



FM 復調技術を用いたアナログ処理による 干渉縞の位相検出

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

(1993年7月19日受付, 1993年10月14日受理)

High Speed Fringe Analysis Method Using Frequency Demodulation Technology

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 July 19, 1993; Accepted October 14, 1993)

In this paper, a new fringe pattern analysis in the time domain by employing an electric circuit based on the communication theory is proposed. The data for fringe analysis in the new method are processed as the analog data. Therefore, the high speed processing can be readily performed. The experimental results show that the new fringe analysis is a very high speed processing method and no less accurate than the FFT 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用いられている¹⁾。1970年代初頭に Bruning によって報告された縞走査法²⁾、80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³⁾、また、TV カメラの画素を利用した空間的解析法⁴⁾ など現在さまざまなサブフリンジ法が提案され利用されている^{1,5)}。ところがこのようなデジタル計算機処理に依存する手法は、多大の演算時間を必要としている。研究室レベルで干渉縞の解析を行う程度であれば、多少の計算時間は問題とならないが、産業界で実用に供する処理としては、できる限り短時間の処理が好ましいことは言うまでもない。デジタル計算機による処理では、FFT 解析に代表されるような複雑な処理が容易に行えるために、現在では、縞解析時に、より精

度の高い結果を得るための複雑なアルゴリズムの開発ばかりが先行し、実用を前提とした高速演算法の開発がおろそかにされていると言っても過言ではない。

このような状況に対して、本研究では、高速処理を念頭においた実用に供する縞解析法の開発を行っている。

従来の縞解析、特にデジタル処理では、センサー上の(一般には、CCD 素子が用いられている)空間的に広がったデータを計算機のメモリ上に空間的に写像し、空間的情報として縞解析を行ってきている。しかし、空間的情報を取り扱うには、並列処理を行わない限り画像の高速演算は不可能である。特に、CCD 素子等センサーの高解像化にともない、データ量が増えるばかりの現在では、空間的情報として縞を取り扱う限り、高速演算は望めないのが現実である。

この問題点に対して、本研究では、CCD 素子から計算機にデータが転送される際に、CCD 素子上の空間的データが、CCD 素子のクロックパルスによって時間的

情報へと変換されることに着目し、空間的情報ではなく、シリアルな時間的情報として縞情報をとらえる手法を提案している。このように時間的情報として縞画像をとらえると、通信理論にもとづく FM 復調回路⁶⁾によるアナログ処理が容易に行え、縞画像の高速処理が可能となる。

本研究では、上記の FM 復調にもとづく縞画像処理原理を示し、また、原理確認実験では、トワイミンググリーン干渉計によってスライドガラス内部の位相情報を縞画像として検出し、その縞画像から試作の電気回路ならびに数値積分を用いることによって位相を検出している。

このようにして得た結果は、従来よく用いられている FFT 法による縞解析法の結果に非常によく一致することがわかった。

本研究であらたに提案した縞の高速解析法は、高精度な干渉縞計測技術の工学における新しい利用分野を開く実用性に富んだ縞解析法であるといえる。

2. 原 理

一般に、Fig. 1 に示すような干渉計からのデータは CCD 素子を経て計算機へと入力され処理される。ここで、mirror-2 が傾けられると、Fig. 2 に示すような空間的に高い周波数成分を持つ干渉縞が発生する⁷⁾。この

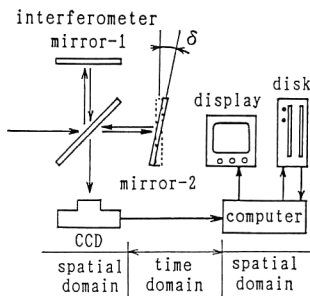


Fig. 1 Experimental system.



Fig. 2 Carrier fringes.

