

研究速報

CCD 駆動パルスをタイムベースとした高速縞解析法

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2月28日受付, 1994年5月2日受理)

High Speed Fringe Analysis Method Using CCD Driving Clock Pulse

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 February 28, 1994; Accepted May 2, 1994)

This paper describes a new high speed fringe analysis method using a relative phase difference between a CCD driving pulse and an image signal as an output of the CCD. A system based on this fringe analysis method is constructed as a simple analog circuit. Experimental results show that the system can perform a high speed fringe analysis and that the measuring accuracy of the system is as close as the FFT method.

1. はじめに

干渉縞などの縞解析は、物体の形状、屈折率分布の測定など工学の分野において重要な意味を持つ技術となってきた¹⁾。現在では、1970年代初頭に Bruning によって報告された縞走査²⁾をはじめとする様々なサブフレンジ法が利用されている³⁻⁶⁾。ところが従来のほとんどの解析法はディジタル計算機に処理を依存しているため、多大の演算時間を必要とする問題が生じている。このような状況に対して、著者らは複雑なアルゴリズムを用いない高速処理を念頭において実用に供する縞解析法の開発を目指してきた。前報では⁷⁾、縞解析を時間領域でアナログ処理によって行う周波数復調技術を用いた高速縞解析法を提案した。

本研究では、より簡易な処理による縞解析法を提案する。この手法では、干渉計の参照光側のミラーを傾かせることによって得られる空間的に高い周波数成分を持つ干渉縞をキャリア信号として用いる技術と、CCD ク

ロックパルスと画像信号とが同期する性質が利用されている。

ここでは、基本論理に基づく位相検出原理の正当性を確認するための原理確認実験を通して本手法の問題点を検討する。

2. 原 理

Fig. 1(A) に示すように干渉計の参照ミラー 2 を微小角 δ 傾けると、キャリア縞 (**Fig. 1(B)**) が発生する。この場合、ミラーの傾きを調整することによって、キャリア縞の周波数を CCD クロックパルスの周波数の整数分の 1 (サンプリングの定理から考えて少なくとも 1/2 以下) になるように設定することができる。例えば、**Fig. 2(A)** のようにキャリア縞の周波数を **Fig. 2(B)** に示す CCD 駆動パルスの 1/4 になるように設定することも可能である。このように設定された **Fig. 2(A)** に示すキャリア縞は、干渉計の測定領域に位相物体を挿入すると、**Fig. 2(D)** に示すように位相変調を受ける。こ

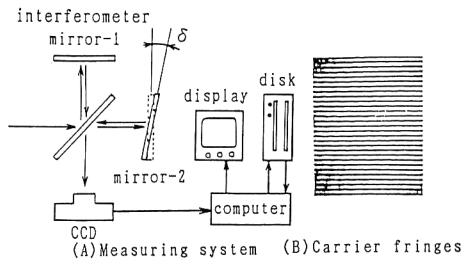


Fig. 1 Schematic of principle.

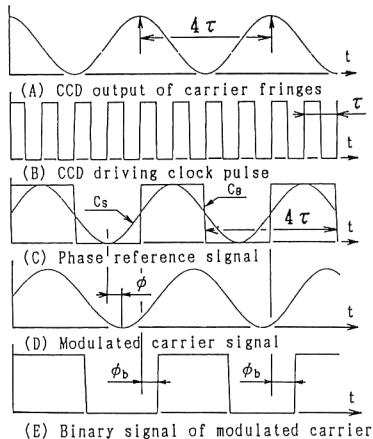


Fig. 2 Relationship between signals in principle.

