2 ステップ・フーリエ変換法による縞画像解析法の提案*

神谷和秀** 松本公久** 野村 俊** 田代発造*** 鈴木伸哉†

Fringe Pattern Analysis Using Two-step Fourier Transform Method

Kazuhide KAMIYA, Kimihisa MATSUMOTO, Takashi NOMURA, Hatsuzo TASHIRO and Shinya SUZUKI

The Fourier transform method is a method of analysis to extract a phase from a fringe pattern. However, when noise and shape components overlap each other in the Fourier domain, it is difficult to eliminate only the overlapped noise components using conventional filtering techniques, such as bandpass filtering. In this paper, to solve this problem of the filter, the two-step Fourier transform method is proposed by using two interferograms with slightly different carrier frequencies. The proposed method has been applied to the grating projection method using gratings with different colors according to the carrier frequency and the validity of the proposed method was investigated.

Key words: Fourier transform method, phase shift method, profilometry, fringe analysis, interferometer

1. 緒 言

工業製品の三次元形状を高精度、かつ、高速に測定する必要から、光を用いた非接触測定法の研究^{1)~9)}が数多く行われている。その中でも、光波干渉法や格子投影法は、測定対象の高さ情報を干渉縞や変形格子としてエンコードし、測定面の形状情報を縞パターンとして一度に取得できることから、測定時における測定対象の拘束時間が短く、近年では動的な測定が可能な装置の開発なども行われている。ただし、このような縞パターンを取得する方法では、測定対象の高さ情報を得るために、縞パターンを解析（デコード）して位相情報を抽出する必要がある。この縞パターンの解析には、多くの場合、位相シフト法¹⁰⁾、あるいは、フーリエ変換法¹¹⁾¹²⁾が利用されている。

前者の位相シフト法は、縞パターンの強度が 3 つの変数（バイアス、コントラスト、位相）を含む方程式で表せることに着目し、条件を変えて取得した 3 つの縞パターンを用いて連立方程式を解き、位相を算出する方法が基礎となっている。位相の抽出計算は簡単であるが、以下の点で問題がある。例えば、フーリエ干渉縞を解析する場合、複数の縞パターンを得る方法として、参照面を PZT アクチュエータなどで機械的に微動させることがある。ここで、参照面を移動中に振動や空気のゆらぎなどの外乱が生じると、干渉縞にランダムなノイズが含まれてしまい、連立方程式を解いた結果に大きな誤差が生じて高精度な位相解析を行うことができない。また、縞パターンの位相シフト量に誤差があっても解析結果に悪影響を与える。測定対象が時々刻々と変化する場合にも同様の理由から通常の位相シフト法では対応が難しい。そのため、4 枚以上の縞パターンを使った解析アルゴリズムの研究^{13)~15)}が精力的に行われた。また、これらの問題は、複数の縞パターンを必要とすることが主たる原因であるため、光学系の工夫¹⁶⁾や回折格子などの光学素子を撮像素子と組み合わせた特殊なハードウェアを開発¹⁷⁾¹⁸⁾して初期位相の異なる干渉縞を同時に取得する方法などが各種提案さ

れている。

一方、後者のフーリエ変換法は、単一の縞パターンから位相を解析することのできる簡便な方法である。対象となる縞パターンを得るには、例えば、格子投影法の場合、等間隔の直線格子を測定物体に斜め方向から投影し、物体の正面から変形格子画像を撮影するだけで良い。また、光波干渉法においても、参照面に傾きを与えることで、フーリエ変換法で解析を行うことの可能な干渉縞を得ることができる。フーリエ変換法による解析では、これらの縞パターンをフーリエ変換し、空間周波数領域でバンドパスフィルタを用いたノイズ除去が行われる。ここで、これまでフーリエ解析法でノイズと考えられてきたのは、光源のムラに起因するような低周波成分であった。したがって、例えば、物体表面の反射率分布に空間キャリア周波数と同程度のムラが存在するような場合、これまでに提案されてきたフィルタ¹⁹⁾²⁰⁾ではノイズを除去することが難しい。光学系の制約などから、空間キャリア周波数を自由に設定することができないこともあるため、フーリエ変換法の適用範囲を拡大するには、新しいフィルタリング手法が必要とされている。

