

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4583619号  
(P4583619)

(45) 発行日 平成22年11月17日(2010.11.17)

(24) 登録日 平成22年9月10日(2010.9.10)

(51) Int.Cl.	F I
GO 1 B 11/24 (2006.01)	GO 1 B 11/24 D
GO 1 B 11/00 (2006.01)	GO 1 B 11/00 G
GO 1 B 11/26 (2006.01)	GO 1 B 11/26 G
GO 1 B 9/02 (2006.01)	GO 1 B 9/02

請求項の数 5 (全 24 頁)

(21) 出願番号	特願2001-22633 (P2001-22633)	(73) 特許権者	306037311
(22) 出願日	平成13年1月31日(2001.1.31)		富士フイルム株式会社
(65) 公開番号	特開2002-162205 (P2002-162205A)		東京都港区西麻布2丁目26番30号
(43) 公開日	平成14年6月7日(2002.6.7)	(74) 代理人	100075281
審査請求日	平成19年11月19日(2007.11.19)		弁理士 小林 和憲
(31) 優先権主張番号	特願2000-277444 (P2000-277444)	(72) 発明者	▲葛▼ 宗濤
(32) 優先日	平成12年9月13日(2000.9.13)		埼玉県大宮市植竹町1丁目324番地 富士写真光機株式会社内
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		
		審査官	八島 剛
		(56) 参考文献	特開平04-264205 (JP, A)
			特開平07-083637 (JP, A)
			特開平09-250907 (JP, A)
			特開昭61-230002 (JP, A)
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 縞画像解析誤差検出方法および縞画像解析誤差補正方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

位相シフト素子を用いて、被観察体と基準とを相対的に位相シフトせしめ、縞画像解析により被観察体の波面を求める方法において、

位相シフト前後の前記被観察体の波面情報を担持した、キャリア縞が重畳された2つのキャリア縞画像データにフーリエ変換を施しキャリア縞の複素振幅を求め、2つの該複素振幅に基づき前記位相シフト素子の位置の演算を行って、前記位相シフト素子の変位誤差を含んだ位相シフト量を検出することを特徴とする縞画像解析誤差検出方法。

【請求項2】

位相シフト素子を用いて、被観察体と基準とを相対的に位相シフトせしめ、縞画像解析により被観察体の波面を求める方法において、

位相シフト前後の前記被観察体の波面情報を担持した、キャリア縞が重畳された2つのキャリア縞画像データにフーリエ変換を施しキャリア周波数および複素振幅を求め、2つの該キャリア周波数および2つの該複素振幅に基づき前記位相シフト素子の位置の演算を行って、前記位相シフトにより発生した前記被観察体と前記基準との相対的な傾き量および前記位相シフト素子の変位誤差を含んだ位相シフト量を検出することを特徴とする縞画像解析誤差検出方法。

【請求項3】

前記縞画像が干渉縞画像であることを特徴とする請求項1または2記載の縞画像解析誤差検出方法。

10

20

## 【請求項 4】

請求項 1 記載の縞画像解析誤差検出方法において、前記検出が行われた後、前記キャリア縞画像データの縞画像解析において、該検出された前記位相シフト素子の変位誤差を含んだ位相シフト量を補正する補正演算を行うことを特徴とする縞画像解析誤差補正方法。

## 【請求項 5】

請求項 2 記載の縞画像解析誤差検出方法において、前記検出が行われた後、前記キャリア縞画像データの縞画像解析において、該検出された前記位相シフトにより発生した前記被観察体と前記基準との相対的な傾き量および前記位相シフト素子の変位誤差を含んだ位相シフト量を補正する補正演算を行うことを特徴とする縞画像解析誤差補正方法。

## 【発明の詳細な説明】

10

## 【0001】

## 【発明の属する技術分野】

本発明は、位相シフト法を用いて縞画像を解析する際における、フーリエ変換を用いた縞画像解析誤差検出方法および縞画像解析誤差補正方法に関し、特に、PZT（ピエゾ素子）を用いて位相をシフトさせ、得られた、干渉縞等の縞パターンを有する画像データを解析する際にフーリエ変換を利用し、その解析値をより高精度なものとし得る縞画像解析誤差検出方法および縞画像解析誤差補正方法に関するものである。

## 【0002】

## 【従来の技術】

従来より、物体表面の精密測定に関する重要な手段として、例えば光波干渉法が知られているが、近年1/10波長以上の面精度や波面収差を計測することの必要性から1干渉縞（1フリンジ）以下の情報を読み取る干渉計測法（サブフリンジ干渉計測法）の開発が急務である。

20

## 【0003】

このようなサブフリンジ干渉計測法として、代表的な技術であり広く実用されているものに、例えば、「PROGRESS IN OPTICS」VOL XXVI（1988年）第349頁～第393頁の「PHASE-MEASUREMENT INTERFEROMETRY TECHNIQUES」に記載されている位相シフト縞解析法（縞走査法あるいは位相走査法とも称される）がある。

## 【0004】

30

位相シフト法においては、例えばPZT（ピエゾ）素子の如き位相シフト素子を用いて、被観察体と基準との相対関係を位相シフトさせて、所定のステップ量をシフトする毎に干渉縞画像データを取り込んで被検面の各点の干渉縞強度を測定し、この測定結果を用いて被検面の各点の位相を求める。

## 【0005】

例えば、4ステップの位相シフト法を行う場合、各位相シフトステップにおける干渉縞強度 $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $I_4$ は、以下のように表わされる。

## 【0006】

## 【数 1】

$$\begin{aligned}
 I_1(x, y) &= I_0(x, y)(1 + \gamma(x, y) \cos(\phi(x, y))) \\
 I_2(x, y) &= I_0(x, y)(1 + \gamma(x, y) \cos(\phi(x, y) + \pi/2)) \\
 I_3(x, y) &= I_0(x, y)(1 + \gamma(x, y) \cos(\phi(x, y) + \pi)) \\
 I_4(x, y) &= I_0(x, y)(1 + \gamma(x, y) \cos(\phi(x, y) + 3\pi/2))
 \end{aligned}
 \dots\dots (1)$$

ただし、 $x, y$  は座標、

$\phi(x, y)$  は位相、

$I_0(x, y)$  は各点での平均光強度、

$\gamma(x, y)$  は干渉縞のモジュレーションを各々表わす。

10

【 0 0 0 7 】

これらの式から位相  $(x, y)$  を求めると、

【 0 0 0 8 】

【 数 2 】

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \dots\dots (2)$$

20

と表わすことができる。

【 0 0 0 9 】

位相シフト法は、所定ステップ量を正確にシフトできれば、非常に精度の高い測定が可能であるが、ステップ量の誤差に伴う測定誤差問題や複数の干渉縞画像データを必要とするため計測中の外乱に影響されやすいという問題がある。

【 0 0 1 0 】

位相シフト法以外のサブフリンジ干渉計測法として、例えば、「光学」第13巻第1号（1984年2月）第55頁～第65頁の「サブフリンジ干渉計測基礎論」に記載されている如くフーリエ変換法を用いた技術が注目されている。

30

【 0 0 1 1 】

フーリエ変換縞解析法はキャリア周波数（被観察体表面と基準面との間の相対的傾斜による）を導入することにより、1枚の縞画像から高精度に被観察体の位相を求めることを可能とする手法である。キャリア周波数を導入し、物体の初期位相を考えないと、干渉縞強度  $i(x, y)$  は次式（3）で表される。

【 0 0 1 2 】

【 数 3 】

$$i(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \phi(x, y)) \quad \dots\dots (3)$$

ただし、 $a(x, y)$  は干渉縞のバックグラウンド、

$b(x, y)$  は縞のビジビリティ、

$\phi(x, y)$  は被観察体の位相、

$f_x, f_y$  は  $x$ 、 $y$  方向のキャリア周波数である。

10

$$f_x = \frac{2 \cdot \tan \theta_x}{\lambda}, \quad f_y = \frac{2 \cdot \tan \theta_y}{\lambda}$$

