

周波数復調技術を用いた二次元高速縞解析システム

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 High Speed Fringe Analysis System Using Frequency Demodulation Technology

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

In this paper, a new two-dimensional fringe analysis method using an analog and digital electric circuit based on frequency demodulation technique is proposed. An experimental system is built. In the system, because image information is processed as an analog signal synchronized with CCD clock-pulse, a high-speed two-dimensional phase detecting processing is realized. Qualitative and quantitative analyses for this system are performed. The results show that this system can process 14 images a second, and that the measurement accuracy is approximately around 1/5 wave. The current system is not satisfied with a high precise measurement, however, the error sources of this system are checked. Furthermore, the improvement plan of the accuracy of this method is discussed.

1. はじめに

干渉縞をはじめとする縞の解析技術は、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、また、様々なサブフリンジ法が提案され利用されるに至っている¹⁾。ところが一般に用いられているデジタル計算機処理に依存する縞解析の手法は、多大の演算時間を必要としている。しかし、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。その一手法として電気回路を用いた手法²⁾が提案され、また、より簡易に縞解析を行うことのできる手法³⁻⁵⁾が提案されてきている。このような状況の中で、本研究では高速処理を念頭においた実用に供する二次元縞解析法の開発を行っている。

前報^{3,4)}までに報告した手法では、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捉え、その結果として、通信理論にもとづく周波数復調技術による二次元高速縞解析処理法を実現していた。しかしながら、産業界で上記の手法が実用化されるためには、FFTを用いた手法⁶⁾が二次元化⁷⁾されたと同様に、二次元処理が行える縞解析法へと拡張されなければならない。本論文では、前報までの結果を踏まえて上記の手法の二次元化のための原理を示し、その原理にしたがった処理回路を製作し、原理の正当性ならびに測定精度の検討を行っている。新たに構成されたシステムでは、605×271素子(ノンインターレースとして市販のCCD素子を用いているので、縦横の素子数がアンバランスになっている)

のエリアセンサーによって捉えられた画像を1秒間に14枚のスピードで縞解析できることを確認した。また、測定精度が現状のシステムでは約1/5 wave程度にすぎないものの、その誤差要因ならびに測定精度改善法についての検討も行った。

2. 周波数復調技術にもとづく二次元測定システム

2.1 二次元位相測定システムの原理

前報^{3,4)}までに示した手法では、CCD 画像出力が CCD 素子上に空間的に広がる画像データを時系列信号として出力することのできる性質を利用した周波数復調技術にもとづく一次元縞解析システムを提案してきた。この考え方に従えば、一次元の位相検出はラインセンサーを用いることによって高速に行うことができる。この手法を二次元へ拡張する場合の問題点は、一次元において各走査線に対して独立に行っていた縞の位相検出処理を、二次元 (X, Z) 各々の方向で協調して行わなければならないところにある。すなわち、本研究では縞の高速処理を目的としているために、 X, Z 二次元の縞位相検出を同時に行い、かつ合成しなければならない。この問題を解決する手法の開発にあたって、まずはじめに、周波数復調技術による二次元縞位相検出処理を各軸方向で独立に行うための手法を示し、さらに、独立して求めた X, Z 方向それぞれの縞位相結果を同期させつつ合成するための手法を提案する。

Fig. 1 に示すような測定システムを構成し、トワイマングリーン干渉計の参照光側のミラー2を空間的に傾けることによって (それぞれ δ, θ に傾ける) $X-Z$ 平面上で斜めに直線的な干渉縞を発生させることができる。このように、斜めに直線的な干渉縞を発生させることによって、 X, Z 方向各々に空間周波数をもつ Fig. 1 に示すキャリア縞を得ることができる。その縞を以下二次元縞解析のためのキャリア縞と呼ぶことにする。

ここで、Fig. 2(A) に示すような位相分布をもつスライドガラスをキャリア縞が発生しているシステムの測定領域に挿入した場合、キャリア縞はスライドガラスの位相分布にしたがって変調を受ける。この変調を受けたキャリア縞が Fig. 2(B) に示すものである。この二次元画像を解析するためには、縞画像を Fig. 3(A) に示すように、CCD 素子上の X, Z 平面上で取り扱う必要がある。ここで、 X 方向は CCD 走査線の走査方向である。この場合、キャリア縞は CCD 画素上では二次元平面のデータではあるものの、CCD 出力部では Fig. 3(B) に示すように各走査線における情報が時間的に連続して水

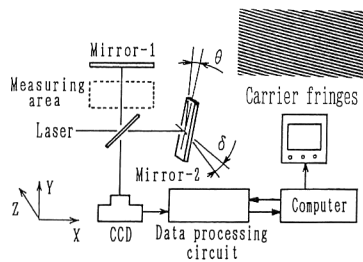


Fig. 1. Schematic of measurement system.

