

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第3870269号
(P3870269)

(45) 発行日 平成19年1月17日(2007.1.17)

(24) 登録日 平成18年10月27日(2006.10.27)

(51) Int. Cl. F I
G O 1 B 11/25 (2006.01) G O 1 B 11/25 G

請求項の数 2 (全 16 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2003-328990 (P2003-328990)</p> <p>(22) 出願日 平成15年9月19日(2003.9.19)</p> <p>(65) 公開番号 特開2005-91325 (P2005-91325A)</p> <p>(43) 公開日 平成17年4月7日(2005.4.7)</p> <p>審査請求日 平成15年9月19日(2003.9.19)</p> <p>特許法第30条第1項適用 社団法人日本機械学会関西支部発行の「関西学生会卒業研究発表講演会講演前刷集」(平成15年3月21日発行)、日本実験力学会発行の「日本実験力学会講演論文集2003年度年次講演会No. 3(2003年)」(平成15年7月7日発行)に発表</p>	<p>(73) 特許権者 504145283 国立大学法人 和歌山大学 和歌山県和歌山市栄谷930番地</p> <p>(74) 代理人 100072051 弁理士 杉村 興作</p> <p>(74) 代理人 100100125 弁理士 高見 和明</p> <p>(74) 代理人 100101096 弁理士 徳永 博</p> <p>(74) 代理人 100107227 弁理士 藤谷 史朗</p> <p>(74) 代理人 100114292 弁理士 来間 清志</p> <p>(74) 代理人 100119530 弁理士 富田 和幸</p>
--	--

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 エイリアシングを利用した干渉縞の位相解析方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

f と f s a m を自然数とし、f s a m < 2 f として、干渉縞の位相を 2 f 変化させる間に f s a m 回撮影して得た画像から前記干渉縞の位相を解析する干渉縞位相解析方法であって、k を任意の自然数として、

$$f' = f \pm k f s a m$$

によって与えられるエイリアシングによって生じる周波数成分をフーリエ変換して得て、その周波数成分の複素数の偏角として前記干渉縞の位相を得ることを特徴とする干渉縞位相解析方法。

10

【請求項2】

請求項1に記載の干渉縞位相解析方法において、各々ピッチ位相シフトの周波数が異なる複数の干渉縞の個々の位相を得ることを特徴とする干渉縞位相解析方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、干渉縞又は投影格子の位相を解析する方法に関する。

【背景技術】

【0002】

20

形状計測、形状検査、変形・ひずみ計測等の分野において、得られた干渉縞又は投影格子の位相を解析する方法が求められている。

【0003】

干渉縞又は投影格子の位相を解析する従来の方法としては、干渉縞又は投影格子の位相を変化させながら複数枚の画像を撮影し、得られた複数の画像から干渉縞又は投影格子の位相分布を求める、いわゆる位相シフト法がある。この方法では、すべての画素において輝度が増えるため、その輝度変化から各点ごとに独立して周囲の画素の輝度変化の情報をいわずに位相値を求めることができる。一般的には、 $\pi/2$ ずつ位相シフトされた4つの輝度から位相を算出する位相シフト法（1周期4分割の位相シフト法）等がよく用いられる。しかしこの位相シフト法では、得られる輝度のどれか1つにでもノイズが含まれると、それが結果に大きく影響し、正確な位相を得ることができないという欠点があった。

10

【0004】

他の従来の方法として、位相シフト回数を多くし、フーリエ変換を用いることによって高次のノイズ成分を除去し、精度よく位相を求めることができるフーリエ変換位相シフト法がある。このようなフーリエ変換を用いた干渉縞又は投影格子の位相解析方法では、シャノンのサンプリング定理により、解析したい干渉縞又は投影格子の周波数の2倍以上の数のデータ、すなわち、ナイキスト周波数以上の数のデータが必要である。そのため、データ採取にも、その計算処理にも時間が掛かり、高速に位相解析ができないという欠点があった。サンプリング定理を満たさない場合、すなわち、ナイキスト周波数以上の数のデータがない場合、エイリアシング現象が起こり、解析対象の干渉縞又は投影格子は実際と異なる低周波の干渉縞となって現れてしまい、解析できなくなる。例えば、周波数3の干渉縞又は投影格子を解析する場合、サンプリング定理に従うと最低6個のデータが必要となる。このとき、4個のデータでサンプリングするとエイリアシングが起こり、周波数3の成分は周波数-1の成分となって現れる。

20

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

上述したことを鑑み、本発明は、本来避けるべきエイリアシングを逆に利用し、少ないサンプリング数で干渉縞又は投影格子の位相を解析することができる位相解析方法を提供することを目的とする。