ただし、 $\lambda$  は光の波長、 $\theta_x$  と  $\theta_y$  は被観察面の  $x$ 、 $y$  方向の傾きである。

【 0 0 1 3 】

上式 (3) は下式 (4) のように変形できる。

【 0 0 1 4 】

【 数 4 】

20

$$i(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp[i(2\pi f_x x + 2\pi f_y y)] + c^*(x, y) \exp[i(2\pi f_x x + 2\pi f_y y)] \quad \dots\dots (4)$$

ただし、 $c(x, y)$  は干渉縞の複素振幅で、 $c^*(x, y)$  は  $c(x, y)$  の共役である。

【 0 0 1 5 】

なお、 $c(x, y)$  は下式 (5) のように表される。

【 0 0 1 6 】

【 数 5 】

30

$$c(x, y) = \frac{b(x, y) \exp[i \phi(x, y)]}{2} \quad \dots\dots (5)$$

【 0 0 1 7 】

上式 (4) をフーリエ変換すると、下式 (6) が得られる。

【 0 0 1 8 】

【 数 6 】

$$I(\eta, \zeta) = A(\eta, \zeta) + C(\eta - f_x, \zeta - f_y) + C^*(\eta - f_x, \zeta - f_y) \quad \dots\dots (6)$$

40

ただし、 $A(\eta, \zeta)$  は  $a(x, y)$  のフーリエ変換で、 $C(\eta - f_x, \zeta - f_y)$  と  $C^*(\eta - f_x, \zeta - f_y)$  はそれぞれ  $c(x, y)$  と  $c^*(x, y)$  のフーリエ変換である。

【 0 0 1 9 】

次に、フィルタリングによって  $C(-f_x, -f_y)$  を取り出し、座標  $(f_x, f_y)$  に位置するスペクトルのピークを周波数座標系 (フーリエ・スペクトル座標系とも称する; 図 6 参照) の原点に移し、キャリア周波数を除去する。次に、逆フーリエ変換し  $c(x, y)$  を求め、下式 (7) によってラッピングされた位相  $(x, y)$  を得る。

50

【 0 0 2 0 】

【 数 7 】

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}(c(x, y))}{\text{Re}(c(x, y))} \quad \dots\dots (7)$$

ただし、 $\text{Im}(c(x, y))$ は $c(x, y)$ の虚部、 $\text{Re}(c(x, y))$ は $c(x, y)$ の実部である。

【 0 0 2 1 】

最後に、アンラッピング処理を行ない、被測定物の位相  $(x, y)$ を求める。

10

【 0 0 2 2 】

以上に説明したフーリエ変換縞解析法においては、上述したようにキャリア周波数により変調された縞画像データに対してフーリエ変換が施されることになる。

【 0 0 2 3 】

【 発明が解決しようとする課題 】

前述した如く、位相シフト法は、干渉計の物体光と参照（基準）光の間に一般には2を整数分の一に分割した位相角ずつ位相差を与えながら画像の明るさを取り込み解析するものであり、理論的には高精度な位相解析を実現可能である。

【 0 0 2 4 】

しかしながら、高精度な位相解析を確保するためには被検体と基準との相対関係を所定位相量（極めて微小な距離）ずつ高精度に変位させることが必要であり、位相シフト法を位相シフト素子、例えば、PZT（ピエゾ素子）を用いて参照（基準）面等を物理的に移動させることにより実行する場合には、このPZT（ピエゾ素子）の変位量を高精度に制御する必要がある。しかしながら、位相シフト素子の変位誤差、あるいは参照面もしくは被検面の傾斜誤差を完全に除去することは難しく、位相シフト量あるいは傾斜量を高精度に制御することは、実際には困難な作業である。したがって、位相シフト素子に起因する上記誤差を検出し、縞画像解析を行なう際に前記検出値に基づき補正することが良好な結果を得る上で重要となる。

20

【 0 0 2 5 】

本発明は、上記事情に鑑みてなされたものであり、位相シフト法を用いて得られた縞画像データを解析する場合に、位相シフトの変位量および/または該被観察体と該基準との相対的な傾斜量の誤差による影響を、装置構成を複雑にすることなく良好に検出し得るフーリエ変換縞解析法を利用した縞画像解析誤差検出方法を提供することを目的とするものである。

30

【 0 0 2 6 】

さらに、本発明は、位相シフト法を用いて得られた縞画像データを解析する場合に、位相シフトの変位量および/または該被観察体と該基準との相対的な傾斜量の誤差による影響を、装置構成を複雑にすることなく良好に補正し得るフーリエ変換縞解析法を利用した縞画像解析誤差補正方法を提供することを目的とするものである。

【 0 0 2 7 】

【 課題を解決するための手段 】

本発明の、請求項1に係る縞画像解析誤差検出方法は、位相シフト素子を用いて、被観察体と基準とを相対的に位相シフトせしめ、縞画像解析により被観察体波面を求める方法において、

40

位相シフト前後の前記被観察体の波面情報を担持した、キャリア縞が重畳された2つのキャリア縞画像データにフーリエ変換を施しキャリア縞の複素振幅を求め、2つの該複素振幅に基づき前記位相シフト素子の位置の演算を行って、前記位相シフト素子の変位誤差を含んだ位相シフト量（以下「位相シフトの変位量」または「位相シフト変位量」と称することがある）を検出することを特徴とするものである。

【 0 0 2 8 】

50

また、本発明の、請求項 2 に係る縞画像解析誤差検出方法は、位相シフト素子を用いて、被観察体と基準とを相対的に位相シフトせしめ、縞画像解析により被観察体の波面を求める方法において、

位相シフト前後の前記被観察体の波面情報を担持した、キャリア縞が重畳された 2 つのキャリア縞画像データにフーリエ変換を施しキャリア周波数および複素振幅を求め、2 つの該キャリア周波数および 2 つの該複素振幅に基づき前記位相シフト素子の位置の演算を行って、前記位相シフトにより発生した前記被観察体と前記基準との相対的な傾き量および前記位相シフト素子の変位誤差を含んだ位相シフト量を検出することを特徴とするものである。

【0029】

また、本発明の、請求項 3 に係る縞画像解析誤差検出方法は、前記縞画像が干渉縞画像であることを特徴とするものである。

【0030】

また、本発明の、請求項 4 に係る縞画像解析誤差補正方法は、上記請求項 1 に係る縞画像解析誤差検出方法において、前記検出が行われた後、前記キャリア縞画像データの縞画像解析において、該検出された前記位相シフト素子の変位誤差を含んだ位相シフト量を補正する補正演算を行うことを特徴とするものである。

【0031】

また、本発明の、請求項 5 に係る縞画像解析誤差補正方法は、上記請求項 2 に係る縞画像解析誤差検出方法において、前記検出が行われた後、前記キャリア縞画像データの縞画像解析において、該検出された前記位相シフトにより発生した前記被観察体と前記基準との相対的な傾き量および前記位相シフト素子の変位誤差を含んだ位相シフト量を補正する補正演算を行うことを特徴とするものである。

【0039】

なお、本発明に係る前述した各方法は、フーリエ変換法を用いた縞画像解析手法全般に適用可能であり、例えば干渉縞やモアレ縞の解析、あるいは縞投影による 3 次元プロジェクタ等にも適用可能である。

【0040】

【発明の実施の形態】

以下、本発明の実施形態に係る縞画像解析誤差検出方法および縞画像解析誤差補正方法を図面を用いて説明する。

【0041】

この方法は、位相シフト法を用いて被観察体表面形状を求める手法において、被観察体表面と参照（基準）面との相対形状に基づき得られた該被観察体の表面形状情報を担持した縞画像データにフーリエ変換を施し、該被観察体からの波面と基準からの波面とのずれに伴って発生するキャリア周波数と複素振幅を求め、該キャリア周波数と複素振幅に基づき、前記被観察体表面と参照（基準）面との相対傾斜量および位相シフトの変位量を検出するものであり、さらにこの後、前記縞画像データの位相シフト法による縞画像解析において前記検出された傾斜量および変位量を補償する補正演算を行うものである。

