

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

新井 泰彦*・横関 俊介**・白木 万博***・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

***関西大学工学部機械システム工学科 〒564 吹田市山手町 3-3-35

Two Dimensional Spatial Fringe Analysis Method Using Sampling Technique on Pixel of CCD

Yasuhiko ARAI,* Shunsuke YOKOZEKI,** Kazuhiro SHIRAKI*** 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

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

This paper describes a two-dimensional spatial fringe analyzing method based on the sampling technique on the pixels of a TV camera. Ordinary spatial fringe analysis has included a problem in the processing, because the analysis should use the information of separated places spatially for calculating the phase of fringes. In this paper, the new two-dimensional fringe analyzing method is proposed in full consideration of this problem. Furthermore, a new phase unwrapping method required for the two-dimensional fringe analyzing method is discussed. The experimental results show that the measurement accuracy of the new spatial fringe analyzing method is as close as that of the FFT method.

1. はじめに

マイクロエレクトロニクスの発達ともなうデジタル計算機の普及が、干渉縞をはじめとする縞の解析において様々なアルゴリズムをもたらし、縞の解析精度を急速に向上させてきた¹⁻⁷⁾。現在、縞解析は temporal な手法のみならず spatial な手法においても測定精度の向上がはかれつつある²⁾。この spatial な手法は、FFT (fast Fourier transform) を用いた手法 (以下、FFT 法)⁵⁾をはじめとして 1 枚の画像で縞解析が行えるので、動的に変化する現象の解析も可能であるなど工学の分野において有効な解析法となりつつある。ところが、spatial な手法には以下に示すような様々な問題が提起されている。たとえば、FFT 法においては長い演算時間が必要である。また、演算時のフィルターの周波数設定が難しい等の問題もある。一方、spatial synchronous detecting method^{2,6)}にもとづく TV カメラの pixel を利用した手法⁷⁾では、空間的に異なった地点の

情報を用いて処理を行わなければならない空間的縞解析の宿命とでもいえる問題点を意識することなく、時間的に異なったデータ間における処理技術としての temporal な手法を、なんら空間的な処理法への適用に対する議論も行うことなく空間的な縞解析に用いているために、空間的に異なった地点間の演算が新たな誤差要因となり、空間的解析特有の誤差が発生するに至っている⁷⁾。

本論文では、空間的に異なった地点の情報を用いて処理が行われていることを十分に考慮した空間的な縞解析のための新たな手法を検討している。

前報⁷⁾では離散値データから連続データを補間法を用いて推定する高速縞解析法を示した。この一次元縞解析では、一次元の補間公式を用いて空間的に順序よく並んだ $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 相のデータから、各測定点ごとに 4 種類、すなわち $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 相の縞画像をモアレ縞技術を応用して一次的に推定し、縞の位相を求め

る処理を行っていた。本研究ではこの次元の手法の考え方を二次元へと拡張することによって、二次元の空間的縞解析を行うための手法を提案している。このように縞解析法は、FFT法においても行われたように次元解析法から次元解析へと拡張される⁹⁾ ことによって実用に供する技術となり、工学の広い分野で用いられるものになると考えられる。

2. 測定システム

本研究では Fig. 1 に示す干渉縞解析システムを構築した。システムはトワイミンググリーン干渉計にもとづく光学系と、二次元 CCD (charge coupled device) カメラ (512×480)、ならびにフレームメモリー、デジタル計算機によって構成された処理系とに大別できる。本システムでは空間的縞解析を行うために、トワイミンググリーン干渉計の参照光側のミラー 2 を微小角傾けることによって発生する直線的な縞を空間的キャリアとして用いている。以下、この縞をキャリア縞と呼ぶことにする。

3. 位相検出原理

3.1 次元モアレ縞強度分布の推定ならびに位相検出⁷⁾

前報⁷⁾ に示したように、TV カメラの pixel 上のデータ操作を用いれば、TV カメラの走査線 (TV カメラの走査線を格子とみなした処理⁹⁾ を行っているのので、本論文ではこの格子に対応する走査線を仮想格子と以下呼ぶことにする) とキャリア縞との間に発生するモアレ縞

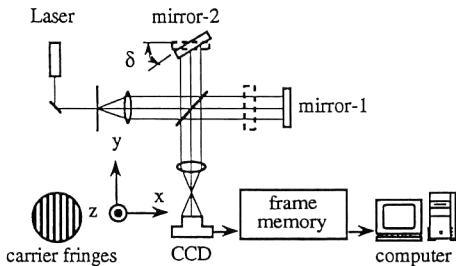


Fig. 1. Schematic of measurement system.