30

【課題を解決するための手段】

【0006】

本発明による干渉縞又は投影格子の位相解析方法は、 f と f_{sam} を自然数とし、 $f_{sam} < 2f$ として、干渉縞の位相を $2f$ 変化させる間に f_{sam} 回撮影して得た画像から前記干渉縞の位相を解析する干渉縞位相解析方法であって、 k を任意の自然数として、

$$f' = f \pm k f_{sam}$$

によって与えられるエイリアシングによって生じる周波数成分をフーリエ変換して得て、その周波数成分の複素数の偏角として前記干渉縞の位相を得ることを特徴とする。

40

【0007】

本発明による干渉縞又は投影格子の位相解析方法の一実施例は、各々ピッチ位相シフトの周波数が異なる複数の干渉縞の個々の位相を得ることを特徴とする。

【発明の効果】

【0008】

本発明によれば、エイリアシングを用いることにより、これまで必要とされてきた最低サンプリング数より少ないサンプリング数で干渉縞の位相を決定することができる。本発明による干渉縞又は投影格子の位相解析方法を、格子投影による形状計測や、モアレ干渉縞解析によるひずみ計測等に適用することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

50

【0009】

本発明による、エイリアシングを用いる位相解析方法は、同時に複数の種類の干渉縞の位相を解析することができる。ここで、2種類の干渉縞の位相を解析する例を示す。

【実施例1】

【0010】

周波数の異なる2種類の干渉縞1、2の輝度を合成し、それぞれの位相を一定間隔ずつ変化させながら試料に投影して撮影を数回に分けて行う。時間tにおける試料上の一点(x, y)での干渉縞1、2の輝度をI₁、I₂とすると、これらは以下の式で表される。

$$I_1(x, y, t) = a_1 \cos(2\pi f_1 t + \phi_1(x, y)) + b_1 \quad (1) \quad 10$$

$$I_2(x, y, t) = a_2 \cos(2\pi f_2 t + \phi_2(x, y)) + b_2 \quad (2)$$

式(1)、(2)において、f₁、f₂は干渉縞1、2の位相変化の周波数を表し、φ₁、φ₂は干渉縞1、2の初期位相を表す。また、a₁、a₂及びb₁、b₂は干渉縞1、2の振幅及び背景輝度である。図1は、2種類の干渉縞の輝度変化を示すグラフである。図1において、横軸は時間軸及び各干渉縞の位相を表し、縦軸は各干渉縞の輝度を表す。ここで、干渉縞をf_{s a m}回撮影する間に干渉縞1及び干渉縞2の位相をそれぞれ2πf₁及び2πf₂変化させる。以上より、合成干渉縞の輝度I_{c o m}は以下の式で表すことができる。

$$I_{c o m}(x, y, t) = a_1 \cos(2\pi f_1 t + \phi_1) + a_2 \cos(2\pi f_2 t + \phi_2) + b_1 + b_2 \quad (3) \quad 20$$

【0011】

ここで、サンプリング定理より、合成干渉縞からそれぞれの成分を抽出するためには、各成分の周波数の2倍以上の周波数でサンプリングする必要がある。つまり、回数f_{s a m}は、f_{s a m} > 2f₁及びf_{s a m} > 2f₂を同時に満たさなくてはならない。しかしながら、撮影する回数が増えると1回の計測に掛かる時間が長くなるため、位相解析に必要な撮影回数をできるだけ少なくすることが望ましい。

【0012】

そこで、f_{s a m}を、サンプリング定理を満たす必要最低限の撮影周波数f_Nよりも少なくする場合を考える。図2は、式(3)で表す干渉縞の時間周波数スペクトルを表すグラフである。ここで、f_Nはナイキスト周波数である。干渉縞1、2の周波数、f₂は共にf_Nよりも大きくなるため、干渉縞1、2は正しく再現されず、エイリアシングにより低周波の干渉縞となって再現される。干渉縞1、2からエイリアスされた干渉縞の周波数をそれぞれf₁'、f₂'とすると、エイリアス前後の周波数の関係は以下の式によって表される。

$$f_1' = f_1 \pm k f_{s a m} \quad (-f_N < f_1' < f_N) \quad (4) \quad 40$$

$$f_2' = f_2 \pm k f_{s a m} \quad (-f_N < f_2' < f_N) \quad (5)$$

ここで、f_{s a m}はサンプリング周波数である。また、k、lは任意の自然数である。エイリアス後のこれらの位置に現れるスペクトルを抽出することにより、位相を算出することが可能となる。位相φ₁とF(f₁')の実部と虚部の値は次式に示す関係となり、

【数 1】

$$\tan \theta_1 = \frac{\operatorname{Im}\{F(f_1')\}}{\operatorname{Re}\{F(f_1')\}} \quad (6)$$

この式により位相 θ_1 を算出することができる。同様に、位相 θ_2 についても次式の関係が成り立つ。

【数 2】

$$\tan \theta_2 = \frac{\operatorname{Im}\{F(f_2')\}}{\operatorname{Re}\{F(f_2')\}} \quad (7)$$