【0042】

以下、位相シフトの変位量の検出、補正と、位相シフトにおける、該被観察体と該基準との相対的な傾斜量の検出、補正とに分けて説明する。

【0043】

< 位相シフトの変位量の検出、補正 >

本実施形態に係る位相シフトの誤差量検出補正方法の概略について、図 1 のフローチャートを用いて説明する。

【0044】

まず、空間キャリア縞が重畳された、被観察体の形状情報を担持してなる干渉縞画像を CCD 撮像カメラにより得る（S1）。次に、得られた干渉縞画像データに対してフーリエ変換を施し（S2）、空間キャリア周波数（ $f_x$ ,  $f_y$ ）を抽出し（S3）、このキャリア周

10

20

30

40

50

波数に基づきフーリエ変換縞解析を行ない、後述する複素振幅  $c(x, y)$  を求める (S 4)。次に、参照 (基準) 面の変位量を求め (S 5)、これにより位相シフトの変位量を求めことができ (S 6)、さらに位相シフト法による縞画像解析を行なう場合に、(S 6) で求めた変位量を補正し被観察体の位相を求める (S 7)。

【0045】

一般的に、フーリエ変換縞解析法はキャリア周波数 (被観察体表面と参照面との相対的な傾斜) を導入することにより、一枚の縞画像のみで位相を求めることができる。キャリア周波数を導入すると干渉縞強度は次の式 (8) で表される。

【0046】

【数 8】

10

$$i(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \phi(x, y) + \xi) \quad \cdots \cdots (8)$$

ただし、 $a(x, y)$  は干渉縞のバックグラウンド

$b(x, y)$  は縞のピジビリティ

$(x, y)$  は被観察体の位相

は被観察体の初期位相 ( $2\pi x / \lambda$ )

$f_x, f_y$  はキャリア周波数

【0047】

は前述したように、 $\lambda$  を光の波長、 $x$  を位相シフト素子の位相シフト量としたとき、  
 $= 2\pi x / \lambda$  で表わせるから上式 (8) は下式 (9) のように変形できる。

20

【0048】

【数 9】

$$i(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp[i(2\pi f_x x + 2\pi f_y y)] + c^*(x, y) \exp[i(2\pi f_x x + 2\pi f_y y)] \quad \cdots \cdots (9)$$

ただし、 $c^*(x, y)$  は  $c(x, y)$  の共役である。

【0049】

【数 10】

30

$$c(x, y) = \frac{b(x, y) \exp[i(\phi(x, y) + \xi)]}{2} \quad \cdots \cdots (10)$$

【0050】

上式 (9) をフーリエ変換すると、下式 (11) を得ることができる。

【0051】

【数 11】

$$I(\eta, \zeta) = A(\eta, \zeta) + C(\eta - f_x, \zeta - f_y) + C^*(\eta - f_x, \zeta - f_y) \quad \cdots \cdots (11)$$

40

ただし、

$A(\eta, \zeta)$  :  $a(x, y)$  のフーリエ変換

$C(\eta - f_x, \zeta - f_y)$  :  $c(x, y)$  のフーリエ変換

$C^*(\eta - f_x, \zeta - f_y)$  :  $c^*(x, y)$  のフーリエ変換

【0052】

一般に、フーリエ変換法では、フィルタリングによって、 $C(\eta - f_x, \zeta - f_y)$  を求め、逆フーリエ変換して  $c(x, y)$  を得る。ここで、位相シフトの初期位相を  $\phi_0$ 、被観察体移動

50

後の位相を  $\phi_1$  とすると、開始位置における干渉縞画像データから下式 (12) が得られる。

【 0 0 5 3 】

【 数 1 2 】

$$c_0(x, y) = \frac{b(x, y) \exp[i(\phi(x, y) + \xi_0)]}{2} \quad \dots\dots (12)$$

【 0 0 5 4 】

次に、被観察体移動後における干渉縞画像データから下式 (13) が得られる。

10

【 0 0 5 5 】

【 数 1 3 】

$$c_1(x, y) = \frac{b(x, y) \exp[i(\phi(x, y) + \xi_1)]}{2} \quad \dots\dots (13)$$

【 0 0 5 6 】

これにより、下式 (14) が得られる。

【 0 0 5 7 】

【 数 1 4 】

20

$$\frac{c_1(x, y)}{c_0(x, y)} = \frac{\exp[i(\phi(x, y) + \xi_1)]}{\exp[i(\phi(x, y) + \xi_0)]} = \exp[i(\xi_1 - \xi_0)] \quad \dots\dots (14)$$

【 0 0 5 8 】

したがって、被観察体移動前後の位相差は下式 (15) で表わされる。

【 0 0 5 9 】

【 数 1 5 】

30

$$\begin{aligned} \xi &= \xi_1 - \xi_0 \\ &= \tan^{-1} \frac{IM \left[ \frac{c_1(x, y)}{c_0(x, y)} \right]}{RE \left[ \frac{c_1(x, y)}{c_0(x, y)} \right]} \quad \dots\dots (15) \end{aligned}$$

【 0 0 6 0 】

したがって、被観察体の変位量は下式 (16) で表わされる。

【 0 0 6 1 】

【 数 1 6 】

40

$$\begin{aligned} x &= x_1 - x_0 \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \tan^{-1} \frac{IM \left[ \frac{c_1(x, y)}{c_0(x, y)} \right]}{RE \left[ \frac{c_1(x, y)}{c_0(x, y)} \right]} \quad \dots\dots (16) \end{aligned}$$

【 0 0 6 2 】

また、所定の位相シフトにより得られた各干渉縞画像毎に求めた変位量の平均を求めるこ

50



とにより高精度の変位検出を行なうことができる。なお、フーリエ変換縞解析法により被観察体の変位を検出する際には、必ずしも縞画像データ全体を用いる必要はなく、一部の縞画像データによっても十分に精度の高い変位検出を行なうことが可能である。

【 0 0 6 3 】

次に、上記のようにして検出された位相シフト変位量を補正する方法について説明する。まず、補正原理を、位相シフト法の一般式を用いて説明する。

【 0 0 6 4 】

P Z T 等を用いて参照面を動かす n バケット法位相シフト方式では、参照面を j ( j=1,2,...n ) 回シフトした被観察体上の干渉縞の強度分布は下式 ( 1 7 ) で表わされる。

【 0 0 6 5 】

10

【数 1 7 】

$$i_j(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos(2\pi f_{xj}x + 2\pi f_{yj}y + \phi(x, y) + \xi_j) \quad \cdots \cdots (17)$$

【 0 0 6 6 】

一般的に j ( j=1,2,...n ) 回目の位相シフト量  $\xi_j$  は、P Z T 等の高精度のアクチュエータで次式 ( 1 8 ) のように与えている。

【 0 0 6 7 】

【数 1 8 】

20

$$\xi_j = \frac{2\pi(j-1)}{n} \quad \cdots \cdots (18)$$

ただし、

$\xi_j$  : j ( j=1,2,...n ) 回目の位相シフト量

【 0 0 6 8 】

上式 ( 1 7 ) を展開し、三角関数の直交性を利用して被観察位相 ( x , y ) を求めることができる。求められた式 ( 1 9 ) を以下に示す。

30

【 0 0 6 9 】

【数 1 9 】

$$\phi(x, y) = \arctan \left( \frac{\sum s_j i_j}{\sum c_j i_j} \right) + const \quad \cdots \cdots (19)$$

ただし、

$s_j$  : 定数

$c_j$  : 定数

40

【 0 0 7 0 】

ところで、高精度のアクチュエータは高価である。そこで、アクチュエータの変位を検出する方法を用いることで、高価なアクチュエータを用いることなく高精度の位相シフトを得ることができる。

