

# 技術報告

## 周波数復調技術を用いた高速高精度 干渉縞解析システムの開発

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

(1994年3月3日受付, 1994年6月27日受理)

### High-Speed and High-Accurate Fringe Analyzer Using Frequency-Demodulation Technique

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

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

\*\* Department of Mechanical System Engineering, Faculty of Computer Science  
and System Engineering, Kyushu Institute of Technology,  
680-4, Kawazu, Iizuka 820

(Received March 3, 1994; Accepted June 27, 1994)

A new fringe analysis based on the frequency-demodulation technique has been proposed. An electronics with high speed is newly developed. The system can continuously detect one dimensional phase on an interferogram every 10 ms by using a CCD-line sensor, an analog-data processing circuit and a digital computer. The experimental results show the measuring accuracy as close as that of the fringe-analysis system made by WYKO corp..

### 1. はじめに

デジタル計算機処理にもとづく干渉縞を始めとする縞の解析法として、現在までにさまざまな手法<sup>1-5)</sup>が提案されている。ところが、一般に、これらの手法は長い演算時間を必要とする問題がある。特に、縞解析時に、より精度の高い結果を得ようとするため、複雑なアルゴリズムを必要とするなど、演算時間は長大化の一途をたどっている。研究室で干渉縞の解析を行う程度であれば、多大の演算時間は問題とはならない。しかしながら、産業界で実用に供する処理を考える場合には、長い演算時間は解決されておかなければならない重大な問題である。

この問題に対して、電気回路を用いた位相復調技術による縞解析法が提案されている<sup>6)</sup>。しかしながら、現在この技術が十分に利用されているとは考えられない。こ

の現状に対して、電気回路による処理の有効性を再認識する意味を含めて、前報<sup>7)</sup>では、周波数復調技術<sup>8)</sup>を用いた高速処理が可能な縞解析法の基礎的原理を提案し、原理確認実験を通して、その有効性を示した。この手法は、空間的にキャリア縞を発生させ、そのキャリア縞が測定物体によって変調を受ける現象に対して、その変調を解析することにより、被測定物体の形状、屈折率分布などを解析しようとする空間的な縞解析の技法<sup>9)</sup>にもとづくものであった。従来、このような解析技法においては、キャリア縞が位相変調を受けているものと仮定したもとの解析が行われていた。このような従来の考え方に対して、本手法では、キャリア縞が周波数変調を受けているものであると仮定し、この仮定にもとづく処理を通信技術として一般によく利用されている周波数復調技術を用い、電気回路で処理することによって、縞解析の高速化をはかった。

本報では、前報に示した上記の原理にもとづき、アナログ回路によってシステムを構築し、本手法の最大の特徴である処理の高速化を実現することのできる技術、また、試作システムの特性について報告する。

本報で試作したシステムは、5000 pixel を持つラインセンサーを用いて、10ms ごとに1ライン上の縞の位相を繰り返し検出し続けることのできる高速縞解析システムである。WYKO 社製干渉縞解析システムとの測定精度の比較において、本システムによる測定結果と、WYKO 社製干渉縞解析システムによる測定結果との差の標準偏差が 1/51 wave であることがわかった。また、アナログ回路において問題となるドリフトについても検討を加えた。

本システムは、処理速度ならびに WYKO 社製干渉縞解析システムとの比較測定実験による結果より、測定精度に関しても、産業界で十分実用に供する干渉縞の縞解析システムであると考えられ、本システムで開発した技術はより広い分野で、干渉縞計測の利用を促すものであると考えられる。

## 2. 測定システム

前報<sup>7)</sup>に示した原理に従い、Fig. 1 に示す干渉縞解析システムを構成した。本システムでは、縞の検出を5000 pixel、クロックパルス 500kHz の CCD ラインセンサー (松下電子部品(株)MN 3664) を用いて行っている。その出力を Fig. 2 に示す。Fig. 2 は画像出力例であり、これは、Fig. 1 のトワイマングリーン干渉計の参照光側のミラー2を微小角 ( $\delta$ ) 傾けることによって発生するキャリア縞プロフィルの断面を示すものである。また、この縞は前報に示すように CCD 素子上では(1)式として表すことができる<sup>7)</sup>。

$$I(x) = A(x) + B(x) \cos \left( \int (\omega_c + \Delta\omega(x)) dx \right) \quad (1)$$