本論文では、フーリエ変換法において、空間キャリア周波数がわずかに異なる 2 枚の縞パターンを用いることで、空間キャリア周波数周辺に存在するノイズ成分であっても、経験則などを用いることなく除去する手法を提案する。本手法では 2 枚の縞パターンを用いることから、以後、提案手法のことを 2 ステップ・フーリエ変換法と呼ぶ。また、2 ステップ・フーリエ変換法では、スペクトルの差分処理を行うことによって、うなりの影響が生じるため、その理論と対策についても明らかにする。そして、提案手法の有効性について、シミュレーションと実験によって検討を行う。

2. フーリエ変換法¹¹⁾¹²⁾

2 ステップ・フーリエ変換法の原理を説明するには、その基礎となるフーリエ変換法の理解が必要不可欠である。そこで、まず、フーリエ変換法の概略について説明を行う。

格子投影法によって得られる変形格子やティルトが与えられた干渉縞の強度分布を $g(x, y)$ とすれば、

$$g(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_0 x + \phi(x, y)] \quad (1)$$

* 原稿受付 平成 26 年 9 月 8 日

掲載決定 平成 27 年 1 月 29 日

** 正 会 員 富山県立大学工学部（富山県射水市黒河 5180）

*** 正 会 員 富山大学（富山市五福 3190）

† 正 会 員 長野工業高等専門学校（長野市徳間 716）

と表すことができる。ここで、 x と y は測定面上の座標を表しており、 $0 \leq x \leq 1$, $0 \leq y \leq 1$ とする。 $a(x, y)$ と $b(x, y)$ は光源のムラや測定面あるいは参照面などの反射率や透過率などの不均一性によって生じる揺らぎを表している。また、 f_0 は空間キャリア周波数を表し、 $\cos$ 関数の中の $2\pi f_0 x$ は空間キャリア縞の位相、そして、 $\varphi(x, y)$ は測定面の形状に対応した位相である。一般的に空間キャリア周波数は単位長さ当たりの明暗の変化の回数で定義されことから単位は m^{-1} で表されるが、本論文では、単位長さとして撮像された画像の範囲 ($0 \leq x \leq 1$, $0 \leq y \leq 1$) をフレーム(Frame)と呼び、その範囲内に生じた縞の本数(line)を用いて、単位には line/frame を用いる。

さて、式(1)は、ド・モアブルの公式を適用すれば、

$$g(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp(2\pi i f_0 x) + c^*(x, y) \exp(-2\pi i f_0 x) \quad (2)$$

と書き換えることができる。ここで、 $*$ は複素共役を表し、 $c(x, y)$ は、

$$c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) \exp[i\varphi(x, y)] \quad (3)$$

である。つぎに、 $g(x, y)$ をフーリエ変換すると

$$G(f_x, f_y) = A(f_x, f_y) + C(f_x - f_0, f_y) + C^*(f_x + f_0, f_y) \quad (4)$$

を得る。空間キャリア周波数 f_0 を適切に設定した縞画像をフーリエ変換した場合、理論上は図1に示すパワースペクトルのように、空間周波数領域ではノイズとなるバイアス成分 $A(f_x, f_y)$ の項が形状の情報を持った $C(f_x - f_0, f_y)$ あるいは $C^*(f_x + f_0, f_y)$ の項と分離される。したがって、バンドパスフィルタでノイズを容易に除去することができる。ただし、この図は説明を簡単にするため、縞パターンを x 軸上の 1 ラインでフーリエ変換した結果をモデルとして示したものである。

そして、ノイズから分離された形状成分が得られた後は、例えば、 $C(f_x - f_0, f_y)$ を原点に向かって f_0 だけ平行移動し、空間キャリア成分を除去して、逆フーリエ変換することで

$$g(x, y) = c(x, y) \quad (5)$$

が得られる。得られた $g(x, y)$ は複素数で、この偏角を求めれば、形状に対応した位相 $\varphi(x)$ を算出することができる。なお、 $C(f_x - f_0, f_y)$ を選択せず、 $C^*(f_x + f_0, f_y)$ を選んだ場合は、結果の凹凸が逆転する。

3. 2ステップ・フーリエ変換法

3.1 基本概念

前節で述べたフーリエ変換法では、空間周波数領域で形状成分とノイズ成分が分離されると述べた。しかしながら、測定物体表面に周期的な反射率あるいは透過率の変動があり、それが空間キャリア縞の方向および空間周波数とほぼ等しい場合、フーリエ変換しても形状成分とノイズ成分は空間周波数領域で重なり合い、単純なバンドパスフィルタでは分離することができない。