【 0 0 7 1 】

すなわち、j ( j=1,2,...n ) 回目の位相シフト量を  $\xi_j$  ( 具体的な値が未知 ) としたとき下式 ( 2 0 ) が得られる。

【 0 0 7 2 】

【数 2 0 】

50

$$\xi_j = (j-1) \cdot a + \delta_j \quad \cdots \cdots (20)$$

【 0 0 7 3 】

ただし、 $\delta_j$  はアクチュエータの位相シフト誤差である ( $\delta_j \ll \pi/2$ )。  
 前述した位相シフト誤差量検出方法で  $\delta_j$  を求めることができることから、下式 (21)、  
 (22) を用いて位相解析誤差を高精度に補正可能である。

【 0 0 7 4 】

【 数 2 1 】

10

$$\sin(a+x) = \sin a + \cos a \cdot x - \frac{\sin a}{2!} \cdot x^2 - \frac{\cos a}{3!} \cdot x^3 + \frac{\sin a}{4!} \cdot x^4 + \cdots \quad \cdots \cdots (21)$$

【 0 0 7 5 】

【 数 2 2 】

$$\cos(a+x) = \cos a - \sin a \cdot x - \frac{\cos a}{2!} \cdot x^2 + \frac{\sin a}{3!} \cdot x^3 + \frac{\cos a}{4!} \cdot x^4 + \cdots \quad \cdots \cdots (22)$$

【 0 0 7 6 】

20

以下、よく使用される 5 パケット法を例にあげて説明する。5 パケット法は下式 (23) で表わされる。

【 0 0 7 7 】

【 数 2 3 】

$$\phi(x, y) = \arctan \left( \frac{2(i_1 - i_3)}{2i_2 - (i_0 + i_4)} \right) \quad \cdots \cdots (23)$$

【 0 0 7 8 】

ここで、 $a_j = (j-1) / 2$  ( $j=1, 2, \dots, 5$ )

30

を利用すると、下式 (24) が得られる。

【 0 0 7 9 】

【 数 2 4 】

$$\begin{aligned} \frac{2(i_1 - i_3)}{2i_2 - (i_0 + i_4)} &= \frac{2(\cos \phi \cdot (\cos \xi_1 - \cos \xi_3) - \sin \phi \cdot (\sin \xi_1 - \sin \xi_3))}{\cos \phi \cdot (2 \cos \xi_2 - \cos \xi_0 - \cos \xi_4) - \sin \phi \cdot (2 \sin \xi_2 - \sin \xi_0 - \sin \xi_4)} \\ &= \tan \phi + \frac{2 \left( \cos \phi \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) + \sin \phi \cdot \left( \frac{\varepsilon_1^2}{2} - \frac{\varepsilon_3^2}{2} \right) \right)}{\cos \phi \cdot (2\varepsilon_2 - \varepsilon_0 - \varepsilon_4) + \sin \phi \cdot \left( \varepsilon_2^2 - \frac{\varepsilon_0^2}{2} - \frac{\varepsilon_4^2}{2} \right)} \quad \cdots \cdots (24) \end{aligned}$$

40

【 0 0 8 0 】

一般に  $\delta_j^2$  は小さいことから、式 (24) は下式 (25) で表わされる。

【 0 0 8 1 】

【 数 2 5 】

$$\frac{2(i_1 - i_3)}{2i_2 - (i_0 + i_4)} = \tan \phi + \frac{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)}{2\varepsilon_2 - \varepsilon_0 - \varepsilon_4} \quad \cdots \cdots (25)$$

50

【 0 0 8 2 】

したがって、下式 ( 2 6 ) が導出される。

【 0 0 8 3 】

【 数 2 6 】

$$\phi(x, y) = \arctan \left( \frac{2(i_1 - i_3)}{2i_2 - (i_0 + i_4)} - \frac{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)}{2\varepsilon_2 - \varepsilon_0 - \varepsilon_4} \right) \quad \dots\dots (26)$$

【 0 0 8 4 】

これにより、アクチュエータのシフト誤差を補正した位相を求めることができる。

【 0 0 8 5 】

次に、本発明の実施形態を実施するための装置について、図 2、3 を用いて説明する。

【 0 0 8 6 】

この装置は、上記実施形態方法を実施するためのもので、図 2 に示すように、マイケルソン型干渉計 1 において、被観察体表面 2 と参照 ( 基準 ) 面 3 からの両反射光束によって形成される干渉縞は、撮像カメラ 4 の CCD 5 の撮像面において形成され、画像入力基板 6 を介して、CPU および画像処理用のメモリを搭載したコンピュータ 7 に入力され、入力された干渉縞画像データに対して種々の演算処理が施され、その処理結果はモニタ画面 7 A 上に表示される。なお、撮像カメラ 4 から出力される干渉縞画像データは CPU の処理により一旦メモリ内に格納されるようになっている。

【 0 0 8 7 】

コンピュータ 7 は、図 3 に示すように、ソフト的に、FFT 演算複素振幅演算手段 1 1、位相シフト変位量検出手段 1 2 および位相シフト変位量補正手段 1 3 を備えている。FFT 演算複素振幅演算手段 1 1 は、前述したように、得られた干渉縞画像データに対してフーリエ変換を施すとともに FFT 演算複素振幅を抽出するステップ 3 ( S 3 ) の処理を行うものであり、位相シフト変位量検出手段 1 2 は、前記 FFT 演算複素振幅演算手段 1 1 において演算された FFT 演算複素振幅に基づいて、上記ステップ 4 ( S 4 ) から上記ステップ 6 ( S 6 ) に相当する処理を行うものである。さらに、位相シフト変位量補正手段 1 3 は、上記位相シフト変位量検出手段 1 2 において検出された変位量に基づいて該変位量を補償し、被観察体の誤差補正された位相を求めるものである ( S 7 ) 。

【 0 0 8 8 】

これにより、PZT ( ピエゾ素子 ) アクチュエータ 1 0 が所定量だけシフトし、この PZT ( ピエゾ素子 ) アクチュエータ 1 0 のシフト量に誤差が生じている場合にも、最終的に求められた被観察体の位相には該誤差による影響がないように調整される。図 2 においては、被観察体の表面 2 は固定されているため、被観察体の表面 2 と参照面 3 の相対的なシフト量変位は PZT ( ピエゾ素子 ) アクチュエータ 1 0 によりシフトされた参照面 3 のシフト量の変位量にのみ依存する。

【 0 0 8 9 】

したがって、上述したような図 2 および図 3 に示す要素により構成された系は、求められた FFT 演算複素振幅に基づき、参照面 3 の位相シフト変位量が除去された状態における被観察体の位相を演算し得る。

【 0 0 9 0 】

また、図 4 は、上記 PZT ( ピエゾ素子 ) アクチュエータ 1 0 の 2 つの態様を示すものである。

【 0 0 9 1 】

すなわち、第 1 の態様は、図 4 ( A ) に示すように、参照面 ( 参照ミラー ) 3 の裏面を支持する 3 つのピエゾ素子 1 2 1、1 2 2、1 2 3 を備え、支点部材としても機能するピエゾ素子 1 2 1 と各ピエゾ素子 1 2 2、1 2 3 とを結ぶ参照面 3 を有する参照ミラー上の、2 本の直線  $L_x$ 、 $L_y$  が互いに直交するように構成されたものである。3 本のピエゾ素

10

20

30

40

50

子 1 2 1、1 2 2、1 2 3 が同量だけ伸縮することにより位相シフトが行なわれ、さらに  
 ピエゾ素子 1 2 2 のみの伸縮により参照ミラーの参照面 3 が y 軸を中心として回転するよ  
 うに x 軸方向に傾き、ピエゾ素子 1 2 3 のみの伸縮により参照ミラーの参照面 3 が x 軸を  
 中心として回転するように y 軸方向に傾くことになる。一方、第 2 の態様は、図 4 ( B )  
 に示すように、参照面 ( 参照ミラー ) 3 の裏面中央部を円柱状のピエゾチューブ 1 2 4 に  
 よって支持するように構成されたものである。このピエゾチューブ 1 2 4 の偏奇しない伸  
 縮により位相シフトが行なわれ、一方、偏奇した伸縮により参照ミラーの参照面 3 が x 軸  
 方向および y 軸方向に自在に傾けられることになる。