ただし、 $x$  は CCD 素子上の座標であり、 $A(x)$ 、 $B(x)$

は、それぞれ干渉縞の強度分布のバイアスならびに振幅を表している。 $\omega_c$  は、キャリア縞の空間周波数であり、 $\Delta\omega(x)$  は、位相物体などが干渉計の測定領域内に挿入されたときの周波数の変化量を示している。

ここでは、キャリア縞を CCD ラインセンサー上に 200 本発生させているので、CCD ラインセンサーの出力としてのキャリア縞の周波数は、20 kHz である。この 20 kHz は、対象とする干渉縞では約 11 本/mm のキャリア縞に相当するものである。本報では、対象とする干渉縞をレンズ系を用いて CCD 素子上に結像し、さらに、CCD 素子の配列と CCD 駆動クロックパルスとの関係を用いて、時間領域における処理信号へと変換している。したがって、本システムには、多数の変換係数が存在している。これらの変換係数と測定精度との関係を今後検討し、最適なシステム設計を行う必要がある。

Fig. 2 に示す CCD 出力は、測定領域の中央部分で緩やかに振幅が大きくなっていることがわかる。これは、レーザーの強度分布であると考えられる。このようなレーザーの強度分布を始めとして、商業電源からのノイズ、スペックル、電気回路におけるノイズ、さらに、干渉縞そのものが純粋な正弦波ではない。また、光学系の持つ歪などのように、さまざまな位相検出処理に対しての誤差要因が CCD 出力中には含まれていると考えられる。ここでは、これらのノイズ源の影響を軽減するために、バンドパスフィルタを用いて処理に必要なキャリア縞の周波数近傍のみの成分を抽出し、その後、位相検出処理を行っている。本システムで利用するバンドパスフィルタは、バターワースフィルタにもとづくもので、フ

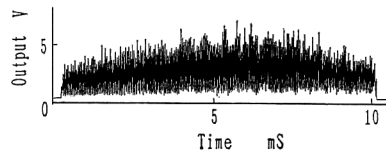


Fig. 2 CCD output of carrier fringe.

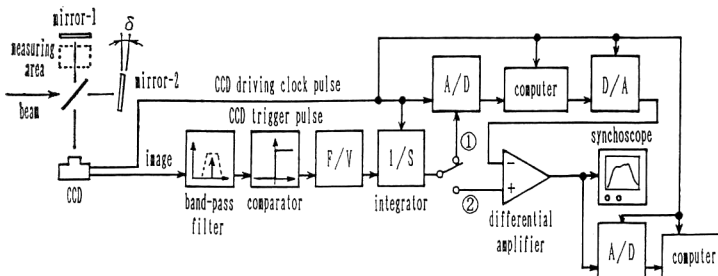


Fig. 1 Schema of measuring system.

フィルタリングによる画像の位相遅れの影響が発生しないように群遅延特性を考慮して設計したものを利用している<sup>13)</sup>.

一方, Fig. 1 に示すシステムの干渉計の測定領域に, 被測定物体としてのスライドガラスを挿入した時の CCD 出力を Fig. 3 (A) に示す. また, この信号の周波数分析結果を Fig. 4 (B) に示す. 被測定物体の挿入によってキャリア信号が変調を受け, 周波数軸上で Fig. 4 (A) に示す被測定物体が挿入されていないときのキャリア信号の周波数分析結果に比べて, 信号成分が広がりを持つ様子を観察することができる.

次に, バンドパスフィルタによってこの変調を受けたキャリア信号が処理された結果を Fig. 3 (B) に示す. フィルタリングによって不必要な周波数成分は除去できるものの, 振幅成分の変化すなわち振幅変調成分を取り除くことはできていない. そこで, 次に振幅変調成分の影響を除去するために, 周波数復調技術で行われていると同様の波形整形処理をコンパレータを用いて行っている. その結果を Fig. 3 (C) に示す. その後, F/V 変換器によって周波数の変化を電圧の変化へと変換している. その結果を Fig. 3 (D) に示す. 本システムでは, アイコーデンキ社製 (FV-465) の F/V 変換器を用いて, この処理を行っている. 前報では, この出力を A/