あらたに発生した縞をキャリア信号とすることによって、FFT 法、SPS (spatial phase stepping) 法などの縞解析が現在なされている⁸⁾。本研究では、この現象を Fig. 3 に示すような通信技術としての FM 変調の原理⁹⁾を用いて説明し、従来の SPS 法、FFT 法のように空間的なデータを計算機内部で、空間的に取り扱うのではなく、時間的なデータとして取り扱う縞解析法を提案している。すなわち、Fig. 1 に示すように、CCD カメラから、計算機へデータが転送される際には、空間的に広がる CCD 素子上のデータは、クロックパルスによってシリアルに並び代えられた時間的なデータとなる。このような時間的なデータから FM 復調技術によってキャリア周波数の変化量を検出することができる。さらに、この周波数変化量から縞の位相を以下に示す原理に従って求めることができる。

CCD 素子上で縞画像は空間的なデータとなる。ここでは、説明を煩雑にしないために、1次元のデータを用いて説明する。

画像データは、CCD 素子上では、(1)式として表すことができる。

$$I_s(x) = A_s(x) + B_s(x) \cos \left(\int (\omega_{sc} + \Delta\omega_s(x)) dx \right) \quad (1)$$

ただし、 x は CCD 素子上の座標であり、 $A_s(x)$ 、 $B_s(x)$ は、それぞれ縞のバイアスならびに振幅を表している。 ω_{sc} は mirror-2 を傾けることによって生じたキャリア縞の空間周波数であり、 $\Delta\omega_s(x)$ は、位相物体等が挿入されたときの周波数の変化量を示している。(1)式の関係を Fig. 3 に示す。Fig. 3 (a)は、(1)式の ω_{sc} のみによって表される FM 変調におけるキャリア信号を示し、Fig. 3 (b)はキャリア信号が変調を受けたときの波形を示すものである。

一方、CCD 素子からの画像出力は、クロック周波数によって時間の関数に変換され、(1)式は(2)式に示すように全ての変数が時間 t の関数に置き換えられる。

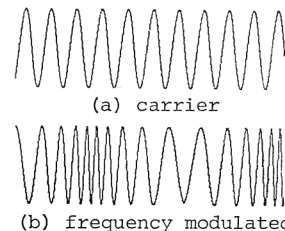


Fig. 3 Frequency modulated wave.

$$I_T(t) = A_T(t) + B_T(t) \cos \left(\int (\omega_{Te} + \Delta\omega_T(t)) dt \right) \quad (2)$$

Fig. 4 のシステムにおいて、(2)式に示す信号は、バンドパスフィルタによって、DC 成分としての $A_T(t)$ ならびに高周波および低周波領域の雑音成分が除去される。また、コンパレータによる処理によって、縞のプロフィルは、矩形波へと波形整形され、 $B_T(t)$ の変化による影響は除去される。このように処理された波形を F/V 変換器を用いて FM 復調すると、位相物体によって変調を受けた周波数の変化量 $\Delta\omega_T(t)$ とキャリア周波数 ω_{Te} の和による瞬時周波数 ω_i に対応する電圧 W_i を求めることができる。

$$\omega_i = \omega_{Te} + \Delta\omega_T(t) : \omega_i \rightarrow W_i \quad (3)$$

(3)式に示された瞬時周波数 ω_i に対応する電圧 W_i を、A/D 変換器を用いてデジタル量に変換し、同時に、計算機のメモリ上に再び空間的データとして並べる。このデータに対して、back ground の瞬時周波数 ω_{i0} に対応する電圧 W_{i0} をあらかじめ求めておき、 W_i から W_{i0} を差し引くことにより、純粋に位相物体のみによるキャリア周波数の変化量 $\Delta\omega(x_m)$ を求めることができる。ここで、 x_m はメモリ上の座標を表している。この $\Delta\omega(x_m)$ を x_m で積分することによって、縞の位相 $\phi(x_m)$ を求めることができる⁶⁾。この減算の処理により、干渉計のミラー等における光学系の歪の影響は除去されるものと考えられる。

本研究では、アナログ回路により求めた $\Delta\omega(x_m)$ を計算機のメモリ上に配列し、台形公式にもとづく数値積分によって位相 $\phi(x_m)$ を求める原理確認実験を行っている。また、測定精度の確認を行うために、FFT 法による結果との比較検討を行っている。

3. 結果と検討

Fig. 5 に示すような干渉縞をもつスライドグラスを被測定物体として、干渉計に挿入したときの A-A' 断

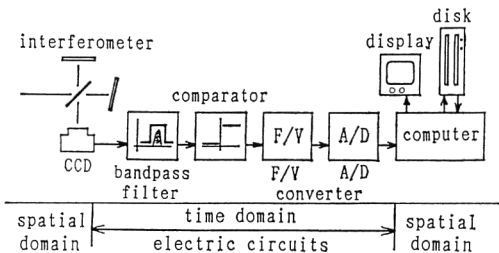


Fig. 4 Frequency demodulating system.