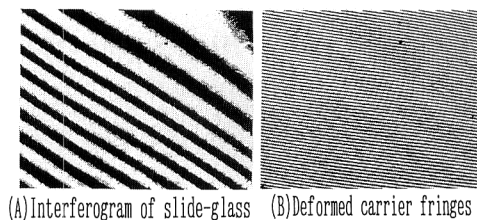


Fig. 2. Object and carrier fringes.

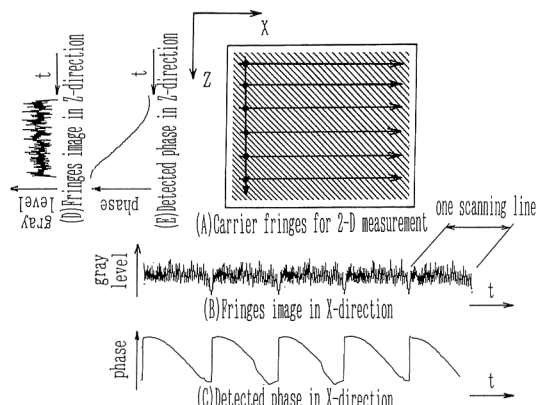


Fig. 3. Principle of two dimensional phase measurement method using frequency demodulation technique.

同期パルスに同期した画像出力として送り出されている。したがって、 X 方向に関しての位相検出処理は、前報^{3,4)}に示した一次元縞解析処理技術にもとづく処理によって行うことができる。この結果、Fig. 3(B) に示す時系列信号としての画像データから Fig. 3(C) に示す位相データを求めることができる。一方、 Z 方向の処理は、走査線に直交しているため、前報に示した位相検出の原理に従って解析するためには、Fig. 3(A) に●で示す走査線上の左端から何番目 (例えば2番目であるとか3番目) かのデータを走査線に対して垂直方向にサンプリングし、Fig. 3(D) に示すような時系列信号として

並びかえをしておかなければならない。この処理を行うためには、各走査線の水平同期パルスからクロックパルスをカウントし、一定の場所（左端から何番目）でサンプルホールドして時系列信号を作成することのできる回路を製作すればよい。さらに、この時系列信号を前報までに示した位相検出原理にもとづくZ方向位相検出回路に導けば、X方向と同様に縞のZ方向に対する位相もFig. 3(E)に示すように求めることができる。ただし、キャリア縞の方向が走査線に対して45度の場合には、X方向に比べて信号の周波数は約600分の1と非常に低くなる。このような場合には、対象とする周波数が非常に異なった2種類の一次元処理回路を製作しなければならず、回路製作を専門としないものにとっては、2種類の回路の特性を合わせた設計は非常に厄介な問題となる。したがって、キャリア縞の方向設定時には、X,Z方向の信号処理にとってできる限り周波数が異なるようにするための所作が必要になる。

2.2 X, Z 方向の位相の合成

上記の処理によって求めたX,Z方向それぞれの位相分布 (Fig. 3(C), (E)) を合成すれば、二次元の位相マップを求めることができる。このとき、それぞれの方向の位相を計算機のメモリー上にA/D変換器などを用いて記録し、十分な演算時間を用いて計算機(ソフトウェア)で2方向の位相合成処理を行うことは容易である。しかしながら高速演算(限りなくリアルタイムに近い処理)を行うために、ここではこの処理を電気回路(ハードウェア)によって行うことにした。この場合には新たな問題に直面する。前報^{3,4)}までに示した一次元処理をそのまま利用するためには、X方向の一次元処理を行うと同時に、X方向の一次元処理の初期値をZ方向の測定結果を用いて与えなければならない。すなわち、ある走査線においての処理を考えると、走査線方向の位相分布を求めることはもとより、走査線に垂直方向の位相分布を求める必要があり、さらに、垂直方向の値を走査線方向の位相を求めるための初期値としなければならないという、時間的に処理の順序が矛盾した処理を行わなければならない。この問題を解決するために、本研究では、X方向とZ方向とのデータ間に遅延回路とクロックパルスを用いて時間差を発生させ、上記の時間的、処理の順序の矛盾を解消することのできるシステムを製作した。