一方、このノイズは、周期的ではあっても変化することはないため、バイアス成分 $A(f_x, f_y)$ に含まれることになる。したがって、干渉縞の空間キャリア周波数を変化させても空間周波数領域での分布は変わらない。

Fig. 1 Fourier spectra model of a fringe pattern with carrier frequency f_0

Fig. 2 Fourier spectra model of a fringe pattern with carrier frequency f_0 and f_1

そこで、わずかに空間キャリア周波数の異なる 2 つの縞パターンをフーリエ変換し、その差分を取るだけの簡単な処理によって、ノイズを除去する方法の提案を行う。この方法では、バンドパスフィルタの空間周波数帯域の上限と下限を決める必要もないため、簡便な方法となる。

3.2 理論

空間キャリア周波数が f_0 と f_1 の 2 つの縞パターンの強度分布は、次のように表すことができる。

$$g_0(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_0 x + \varphi(x, y)] \quad (6)$$

$$g_1(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_1 x + \varphi(x, y)] \quad (7)$$

通常のフーリエ変換法にならって、これらをフーリエ変換すれば、

$$G_0(f_x, f_y) = A(f_x, f_y) + C(f_x - f_0, f_y) + C^*(f_x + f_0, f_y) \quad (8)$$

$$G_1(f_x, f_y) = A(f_x, f_y) + C(f_x - f_1, f_y) + C^*(f_x + f_1, f_y) \quad (9)$$

となる。空間キャリア周波数の周辺に存在する周期的なノイズは、このモデルでは、共通するバイアス成分 $A(f_x, f_y)$ の中に含まれる。図2は、空間キャリア周波数に近接する空間周波数の周期的ノイズが含まれる場合に、空間キャリア周波数がわずかに異なる干渉縞をフーリエ変換したスペクトルのモデルを示している。ただし、説明を簡単にするため、空間周波数が負の部分を省略している。

このモデルでは、図中の点線の楕円で示した部分にノイズが含まれている。この誤差となる成分は共通するバイアス成分 $A(f_x, f_y)$ の中に等しく含まれているので、これらの差を取れば、

$$G_0(f_x, f_y) - G_1(f_x, f_y) = \{C(f_x - f_0, f_y) - C(f_x - f_1, f_y)\} + \{C^*(f_x + f_0, f_y) - C^*(f_x + f_1, f_y)\} \quad (10)$$

となり、不要な成分を簡単に除去することができる。図3は、図2で示したスペクトルの差分スペクトルの例を示している。また、両辺を空間キャリア周波数の差 $(f_0 - f_1)$ で割れば

$$\frac{G_0(f_x, f_y) - G_1(f_x, f_y)}{f_0 - f_1} = \frac{\{C(f_x - f_0, f_y) - C(f_x - f_1, f_y)\}}{f_0 - f_1} + \frac{\{C^*(f_x + f_0, f_y) - C^*(f_x + f_1, f_y)\}}{f_0 - f_1} \quad (11)$$

となるが、空間キャリア周波数 f_0 と f_1 の差が小さい場合、差分を微分とみなすことができ、

$$\frac{\partial}{\partial f} G_0(f_x, f_y) = \frac{\partial}{\partial f} C(f_x - f_0, f_y) + \frac{\partial}{\partial f} C^*(f_x + f_0, f_y) \quad (12)$$

のように書き換えることができる。ここで、実数関数のフーリエスペクトルはエルミート関数（実部が偶関数、虚部が奇関数）になることがわかっており、さらに、この式の右辺にある2つの項は、空間周波数領域で正と負の領域に分離して存在していることから、簡単に一方を選択することができる。つまり、たとえば、

$$\frac{\partial}{\partial f} G_0(f_x, f_y) = \frac{\partial}{\partial f} C(f_x - f_0, f_y) \quad (13)$$

を容易に得ることができる。この両辺を積分すれば、以降の処理は、通常のフーリエ変換法と同様に、空間キャリア成分の除去のために空間キャリア周波数 f_0 だけ原点に向かってスペクトルを移動し、逆フーリエ変換すること、

$$g_0(x, y) = c(x, y) \quad (14)$$

が得られ、偏角を求めることで、形状に関する位相を算出することができる。

3.3 積分と位相の関係

2ステップ・フーリエ変換法では、空間キャリア周波数がわずかに異なる2枚の縞画像のフーリエスペクトルを差分処理している。前述した理論の記述では、これを微分処理であると考え、積分を行って形状成分を含む成分を求めている。しかし、この積分処理は、縞解析における位相の算出処理に対しては不要である。