これらの関係式により位相を決定することが可能となる。本方法は、異なる周波数の干渉縞で上記の条件を満たす場合においては適用可能であり、したがって、干渉縞が 2 種類以上になっても位相の同時解析が可能である。

【実施例 2】

【0013】

ピッチが異なる 2 種類の格子パターンを合成した格子（以後、輝度合成格子と呼ぶ）を投影して、位相解析及び位相接続を行う方法を説明する。本方法では、1 種類の格子パターンのみを使用して位相接続できるために、格子の交換が必要でなく、計測結果を連続的に出力することが可能となる。輝度合成格子の解析方法は、上述したように、一定間隔で格子の位相をシフトさせながら撮影した数枚の画像から、フーリエ変換及びエイリアシングを用いて 2 種類の格子成分を抽出するものである。

【0014】

図 3 は、本位相解析方法を実行する装置の構成を示す図であり、格子投影装置 2 と、CCD カメラ 4 と、計測対象物体 6 の配置を示す。x - y 平面を基準面上にとり、計測対象物体 6 の高さ方向に z 軸をとる。格子投影装置 2 が投影する格子を x 軸方向に移動させることにより、格子の位相をシフトさせることができる。格子投影装置 2 によって、CCD カメラ 4 の 1 画素 (i, j) で撮影される光強度 I が次式で表される格子を投影する。

【数 3】

$$\begin{aligned} I(\alpha, i, j) &= a(i, j) \cos \left[\frac{2\pi}{P_1} \alpha + \theta_1(i, j) \right] + a(i, j) \cos \left[\frac{2\pi}{P_2} \alpha + \theta_2(i, j) \right] \\ &+ b(i, j) \end{aligned} \quad (8)$$

式 (8) において、右辺の第 1 項及び第 2 項は合成された 2 種類の格子成分を表し、それぞれ格子成分 1 及び格子成分 2 と呼ぶ。a、b はそれぞれ格子の輝度振幅及び背景輝度を表す。 θ_1 は格子の位相の変化量である。 P_1 、 P_2 及び θ_1 、 θ_2 はそれぞれ格子成分 1 及び 2 のピッチと初期位相である。ここで、輝度合成格子の周期 $P_{c.o.m}$ を、2 種類の格子成分のピッチ P_1 及び P_2 の最小公倍数と定義する。図 4 は、輝度合成格子のパターンの一例を示すグラフである。図 4 a 及び 4 b はそれぞれ格子成分 1 及び 2 の輝度成分を示し、図 4 c は合成格子の輝度分布を示す。また、格子成分のピッチ比は $P_1 : P_2 = 3 : 19$ である。

【0015】

各格子成分の位相を解析するために、 α を一定量ずつ、格子が一周期 $P_{c.o.m}$ 移動するまで時間変化させ、数回に分けて撮影を行う。図 5 は、図 4 に示す格子パターンについて

10

20

30

40

50

、奥行き方向に時間軸をとって並べた図であり、撮影される複数枚の格子画像の例である。撮影される格子画像上の1点Qに注目すると、輝度の時間変化は図6に示す形となる。図4に示す格子は、二種類の格子成分のピッチが $P_1 : P_2 = 3 : 19$ であるため、輝度合成格子が一周期移動する間に、格子成分1が19周期、格子成分2が3周期移動する。したがって、点Qにおける格子輝度の時間変化をフーリエ変換すると、図7に模式的に示すように、格子成分1及び2のスペクトルがそれぞれ周波数19及び3の位置に現れる。よって、周波数3及び19のスペクトルを抽出することにより、二種類の格子成分を分離することが可能となる。また、位相解析に必要なノイズ成分がある場合、ノイズ成分の多くは周波数3及び19以外のスペクトルとして現れるため、これらの影響を受けずに精度よく位相解析ができる。抽出された格子1及び2の複素スペクトルをそれぞれ S_1 、 S_2 とすると、位相 ϕ_1 、 ϕ_2 はそれぞれ S_1 、 S_2 の偏角として得られる。すなわち、以下の式で求めることができる。

$$\phi_1 = \arg(S_1) \quad (9)$$

$$\phi_2 = \arg(S_2) \quad (10)$$

ここで、 $\arg(S)$ は複素数 S の偏角を表す。以上の作業で得られるピッチの異なる二種類の位相 ϕ_1 及び ϕ_2 を用いることで、画素ごとに独立して位相接続を行うことができる。

【実施例3】

【0016】

ピッチの異なる複数の位相分布を用いて画素ごとに独立して位相接続する方法は、これまでにいくつか開発されている。中でも、GushovとSolodkinは複数のピッチの比を解析に用いることにより、精度よく位相接続を行う方法を開発している。本発明によるエイリアシングを利用した干渉縞位相解析方法を、このGushovらの位相接続法に適用し、二種類の格子成分の位相分布から位相接続を行うことができる。