ここで、空間的に発生した干渉縞を、CCD を用いて電気信号に変換する作業について考えてみる。CCD を用いたこのような画像サンプリング処理は、規則正しく並べられた CCD 各素子上に広がる空間的なデータ（干渉縞）を、CCD 駆動クロックパルスでサンプリングすることによって、干渉縞データを空間から時間的情報へと変換する作業に他ならないと考えられる。また、当然のことながら、このサンプリングされた変換信号は、CCD 駆動クロックパルスに同期している。さらに、クロックパルスの周波数の整数分の 1 倍に Fig. 2(A) に示すような変調前のキャリア縞の周波数が設定されているとするならば、Fig. 2(D) に示す変調後のキャリア縞と変調前のキャリア縞との位相差は、変調後のキャリア縞とシステムのタイムベースであるクロックパルスとの間の位相差に等しくなるはずである。

この考え方に基づくと、位相変調成分を変調後のキャリア縞とクロックパルスとの間で、位相差計によって直接測定することも可能であると考えられる。

たとえば、一例として、次に示すような処理を考えられる。すなわち、Fig. 2(C) に C_B 信号として示され

ている CCD クロックパルスから創成した位相基準パルス信号（ただし、この信号は、CCD クロックパルスを単に分周したものにすぎないので、波形としては、バイナリ信号である）を Fig. 2(C) の C_s 信号として示すような正弦波プロフィルを持つ信号へと波形整形する処理を行い、干渉縞の CCD 出力信号と直接位相を比較することができるようにしておくと、この波形整形された信号 (C_s) と CCD 出力信号との間に発生する位相差 ϕ を、位相差計によって直接測定する縞解析処理が考えられる。ところが、この処理では、現実には、レーザーの強度分布や、縞の位相が変調を受ける際の縞の強度分布のローカルな変動、すなわち、バイアスと振幅に生じる変動のために、位相差を正確に求めることはできない問題がある。そこで、本研究では、変調を受けたキャリア縞信号を、Fig. 2(E) に示すようにバイアス、振幅の変化の影響を除去した矩形波信号へと波形整形し、この信号と Fig. 2(C) に示す C_B 信号との間で、位相差 ϕ_b の検出を行うこととした。ただし、この処理では、矩形波を用いているために、キャリア縞 1 フリンジに対して立ち上がりのエッジと立ち下がりのエッジの 2箇所でしか位相差を検出することができない問題がある。しかしながら、測定点では直接縞と縞との位相差を検出してるので、高精度な位相差計を用いれば、高精度な縞解析が実現できるものと考えられる。また、きわめて簡単な回路で縞解析を行うことができる利点もある。

上記の原理にもとづく処理を行うために、Fig. 3 に示すようなシステムを製作した。Fig. 4 に示す各処理回路の出力結果を用いて、測定手順を説明する。

測定に先立ち、まず、干渉計を、位相物体が挿入される前にミラー 2 を微小角傾け、キャリア縞の周波数が、CCD 駆動パルスの 1/16, 1/32 等になるようにセットしておく。Fig. 4(A) ではキャリア縞の周波数は CCD 駆動パルスの 1/32 に設定されている。このキャリア縞を CCD によって電気信号へと変換し、Fig. 4(B) に示すようにバンドパスフィルタを用いて低周波領域の雑音と考えられるバイアス成分とキャリア信号の高調波等の高周波領域の雑音成分を除去し、キャリア信号周辺の処理に必要な周波数成分のみを抽出する。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^③に基づくもので、フィルタリングによる位相への影響ができるだけ発生しないように特別に設計したものを利用している。さらに、振幅の変化の影響を除去するために、コンパレータによって矩形波へと波形整形する (Fig. 4(C))。

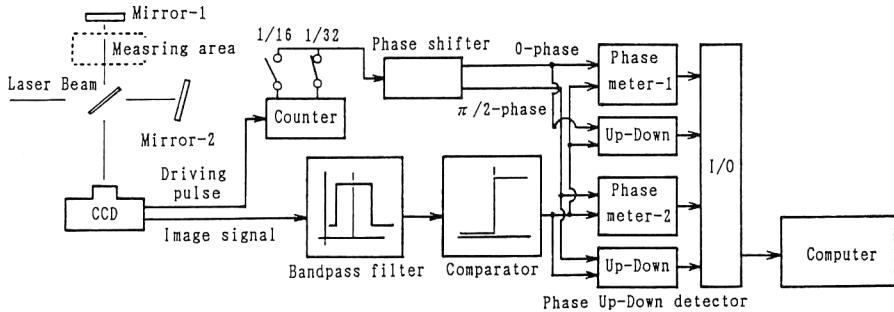


Fig. 3 Block diagram of fringes processing circuit.

