

技術報告

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

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6日受付, 1995年4月6日受理)

Phase-Unwrapping Hybrid System for High Speed Fringe Analysis 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-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 6, 1995; Accepted April 6, 1995)

A new hybrid system of phase-unwrapping for a high speed fringe analysis system is presented, which utilizes a relative phase difference between the driving pulses and the video signal of a CCD. Experimental results show that the new hybrid system can perform a high speed fringe analysis without a computer. The accuracy of the measuring system is estimated as close to that of the FFT method by using a digital computer.

1. はじめに

干渉計における縞解析は、工学の分野において、物体の形状、屈折率分布の測定など、高精度な計測法として重要な意味をもつ技術となってきた¹⁾。1970年代初頭に報告された縞走査の技術²⁾をはじめとして、現在、様々な高精度な縞解析技術が報告されている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委ねているため、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、筆者らは、複雑なアルゴリズムを用いないアナログ処理による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きた^{7,8)}。その一例として、周波数復調技術による手法が挙げられる。周波数復調技術を用いた手法⁷⁾では、位相つなぎ処理（以下、unwrappingと呼ぶ）を必要としない、実時間に近い処理が実現されている。一方、位相復調の考え方に基づく手法もアナログ処理によ

って行うことができる⁸⁾。ところが、この位相復調による手法では、特別な位相差計を用いない限り、従来のディジタル計算機を用いる場合と同様に、unwrappingを必要とする。このような unwrapping 技術は、武田により報告された FFT 法³⁾における unwrapping 法をはじめとして、現在では、様々な unwrapping⁵⁾が議論されるに至っている。

前報に示した位相復調技術を用いたアナログ処理による縞解析⁸⁾では、従来の unwrapping のように位相データのみを用いて処理するのではなく、個々の測定点で、従来の手法に比べてより多くの情報を用いた処理が行われているので、ディジタル計算機を用いなくても、容易に unwrapping 処理の実現が期待できる。本研究では、この特徴を生かして、ディジタル計算機を用いない unwrapping のためのハイブリッドシステムを開発し、その特性を検討した。

2. 原理

2.1 位相差計を用いた位相検出⁸⁾

CCDを用いた画像サンプリング処理は、画像の光電変換のみならず、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（ここでは、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、空間領域から時間領域へと変換する処理であるとも考えられる。本研究では、この考え方に基づいて、CCD出力としての干渉縞データを時間領域の情報を取り扱い、以下に示す考え方に基づいて位相検出処理を行っている。

位相検出処理においては、前報⁸⁾に示したように、まずはじめに、Fig. 1に示す干渉計の参考ミラー（mirror-2）を微小角 δ 傾けることによって得られるキ

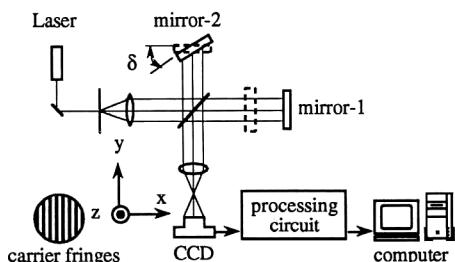


Fig. 1 Schematic of system.

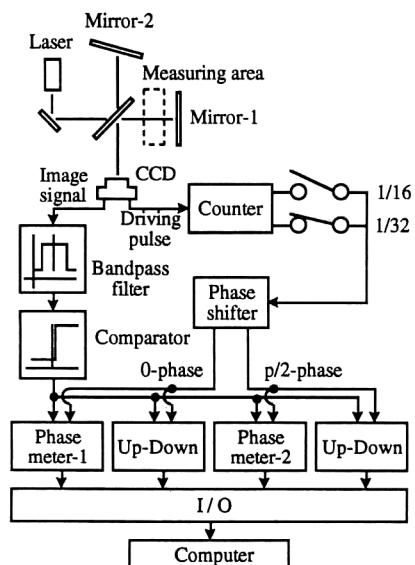


Fig. 2 Block diagram of fringes processing circuit.