A	B	C	D	E	F	G	H	I
$\frac{\pi}{2}$	π	$\frac{3}{2}\pi$	0	$\frac{\pi}{2}$	π	$\frac{3}{2}\pi$	0	$\frac{\pi}{2}$
$4n-3$	$4n-2$	$4n-1$	$4n$	$4n+1$	$4n+2$	$4n+3$	$4(n+1)$	$4(n+1)+1$

Fig. 2. Information on pixel of line sensor.

の強度分布を推定することができる。たとえば Fig. 2 に示すように、仮想格子の周期が TV カメラの pixel 4 個に対応していると考えれば、変形したキャリア縞の強度分布の $4n$ 番目 (n は整数) の pixel 上のデータをサンプリングすることによって 0 相のモアレ縞画像を抽出することができる。さらに、 $4n+1$ 番目、 $4n+2$ 番目、 $4n+3$ 番目、とそれぞれサンプリングしてゆくと仮想格子があたかもキャリア縞上を $\pi/2$ rad ずつシフトされたかのようになり⁹⁾、離散値データではあるものの $\pi/2$ 、 π 、 $3\pi/2$ 相の各モアレ縞強度分布を得ることができる。このようにして求めた各相に対する離散的なモアレ縞強度分布に対して、強度分布の変化は滑らかであると仮定すると、補間法を用いた処理が可能となる。この処理によって、TV カメラの各 pixel 位置に対応するすべての地点でのモアレ縞強度分布の推定値が求められる。この処理を 0 相のみならず、 $\pi/2$ 、 π 、 $3\pi/2$ 相の各モアレ縞強度分布に対しても行い、各 pixel 位置に対応する地点で式 (1) にしたがった演算を行うと縞の位相を求めることができる。

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

ただし、 I_0 は 0 相、 I_1 は $\pi/2$ 相、 I_2 は π 相、 I_3 は $3\pi/2$ 相のモアレ縞の強度分布をそれぞれ示している。

ここでは、pixel 4 個を仮想格子のピッチに対応させているのでキャリア縞と仮想格子とを重ね合わせた場合に発生するモアレ縞は、 $4n$ 番目の pixel 上のデータを集めると 0 相のモアレ縞成分となり、また、 $4n+1$ 番目が $\pi/2$ 相、 $4n+2$ 番目が π 相、 $4n+3$ 番目が $3\pi/2$ 相にとそれぞれ対応するモアレ縞成分となっている。しかしながら、pixel 5 個を仮想格子のピッチに対応させれば、 $5n$ 番目の pixel 上のデータが 0 相、 $5n+1$ 番目が $2\pi/5$ 相のモアレ縞の強度とそれぞれ取り扱うことができる。したがって、縞解析時に問題となる仮想格子の周期は、必ずしも TV カメラの pixel 4 個に対応させる必要はなく、縞解析時の状況に合わせて設定すればよいと考えられる。ただし、この設定が測定精度にいかに関与するかは現在では明らかではない。

この設定法については補間処理との関連も含めて今後の課題である。

3.2 次元モアレ縞強度分布の推定

前項に示したように、次元の縞解析ではまずはじめに TV カメラの pixel 上のデータをルールにしたがってサンプリングする。この処理によってキャリア縞に仮想格子が重ね合わされた場合に発生するモアレ縞の強度

分布が得られる^{7,8)}。しかしながら、この強度分布は空間的に不連続であるために、さらに一次元の補間公式を用いて縞の位相検出演算に用いるための連続したモアレ縞強度分布を推定していた。このようにして行っていた一次元の縞補間技術を二次元へと拡張すれば、二次元のモアレ縞強度分布も容易に求めることができるものと考えられる。

前報⁷⁾と同様に、便宜上仮想格子の周期が pixel 4 個に対応しているように設定されている場合を考える。この場合、一次元では Fig. 2 に示すようにモアレ縞強度分布の情報は順序よく pixel 上に並んでいると考えられる。したがって、二次元でもキャリア縞と仮想格子との重ね合わせにより得られるモアレ縞強度分布は Fig. 2 と同様に Fig. 3 に示すように分布していると考えられる。