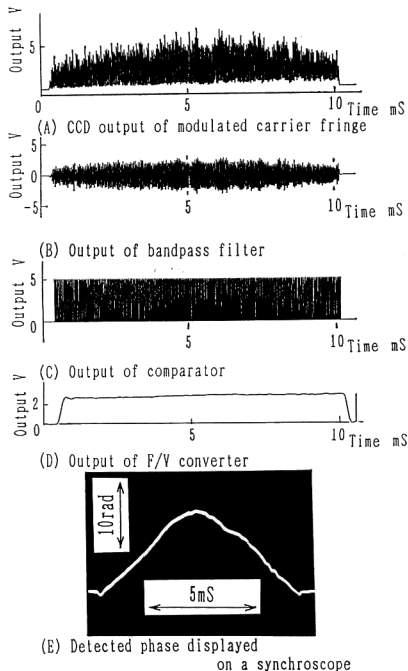


Fig. 3 Output signals of information processing system.

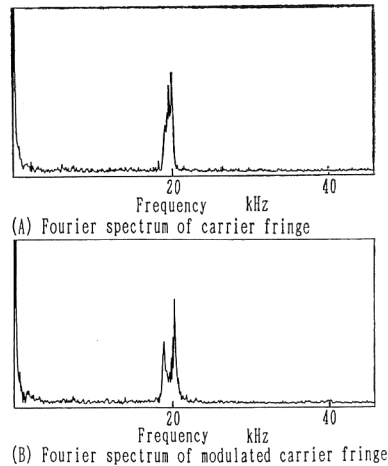


Fig. 4 Fourier spectra of carrier fringe (A) and modulated carrier fringe (B), respectively.

D 変換器を用いて計算機へと入力し, 計算機内部で数値積分することによって, 縞の位相を求めていた. ところが, 本手法の基本原則では, 単にこの電気信号を積分するだけでは縞の位相を求めることはできない. なぜならば, 前報の(3)式に示すように, この信号にはキャリア周波数成分と測定物体によって発生した周波数変調成分とが重なり合っているからである.

この問題を解決するために, 前報では, 干渉計の測定領域に何も挿入していないときのキャリア縞の F/V 変換器出力成分をあらかじめ測定しておき, この結果と測定領域に測定物体を挿入したときに変形を受けたキャリア縞の F/V 変換器出力との差をとることによって, 測定物体によって発生した縞の変調成分の分離を行っていた. しかもこの処理は, 光学系を持つ歪による影響の除去が可能で, 測定精度の向上をはかることができた. したがって, 前報では, これらの処理を行うためにどうしても計算機内部で演算を行わなければならない理由があった. 本手法は, 原理的に限りなく実時間に近い干渉縞解析が行えるというものの, 現実には, これらの処理のために, 数秒の演算ならびに処理時間が必要となっていた. すなわち, 前報の手法では, 本手法の高速処理が行える特徴を実現できない問題があった. しかし, この処理は測定精度を考える上で, 非常に大切な処理であった.

本報では, 前報において問題となっていた上記の計算機内部で行っていた処理を, CCD のトリガー信号とクロックパルス信号に同期した電気回路による積分器 (積分時定数: 0.9 ms) を用いて, 次に示す処理によって行っ

た. すなわち, Fig. 1 に示すように, 干渉計の測定領域に被測定物体がない場合には, スイッチを①に接続しておく, この場合の積分器出力は, A/D 変換器を通して計算機のメモリ上に, 測定システムのバックグラウンドの位相情報として蓄えられることになる. ここでは, トリガー信号に同期した CCD クロックパルスを A/D 変換器のサンプリング周波数として利用している. 一方, 被測定物体が測定領域に挿入された時には, スイッチを②に切り換える. 結果として, この場合の積分器出力は, 差動増幅器へと入力されることになる. この時, あらかじめ計算機のメモリ上に蓄えられている被測定物体が測定領域内に挿入されていないときの積分器出力信号を, CCD クロックパルスをサンプリング周波数とし, CCD のトリガー信号に同期した D/A 変換器を用いて, 計算機より差動増幅器へ入力するようにしておく, この D/A 変換器出力とスイッチを②に切り換えた場合の積分器出力がともに, CCD トリガー信号とクロックパルスに同期しているので, 両データ間で, 時間に対応した測定点の同一化をはかることができる.