【 0 0 9 2 】

< 傾斜量の検出、補正 >

10

一般に、被観察体や参照面のサイズが大きい場合には、複数の位相シフト素子、あるいは  
 位相シフト素子と支持ガイドとを有することが必要となり、この場合には、位相シフトの  
 直進性を確保することが難しくなり、被観察体や参照面に傾きが生じる場合がある。そこ  
 で、以下に示す実施形態方法においては、上記実施形態方法と略同様の手法により位相シ  
 フト素子の傾斜量 ( 被観察体の表面と基準面との相対的な傾き量 ) を検出し、補正するよ  
 うにしている。

【 0 0 9 3 】

以下、位相シフト素子の傾斜量を検出し、補正する本発明の第 2 の実施形態方法について  
 説明する。

【 0 0 9 4 】

20

図 5 は、上記第 2 の実施形態方法を概念的に示すフローチャートである。

すなわち、まず、空間キャリア縞が重畳された、被観察体の形状情報を担持してなる干渉  
 縞画像を CCD 撮像カメラにより得る ( S 1 1 )。次に、得られた干渉縞画像データに対  
 してフーリエ変換を施し ( S 1 2 )、空間キャリア周波数 (  $f_x$  ,  $f_y$  ) を抽出し ( S 1 3  
 )、このキャリア周波数に基づきフーリエ変換縞解析を行ない、後述する  $c(x, y)$  を求  
 め、参照面の傾斜量を求め ( S 1 4 )、この傾斜量を補償するようにして ( S 1 5 )、被  
 観察体の、補正演算された位相を求める ( S 1 6 )。

【 0 0 9 5 】

以下、数式を用いて上記第 2 の実施形態について説明する。

【 0 0 9 6 】

30

前述したように、フーリエ変換縞解析法はキャリア周波数 ( 被観察体表面と参照面との相  
 対的傾斜 ) を導入することにより、一枚の縞画像のみで位相を求めることができる。キャ  
 リア周波数を導入すると干渉縞強度は次の式 ( 2 7 ) で表される。

【 0 0 9 7 】

【 数 2 7 】

$$i(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \phi(x, y) + \xi) \cdots \cdots (27)$$

ただし、 $a(x, y)$ は干渉縞のバックグラウンド

$b(x, y)$ は縞のビジビリテイ

$\phi(x, y)$ は被観察体の位相

$\xi$ は位相シフト量 ( $2\pi x/\lambda$ )

$f_x, f_y$  はキャリア周波数

10

また、キャリア周波数  $f_x, f_y$  は下式 (27 a) の如く表される。

$$f_x = \frac{2 \cdot \tan \theta_x}{\lambda}, \quad f_y = \frac{2 \cdot \tan \theta_y}{\lambda} \cdots \cdots (27 a)$$

【0098】

また、前述したように、 $\lambda$  を光の波長、 $\theta_x$  と  $\theta_y$  を被観察体表面のX,Y方向の傾斜 (姿勢)、 $x$  を位相シフト素子の位相シフト量としたとき、上式 (27) は下式 (28) のように変形できる。

20

【0099】

【数28】

$$i(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp[i(2\pi f_x x + 2\pi f_y y)] + c^*(x, y) \exp[i(2\pi f_x x + 2\pi f_y y)] \cdots \cdots (28)$$

ただし、 $c^*(x, y)$  は  $c(x, y)$  の共役である。

【0100】

【数29】

30

$$c(x, y) = \frac{b(x, y) \exp[i(\phi(x, y) + \xi)]}{2} \cdots \cdots (29)$$

【0101】

上式 (28) をフーリエ変換すると、下式 (30) を得ることができる。

【0102】

【数30】

$$I(\eta, \zeta) = A(\eta, \zeta) + C(\eta - f_x, \zeta - f_y) + C^*(\eta - f_x, \zeta - f_y) \cdots \cdots (30)$$

ただし、

40

$A(\eta, \zeta)$  :  $a(x, y)$  のフーリエ変換

$C(\eta - f_x, \zeta - f_y)$  :  $c(x, y)$  のフーリエ変換

$C^*(\eta - f_x, \zeta - f_y)$  :  $c^*(x, y)$  のフーリエ変換

【0103】

一般に、フーリエ変換方法においては、フィルタリングによって、 $C(-f_x, -f_y)$  を求め、図6に示す如く周波数座標系上の位置 ( $f_x, f_y$ ) に存在するスペクトルのピークを座標原点に移動させ、キャリア周波数を除去する。次に、逆フーリエ変換を用いて  $c(x$

50

$x, y$ を求めることにより、ラップ処理された位相が得られる。次に、アンラップ処理によって被測定物の位相  $(x, y)$  が求められる。ここで、 $(f_x, f_y)$  はキャリア周波数であるが、被観察体の表面と参照面との間には所定の角度関係（相対姿勢）、具体的には式（27a）の関係が存在することに着目し、 $(f_x, f_y)$  の各値を求め、その値に基づき、被観察体表面と参照面の間の角度関係を求める。

【0104】

$(f_x, f_y)$

の各値は、上式（30）の結果から、座標原点にある最大ピーク以外のサブピーク位置、すなわち、 $C(-f_x, -f_y)$  の位置を求めることで得られる。これにより、被観察体のX,Y方向の傾斜（姿勢）である  $\theta_x$  と  $\theta_y$  を求めることができる。

10

【0105】

被観察体のX,Y方向の傾斜（姿勢）である  $\theta_x$  と  $\theta_y$  は、上記手法（第1の手法）に代えて次のような手法（第2の手法）によっても求めることができる。

【0106】

この傾斜検出方法の概略は図5のステップ11～14（S11～14）に代えて、図9のフローチャートの各ステップ（S21～27）によって表わされる。

【0107】

まず、空間キャリア縞が重畳された、被観察体の形状情報を担持してなる干渉縞画像をCCD撮像カメラにより得る（S21）。次に、得られた干渉縞画像データに対してフーリエ変換を施し（S22）、フィルタリングによってキャリア周波数のスペクトル分布（サイドローブ）である  $C(n - f_x, -f_y)$  を抽出する（S23）。次に、この分布  $C(n - f_x, -f_y)$  に逆フーリエ変換を施して  $c(x, y)$  を得、ラップされた位相を得る（S24）。この後、アンラップ処理を施すことにより被観察体の形状情報に基づき被観察体の位相  $p(x, y)$  を求める（S25）。次に、最小二乗法を用いて上記位相  $p(x, y)$  の最小二乗平面を求める（S26）。最後に、最小二乗平面の微係数に基づき被観察体の傾斜を求める（S27）。

20

【0108】

ところで、上記第1の手法におけるフーリエ縞解析法では、例えばフィルタリングによって、周波数座標系上におけるキャリア周波数のスペクトル分布（サイドローブ）である  $C(n - f_x, -f_y)$  を抽出した後、そのピークをその位置  $(f_x, f_y)$  から座標原点に移動することによりキャリア周波数を除去し、この後逆フーリエ変換を施すことにより被観察体の位相（形状）を求めるようにしている。

30

【0109】

これに対し、上記第2の手法においては、被観察体の傾斜もその形状の一部と考え、前述した式（30）におけるキャリア周波数のスペクトル分布（サイドローブ）である  $C(n - f_x, -f_y)$  のピークを、移動させることなく、すなわち、キャリア周波数を除去することなくこのスペクトル分布  $C(n - f_x, -f_y)$  に対して逆フーリエ変換を施す。これにより、最終的に得られた上記被観察体の位相  $p(x, y)$  には傾き成分が含まれることになる。