Fig. 3(A) に示すマトリックス化された二次元の pixel 上の各行では、一次元と同様にモアレ縞強度分布は順序よく 0 相, $\pi/2$ 相, π 相, $3\pi/2$ 相として並んでいると考えられる。一方、各列では垂直方向に格子条をもつ仮想直線格子を設定しているため、同じ相の情報が並んでいると考えられる。

ここで、0 相の二次元モアレ縞強度分布の推定作業を考えることにする。Fig. 3(A) に示すすべての画像から 0 相の情報をもつ pixel のみを抽出すると、情報が存在する列と存在しない列 ($\pi/2$, π , $3\pi/2$ 相の情報をもつと考えられる pixel によって構成されている列、図ではハッチングの部分) とがあるものの、0 相に対する離散値画像が得られる。この離散値画像を、一次元において行ったと同様に二次元の補間公式を用いて処理すれば、Fig. 3(B) に示すように 0 相のモアレ縞強度分布を二次元分布として推定することができる。ここで、Fig. 3(B) の “ $\hat{0}$ ” は、上記の離散値画像の 0 相の情報が存在していない地点における 0 相の二次元モアレ縞強度分布

π	$\frac{3}{2}\pi$	0	$\frac{\pi}{2}$	π	$\frac{3}{2}\pi$	0
π	$\frac{3}{2}\pi$	0	$\frac{\pi}{2}$	π	$\frac{3}{2}\pi$	0
π	$\frac{3}{2}\pi$	0	$\frac{\pi}{2}$	π	$\frac{3}{2}\pi$	0

(A) Phase of each pixel of TV camera

$\hat{0}$	$\hat{0}$	0	$\hat{0}$	$\hat{0}$	$\hat{0}$	0
$\hat{0}$	$\hat{0}$	0	$\hat{0}$	$\hat{0}$	$\hat{0}$	0
$\hat{0}$	$\hat{0}$	0	$\hat{0}$	$\hat{0}$	$\hat{0}$	0

(B) Estimated image using 2-D interpolation

Fig. 3. Information on pixel of area sensor.

の補間により得た推定値を意味している。

この作業を $\pi/2$ 相, π 相, $3\pi/2$ 相に対しても行えば、それぞれの相に対応するモアレ縞強度分布を推定することができる。前報⁷⁾では、Lagrange 補間公式¹⁰⁾を用いた処理を行っていた。しかしながら、一般に Lagrange 補間は補間結果において振動現象が観察されることがあり¹¹⁾、より安定した補間を行うために、本研究では新たに 3 次の spline 補間¹¹⁾にもとづく処理を行うことにした。

3.3 縞の位相検出

本研究で示した縞の強度分布の推定を行うと同一地点での各相ごとのデータが得られるので、以後は temporal な手法とまったく同じ考え方で縞解析処理²⁾を行うことができると考えられる。したがって、これ以後の処理では、縞の位相検出は temporal な手法において十分に議論されている位相検出公式を用いることができると考えられる。この結果として、式(1)に示す公式のみならず、Carré の手法、Hariharan の手法等、様々な手法²⁾によって位相を求めることができると考えられる。

4. 位相の Unwrapping

前報¹²⁾に示した電気回路を用いた一次元 unwrapping システムの考え方にしたがって、本研究では二次元の unwrapping アルゴリズムを構築した。説明を容易に行うために、ここではまず一次元における処理原理を示す。

前節までに示したような式(1)によって位相を求めると、位相は \tan^{-1} 関数の主値として $-\pi/2$ から $\pi/2$ までの範囲でしか得られない。そこで、式(1)の分子、分母の符号を考慮することによって、 $-\pi$ から π までの範囲に \tan^{-1} 関数の演算結果を拡張しておく²⁾。しかしながら、この処理によっても位相飛びはなお存在している。

一般に、位相飛びが発生する場合に問題となるのは、位相が 2π rad 変化する部分の取扱いである。そこで、ここでは、式(1)に加えて式(1)の演算結果よりも π rad 位相シフトされた式(2)にもとづく位相も同時に求め、以後の処理において用いることにした。

$$\phi_1 = \tan^{-1} \frac{\sin(\phi + \pi)}{\cos(\phi + \pi)} = \tan^{-1} \frac{-\sin \phi}{-\cos \phi} = \tan^{-1} \frac{I_1 - I_3}{I_2 - I_0} \quad (2)$$

この処理の過程を示したものが Fig. 4 である。ただし、Fig. 4(A) に示す ϕ_1 に対しても \tan^{-1} の演算結果が $-\pi$ から π の範囲になるような処理が行われている。