このシステムを用いて, 測定領域に測定物体が挿入されたときの積分器出力 (測定物体とバックグラウンドの位相が重なりあった結果) から, あらかじめ計算機のメモリ上に保存されている測定システムのバックグラウンドの位相成分を減算する演算を差動増幅器によって行うと, バックグラウンドの影響を実時間で除去することが可能となる. この新しいシステムにより, 前報では計算機内部で行われていたすべての処理を電気回路に置き換えることができた.

本干渉縞解析システムでは, CCD トリガー信号が 10 ms であることより, 1 ライン 10 ms ごとに縞の位相を繰り返し検出することが可能となった. この出力は, オシロスコープ上で直接観察することができるとともに (例えば, Fig. 3 (E)), 再び A/D 変換器を用いて計算機内部へと取り込み, さらに新たな処理を行うことも可能となっている. このシステムを構成することによって, はじめて, 前報に示した周波数復調技術を用いた高速な縞解析技術を提案したことの意義が生まれてくるものと考えられる.

### 3. 測定結果の検討

上記のシステムによって, 本手法の最大の特徴である処理の高速化は実現する. その測定精度を次に検討する.

まず始めに, 他の手法による結果との違いを検討す

る.

同一測定物体 (Fig. 5 に示す干渉縞をもつスライドガラスの A-A' 断面) を WYKO 社製縞解析システム (WYKO 400 DE) によって測定した結果ならびに, FFT 法<sup>3)</sup> によって解析した結果をそれぞれ Fig. 6 (B) と Fig. 6 (C) に示す. Fig. 6 (A) に示した本手法による結果は, 定性的には上記の異なった手法と同程度の測定がなされていることがわかる. 定量的に本手法の測定精度を検討するために, WYKO 社製システムによる結果と本手法による結果との差を Fig. 7 (A) に, FFT 法による結果と本手法による結果との差を Fig. 7 (B) にそれぞれ示す. WYKO 社製システムによる結果との測定値の差は, 標準偏差で 0.122 rad (1/51 wave), FFT 法との差は, 標準偏差で 0.174 rad (1/37 wave) であった.

測定結果に数十分の 1 wave 程度の違いが見られるのは, 本手法との測定手法 (位相シフト法, FFT 法) の

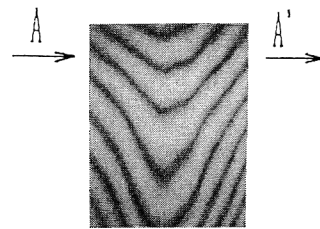


Fig. 5 Interferogram of slide glass.

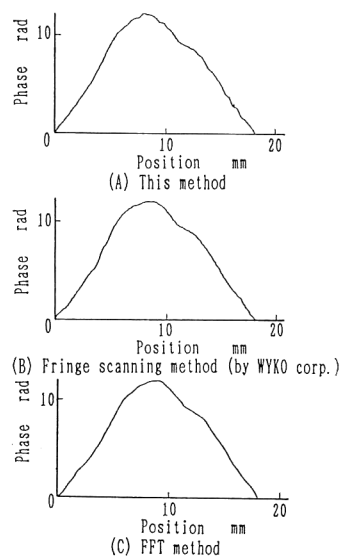
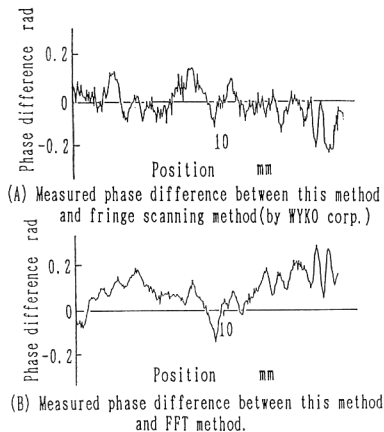


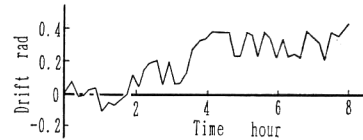
Fig. 6 Detected phase of fringes measured by this method (A), by fringe scanning method (B) and by FFT method (C), respectively.