以下に、その理由を明らかにする。

まず、フーリエ変換は、一般に次の式で定義されている。

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \exp(-i 2\pi f x) dx \quad (15)$$

ここで、直交基底関数は $\exp(-i 2\pi f x)$ であり、変換結果の $F(f)$ は複素数となる。したがって、 $F(f)$ の偏角 θ を求めるには、

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}[F(f)]}{\text{Re}[F(f)]} \right) \quad (16)$$

を計算することになる。ここで、 $\text{Re}[Z]$ は Z の実部を取る関数であり、また、 $\text{Im}[Z]$ は虚部を取る関数である。

つぎに、 $F(f)$ を f で微分した $F'(f)$ について考える。 $F'(f)$ の基底関数は、 $F(f)$ の基底関数を f で微分したもので、 $-i 2\pi x \exp(-i 2\pi f x)$ となる。これは、先の基底関数と比較すると、

Fig. 3 Difference Fourier spectra obtained by subtracting $G_0(f_x, f_y)$ from $G_1(f_x, f_y)$

$-i 2\pi x$ 倍されたものとなっている。この基底関数は f の関数であるので、 x は定数となる。重要なのは $-i$ 倍の部分で、これは物理的には偏角を $\pi/2$ rad だけ遅らせることと等価である。

ここで、干渉縞を解析して位相を求める場合、通常、絶対的な位相を求める必要はなく、相対的な位相を求めることになる。したがって、スペクトルが微分されたことで、全体的に位相が等しく遅れたとしても、相対的な位相に注目していれば、解析結果には何の影響も生じない。

以上の理由から、スペクトルの差分によって微分されたスペクトルを積分することなく、通常のフーリエ変換法の手順で解析した場合であっても目的の位相を求めることができる。このことは、計算時間の短縮につながり、工業的な応用において有益である。

3.4 うなりによる位相反転

2ステップ・フーリエ変換法では、空間周波数領域でスペクトルの差分処理を行い、不要なノイズ成分を除去している。しかしながら、この処理を行うことで、同時に、空間的なうなりによる望まれない位相反転を引き起こすことになる。ここでは、望まれない位相反転の発生原理について述べ、その性質を利用した回避方法について提案をする。

周波数のわずかに異なる波を足し合わせるとうなりが生じることは、音波の例などで良く知られている。例えば、周波数 $(f - \Delta f/2)$ のsin波を w_1 とし、同様に、周波数 $(f + \Delta f/2)$ のsin波を w_2 とする。また、 w_1 と w_2 の位相差を p とすれば、

$$w_1 = \sin \left[2\pi \left(f - \frac{\Delta f}{2} \right) x - \frac{p}{2} \right] \quad (17)$$

$$w_2 = \sin \left[2\pi \left(f + \frac{\Delta f}{2} \right) x + \frac{p}{2} \right] \quad (18)$$

とできる。通常、うなりは波を足し合わせることで生じるが、2ステップ・フーリエ変換法では、差分によってうなりが生じることを考慮し、次の式を得る。

$$\begin{aligned} w_1 - w_2 &= \sin \left[2\pi \left(f - \frac{\Delta f}{2} \right) x - \frac{p}{2} \right] \\ &\quad - \sin \left[2\pi \left(f + \frac{\Delta f}{2} \right) x + \frac{p}{2} \right] \\ &= -2 \cos[2\pi f x] \sin \left[\pi \Delta f x + \frac{p}{2} \right] \end{aligned} \quad (19)$$

この合成波は、 $\cos[2\pi f x]$ が基本波となり、 $\sin[\pi \Delta f x + p/2]$ が

うなりの包絡線となる。また、このうなりは、 $0 < x < 1$ の区間において、 Δf 個の腹と節を持ち、これらは等間隔に並ぶ。ただし、位相差 p の値によっては、腹や節の位置が区間の端に生じることがあるが、その場合は、両端の腹、あるいは、節をまとめて1つと数える。そして、この節の部分では、合成波の位相が反転する。これが望まれない位相反転の原因となる。この結果から、空間周波数差のある2つの縞パターンの差分を計算する2ステップ・フーリエ変換法では、 $\Delta f \neq 0$ であることから、うなりが必ず生じることがわかる。