ヤリア縞の周波数をCCDクロックパルスの周波数の整数分の1になるように設定している。ここで、干渉計の測定領域に位相物体を挿入すると、キャリア縞は、位相変調を受ける。このとき、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クロックパルスとの間の位相差として、位相差計によって直接測定されている⁸⁾。

上記の原理に基づく処理を行うために、Fig. 2に示すようなシステムを前報⁸⁾において製作した。このシステムでは、unwrapping以外は、すべて電気回路で処理ができるため、高速処理が可能である特徴をもっていた。しかしながら、unwrapping処理にデジタル計算機を用いていたため、計算機への入出力処理を含めてトータルとして秒オーダーの処理時間が必要になっていた。そこで、本研究では、従来デジタル計算機によって行っていた処理をハードウェアに置き換えて、高速に縞解析可能な以下に示すシステムの開発を行った。

2.2 アナログ処理による unwrapping

従来のほとんどのunwrapping技術では、位相データそのものを処理しようするために、位相データの特異点（たとえば、 $\pm\pi/2$ 等）において、位相をシフトする処理が必要となっていた。ところが実際には、特異点近傍で位相データが大きく変化することにより発生する問題があり、処理が煩雑になっていた。そこで、本システムでは、0相、 $\pi/2$ 相の2種類の位相差データを切り換えながら用いることによって、特異点近傍での煩雑な処理を回避することを考えた。これが、本研究において提案するunwrapping法の第一の特徴である。

第二の特徴は、位相差の変化量を扱うことにより、処理の簡素化を図る点にある。

連続した位相分布をもつ測定物体を対象と考えた場合、変化量を用いた処理では、変化量に対するすべての処理が行われた後に、積分さえすれば、容易に位相を復元することができる。したがって、従来行っていた位相の絶対量としての π 、 $\pi/2$ 等の値を加減する処理は、いずれの地点においても不必要となる。さらに、本システムで用いているような位相差計では、前報⁸⁾に示したように、位相差出力の傾きを位相増減判定信号（以下、判定信号）に基づいてその符号を変化させるなどの処理が必要となるので、位相差データそのものを用いるよりも、位相差の変化量を用いる方が、システム構成を簡単にことができる。

第三の特徴は、位相差データに加えて判定信号というunwrappingのための新たな情報が用いられる点に

ある。

本研究では、上記の特徴を踏まえて、前報⁸⁾に示したディジタル計算機内部での処理論理をハードウェアとして実現可能な論理へと発展させ、実時間に限りなく近い unwrapping 処理を行うために、Fig. 3 に示すフローチ

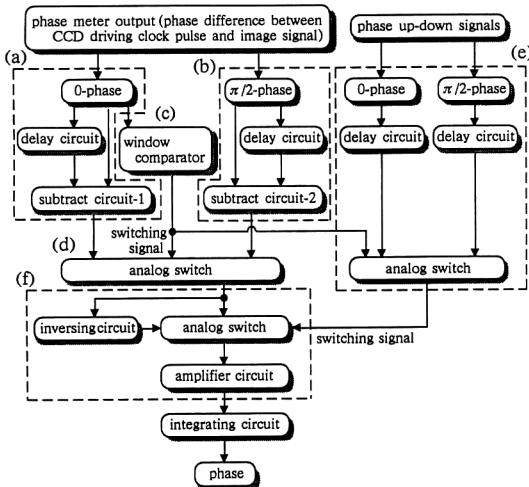


Fig. 3 Flowchart of unwrapping hybrid system.

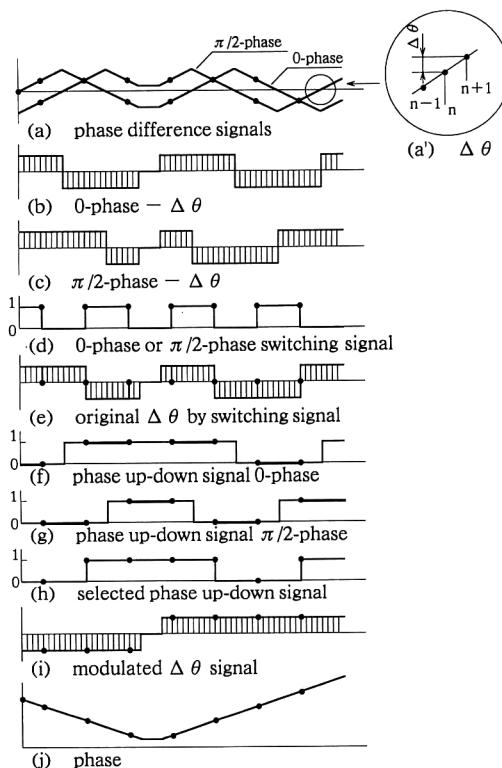


Fig. 4 Signals in the hybrid system.