ここで、 ϕ , ϕ_1 の x に関する変化量¹³⁾を求めると、Fig. 4(B)の実線で示す $d\phi/dx$ と破線で示す $d\phi_1/dx$ と

してそれぞれ得ることができる。この場合、それぞれの変化量には位相飛びによる不連続点が生じている。この不連続点の問題を解消するために次に示す手法が考えられる。

Fig. 4(B)において、A点からB点の間では $d\phi_1/dx$ は不連続点をもつので、Fig. 4(A)において ϕ が $-\pi/2$ から $\pi/2$ の範囲にある $d\phi/dx$ を位相飛びにより発生する不連続点が存在しない位相の変化率 $d\phi_{01}/dx$ として採用する。一方、隣り合うB点からC点では、 $d\phi_1/dx$ を $d\phi_{01}/dx$ として用いるようにすれば不連続点の問題は解消できる。このように、不連続な位相分布 ϕ 、 ϕ_1 が $-\pi/2$ から $\pi/2$ の範囲にあるか否かを指標として位相の変化量をそれぞれ切り換えつつ繋ぎ合わせると、連続した変化量 $d\phi_{01}/dx$ を求めることができる。この位相の変化量を x に関して積分すると位相も復元することができる。

このような一次元の処理を二次元へと本論文では拡張している。

まずはじめに、一次元の処理と同様に二次元の処理においても、3.2項に示した補間を用いる手法によってモアレ縞の強度分布を推定する。その結果を用いると、位相 $\phi(x, z)$ 、 $\phi_1(x, z)$ を各測定点で式(1)、式(2)を用いて求めることができる。その後、 $\phi(x, z)$ 、 $\phi_1(x, z)$ を x, z 方向で隣り合う測定点間で差分をとり、それぞれの偏微分係数に相当する $\partial\phi(x, z)/\partial x$ 、 $\partial\phi(x, z)/\partial z$ 、

$\partial\phi_1(x, z)/\partial x$ 、 $\partial\phi_1(x, z)/\partial z$ を求める処理を行う。次に、 $\phi(x, z)$ 、 $\phi_1(x, z)$ が $-\pi/2$ から $\pi/2$ の範囲に入る領域で切換えを行い、 $\partial\phi(x, z)/\partial x$ 、 $\partial\phi(x, z)/\partial z$ 、 $\partial\phi_1(x, z)/\partial x$ 、 $\partial\phi_1(x, z)/\partial z$ を連続した $\partial\phi_{01}(x, z)/\partial x$ 、 $\partial\phi_{01}(x, z)/\partial z$ へと変換する。この $\partial\phi_{01}(x, z)/\partial x$ 、 $\partial\phi_{01}(x, z)/\partial z$ を x, z 平面内で積分¹⁴⁾することによって二次元の位相面を構成することができる。

5. 結果と検討

Fig. 5に示す干渉縞をもつスライドガラスの位相を前節までの手法によって求めた。

Fig. 6にスライドガラスが挿入された後の変形を受けたキャリアー縞を示す。実験では、キャリアー縞としてTVカメラの走査線に平行なもの、Fig. 6に示す5deg傾き角をもつものの2種類を用意した。平行なものは走査線とキャリアー縞のピッチが完全に一致し、かつ正確に平行に設定することができれば、本手法の処理で行っているような測定物体を挿入した場合の結果から挿入前の結果を減算する必要がなくなる利点がある。しかしながら、光学系のもつ歪などを完全に除去することは非常に困難であると考えられるので、本手法ではあくまでも

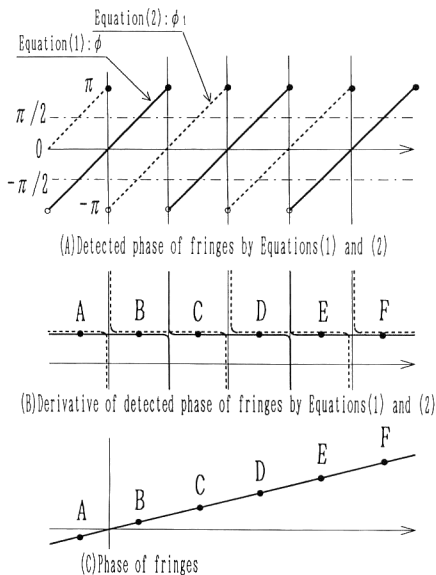


Fig. 4. Signals in a new phase unwrapping method.