3. 結果と検討

本研究では、走査線に対して20度の傾きをもつキャ

リア縞を用いて実験を行った。この程度に角度をつけた二次元キャリア縞では、X,Z方向の信号周波数の比を約90分の1程度に抑えることができるので、回路製作を得意としない者にとっても回路設計上の問題を極力抑えることができるとともに、市販の電子部品でシステムを構築することができた。具体的には、CCDクロックパルスを3.5MHzとし、X方向の信号周波数を72kHzに設定した場合、Z方向は800Hz程度に設定することができた。このキャリア縞に対して、Fig. 2(B)に示すように変調を与えると、X軸方向の処理回路では、Fig. 4に示すように画像信号をディレー回路によって遅延させた後に、一次元処理で行ったと同等の処理を行う

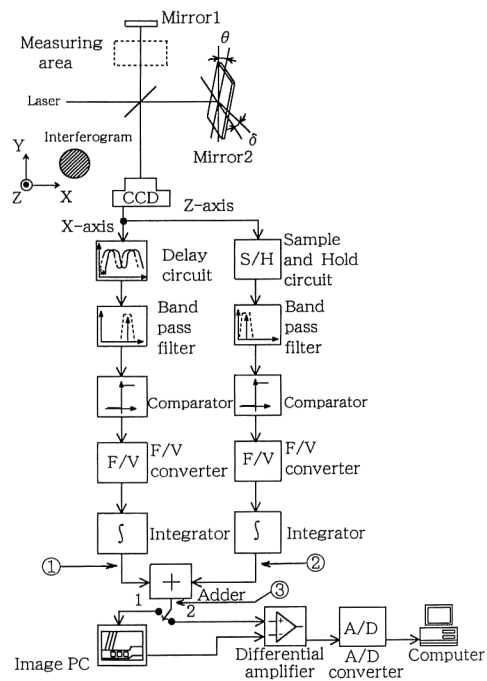


Fig. 4. Flow chart of measurement system.

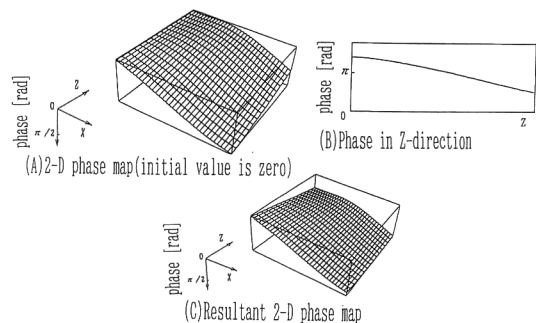


Fig. 5. Outline of resulting method of horizontal and vertical phase distributions.

と、各走査線に平行な方向 (X 方向) における縞の位相が求められる。この各走査線における位相を二次元配列として並びかえると、Fig. 5(A)に示すような位相分布を求めることができる。しかしながら、この各走査線の位相分布では、各走査線における演算の初期値がゼロに設定されているために、初期値を与えるべきここでは左端で、位相はすべてゼロになっている。そこで、キャリア縞を Fig. 3(A)に示すように走査線上の左端から何番目 (画面左端から縦方向に一定の位置、また、この位置が X 方向の初期値を与えるポイントでもある) のデータを走査線に対して、垂直方向にサンプリングしてゆくことのできる Fig. 4の Z 軸方向に示すようなサンプルホールド回路によって、サンプリングすると、前述のように、走査線に垂直方向、つまり Z 方向のデータを抽出することができる。この Z 方向のデータに対しても一次元処理で行ったと同様の処理を行うと、Fig. 5(B)に示すような Z 方向の位相を求めることができる。この Z 方向の位相を X 方向の処理においてゼロと設定されていた位相分布 (Fig. 5(A)) の初期値として用いれば、Fig. 5(C)に示す X, Z 両方向の結果を合成した二次元位相分布が求められる。以上、これらの処理は、Fig. 4に示すブロック線図における各回路により行うことができる。その結果を Fig. 6に示す。

Fig. 6は Fig. 4に示すシステムにおける信号をオシロスコープ上で観察したものである。Fig. 6(A)は、Fig. 4の①点上の X 方向の位相検出結果であり、1画面分 (走査線 271 本分) の位相が検出されている。また、出力結果の上端が平らになっていることから初期値がすべて一定 (0 volt) に設定されている様子が確認できる。

Fig. 6(B)は Fig. 4の②点上の Z 方向の1画面分の位

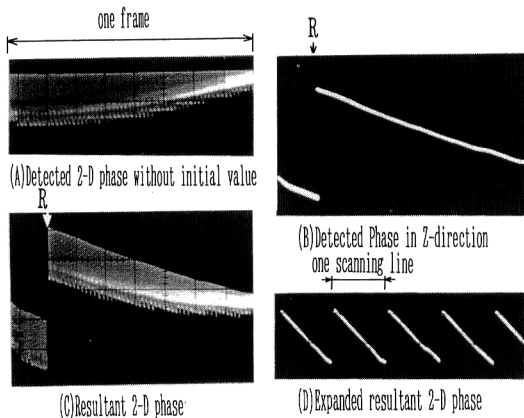


Fig. 6. Output signals from an experimental circuit.