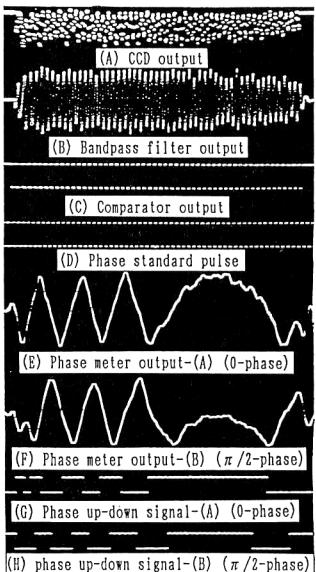


Fig. 4 Output-signals in each circuit.

一方、CCD 駆動パルスをカウンタによって $1/32$ に分周し、測定された縞との間で位相差を求めるための位相基準パルスを Fig. 4(D) のように用意する。本システムで使用した位相差計 (Analog Devices 社製 AD 630 によって構成した) は、測定範囲が $-\pi/2$ から $\pi/2$ である。したがって、 $-\pi/2$, $\pi/2$ において、位相差計出力には、位相飛びが発生する。この位相飛びの結果、連続した位相分布を測定しているにもかかわらず、位相差計出力は、不連続となる。この位相飛びによって発生する不連続な位相分布を連続化する処理 (以下、unwrapping と呼ぶ) が必要となる。さらに、この位相差計は $-\pi/2$, $\pi/2$ 近傍での測定精度が非常に低いため、unwrapping を正確に行うことができない問題も生じた。

これらの問題を解決するために、位相基準パルスを移相器を用いて $\pi/2$ シフトし、Fig. 5 に示すような 0 相と $\pi/2$ 相の 2 種類の位相基準パルスを用意して、2 台の

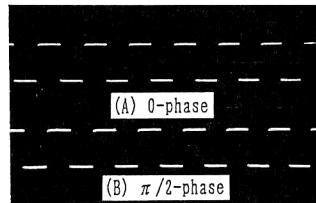


Fig. 5 Standard pulses for detecting a phase.

位相差計を用いて、0 相の位相基準パルスとコンパレータ出力との位相差、ならびに、 $\pi/2$ 相の位相基準パルスとコンパレータ出力との位相差の、二つの異なった相で、それぞれ縞の位相差を同時に検出することにした。この処理によって、0 相の位相差が $-\pi/2$, $\pi/2$ 近傍になるときには、 $\pi/2$ 相の位相差データを用いて、測定を行なうこととした。この結果、スムーズに unwrapping することができたとともに、 $-\pi/2$, $\pi/2$ 近傍での測定精度の劣化を防ぐことができた。

また、測定された位相差は、unwrapping する際に減少し続けているのか、あるいは、増加しているのかを判別する必要がある。そのため、位相差増減判定回路をあらたに作成して、unwrapping をスムーズに行なうための位相差増減判定信号 (以下、判定信号と呼ぶ) を Fig. 4(G), (H) に示すように発生させ、位相差データと共に計算機へと入力した。この判定信号は、コンパレータ出力である画像データ信号が、0 相, $\pi/2$ 相のそれぞれの位相基準パルスに対して、位相が進んでいる場合には “1”，遅れている場合には “0” を表示するように創成されている。使用した回路は、ロータリーエンコーダの回転方向を調べる原理に基づいて製作した。