【0110】

すなわち、上記位相  $p(x, y)$  は下式（31）の如く表される。

40

【0111】

【数31】

$$\begin{aligned} p(x, y) &= 2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \phi(x, y) \\ &= ax + by + \phi(x, y) \quad \dots\dots (31) \\ &= \tan(\theta_x) x + \tan(\theta_y) y + \phi(x, y) \end{aligned}$$

ただし、

aは最小二乗平面のx方向の微係数

50

bは最小二乗平面のy方向の微係数

【0112】

したがって、上記第2の手法によれば、最小二乗法を用いて、キャリア周波数を除去せずに求めた被観察体の形状の最小二乗平面（形状を最小二乗法でフィッティングし得られた平面）を求め、この最小二乗平面のx、y方向の微係数を求め、さらに上式（31）を用いて被観察体の傾斜 $q_x$ と $q_y$ を得るようにしており、これにより被観察体の傾きを容易に求めることができる。

【0113】

なお、上記手法において、被観察体の形状を表す平面を求める際には、上記最小二乗法に替えて他のフィッティング手法を採用することによっても、曲面をフィッティングした所望の平面を求めることができる。

10

【0114】

このように、フーリエ変換縞解析法を用いることで、被観察体の姿勢（傾斜）を検出できる。なお、フーリエ変換縞解析法により被観察体の姿勢（傾斜）を求める際には、縞画像の全領域を使う必要がなく、一部の縞画像領域を解析することによっても十分に有効なデータを得ることが可能である。

【0115】

次に、上記のようにして検出された傾斜量を補正する方法について説明する。

まず、補正原理を、位相シフト法の一般式を用いて説明する。

【0116】

20

PZTを用いて参照面を動かすnバケット法位相シフト方式では、参照面をj（j=1,2,...n）回シフトした被観察体表面上の干渉縞の強度分布は下式（32）で表わされる。

【0117】

【数32】

$$i_j(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos(2\pi f_{xj}x + 2\pi f_{yj}y + \phi(x, y) + \xi_j) \quad \dots\dots (32)$$

【0118】

一般的にj（j=1,2,...n）回目の位相シフト量 $\xi_j$ は、PZT等の高精度のアクチュエータで次式（33）のように表わされる。

30

【0119】

【数33】

$$\xi_j = \frac{2\pi(j-1)}{n} \quad \dots\dots (33)$$

ただし、

$\xi_j$  : j（j=1,2,...n）回目の位相シフト量

40

【0120】

上式（33）を展開し、三角関数の直交性を利用して被検位相（x,y）を求めることができる。求められた式（34）を以下に示す。

【0121】

【数34】

$$\phi(x, y) = \arctan\left(\frac{\sum s_j i_j}{\sum c_j i_j}\right) + const \quad \dots\dots (34)$$

ただし、

$s_j$  : 定数

$c_j$  : 定数

10

【 0 1 2 2 】

被観察体と参照面との姿勢に変更があるとき  $j$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ) 回目の位相シフト量  $\xi_j$  ( $\xi_j$  は具体的な値が未知) は下式 (35) で表される。

【 0 1 2 3 】

【 数 3 5 】

$$\begin{aligned} \xi_j &= (j-1) \cdot a + x\theta_{xj} + y\theta_{yj} \\ &= (j-1) \cdot a + \varepsilon_j, \end{aligned} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad \dots\dots (35)$$

20

ただし、 $\theta_{xj}$  と  $\theta_{yj}$  はアクチュエータの傾斜であり ( $\theta_{xj} < \pi/2$ )、前述した方法で  $\theta_{xj}$  と  $\theta_{yj}$  を求めることができるから、下式 (36)、(37) を用いて位相解析誤差を高精度に補正可能である。

【 0 1 2 4 】

一般に  $\theta_{xj}^2$  は小さいことから、式 (39) は下式 (40) で表わされる。

【 0 1 2 5 】

【 数 3 6 】

$$\sin(a+x) = \sin a + \cos a \cdot x - \frac{\sin a}{2!} \cdot x^2 - \frac{\cos a}{3!} \cdot x^3 + \frac{\sin a}{4!} \cdot x^4 + \dots \quad \dots\dots (36)$$

30

【 0 1 2 6 】

【 数 3 7 】

$$\cos(a+x) = \cos a - \sin a \cdot x - \frac{\cos a}{2!} \cdot x^2 + \frac{\sin a}{3!} \cdot x^3 + \frac{\cos a}{4!} \cdot x^4 + \dots \quad \dots\dots (37)$$

【 0 1 2 7 】

以下、よく使用される 5 パケット法を例にあげて説明する。5 パケット法は下式 (37) で表わされる。

【 0 1 2 8 】

【 数 3 8 】

$$\phi(x, y) = \arctan\left(\frac{2(i_1 - i_3)}{2i_2 - (i_0 + i_4)}\right) \quad \dots\dots (38)$$

【 0 1 2 9 】

ここで、 $a_j = (j-1)/2$  ( $j=1, 2, \dots, 5$ )

を利用すると、下式 (39) が得られる。

【 0 1 3 0 】

【 数 3 9 】

40

50



$$\begin{aligned} \frac{2(i_1 - i_3)}{2i_2 - (i_0 + i_4)} &= \frac{2(\cos\phi \cdot (\cos\xi_1 - \cos\xi_3) - \sin\phi \cdot (\sin\xi_1 - \sin\xi_3))}{\cos\phi \cdot (2\cos\xi_2 - \cos\xi_0 - \cos\xi_4) - \sin\phi \cdot (2\sin\xi_2 - \sin\xi_0 - \sin\xi_4)} \\ &= \tan\phi + \frac{2\left(\cos\phi \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) + \sin\phi \cdot \left(\frac{\varepsilon_1^2}{2} - \frac{\varepsilon_3^2}{2}\right)\right)}{\cos\phi \cdot (2\varepsilon_2 - \varepsilon_0 - \varepsilon_4) + \sin\phi \cdot \left(\varepsilon_2^2 - \frac{\varepsilon_0^2}{2} - \frac{\varepsilon_4^2}{2}\right)} \quad \dots\dots (39) \end{aligned}$$

10

【 0 1 3 1 】

一般に  $j^2$  は小さいことから、式 ( 3 9 ) は下式 ( 4 0 ) で表わされる。

【 0 1 3 2 】

【 数 4 0 】

$$\frac{2(i_1 - i_3)}{2i_2 - (i_0 + i_4)} = \tan\phi + \frac{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)}{2\varepsilon_2 - \varepsilon_0 - \varepsilon_4} \quad \dots\dots (40)$$

【 0 1 3 3 】

20

したがって、下式 ( 4 1 ) が導出される。

【 0 1 3 4 】

【 数 4 1 】

$$\phi(x, y) = \arctan\left(\frac{2(i_1 - i_3)}{2i_2 - (i_0 + i_4)} - \frac{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)}{2\varepsilon_2 - \varepsilon_0 - \varepsilon_4}\right) \quad \dots\dots (41)$$

【 0 1 3 5 】

これにより、アクチュエータの傾斜量を補正した位相を求めることができる。

30

【 0 1 3 6 】

次に、本発明の実施形態装置について、図 7、8 を用いて説明する。

【 0 1 3 7 】

この装置は、上記実施形態方法（傾き検出については第 1 の手法を例示する）を実施するためのもので、図 7 に示すように、マイケルソン型干渉計 1 において、被観察体表面 2 と参照（基準）面 3 からの両反射光束によって形成される干渉縞は、撮像カメラ 4 の CCD 5 の撮像面において形成され、画像入力基板 6 を介して、CPU および画像処理用のメモリを搭載したコンピュータ 7 に入力され、入力された干渉縞画像データに対して種々の演算処理が施され、その処理結果はモニタ画面 7 A 上に表示される。なお、撮像カメラ 4 から出力される干渉縞画像データは CPU の処理により一旦メモリ内に格納されるようになっている。