面についての結果を Fig. 6 に示す。CCD 出力は、スライドグラスが挿入される前の back ground の場合も、挿入後も、離散値データとなっている。試作したシステムでは、CCD 素子として、1次元ラインセンサー (1024 pixels, クロック周波数: 100 kHz) を用いている。この出力をバンドパスフィルタによって、キャリア周波数 (25 kHz になるようにミラーの傾き角 δ を設定しておく) 周辺 5 kHz のみを抽出し、コンパレータを用いることによって、矩形波に整形し、F/V 変換器 (Analog Devices 社製モデル 453) によって周波数を電圧に変換し、A/D 変換器 ((株)テー・エス・ケー製 T 98-0212 ADM) によって計算機へ瞬時周波数データを入力している。Slide glass を挿入した場合の結果とあらかじめ入力されている back ground との間で引き算を行い、スライドグラスの挿入にともなって発生した周波数の変化量のみを求め、この変化量を数値積分し、位相 $\phi(x_m)$ を求めている。その結果を示したものが、Fig. 7 である。

Fig. 7 (a) が本手法による結果である。この結果を比較検討するために求めた FFT 法による処理結果を Fig. 7 (b) に示す。両者は非常によく一致していることがわかる。

現時点では、F/V 変換器のゲイン (0.12 V/kHz) と A/D 変換器のサンプリングタイム (1 μ s) と変換係数 (± 5 V/12 bits) から本手法の位相の絶対量を換算して求

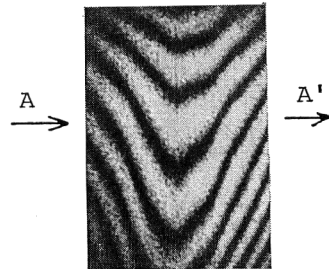


Fig. 5 Interferogram of slide glass.

	Back ground	Slide glass
CCD output		
Bandpass filter output		
Comparator output		
F/V output		

Fig. 6 Outputs of electric circuits.

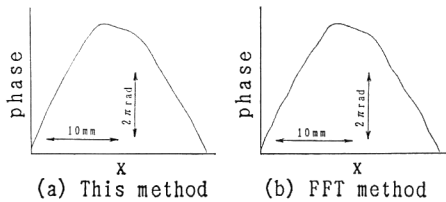


Fig. 7 Experimental results.

めている。この較正法によって求めた位相 (単位は rad) と FFT 法における位相は Fig. 7 に示すように単に定性的な一致だけでなく、定量的にもよく対応し、FFT 法とほぼ同程度の精度が得られているものと考えられる。しかし、精度については、今後より詳しい検討が必要であると考えられる。

本手法は、従来の FFT 法等のデジタル演算による手法に比べて、比較にならないほどの高速処理が可能であり、実用に十分供する干渉縞の解析技術であると考えられる。現在、本手法の 2 次元への拡張ならびに積分器を用いることにより、すべての演算をアナログ化したりリアルタイム処理に準じる処理システムの開発を行っている。

4. ま と め

本研究において、以下のことを行った。

- (1) 代表的な通信技術である FM の復調技術を用いることにより、高速処理が行える干渉縞解析法を提案した。
- (2) 電気回路により、処理装置を構成し、スライドガラスを被測定対象とした実験を行った結果、デジタル計算機によって従来行われている代表的な解

析法 (FFT 法) による結果とほぼ同じ結果を得ることができた。

以上の結果は、本手法が、従来、多大の演算時間を必要としていたデジタル処理に代わる、実用に供する縞解析法であることを示し、干渉縞計測の工学分野への普及に貢献する測定手法であることを示している。

研究を遂行するにあたって、熱心に議論していただいた、New York 州立大学 Stony Brook 校の Fu-Pen Chiang 教授ならびに、Warsaw 工科大学の Kujawinska 助教授に深く感謝いたします。

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) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) D. Malacara: *Optical Shop Testing*, 2nd ed. (John Wiley & Sons, New York, 1992) pp. 501-598.
- 6) K. K. Clarke and D. T. Hess: *Communication Circuits: Analysis and Design* (Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1971) pp. 509-628.
- 7) 新井泰彦, 倉田忠雄, 横関俊介: “モアレ縞干渉法の自動縞解析”, 光学, **20** (1991) 86-91.
- 8) M. Kujawinska: *Automatic Fringe Pattern Analysis in Optical Methods of Testing* (Warsaw University of Technology Publications, Warsaw, Poland, 1990) pp. 4-66.