**Fig. 7** The measured phase difference (A) between this method and the fringe scanning method, and that (B) between this method and FFT method, respectively.

違いならびに次に示すような誤差要因が存在するためであると考えられる。すなわち、よく議論されている A/D, D/A 変換時の量子化誤差をはじめとして、バンドパスフィルタの位相遅れによる誤差, CCD 素子の配列誤差, CCD の個々の素子の特性の違い, 素子の非線形性, 電気回路 (F/V 変換器, 積分器, 差動増幅器等) の持つ非線形性, また, それらの応答特性等が考えられる。本システムを用いてより高精度な測定を行うためには, 干渉縞計測共通のさまざまな誤差要因<sup>5)</sup>の影響に加えてアナログ回路における問題点を調べていかなければならないと考える。しかしながら, Fig. 7 の結果から, 本手法では高速処理が可能であるだけでなく, WYKO 社製縞解析システムにもとづく測定結果, ならびに FFT 法による結果と約 1/40 wave 以内での測定精度の範囲内で処理が行えることがわかった。

次に, アナログ処理であるがゆえのドリフトの問題を検討した。Fig. 8 に, 室温  $24 \pm 0.5^\circ\text{C}$  の環境で, 本システムによって, 繰り返し連続測定を 10 分ごとに 8 時間にわたって行った結果を示す。Fig. 8 に示す結果は, 各測定時間ごとに, 各測定点で初期測定結果との変化量を求め, 全測定領域で, この変化量を各測定時間ごとに平均した値を示している。連続測定を開始して, 約 4 時間経過するまでは, ドリフトが約 0.1 rad/h (1/60 wave/h) で存在するものの, 4 時間経過後は, 振幅 0.18 rad 程度で周期的に変化していることが認められる。数回の測定においてもほぼ同じ傾向がみられた。本システムにおける試作電気回路は, 十分な温度補償が施されていない, そのためこのようなドリフトが発生している



**Fig. 8** Drift of the measured phase in this interferometer.

ものと考えられる。

本報では, 第 2 章に示した設計条件にもとづく試作システムについてのみ検討したに過ぎない。今後, 回路設計時に, 温度補償, 応答特性等, システムのハードウェアとしての問題解決のために, 周波数復調技術として進んだ電気回路設計技術を導入しなければならないと考える。また, この場合, 周波数復調回路の特性を考慮したシステム設計を行うにあたって, 解析可能な空間周波数の決定に関与する, CCD の素子数とクロックパルスとに関係する, 空間領域から時間領域への最適変換係数の設定法また, バンドパスフィルタのバンド幅等の測定感度, 測定精度への影響を検討していく必要があると考える。このように, 本手法の実用化には, さらなる検討が必要であると考えられる。

#### 4. おわりに

本報では, 前報に示した周波数復調技術を用いた干渉縞解析法の高速度処理のためのシステムを提案し, ラインセンサーによる一次元測定システムを試作した。この縞解析システムでは, 10 ms ごとに測定を繰り返し行い, その測定精度が WYKO 社製縞解析システムと, FFT 法の二つの手法と約 1/40 wave 以内であることを明らかにした。しかしながら, アナログ回路としての安定性の問題がまだ存在することも同時にわかった。今後, これらの点について検討する必要がある。

最後に, 本システムの測定精度検討にあたり, WYKO 社製縞解析システムを用いて試料の測定をしていただきました松下インターテクノ株式会社の田中昭彦氏, 本間隆氏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) Y. Ichioka and M. Inuiya: "Direct phase detecting system," Appl. Opt., **11** (1972) 1507-1514.
  - 7) 新井泰彦, 横関俊介, 山田朝治: "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", 光学, **23** (1994) 38-41.
  - 8) K.K. Clarke and D. T. Hess: *Communication Circuits: Analysis and Design* (Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1971) pp. 509-628.
  - 9) M. Kujawinska: *Automatic Fringe Pattern Analysis in Optical Methods of Testing* (Warsaw University of Technology Publications, Warsaw, Poland, 1990) pp. 4-66.
  - 10) A.B. Williams and F.J. Taylor: *Electronic Filter Design Handbook*, 2nd ed. (McGraw-Hill, N. Y., 1988) pp. 7-1-7-44.