【0017】

二種類の格子成分について、接続後の位相値をそれぞれ ϕ_1 、 ϕ_2 とすると、接続前後の位相値には、以下の式で表される関係がある。

$$\phi_1 = \phi_1 + 2\pi k_1 \quad (11)$$

$$\phi_2 = \phi_2 + 2\pi k_2 \quad (12)$$

ここで、 k_1 及び k_2 はそれぞれ格子成分1及び2の格子番号を表す整数である。また、接続後の位相値 ϕ_1 及び ϕ_2 には以下の関係がある。

$$P_1 \phi_1 = P_2 \phi_2 \quad (13)$$

式(11)、(12)及び(13)から以下の式を導くことができる。

$$\begin{aligned} P_2 \phi_2 - P_1 \phi_1 &= P_2 \phi_2 - P_1 \phi_1 - 2\pi (P_2 k_2 - P_1 k_1) \\ &= 2\pi (P_2 k_2 - P_1 k_1) - 2\pi m U \end{aligned} \quad (14)$$

ただし、 m はピッチ P_1 及び P_2 の最大公約数である。図8は位相 ϕ_1 、 ϕ_2 及び U の関係を示すグラフである。この図からわかるように、 U は理論的に常に整数値となり、整数 U から格子番号 k_1 及び k_2 を一意に決定できる。したがって、整数 U を求めることで位相接続が可能となる。しかしながら、実際は格子画像に含まれるノイズ等の原因で U は常に整数値をとらない。したがって、最も近い整数値に近似することによって、 U の値を決定する。以上のようにして決定される整数値 U を用いて、それぞれの格子成分の格子番号 k_1 及び k_2 は以下の式によって求められる。

【数4】

$$k_1 = \left[\frac{U}{P_1} \right] + \left[\frac{P_2}{P_1} \right] \text{Mod}(U, P_1) \quad (15)$$

ここで、 $\left[U / P_1 \right]$ は U / P_1 を超えない最大の整数を表す。また、 $\text{Mod}(U, P_1) = U - \left[U / P_1 \right]$ と定義する。本方法を用いて、格子番号 k_1 は次式で示される範囲において求まる。

$$0 \leq k_1 < P_1 / m \quad (16)$$

10

したがって、接続後の位相 ϕ_1 は以下の範囲に限定される。

$$0 \leq \phi_1 < 2\pi P_1 / m \quad (17)$$

一般に、2種類のピッチ P_2 及び P_1 の最小公倍数、すなわち輝度合成格子の周期 P_c 。
 m が大きいほど広い範囲において位相接続が可能となる。

【実施例4】

【0018】

物体上に投影した格子の初期位相を $\phi(i, j)$ とし、基準面上に投影した格子の初期位相を $\phi_0(i, j)$ とする。ただし、 $\phi(i, j)$ 、 $\phi_0(i, j)$ は共に位相接続後の値である。物体上に投影した格子は物体の高さに応じて変形しており、変化量は以下に示す位相差 $\Delta\phi(i, j)$ で表される。

20

$$\Delta\phi(i, j) = \phi(i, j) - \phi_0(i, j) \quad (18)$$

ただし、ここで述べる高さとは物体表面から基準面までの距離を示す。また、位相差 $\Delta\phi(i, j)$ と物体の高さ $h(i, j)$ は幾何学的な関係によって対応付けることができる。位相差と高さの対応関係は以下の等式で表すことができる。

30

$$1/h(i, j) = A(i, j) / \Delta\phi(i, j) + B(i, j) \quad (19)$$

式(19)において、 $A(i, j)$ 及び $B(i, j)$ は計測装置のシステムパラメータであり、後述するキャリブレーションによってカメラの画素ごとに決定される。

【0019】

ここで、撮影時間及び計算時間を減少させるためにエイリアシングを行う。離散的フーリエ変換を用いて任意の周波数のスペクトルを抽出する場合、シャノンの標本化定理により、サンプリング周波数は求めたい周波数の2倍以上に設定しなければならない。図4に示す格子の例では、周波数3及び19のスペクトルを抽出するために必要なサンプリング周波数は38以上である。すなわち、格子が一周期 P_c 。
 m 移動する間に、38回以上の撮影を行わなければならない。一般に、輝度合成格子の一周期に含まれる格子成分が高周波になるほど、位相接続できる範囲が広がるが、必要な撮影回数が多くなる。

40

【0020】

そこで撮影回数をナイキスト周波数より小さく設定する。図4に示す輝度合成格子の各格子成分について、撮影回数を5回にしたとき、すなわちサンプリング周波数が5のとき、時間領域におけるエイリアシングの様子を図9に示す。図9a、bは、それぞれ格子成分1、2を示す。同様に、周波数領域における格子成分1、2の様子をそれぞれ図10a、bに示す。サンプリング周波数 $f_s = 5$ であるため、ナイキスト周波数は $f_N = 2.5$ となる。したがって、周波数19の格子成分1及び周波数3の格子成分2は共にエイリアスされて、それぞれ周波数-2及び-1の成分として再現される。したがって、周波数-