そこで、望まれない位相反転の問題を解決する方法として、

Fig. 4 Position of the nodes of the beat signal

Fig. 5 Beat signal removed nodes by proposed method

Fig. 6 Phase of model shape

Fig. 7 Intensity distribution of fringe pattern with carrier frequency $f_0 = 60$ and $f_1 = 65$

位相反転が節の部分でのみ生じることを考慮し、 $0 < x < 1$ の区間の中にうなりの節が生じないようにすることを提案する。

例えば、 $f = 20$, $\Delta f = 1$, $p = 0$ の場合、うなりの節は、図4のように区間の両端で破線の丸で示した部分に位置し、この2つの節の位置で位相の反転が生じる。そこで、具体的な対策として、まず、空間周波数差を $\Delta f < 1$ 、ここでは、0.5とすることで、 $x = 1$ で生じていた節を範囲外に追い出し、つぎに、 $x = 0$ で生じる節は、初期位相を $p = -\pi/2$ とすることで同様に範囲外に追い出す。図5は、前述の条件によって、うなりの節が解析範囲外に追い出された様子を示している。

以降、本論文では、望まれない位相反転の対策として、空間キャリア周波数差を1以下にして、位相差を与える方法を用いることとする。

また、空間周波数差を1以下にした場合、解析に離散フーリエ変換を用いていることから、離散化による影響で空間キャリア周波数 f_0 と f_1 の選び方により縞パターンのスペクトル分布が変化し、スペクトルの差分による微分処理に誤差が生じる。ただし、このスペクトル分布の変化は系統的である。そこで、空間キャリア周波数 f_0 と f_1 の縞パターンのスペクトルが等しく変化するように、空間キャリア周波数 f_0 と f_1 を $f_0 = f - \Delta f/2$, $f_1 = f + \Delta f/2$ で算出した。ただし、 f の選定は整数値となるように行い、 $\Delta f = f_1 - f_0$ である。

4. シミュレーション

本論文で提案する2ステップ・フーリエ変換法の有効性を確認するため、次の手順でシミュレーションを行った。

まずはじめに、図6に示すモデル形状（位相分布）について、

Fig. 8 Fourier spectra model of a fringe pattern with carrier frequency f_0 and f_1

Fig. 9 Difference Fourier spectra obtained by subtracting $G_0(f_x, f_y)$ from $G_1(f_x, f_y)$

Fig. 10 Phase distribution with undesired phase inversion

Fig. 11 Comparison between phase distribution obtained by proposed method and ideal one

空間キャリア周波数を 60 line/frame と 65 line/frame に設定した縞パターンをデータ数 1024 で生成した。ここでは、うなりによる望まれない位相反転を確認するため、意図的に空間周波数差を 1 以上 ($\Delta f = 5$)、位相差 $p = 0$ rad に設定している。生成した縞パターンを図 7 に示す。点線は空間キャリア周波数が 60 line/frame の縞パターン、実線は空間キャリア周波数が 65 line/frame の縞パターンである。

つぎに、これらをフーリエ変換したそれぞれのパワースペクトルを図 8 に示す。点線は空間キャリア周波数が 60 line/frame のパワースペクトル、実線は空間キャリア周波数が 65 line/frame のものである。図 9 は、これらのスペクトルを差分したパワースペクトルであり、両者に共通するバイアス成分が除去されていることが確認できる。そして、これを空間周波数軸上で原点に移動し、逆フーリエ変換、偏角の算出を行ったものが図 10 である。2 π rad の位相飛びについては、位相接続処理で正しく位相接続が行われているが、望まれない位相反転である π の位相飛び (図中の点線の楕円部分) が残っていることが確認できる。また、その位置、および、個数が理論通りであることも確認できる。最後に、空間キャリア周波数を 60 line/frame と 60.5 line/frame、つまり、空間周波数差を 0.5 line/frame に設定し、位相差を $-\pi/2$ rad とした場合の縞パターンを解析した結果を図 11 に示す。望まない位相反転が除去され、モデル形状と解析結果が良く一致することを確認した。