ヤートの論理に従った処理回路の開発を行った。

Fig. 4 に各処理過程における信号を示す。unwrapping 处理のためのデータとして、電気回路では、2種類の位相差データ（0相、 $\pi/2$ 相；Fig. 4(a)) と Fig. 4(f), (g) に示す 0相、 $\pi/2$ 相 2種類の判定信号が用意されている。

処理では、まずははじめに、Fig. 4(a) に示すそれぞれの位相差データ（0相、 $\pi/2$ 相）に対して、変化量の処理を行うために、CCD 駆動パルス 1 パルス間の位相差の変化量（たとえば、Fig. 4(a') に示す n 番目と $n+1$ 番目の位相差の値の差） $\Delta\theta$ を、Fig. 4(b), (c) としてそれぞれ求めている。この処理には、Fig. 3(a), (b) に示すサンプルホールド回路と CCD クロックパルスとともに構成された遅延回路ならびに、減算回路が用いられている。この処理と並行して、 $\pm\pi/2$ の特異点での処理を回避するために、0相の位相差データ (Fig. 4(a)) から、unwrapping に必要な 0相あるいは $\pi/2$ 相の切換え信号 (Fig. 4(d)) を抽出している。この処理は、Fig. 3(c) に示すウインドコンパレータによって行われている。この切換え信号は、論理が “1” の場合には 0相のデータを、“0” の場合には $\pi/2$ 相のデータを選択して処理するためのものである。この切換え信号を用いて、Fig. 4(b), (c) から、unwrapping に直接必要な $\Delta\theta$ 信号 (Fig. 4(e)) を、Fig. 3(d) のアナログスイッチの出力として抽出している。

一方、Fig. 4(f), (g) にそれぞれ示す 0相、 $\pi/2$ 相 2つの判定信号からも unwrapping に直接必要な判定信号 (Fig. 4(h)) を切換え信号 (Fig. 4(d)) によって抽出しておく。この判定信号は、前報⁸⁾に示した判定信号同様に、判定信号が “0” の場合には、位相差出力の符号が “-” であると解釈し、unwrapping 处理では、位相差出力の傾きを土反転させて接続して行くための信号である。この論理に従って、Fig. 4(h) に示す unwrapping に直接必要な判定信号を用いて Fig. 4(e) の $\Delta\theta$ 信号を、Fig. 4(i) へと修正する。この処理には、Fig. 3(f) の処理回路が用いられている。この結果、得られた位相の増減も考慮にいれた $\Delta\theta$ 信号 (Fig. 4(i)) を順次加算することによって、Fig. 4(j) に示す位相データの検出が行える。本研究では、当初この加算回路として、サンプルホールドと加算器を用いた回路を作製していたが、パラメータの設定が煩雑であることより、アナログ回路による積分器を用いることによって位相を求めるにした。

3. 結果と検討

Fig. 3, 4 に示す論理に従った試作処理回路の直線性と急激な位相の変化に対する応答性を調べるために、Fig. 5 に示すような直線的に変化する位相をもつ信号モデルをデジタル計算機によって創成し、D/A 変換器によって処理回路へと入力した。Fig. 5 に示すものは信号モデルの一例である。このモデルでは、実際のシステムで用いる CCD ラインセンサーを想定して、横軸に示す 5000 pixel の素子に対して、A-B 間では位相は一定、B-C 間では位相は $-0.0045 \text{ rad}/\text{dot}$ の傾きで変化し、C 点で急激な変化が存在している。さらに、C-D 間では $-0.0015 \text{ rad}/\text{dot}$ の傾きを設定している。このモデルに対して、Fig. 4 に示す各信号を調べるとともに、位相を求め Fig. 5 に示す計算機内部に設定した位相モデルとの比較検討を通して試作処理回路の精度の検討を行った。処理回路内の各信号をオシロスコープによって撮影した結果を Table 1 に示す。また、その備考欄に Fig. 4 中の各信号との対応を示す。

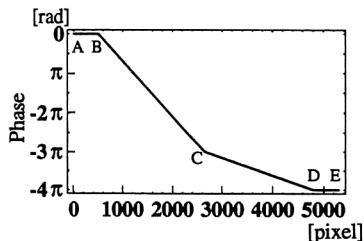


Fig. 5 A model of phase map for checking the characteristics of the system.

Table 1 Experimental results in regard to the model shown in Fig. 5.