50

2及び-1のスペクトルを抽出することで、合成された二種類の位相分布を分離・解析することができる。

【0021】

また、本方法によって撮影回数を低減した場合、解析可能な周波数帯の幅が狭くなるため、位相解析に不要なノイズ成分と格子成分との区別ができなくなる。このことより、撮影回数を低減するためには、輝度非線形性など、大きなノイズとなる要素を予め補正するなどして取り除いておく必要がある。

【実施例5】

【0022】

複雑な形状を持つ物体の形状計測例として、図11に示す石膏像の計測を行った。図12は、物体に投影した輝度合成格子の一例を示す図である。この格子を等間隔ずつ移動させて撮影した5枚の画像から位相解析を行う。計測対象物体が複雑な形状を持つ場合、物体表面の反射角度などの影響によって、位相解析の信頼性が画素ごとに異なる。本例では、画素ごとに位相解析の信頼性を評価するために、以下の式を用いて格子の輝度振幅aを計算する。

$$\begin{aligned} a &= |S_1| \quad (|S_1| = |S_1| \text{ のとき}) \\ a &= |S_2| \quad (|S_1| > |S_1| \text{ のとき}) \end{aligned} \quad (20)$$

ただし、 S_1 、 S_2 はそれぞれ格子成分1及び2の複素スペクトルである。式(20)を用いて得られる輝度振幅aについてしきい値 a_1 を設け、 $a_1 > a$ となる画素は位相解析の信頼性が低いとみなして高さの計算を行わないことにする。本例では、 $a_1 = 8$ と設定する。図13は、位相解析結果を示す図である。図13a、b、cは、それぞれ初期位相 ϕ_1 、 ϕ_2 の分布及び位相接続後の初期位相分布である。また、図13dは位相差分布である。これらの画像では、信頼性の低い画素は黒で表されている。図13cでは、画像全体に渡って初期位相分布が連続化されていないが、図13dに示す位相差は、全計測範囲において高さと一対一対応している。さらに、図13dの位相差分布から計算した物体の高さ分布の3次元表示を図14に示す。この結果から、本発明によるエイリアシングを利用した干渉縞位相解析方法によって、複雑な表面形状を持つ物体の形状計測も可能であることがいえる。

【実施例6】

【0023】

本発明によるエイリアシングを利用した干渉縞位相解析方法を、モアレ干渉法に適用することもできる。モアレ干渉法は、試料物体のx及びy方向の2種類の変位をナノメートルオーダで高精度に計測することができる方法である。x方向の変位に関するモアレ干渉縞及びy方向の変位に関するモアレ干渉縞の位相を、それぞれ異なる周波数でシフトさせ、1点の明るさ変化について時間軸方向にフーリエ変換し、それぞれの周波数成分を抽出することにより、2方向の変位を表す2種類の干渉縞の同時解析を行う。本発明の干渉縞位相解析方法により、これまで困難であった試料物体の2方向の変位を同時に計測することが可能となる。

【0024】

図15は、本発明による干渉縞位相解析方法を適用するモアレ干渉法の光学系の概念図である。平面である試料表面に非常に薄い金属蒸着膜から成る反射型2次元回折格子を貼付してある。この格子はx及びy方向共に格子ピッチ d_s mm、空間周波数 f_s $1/\text{mm}$ ($f_s = 1/d_s$) である。A、Bはxz面内で光軸に対して入射角 θ 及び ϕ で入射する平面波である。使用する光の波長を λ とすると、

$$\sin \theta = f_s \lambda \quad (21)$$

を満たすとき、AとBの1次及び-1次の反射回折光は、試料表面に垂直に現れる。試料

10

20

30

40

50

が変形していない場合、2つの反射回折光は一樣に干渉し、均一的な濃度の干渉縞、すなわちワンカラーの干渉縞を生じる。試料が変形した場合は、それに伴って回折格子のピッチが変わり、2つの反射回折光の回折角がわずかに変化することから干渉縞が生じる。この干渉縞はx方向の変位uの等変位線となる。

【0025】

また、yz面内において平面波C、Dを光軸に対して入射角 θ 及び $-\theta$ で入射すると、それぞれの ± 1 次回折反射光が試料表面に垂直に現れる。試料が変形したときに生じる干渉縞は、y方向の変位vの等変位線となる。x、y方向のモアレ干渉縞の干渉縞次数をそれぞれ N_x 、 N_y とすると、変位と干渉縞次数の関係は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} u &= d_s N_x / 2 \\ v &= d_s N_y / 2 \end{aligned} \quad (22)$$