5. 実験

シミュレーションでは、提案手法の確認を行うため、ノイズ

Fig. 12 Photograph of surface under test with noise pattern

Fig. 13 The optical system to acquire color deformation fringe pattern

を含まないデータを解析した。ここでは、従来のフーリエ変換法で利用される単純なバンドパスフィルタでは取り除くことが難しいノイズとして、空間キャリア周波数周辺に生じる周期的なバイアス成分を実験的に再現し、提案手法の有効性を確認する。

5.1 測定対象とノイズの付加方法

実験では、測定対象として、球状の物体を選定した。サイズは直径が 90 mm、表面には測定面を拡散表面にするため、つや消し塗装を行っている。また、球状の物体に周期的なバイアス成分を付加するため、正弦波パターンを印刷したシートを準備し、これを測定対象の表面に張り付けた。図 12 は、球状の物体に正弦波パターンを印刷したシートを貼り、物体の斜め方向から照明して物体の正面から撮影した画像である。正弦波パターンの周期は、格子投影法で物体に投影する格子のピッチと一致するように調整している。

5.2 測定装置

図 13 は格子投影法によって測定を行うための光学系である。光学系は、物体の正面に CCD カメラを置き、格子は斜め方向から投影している。格子の投影は、RGB がそれぞれ 1,024 pixel ×

Fig. 14 Acquired color deformation fringe pattern with noise

(a) Fourier spectra of a red fringe pattern

(b) Fourier spectra of a blue fringe pattern

(c) Difference Fourier spectra

Fig. 15 Fourier spectra of a fringe pattern

768 pixel の空間分解能で 256 階調の液晶プロジェクタを用いて行った。物体に投影した格子は、空間キャリア周波数を 70.25 line/frame と 69.75 line/frame に設定し、それぞれ赤のプレーンと青のプレーンに重ねて投影した。プロジェクタと物体は 1,070 mm, CCD カメラと物体は 1,170 mm の間隔を離して配置した。画像を撮影する CCD カメラは、1,024 pixel × 768 pixel の空間分解能で 256 階調の 3 板式カラーデジタルカメラを用いた。

5.3 実験と結果

投影された格子を撮影したカラー画像を図 14 に示す。本実験では、プロジェクタの投影エリアに対して、CCD カメラの撮影

(a) Wrapped phase distribution of surface under test

(b) Unwrapped phase distribution of surface under test

(c) Bird's-eye view of surface under test

Fig. 16 Results of proposed method

Fig. 17 Comparison between phase distribution obtained by proposed the method and the ordinary Fourier transform method

領域が狭いため、この画像には、約 45 line/frame の縞パターンとして 2 色の変形格子が撮影されている。この画像から、赤と青のプレーンを抜き出して色分解し、その後、フーリエ変換、

スペクトルの差分処理を行ったパワースペクトルを図15に示す。ただし、このスペクトルは、形状成分を確認しやすいようにスペクトル全域ではなく、正の空間キャリア周波数周辺を拡大表示している。(a)と(b)は色分解した縞画像のパワースペクトル、(c)はスペクトルを差分したパワースペクトルである。(c)のパワースペクトルでは空間キャリア周波数周辺に存在する周期的なノイズ成分が除去されていることは目視では確認できない。しかし、空間キャリア成分を除去するためのスペクトルの移動を行い、逆フーリエ変換して、偏角を求めたところ、図16の結果を得た。ここで、図16(a)はラップされた位相解析結果である。この位相分布には 2π の位相飛びが生じているので、測定対象の中央部を基準として、まず上下に位相接続し、次に左右に位相接続をした結果が図16(b)である。また、(c)は格子投影法の理論²¹⁾に従って、位相情報を高さ情報に変換した鳥瞰図である。この結果から、空間キャリア周波数近傍に存在するノイズ成分は除去されていることが確認できる。なお、鳥瞰図では、測定対象物以外の領域をマスク処理によって除去している。比較のため、図14の画像の矢印で示されたライン上の輝度分布について、通常のフーリエ変換法でも解析を行った。結果を図17に示す。通常の方法では、測定面に張り付けた周期的な濃淡によって生じたノイズが除去できず、正しい結果を得ることができていないことが確認できた。