相検出結果である。さらに、Fig. 6(C)は、Fig. 4の③点上の結果で、Fig. 6(A), (B)を合成したものである。Fig. 6(B)の結果が Fig. 6(A)の結果の初期値として合成されていることがわかる。Fig. 6(C)の Z 方向のリセット位置 (R 点) 直後を時間軸方向に拡大したものが、Fig. 6(D)である。Fig. 6(D)に示すように各走査線に対する位相演算結果が時系列に並んでいることが確認できる。これらの結果を二次元位相分布として表現するときには、Fig. 6(C)の各走査線データを二次元に並べかえればよいことになる。

ところが、Fig. 6(C)に示す結果は、一次元処理において問題⁹⁾となった光学系の歪による誤差、キャリア周波数の設定誤差をも含むものである。したがって、本研究ではキャリア縞のみの処理結果 (バックグラウンド) を Fig. 6(C)から減算して、被測定物体 (ここでは、スライドガラス) のみの位相を検出することのできるシステムを二次元測定システムにおいても採用している。この処理は、前報⁹⁾で一次元処理として行ったキャリア縞のみの処理結果を計算機にあらかじめ記憶させておいて、CCD トリガパルス、クロックパルスに同期させて変形後のキャリア縞による位相の変化量を検出してゆくことのできるシステムを、新たに水平同期パルス、垂直同期パルス、さらにクロックパルスを用いて二次元処理へと拡張することによって実現させている。本研究では、この処理を Fig. 4の加算器出力直後のスイッチ (1 or 2) の切換えとフレームメモリーを改造したシステムとを用いて実行している。現在、フレームメモリーを用いている関係上、このシステムにおける A/D, D/A 変換器は 8 bit である。

上記の減算処理によりスライドガラスのみの位相を求めた結果を二次元に展開して表示すると Fig. 7(A)に示す結果が得られる。さらに、Fig. 7(A)に示す位相分布を等位相線図に描きなおしたものが Fig. 7(B)である。この場合、等位相線図の間隔は 2π rad である。ノイズがみられるものの、この結果は Fig. 2(A)に示すスライドガラスの位相分布によく一致している。

この結果から、本システムによって定性的に二次元位相測定が行えることが確認できる。

次に、本システムの測定精度を検討するために、従来測定精度が高いと考えられている FFT (fast Fourier transform) 演算を用いた手法^{6,7)}との比較を行った。本システムで処理した領域と同じ部分での FFT 法による処理結果を Fig. 8に示す。さらに、本システムにより得られた Fig. 7(A)と Fig. 8との測定の対応点での差を

Fig. 9 に示す。Fig. 7(A)には処理時の問題としてランダムなノイズが存在する。このため、Fig. 9 に示す両者の差の標準偏差は約5分の1 wave 程度にすぎない。また、PV値は、8.35 radであり、1 wave を越えた値となってしまう。

この測定精度に影響する誤差の主たる原因として、下記の項目に示すものが考えられる。

- 1) 8 bit の変換器を用いた処理を行っている。
- 2) フィルターの遅延時間の同定が十分に行われてい

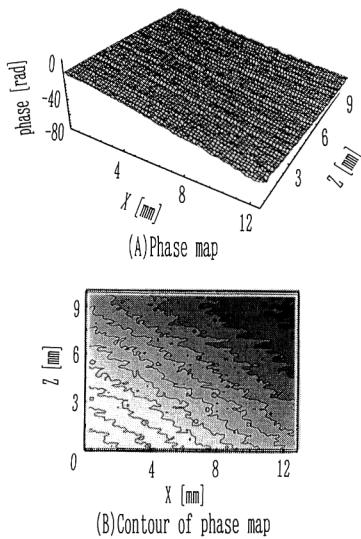


Fig. 7. Detected phase maps with this method.

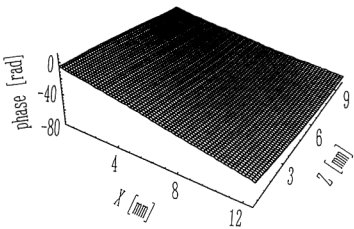


Fig. 8. Detected phase map with FFT method.