式(22)から、干渉縞1本あたりの変位量は、回折格子のピッチの半分に相当していることがわかる。

【0026】

フーリエ変換位相シフト法は、位相解析に非常に有効な手段の1つである。本例では、この手法を同時4ビームモアレ干渉法で得られる2つの干渉縞の分離に用いる。x及びy方向の2つの干渉縞を同時に撮影し、それぞれの干渉縞の位相を異なる速さで連続的に少しずつシフトさせる。これらの画像を奥行き方向に重ね合わせると、図16に示すような3次元画像を得ることができる。図16は12枚の画像を重ね合わせた画像であり、x及びy方向の干渉縞の位相シフト周期はそれぞれ3及び4である。この3次元画像のある一点における明るさ変化、x及びy方向の干渉縞の成分をそれぞれ除去した場合の明るさ変化を図17に示す。この図より、ある一点の明るさ変化は、周波数3と4の干渉縞の明るさ変化を合成したものであることがわかる。図16の3次元画像の各点において時間軸方向のフーリエ変換を行うことにより、図18に示すようなスペクトルが得られる。この周波数スペクトルは、干渉縞の特徴を表している。周波数3及び4の成分を別々に抽出し、各成分の逆正接を求めることにより、x及びy方向成分の位相値を得ることができる。すなわち、uとvに相当するx及びy方向の変位を同時に求めることができる。このようにして求めた各干渉縞の位相分布画像を図19及び図20に示す。

【0027】

本発明では、フーリエ変換位相シフト法を用いてより少ないサンプリングで位相解析する新しい方法を提案する。干渉縞を解析する場合、サンプリング周波数は解析する干渉縞の周波数の2倍、すなわちナイキスト周波数よりも大きくなければ行えないというシャノンのサンプリング定理がある。ゆえに、上記では高い方の周波数の2倍以上、すなわち8枚以上の12枚の画像を用いて解析を行った。ここでサンプリング周波数がナイキスト周波数よりも小さい場合を考える。この場合、解析される干渉縞が本来の周波数とは異なる周波数として認識されるエイリアシングと呼ばれる現象が発生する。通常はエイリアシングが生じないようにナイキスト周波数以上のサンプリングを行うが、本発明ではこのエイリアシングを干渉縞の位相解析に積極的に利用する。

【0028】

x及びy方向干渉縞の位相シフト周波数をそれぞれ f_1 、 f_2 とし、各干渉縞の位相が $f_{s a m}$ 枚の画像が撮影される間に $2 \frac{f_1}{f_{s a m}}$ 、 $2 \frac{f_2}{f_{s a m}}$ 分変化するとする。ここで $f_{s a m}$ はサンプリング数であり、それぞれ整数である。2つの干渉縞が重なった画像からそれぞれの干渉縞を分離するためには、サンプリング定理より次式が同時に満たされなければならない。

$$\begin{aligned} f_{s a m} &> 2 \frac{f_1}{f_{s a m}} \\ f_{s a m} &> 2 \frac{f_2}{f_{s a m}} \end{aligned} \quad (23)$$

10

20

30

40

50

しかしながら、サンプリング周波数が大きくなるとサンプリングに掛かる時間が長くなる。このことから、フーリエ変換位相シフト法を用いて時間と共に変化する現象を解析することは困難であった。

【0029】

本発明によれば、エイリアシングを利用して計測に掛かる時間を短縮することができる。図21は、5枚の画像を重ねた3次元画像であり、x及びy方向の干渉縞の位相シフト周期はそれぞれ3及び4である。このときのサンプリング周波数5は式(23)を満たしていないことから、エイリアシングが発生する。図22は、図21のある一点におけるx及びy方向成分の明るさ変化を示すグラフである。破線はエイリアスされた干渉縞を表しており、実際とは異なる周波数として認識されていることがわかる。図23は、図21の3次元画像をフーリエ変換した際の周波数スペクトルを示すグラフである。ここで、 f_N はナイキスト周波数である。エイリアス後の各干渉縞の周波数をそれぞれ f_1' 、 f_2' とすると、本来の周波数 f_1 、 f_2 との関係は次式で表される。

【数5】

$$f_1' = f_1 \pm k f_{sam} \quad (-f_N \leq f_1' < f_N),$$

$$f_2' = f_2 \pm l f_{sam} \quad (-f_N \leq f_2' < f_N).$$

ここで f_{sam} はサンプリング周波数である。また k と l は任意の整数である。この例の場合、x方向の干渉縞の位相シフト周波数は3であるが、エイリアシングにより周波数成分は3ではなく-2に現れる。y方向の干渉縞についても同様に周波数成分は4ではなく-1に現れる。したがって周波数成分-2及び-1を別々に抽出し計算することによって、最低データ数より少ないデータで2種類の干渉縞の位相を同時に求めることができる。図24、25は、このようにして求めたx方向成分の干渉縞の位相分布画像と、y方向成分の干渉縞の位相分布画像である。