	Experimental results	Remarks
(a) phase difference signals		Fig. 4 (a)
(b) $\Delta \theta$		Fig. 4 (b), (c)
(c) 0-phase or $\pi/2$ -phase switching signal		Fig. 4 (d)
(d) original $\Delta \theta$ by switching signal		Fig. 4 (e)
(e) phase up-down signals		Fig. 4 (f), (g)
(f) selected phase up-down signal		Fig. 4 (h)
(g) modulated $\Delta \theta$ signal		Fig. 4 (i)
(h) phase		Fig. 4 (j)

Fig. 4 に示す処理が、試作回路において、順次スムーズに行われていることが Table 1 の結果より確認できる。また、直線的に変化する位相に対する応答から、処理回路の直線性の高さが確認できる。さらに、急激な位相変化に対しても、処理回路は位相遅れを生じることもなく対応していることが確認できる。

Fig. 5 に示す計算機内部の信号モデルの位相と Table 1(h) に示す位相結果との差を Fig. 6 に示す。この結果における誤差としてのばらつきは、標準偏差で、 0.0632 rad であることが確認できた。この結果に従うと、ハードウェアとしての処理回路のトータルの測定精度は、約 $1/100 \text{ wave}$ であると表現することができる。

Fig. 7 に実際の干渉縞解析の結果を示す。実験装置の概要は Fig. 1 に示すもので、ヘリウムネオンレーザーによるトワイマングリーン干渉計と試作処理回路によって構成されている。また、CCD クロックパルスは 500 kHz であり、前報にも示したクロックパルスの分割⁸⁾は、 $1/16$ を用いている。 5000 pixel をもつ CCD ラインセンサーを使用した本システムは、 10 ms 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が可能である。

Fig. 7(a) が処理対象としてのスライドグラスの干渉

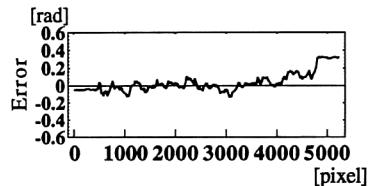


Fig. 6 Detected error of the system in regard to the model shown in Fig. 5.

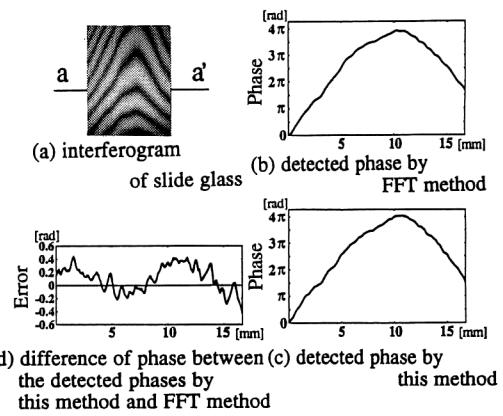


Fig. 7 Experimental results using an interferometer.

縞であり、実験では a-a' 線上の位相を求めた。Fig. 7 (b) は FFT 法に基づき検出された位相の結果である。一方、Fig. 7(c) は本研究において構成した処理回路を用いた場合の位相の結果である。両者の差を求めたものが Fig. 7(d) である。2つの手法による結果の差の標準偏差は 0.190 rad であり、約 1/35 wave であると考えられる。

以上の結果は、前報に示した計算機援用による unwrapping 結果と同程度の精度が本システムにおいても実現可能であることを示している。本研究で開発した unwrapping のためのハイブリッドシステムによって、CCD 駆動パルスを用いた手法においても、周波数復調の手法同様に、限りなく実時間に近い処理法としてオシロスコープ上で位相を確認することが可能となった。このことは、干渉縞を用いた高精度な測定がより取り扱いやすくなり、測定がスムーズに行えることを意味するものであると考えている。したがって、本研究において提案したシステムは、干渉計測のより広い分野での利用を促す技術であると考える。

4. おわりに

本研究においては以下のことが明らかとなった。

(1) 干渉縞などの縞解析において、空間的に広がるキャリア縞に対して測定対象の縞が空間的に位相変調されていると考えた場合の解析も、電気回路に基づくハイブ

リッドシステムによって高速処理が可能である。

(2) 演算時間が問題となっていた unwrapping 処理も、ハードウェアのための論理が提案され、その論理に基づく電気回路によるシステムが構築されている。

(3) 本研究において試作した処理回路では、1 ライン 10 ms で高速に縞解析が行える特徴をもち、トータルの処理に対する精度は FFT 法による結果との比較において、約 1/35 wave であることがわかった。

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) J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White and D. J. Brangaccio：“Digital wave-front 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) 新井泰彦、横関俊介、山田朝治：“CCD 駆動パルスをタイムベースとした高速縞解析法”，光学，23 (1994) 445-449.