40

【 0 1 3 8 】

コンピュータ 7 は、図 8 に示すように、ソフト的に、FFT 演算キャリア周波数演算手段 2 1、傾斜量検出手段 2 2 および傾斜量補正手段 2 3 を備えている。FFT 演算キャリア周波数演算手段 2 1 は、前述したように、得られた干渉縞画像データに対してフーリエ変換を施すとともに FFT 演算キャリア周波数 ( $f_x$ ,  $f_y$ ) を抽出するステップ 1 3 (S 1 3) の処理を行うものであり、傾斜量検出手段 2 2 は、前記 FFT 演算キャリア周波数演算手段 2 1 において演算された FFT 演算キャリア周波数に基づいて、上記ステップ 1 4 (S 1 4) に相当する処理を行うものである。さらに、傾斜量補正手段 2 3 は、上記傾斜量検出手段 2 2 において検出された参照面の傾斜量に応じて、該傾斜量を補償し、被観察

50

体の位相を求めるステップ15、16(S15、S16)に相当する処理を行なうものである。

【0139】

なお、上述した2つの実施形態方法(位相シフト素子の変位量検出、補正方法および傾斜量の検出、補正方法)は、両者を1つの検査工程あるいは補正工程において行ってもよく、このようにすれば、より効率的に縞画像の解析精度を上げることができる。

【0140】

また、一般的に位相シフト干渉計においては、決定された位相シフト量(例えば45度、90度さらには120度)を、精密に制御する必要があり、高精度かつ高価なアクチュエータを使用している。しかし、本発明方法においては、測定された縞画像からキャリア周波数を求め、このキャリア周波数に基づいて位相シフトの変位量および位相シフトに基づく参照面および/または被観察体の傾斜量を求めているので、アクチュエータの変位と傾斜を検出でき、また、縞画像の解析において上記変位量または上記傾斜量が補償されるような補正が可能であるから、必ずしも、高精度かつ高価なアクチュエータを要しない。また、Nバケット法を採用する場合に、必ずしも、1ステップを正確に(360/N(度))調整することを要しない。

【0141】

以下、本発明方法を、任意バケット位相シフト干渉計に適用した場合について説明する。任意バケット位相シフト干渉計とは、位相シフト量を特定の値(例えば45度、90度、120度等)とせず、任意の値(各シフト量も互いに異なってよい)とした位相シフト干渉計である。なお、以下の説明においては、説明の便宜のため、3バケット法、4バケット法および5バケット法についてのみ言及するが、バケット数としてはこれらに限られないことは勿論である。

【0142】

まず、任意シフト量4バケット位相シフト法においては、キャリア周波数を導入した第m回目の干渉縞強度は下式(42)で表される。

【0143】

【数42】

$$\begin{aligned} i_m(x, y, \xi_m) &= a(x, y) + b(x, y) \cos(2\pi f_{xm} x + 2\pi f_{ym} y + \phi(x, y) + \xi_m) \\ &= a(x, y) + b(x, y) \cos(\phi(x, y) + \delta_m) \end{aligned} \quad \dots\dots (42) \quad 30$$

ただし、 $a(x, y)$ は干渉縞のバックグラウンド、

$b(x, y)$  は縞のビシビリテイ、

$\phi(x, y)$  は被測定物の位相、

$\xi_m$  は位相シフト素子の位相シフト量、

$f_{xm}, f_{ym}$  は第m回目位相シフトした後のキャリア周波数である。

$$\xi_m = 2\pi \frac{x_m}{\lambda}, \quad f_{xm} = \frac{2 \cdot \tan \theta_{xm}}{\lambda}, \quad f_{ym} = \frac{2 \cdot \tan \theta_{ym}}{\lambda} \quad 40$$

$$\delta_m = 2\pi f_{xm} x + 2\pi f_{ym} y + \xi_m \quad \dots\dots (42a)$$

【0144】

ここで、 $\lambda$  は光の波長、 $x_m$ と $y_m$ は第m回目の位相シフトがなされた後における被観察体のX,Y方向の傾斜(傾斜量)、 $x_m$ は被観察体の第m回目の位相シフト量である。次に、被観察体位相 $(x, y)$ を求めるために下式(43)の考察を行なう。

【0145】

10

20

30

40

50

【数 4 3】

$$p = \frac{i_3 - i_2}{i_2 - i_1} = \frac{\cos(\phi(x, y) + \delta_3) - \cos(\phi(x, y) + \delta_2)}{\cos(\phi(x, y) + \delta_2) - \cos(\phi(x, y) + \delta_1)} \quad \dots\dots (43)$$

【0 1 4 6】

したがって、下式(44)が得られる。

【0 1 4 7】

【数 4 4】

10

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{\cos \delta_3 - (1 + p) \cos \delta_2 + p \cos \delta_1}{\sin \delta_3 - (1 + p) \sin \delta_2 + p \sin \delta_1} \quad \dots\dots (44)$$

【0 1 4 8】

位相シフト素子 P Z T の駆動による参照面または被観察体の位相シフト変位量と傾斜量を検出できるので、式(42a)における  $m$  を求めることができる。したがって、上式(44)を用いて、被観察体形状のラップした位相を求めることができる。さらに、周知のアンラップ処理方法を用いて連続的な被観察体位相を求めることができる。

【0 1 4 9】

20

なお、任意シフト量 4 パケット位相シフト法においては、上式(43)、(44)に代えて、下式(45)、(46)を用いる。

【0 1 5 0】

【数 4 5】

$$p = \frac{i_4 - i_2}{i_3 - i_1} = \frac{\cos(\phi(x, y) + \delta_4) - \cos(\phi(x, y) + \delta_2)}{\cos(\phi(x, y) + \delta_3) - \cos(\phi(x, y) + \delta_1)} \quad \dots\dots (45)$$

【0 1 5 1】

【数 4 6】

30

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{\cos \delta_4 - \cos \delta_2 + p \cos \delta_3 - p \cos \delta_1}{\sin \delta_4 - \sin \delta_2 + p \sin \delta_3 - p \sin \delta_1} \quad \dots\dots (46)$$

【0 1 5 2】

また、任意シフト量 5 パケット位相シフト法においては、上式(43)、(44)に代えて、下式(47)、(48)を用いる。

【0 1 5 3】

【数 4 7】

40

$$p = \frac{2(i_4 - i_2)}{i_1 - 2i_3 + i_5} = \frac{2(\cos(\phi(x, y) + \delta_4) - \cos(\phi(x, y) + \delta_2))}{\cos(\phi(x, y) + \delta_1) - 2\cos(\phi(x, y) + \delta_3) + \cos(\phi(x, y) + \delta_5)} \quad \dots\dots (47)$$

【0 1 5 4】

【数 4 8】

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{2\cos \delta_4 - 2\cos \delta_2 + p \cos \delta_1 - 2p \cos \delta_3 + p \cos \delta_5}{2\sin \delta_4 - 2\sin \delta_2 + p \sin \delta_1 - 2p \sin \delta_3 + p \sin \delta_5} \quad \dots\dots (48)$$

50

## 【 0 1 5 5 】

なお、本発明の方法としては上記実施形態のものに限られるものではなく、その他の種々の態様の変更が可能である。例えば、位相シフト素子としては、上記 P Z T に限られるものではなく、参照面または被観察面を物理的に移動させたり、A O 素子、E O 素子を用いること等によって光学光路長を変化させて位相シフト法を達成できるもの、あるいは、参照光路および／または観察光路中に挿入し、屈折率等を変化させ光学的光路長を所定量変化させ得る透過型素子であってもよい。

## 【 0 1 5 6 】

また、上記実施形態においては、3つの P Z T 素子を配設する態様としてこれら3つの部材が丁度直角三角形の各頂点に位置するようにしているが、これら3つの部材は参照ミラ