【実施例7】

【0030】

近年モアレ干渉法による電子部品の熱変形解析が行われている。しかしながら従来これらの計測では、2方向の変位は別々に計測されている。本発明のエイリアシングを利用した干渉縞位相解析法を用いて、例として3端子レギュレータの熱変形を2方向同時に計測する。図26aは試料とするレギュレータを示し、図26bは計測範囲を示し、図26cは回路図を示す。レギュレータの表面には空間周波数 1200 lines/mm の2次元の回折格子を貼付する。図26cに示すスイッチを入れた際に発生する熱による変形を計測する。

【0031】

図27は、計測に使用した4ビームモアレ干渉法の光学系の構成を簡単に示す図である。ミラーM1、M2、M3を用いて不要な干渉縞を除去する。ミラーM1とM3をそれぞれx及びy軸に対して平行に移動させることでモアレ干渉縞の位相シフトを行う。画像を撮影するタイミングと同期させて、x方向の干渉縞を $6/5$ 、y方向の干渉縞を $8/5$ ずつ連続的にシフトさせる。このようにして撮影した5枚の画像からなる3次元画像をフーリエ変換し、周波数分布を得る。スイッチを入れる前後のモアレ干渉縞のx及びy方向成分の位相分布を周波数-2と-1の成分を抽出することにより算出する。各干渉縞の位相差分布画像を求めることにより、レギュレータの変形量を得る。

【0032】

図28は、スイッチを入れる前のモアレ干渉縞のキャリアパターンとその位相分布画像を示す。CCDカメラの露出時間は $1/1000 \text{ s}$ である。画像の大きさは 640×480 画素であり、グレースケールで表現してある。図29は、スイッチを入れてから30秒後のモアレ干渉縞の位相分布と位相差分布画像を示す。位相差分布画像は、レギュレータ

の熱変形のみによる変位量を表している。本例では、干渉縞 1 本あたり 417 nm の変位を表しており、 x 方向に約 $3.4 \mu\text{m}$ 、 y 方向に約 $2.7 \mu\text{m}$ の変位があったことがわかる。図 28 及び 29 より、試料が時間と共にゆっくりと変形しているならば、2 つの干渉縞が重なった画像からそれぞれの干渉縞の位相分布が同時に得られていることが示される。