次に、unwrapping のための論理を説明する。Unwrapping のルールは、次に示すような、接続点においての判定信号の状態に依存したものとなる。

先に示したように判定信号が “1” ならば位相は進み、“0” ならば遅れていることになる。一方、位相差信号

は、位相基準パルスとコンパレータ出力との相対的な位相差量を示すもので、本手法のような位相差計を用いる場合には、位相差信号だけでは、『遅れている』、『進んでいる』等を見極めることはできない。そこで、判定信号の値(1 or 0)を用いて、位相の進み、遅れを見極めることにした。

ここで、Fig. 6(A)に示すような0相の位相差出力と、 $\pi/2$ 相の位相差出力とが得られているとし、その時の判定信号が0相、 $\pi/2$ 相それぞれに、Fig. 6(B), (C)のように得られたとすると、次のように unwrapping を行うことができる。

Fig. 6(A)において、0相の位相差の初期値はA点である。したがって、A点より unwrapping の処理を始める。

A点からB点までの区間は、0相の位相差出力を利用することになり、この時、0相の判定信号は、“0”である。したがって、A点からB点までの区間では、位相は遅れ、またA点からB点までの傾きを見ると、位相差の相対量は増大していると考えられる。B点では、C点をシフトして接続する。C点からD点の区間は、 $\pi/2$ 相の位相差出力に切り換えられ、また、この時、 $\pi/2$ 相の判定信号は、“0”であるから、この場合も、A点とB点の区間と同様に、遅れは大きくなっていると考えられる。このように、判定信号が“0”的場合には、位相差出力の符号が“-”であると解釈し、unwrapping では、位相差出力の傾きを士反転させて接続してゆけば良いと考えられる。次に、D点で再び0相の位相差出力に切り換えられる。D点からE点までの区間では、0相の判定信号

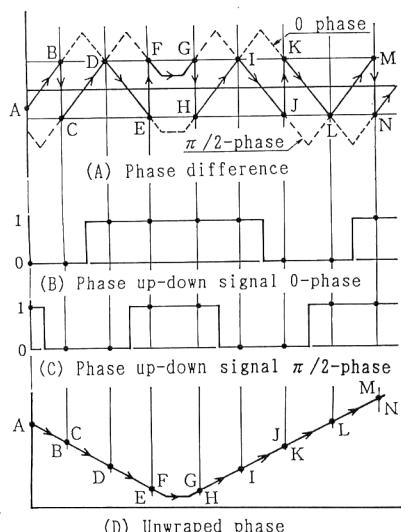


Fig. 6 Unwrapping process.

は“1”になっている。先に示した判定信号が“0”的場合の解釈の逆を考えると、判定信号が“1”的場合には、位相差出力の符号は“+”と考えられ、位相差出力を接続点において、そのまま unwrapping すれば良いと考えられる。

このようにして、D点からE点の区間は、位相差出力をD点からそのまま接続すれば良いことになる。次に、E点では、F点を接続し、F点からG点の区間に對しても、 $\pi/2$ 相の位相差出力と判定信号とによって、D点からE点の区間と同様に、そのまま位相差出力を接続すれば良いことがわかる。同様にして、各区間の判定信号に従って、unwrapping してゆくと、Fig. 6(A)からFig. 6(D)の結果を得ることができる。

以上の unwrapping の処理は、本研究では、計算機内部でソフトウェアによって行った。

3. 結果と検討

測定結果を、Fig. 7 に示す。Fig. 7 は、CCD ラインセンサー(1000 pixel)のクロックパルス(100 kHz)を32分の1に分周して位相基準パルスを作成した場合の結果である。また、測定対象は、Fig. 8 に示すような干渉縞

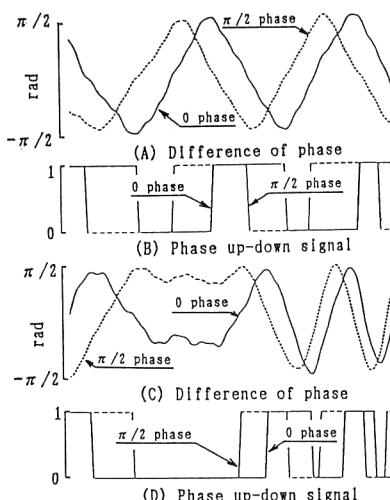


Fig. 7 Experimental results.