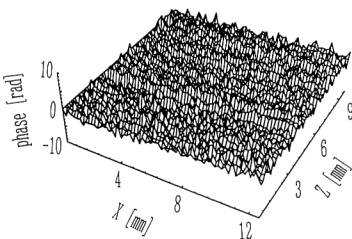


Fig. 9. Difference between results with this method and with FFT method.

ない。

- 3) 縦・横の周波数の差が大きい。
- 4) システムにおけるノイズ対策が十分でない。

1)の問題は、物体のあるなし双方のデータ間の減算に8 bit の変換器を用いているために量子化誤差が生じていることを意味している。現在のシステムでは、システムゲインの関係で、変換器のダイナミックレンジが6 bit 程度にしか対応していない。このために測定結果にみられるようなランダムなノイズとしての大きな量子化誤差が生じている。この問題は、現在、本システムにおける最大の誤差要因となっているものの、前報⁴⁾に示した結果をもとに検討すると、12 bit の変換器を用いることによって改善することの可能な問題であると考えられる。

2)では、本システムにおけるアナログフィルターの特性に問題があることを示している。群遅延特性⁴⁾をもつバンドパスフィルターを用いているものの、遅延時間の同定が十分に行われていないため、横方向の初期値を与えるために行われる縦方向処理の位置と、横方向の初期値を与える位置との間に若干の空間的相違が生じている可能性が考えられる。このため、縦横のデータを合成することによって得られた測定結果に歪みが生じているのではないかと考えられる。この問題の解消には、デジタルフィルターなどの遅延のないフィルターを用いる、あるいは、さらに厳密に縦方向の処理位置と、横方向の初期値を与える位置とを合わせるための処理が必要であると考えられる。

3)の問題は、本システムの二次元センサーが横605、縦271の分解能しかなく、さらに、低い周波数を扱う縦方向の結果がいくぶん不安定になっていることに起因している。

縦方向の結果は、横方向の初期値となっているため、ノイズ等による縦方向の変動は、その値を初期値とする横方向のデータすべてに影響を与えてしまう結果となる。例えば、Fig. 7(A)の結果において横方向に筋が入ったような状態を形成してしまう。この問題は、本システムの現状の処理方法では、避けることができないものである。現在、初期値を与えるためにのみ行っている縦方向の処理をすべての測定領域で行い、縦横の処理をよりいっそう協調させることのできるシステムへの改良が望まれる。さらに、より縦方向に多くの画素をもつエリアセンサーの導入が待たれる。

4)については、2)の問題同様に、回路設計、製作のノウハウが必要とされるもので、回路製作を専門とする技

術なしにはいかんともしがたい問題である。

本システムにおける演算では、画像データは高速処理が可能なアナログ量として取り扱われているので、現在、605×271のエリアセンサーからの入力画像に対して1秒間に14枚の連続処理を行うことができる高速処理システムが実現されている。しかしながら、新たな問題として、演算結果を観察するためのシステムをいかに構築するかの議論が十分に行われていないという問題が浮かんでくる。現在は、アナログ回路によって得た結果をA/D変換器を用いて計算機のメモリー上に配列させてモニター上で観察しているに過ぎない（すなわち、データの表示に時間を要する問題がある）。本研究において提案されたような高速処理を行うことのできるシステムをより有効に利用するために、単に、結果を観察するための処理のみならず、高速処理によって演算を行うシステムにより求めた結果を迅速にまた効果的に応用するための新たな議論が必要であると考えられる。

4. ま と め

本研究において、以下のことを行い明らかにした。

(1) 代表的な通信技術である周波数復調技術を用いることにより、二次元画像の高速処理が行える干渉縞解析法を提案した。

(2) 周波数復調技術にもとづく二次元縞解析システムの演算回路を試作した。

(3) 試作演算回路によって二次元縞解析処理を1秒間に14枚の速度で行えることが確認した。また、その測定精度は現状では、約5分の1 wave程度であるものの、その改善についての検討を行い、改善方法の指針を示した。

文 献

- 1) D. Malacara: *Optical Shop Testing*, 2nd ed. (John Wiley & Sons, New York, 1992) pp. 501-598.
- 2) Y. Ichioka and M. Inuiya: "Direct phase detecting system," *Appl. Opt.*, **11** (1972) 1507-1514.
- 3) 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.
- 4) 新井泰彦, 横関俊介, 山田朝治: "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", *光学*, **23** (1994) 584-589.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) W. W. Macy, Jr.: "Two-dimensional fringe-pattern analysis," *Appl. Opt.*, **22** (1983) 3898-3901.