6. 結 言

本研究では、次のような結果を得た。

- 1) フーリエ変換法で従来考慮されていなかった空間キャリア周波数周辺に存在するノイズ成分を除去するため、空間キャリア周波数がわずかに異なる2枚の縞パターンを差分することで、ノイズ除去を行う2ステップ・フーリエ変換法を提案した。
- 2) スペクトルの差分によってうなりが生じ、それが望まれない π radの位相とびを生じさせることを理論的に示した。また、その回避策として、2枚の縞パターンの空間周波数差を1 line/frame以下、位相差を $-\pi/2$ とすることを提案した。
- 3) シミュレーションによってうなりに対する対策の有効性を示し、また、格子投影法によって得た実際の縞パターンを提案手法と従来法で解析し、比較することで提案手法のノイズに対する有効性を示した。

参 考 文 献

- 1) David Y. Lou, A. Martinez, and D. Stanton : Surface profile measurement with a dual-beam optical system, *Applied Optics*, **23**, 5 (1984) 746.
- 2) Gerd Häusler, Werner Heckel : Light sectioning with large depth and high resolution, *Applied Optics*, **27**, 24 (1988) 5165.
- 3) 高崎宏 : 日本のモアレ研究, *応用物理*, **51**, 5 (1982) 535.
- 4) 吉澤徹, 大谷 幸利 : サブミクロン感度をもつモアレトポグラフィ法, *精密工学会誌*, **55**, 1 (1989) 152.
- 5) 鈴木賢策, 吉澤徹 : 格子パターン投影による三次元形状の自動測定, *精密工学会誌*, **53**, 3 (1987) 422.
- 6) 小松原 良平, 片瀬 和伸, 吉澤 徹 : 縞走査を導入した格子パターン投影法 (第2報) 正弦格子の利用, *精密工学会誌*, **58**, 7 (1992) 1173.
- 7) 田島譲二, 岩川正人 : Rainbow Range Finderによる距離画像取得, *電子情報通信学会論文誌 D-2 情報・システム*, **73**, 3 (1990) 374.
- 8) 石原満宏, 佐々木博美 : 合焦法による高速三次元形状計測, *精密工学会誌*, **63**, 1 (1997) 124.
- 9) Akira Hirabayashi, Hidemitsu Ogawa, Katsuichi Kitagawa : Fast surface profiler by white-light interferometry using a new algorithm, the SEST algorithm, *Proc. SPIE 4451, Optical Manufacturing and Testing IV* (2001) 356.
- 10) 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, *Applied Optics*, **13**, 11 (1974) 2693.
- 11) 武田光夫 : フーリエ変換法によるしま画像解析とその応用, *応用物理*, **62**, 6 (1993) 579.
- 12) Mitsuo Takeda, Hideki Ina, and Seiji Kobayashi : Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry, *JOSA*, **72**, 1 (1982) 156.
- 13) P. Carré : Installation et utilisation du comparateur photoélectrique et interférentiel du Bureau International des Poids et Mesures, *Metrologia*, **2**, 1 (1966) 13.
- 14) Johannes Schwider, Oliver R. Falkenstoerfer, Horst Schreiber, Andreas Zoeller, Norbert Streibl : New compensating four-phase algorithm for phase-shift interferometry, *Opt. Eng.*, **32**, 8 (1993) 1883.
- 15) Hariharan P. : Digital phase-stepping interferometry: effects of multiply reflected beams, *Applied Optics*, **26**, 13 (1987) 2506.
- 16) Andrea Hettwer, Jochen Kranz, Johannes Schwider : Three channel phase-shifting interferometer using polarization-optics and a diffraction grating, *Opt. Eng.*, **39**, 4 (2000) 960.
- 17) R. Smythe, R. Moore : Instantaneous Phase Measuring Interferometry, *Opt. Eng.*, **23**, 4 (1984) 361.
- 18) James E. Miller, Neal J. Brock, John B. Hayes, Michael B. North-Morris, Matt Novak, James C. Wyant : Pixelated phase-mask dynamic interferometer, *Proc. SPIE 5531, Interferometry XII: Techniques and Analysis* (2004) 304.
- 19) Guanming Lai, Toyohiko Yatagai : Use of the fast Fourier transform method for analyzing linear and equispaced Fizeau fringes, *Applied Optics*, **33**, 25 (1994) 5935.
- 20) V. Srinivasan, H. C. Liu, M. Halioua : Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects, *Applied Optics*, **23**, 18 (1984) 3105.
- 21) Daniel Malacara, Manuel Servin, Zacarias Malacara : *Interferogram Analysis for Optical Testing Second Edition*, CRC Press(2005) 34.