10

## 【 0 1 5 7 】

また、上述した実施形態では、キャリア周波数として空間キャリア周波数を用いて説明しているが、本発明のキャリア周波数として、時間キャリア周波数あるいは時空間キャリア周波数を用いることが可能である。

## 【 0 1 5 8 】

また、上記実施形態のものにおいては、干渉縞画像データをマイケルソン型干渉計を用いて撮像しているが、フィゾー型等のその他の干渉計を用いて得られた干渉縞画像データに対しても同様に適用できることは勿論である。

さらに、本発明は、干渉縞のみならずモアレ縞やスペックル縞、その他の種々の縞画像に対しても同様に適用可能である。

20

## 【 0 1 5 9 】

## 【発明の効果】

本発明の位相シフト素子誤差検出方法によれば、位相シフト法を用いて得られた縞画像データに対してフーリエ変換を施す場合に、被観察体からの波面と基準からの波面とのずれに伴って発生するキャリア周波数と複素振幅を求め、該キャリア周波数と該複素振幅に基づき、前記被観察体表面と基準面との相対傾斜量と前記位相シフトの変位量を検出することで、位相シフト素子の傾斜量および／または変位量の誤差による影響を、装置構成を複雑にすることなく良好に検出することができる。

## 【 0 1 6 0 】

30

さらに、本発明の位相シフト素子誤差補正方法によれば、前記縞画像データの縞画像解析において検出された誤差量を補償する補正演算を行うようにしているので、位相シフト法を用いて得られた結果に対して位相シフト素子の傾斜量および／または変位量の誤差による影響を、装置構成を複雑にすることなく良好に補正することができる。

## 【図面の簡単な説明】

【図 1】本発明の一実施形態方法を説明するためのフローチャート

【図 2】図 1 に示す実施形態方法を実施するためのブロック図

【図 3】図 2 の一部を詳細に示すブロック図

【図 4】図 2 の一部を具体的に示す概念図

【図 5】本発明の他の実施形態方法を説明するためのフローチャート

40

【図 6】図 5 に示す方法の一部を説明するための概念図

【図 7】図 5 に示す実施形態方法を実施するためのブロック図

【図 8】図 7 の一部を具体的に示すブロック図

【図 9】図 5 に示すフローチャートの一部変更例を示すフローチャート

## 【符号の説明】

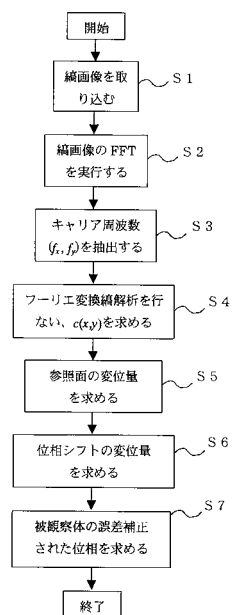
- 1        マイケルソン型干渉計
- 2        被観察体表面
- 3        参照面
- 4        撮像カメラ
- 5        C C D

50

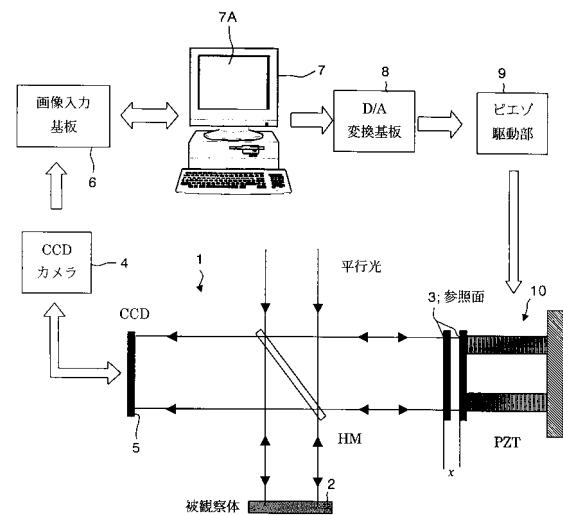
7	コンピュータ
7 A	モニタ画面
9	ピエゾ駆動部
10	PZTアクチュエータ
11	FFT演算複素振幅演算手段
21	FFT演算キャリア周波数演算手段
12	位相シフト変位量検出手段
13	位相シフト変位量補正手段
22	傾斜量検出手段
23	傾斜量補正手段
121、122、123	ピエゾ素子
124	ピエゾチューブ

10

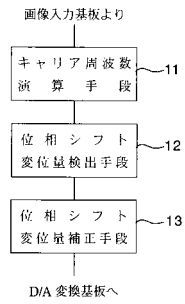
【図1】



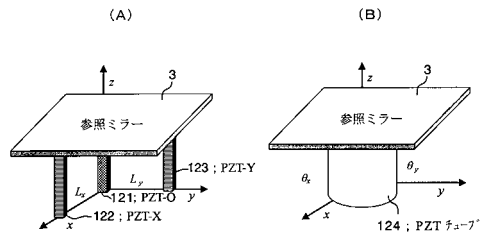
【図2】



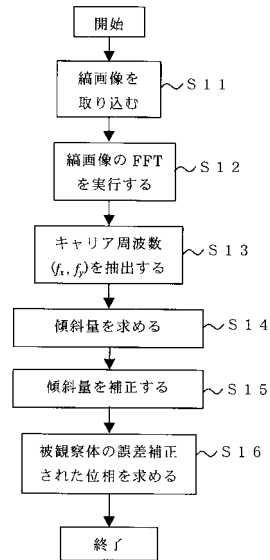
【図 3】



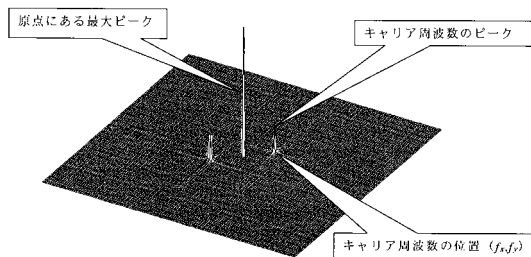
【図 4】



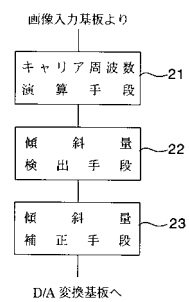
【図 5】



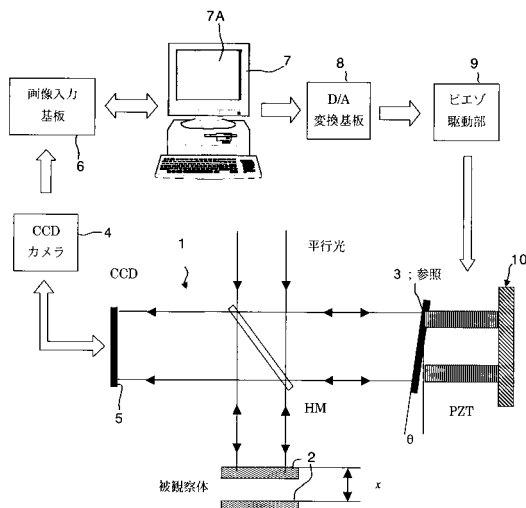
【図 6】



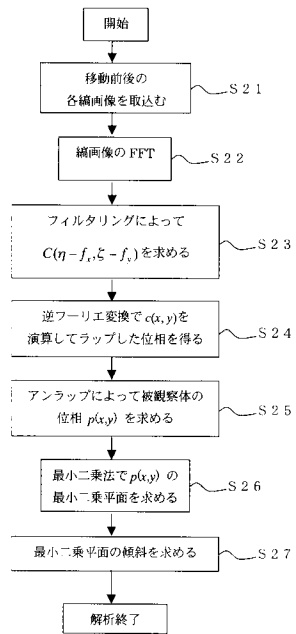
【図 8】



【図 7】



【図 9】



---

フロントページの続き

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

G01B11/00-11/30

G01B9/00-9/10