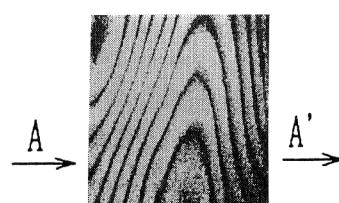


Fig. 8 Interferogram of slide glass.

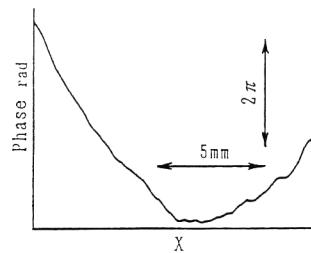


Fig. 9 Detected phase. (This method)

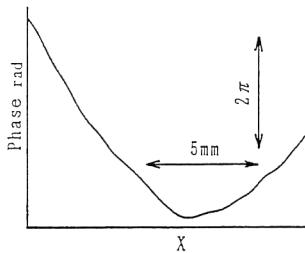


Fig. 10 Detected phase. (FFT method)

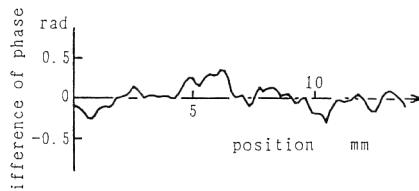


Fig. 11 Difference of phase between the detected phases by this method and FFT method.

をもつスライドグラスの A-A' 断面である。

Fig. 7(A) は、干渉計に位相物体が挿入されていない場合のキャリア縞と位相基準パルスとの位相差出力(0 相と $\pi/2$ 相)を示している。この場合に、キャリア縞の周波数は、位相基準パルスの周波数とおおよそ等しくなるように設定した。また、Fig. 7(B) は、0 相、 $\pi/2$ 相各々の判定信号である。一方、Fig. 7(C) は、測定物体挿入後の位相差出力である。光学系のひずみ、また、キャリア縞の周波数を位相基準パルスの周波数に設定する時の微小設定ずれの影響を除去するために、本研究では Fig. 7(A)、(C) 各々を unwrapping して、両者の差をとり、縞の位相として求めた。結果を Fig. 9 に示す。Fig. 10 に同一断面に対しての FFT 法³⁾の結果を示す。定性的に同程度の測定が行われていることがわか

る。そこで、定量的に検討するために両者の差を求めたものが、Fig. 11 である。FFT 法による測定結果と本手法による結果との差の標準偏差は、0.142 rad (約 45 分の 1 wave) であることがわかった。

簡易な原理に基づき、簡単な処理回路によっても、この程度の測定を容易に実現することができる本手法は、実用性に富む縞解析法であると考えられる。

本手法は、原理でも述べたように、測定点では高い精度を持つ測定が行われているものの、空間的に測定点が少ないので問題がある。測定点を増やすために、位相差基準パルスの周波数をクロックパルスの 1/16, 1/8 へと変換してその影響を検討する必要があると考える。

4. まとめ

本研究では、以下に示すところを提案し、確認した。

(1) CCD イメージセンサーが持つ干渉縞画像データを空間領域から時間領域に変換することのできる性質を利用した、アナログ処理を用いた簡単な論理に基づく縞解析法を提案した。

(2) 新しい縞解析原理に基づく処理システムを試作し、本手法が FFT 法とほぼ同程度の測定精度を持つことを実験によって明らかにした。

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) 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) 豊岡 了, 大橋勝樹, 山田興治, 小林久信：“高速縞解析用ハイブリッドシステム”，光学，16 (1987) 407-413.
- 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) A.B. Williams and F.J. Taylor: *Electronic Filter Design Handbook*, 2nd ed. (McGraw-Hill, N.Y., 1988) pp. 7-1-7-44.