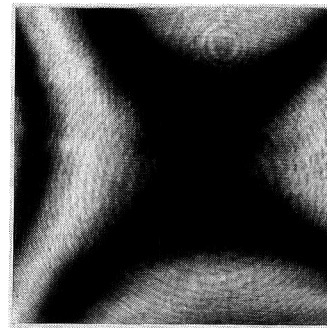


Fig. 5. Interferogram of slide glass.

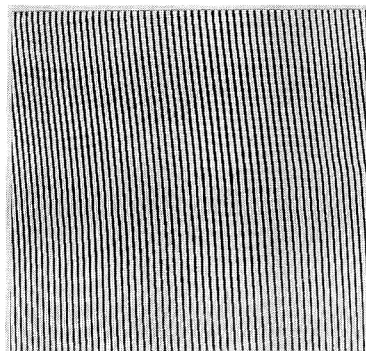


Fig. 6. Deformed carrier fringes.

測定物体挿入前後の結果の差を求めて測定結果とすることにした。このような考え方にもとづき、本実験では、従来の工学におけるモアレ縞応用の基本的な考え方¹⁵⁾にしたがって、TVカメラの走査線に平行なキャリア縞ではなく、傾き角（ここでは5 deg）をもつキャリア縞を用いることにした。一方、仮想格子のピッチはTVカメラの8個のpixelが1周期となるように設定した。したがって、8 pixelが1周期となっているので、実際には0, $\pi/4$, $\pi/2$, $3\pi/4$, π , $5\pi/4$, $3\pi/2$, $7\pi/4$ 相以上、8種類のモアレ縞を抽出することができる。しかしながら、ここでは一般によく行われている演算が容易にかつ高速に行える式(1)にしたがった0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$ 相の4種類のモアレ縞を用いる手法によって縞の位相を検出した。この処理に用いた4種類のモアレ縞強度分布をFig. 7に示す。この場合、キャリア縞と走査線との間に5 degの傾き角が設定されているので、モアレ縞強度分布はFig. 5に示すスライドガラスの干渉縞とは異なったものとなっている。しかしながら、3.2項に示した考え方にしたがえば、Fig. 6の変形縞から二次元処理によって各相のモアレ縞強度分布の推定が可能であることが確認できる。

このモアレ縞強度分布から求めた位相が、Fig. 8(A)に示すものである。この結果では、 \tan^{-1} 関数の主値が求められているので位相飛びが発生している。したがって、4節に示した手法にもとづいて位相を π radシフトさせた位相も同時に求めた。その結果がFig. 8(B)である。さらに、前節に示したように、Fig. 8(A), (B)とを $\pm\pi/2$ radで切り換えながら、 x, z 方向それぞれの変化量を求め、この結果を積分することによって縞の位相

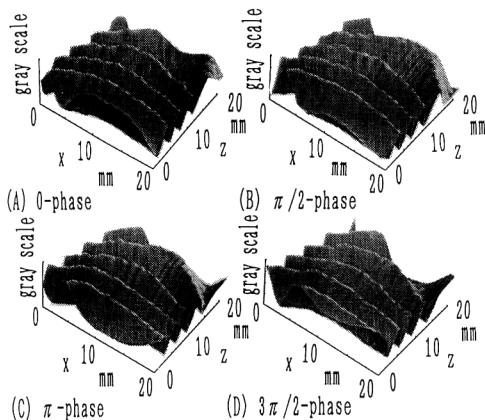


Fig. 7. Four kinds of two-dimensional moiré profiles with different phase shifts.

を求めることができる。前述のように、本研究では測定精度の向上のためにバックグラウンドとしてキャリア縞のみの位相も同様にして求め、スライドガラス挿入後のキャリア縞より求めた位相から減算することによってバックグラウンドの影響を除去した。この処理を施した結果がFig. 9(A)である。鞍状の位相分布をもつことがわかる。また、この結果を等位相線表示したものがFig. 9(B)である。

Fig. 5に示したスライドガラスの干渉縞にFig. 9(B)

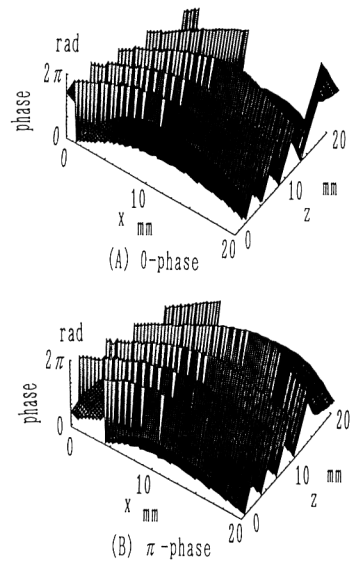


Fig. 8. Two-dimensional phase maps without phase unwrapping processing.

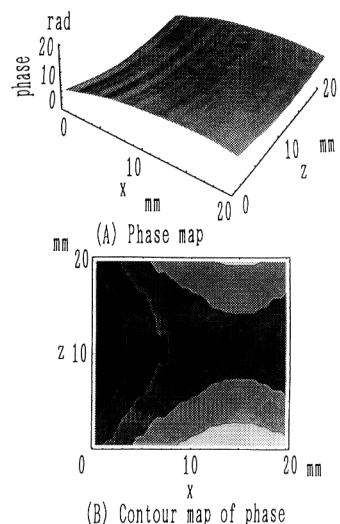


Fig. 9. Measurement result using this method.

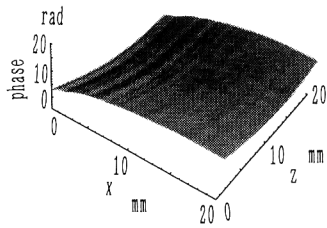


Fig. 10. Measurement result using FFT method.

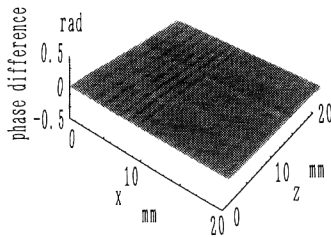


Fig. 11. Phase difference between results using this method and FFT method.

の結果は定性的に一致していることが確認できる。

測定精度の検討を行うために、同じデータを用いたFFT法にもとづく二次元解析を行い比較検討した。FFT法にもとづく結果がFig. 10である。また、Fig. 9とFig. 10との測定結果の各点における差を示したものがFig. 11である。

Fig. 11において、両者の差は、PV値で1/250 wave、差の標準偏差では、1/500 waveであった。また、繰り返し実験を行った場合においても同様の結果が得られた。さらに、前述のキャリア縞を走査線に平行にした場合にも同様の結果が得られた。したがって、キャリア縞を走査線に対して5 deg傾けた場合が最適であるかについての議論はここでは行うことはできない。今後、測定対象、システムの構成（たとえば、仮想格子のピッチの設定法等）を含めて詳細に議論する必要があると考えている。しかしながら、以上の結果より、本研究で示した二次元空間的縞解析法の測定精度は、測定精度が高いと考えられているFFT法にもとづく処理法と同程度であると考えられるとともに、演算時間はFFT法に比べて約1/5であることがわかった。

6. ま と め

本研究において以下に示す事項を提案し、また、実験を通して明らかにした。

1) TVカメラのpixel上のデータサンプリング技術を用いた空間的縞解析法を二次元へと拡張した。

2) 従来問題となっていた位相飛びの問題を、位相が π rad異なった2種類の縞位相を検出し、さらに、両者を切り換えつつ合成することによって、不連続部が存在しない環境を作りだし、その環境内で合成された情報を用いた位相のunwrapping法を開発することによって解決した。

3) FFTにもとづく手法と同程度の精度をもつ測定が、二次元測定においてもTVカメラのpixel上のデータサンプリングによる空間的縞解析法によって高速に行えることを示した。

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 Edition* (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) 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.
- 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, 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.
- 8) W. W. Macy, Jr.: “Two-dimensional fringe-pattern analysis,” *Appl. Opt.*, **22** (1983) 3898-3901.
- 9) 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.
- 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) 市田浩三, 吉本富士市: *スプライン関数とその応用* (教育出版, 東京, 1979) pp. 29-79.
- 12) 新井泰彦, 横関俊介, 山田朝治: “CCD駆動パルスを用いた高速縞解析におけるPhase unwrappingハイブリッドシステム”, *光学*, **24** (1995) 440-444.
- 13) D. C. Ghiglia, G. A. Mastin and L. A. Romero: “Cellular-automata method for phase unwrapping,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **4** (1987) 267-280.
- 14) 古村文伸, 加藤 誠: “SEMによる立体形状測定”, 講習会「ナノメートル時代を支える高速・非接触計測技術」テキスト (精密工学会, 1989) pp. 40-47.
- 15) 植村恒義: *画像計測入門* (昭晃堂, 東京, 1980) pp. 72-92.