【図面の簡単な説明】

【0033】

【図 1】2 種類の干渉縞の輝度変化と撮影タイミングとの関係を示すグラフである。

【図 2】干渉縞の時間周波数スペクトルを表すグラフである。

【図 3】本位相解析方法を実行する装置の構成を示す図である。

10

【図 4】輝度合成格子のパターンの一例を示すグラフである。

【図 5】撮影される複数枚の格子画像の例を示す図である。

【図 6】輝度の時間変化を示すグラフである。

【図 7】格子輝度の時間変化をフーリエ変換した結果のパワースペクトルを示すグラフである。

【図 8】位相 1 、 2 及び U の関係を示すグラフである。

【図 9】時間領域におけるエイリアシングの様子を示すグラフである。

【図 10】周波数領域における格子成分 1 、 2 を示すグラフである。

【図 11】形状計測する石膏像の画像である。

【図 12】物体に投影した輝度合成格子の一例を示す図である。

20

【図 13】位相解析結果を示す図である。

【図 14】位相差分布から計算した物体の高さ分布の 3 次元表示である。

【図 15】本発明による干渉縞位相解析方法を適用するモアレ干渉法の光学系の概念図である。

【図 16】12 枚の画像からなる 3 次元画像である。

【図 17】1 点における明るさ変化を示すグラフである。

【図 18】3 次元画像の各点において時間軸方向のフーリエ変換を行うことによって得られた周波数スペクトルを示すグラフである。

【図 19】 x 方向成分の干渉縞の位相分布画像である。

【図 20】 y 方向成分の干渉縞の位相分布画像である。

30

【図 21】5 枚の画像を重ねた 3 次元画像である。

【図 22】一点における x 及び y 方向成分の明るさ変化を示すグラフである。

【図 23】3 次元画像をフーリエ変換した際の周波数スペクトルを示すグラフである。

【図 24】 x 方向成分の干渉縞の位相分布画像である。

【図 25】 y 方向成分の干渉縞の位相分布画像である。

【図 26】 a は試料とするレギュレータを示し、 b は計測範囲を示し、 c は回路図を示す。

【図 27】4 ビームモアレ干渉法の光学系の構成を簡単に示す図である。

【図 28】スイッチを入れる前のモアレ干渉縞のキャリアパターンとその位相分布画像である。

40

【図 29】スイッチを入れてから 30 秒後のモアレ干渉縞の位相分布と位相差分布画像である。

【符号の説明】

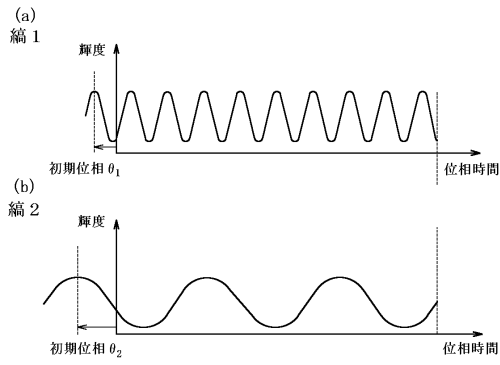
【0034】

2 格子投影装置

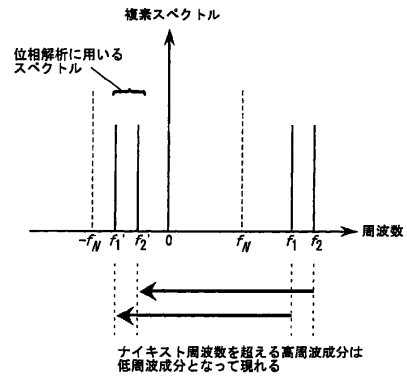
4 CCDカメラ

6 計測対象物体

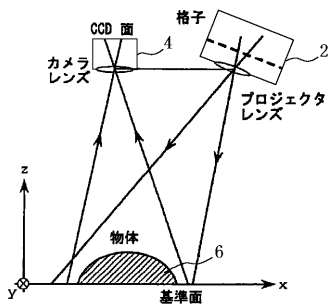
【 図 1 】



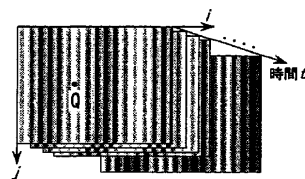
【 図 2 】



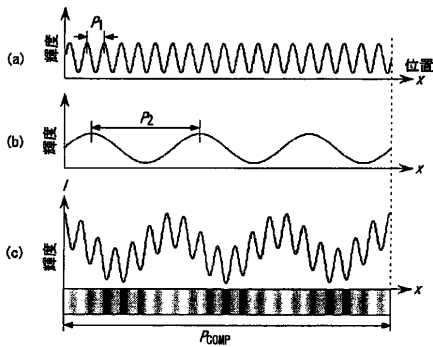
【 図 3 】



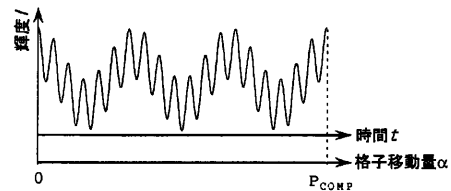
【 図 5 】



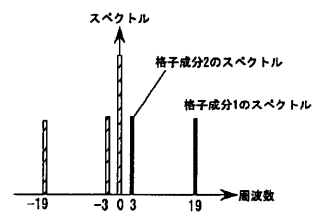
【 図 4 】



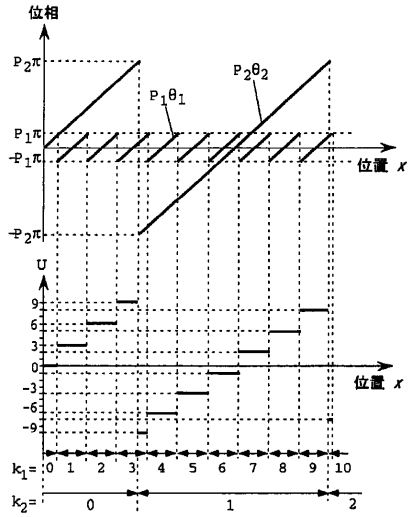
【 図 6 】



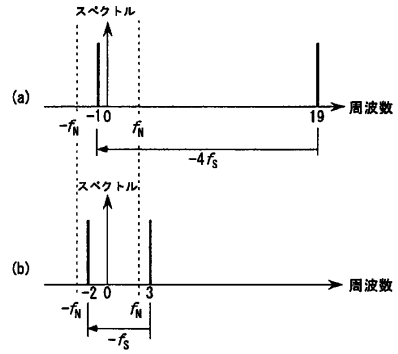
【 図 7 】



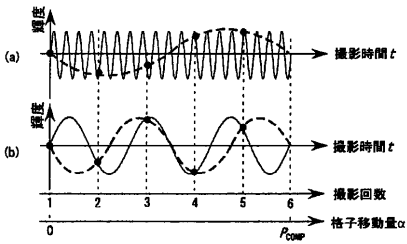
【 図 8 】



【 図 1 0 】



【 図 9 】

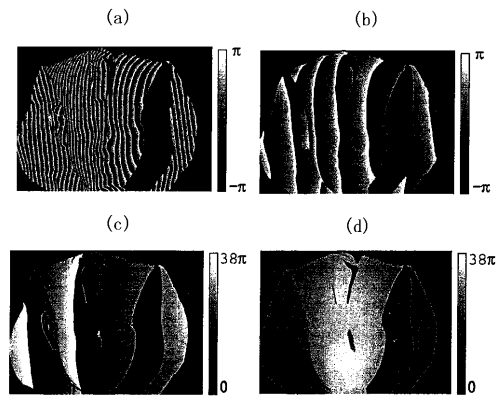


【 図 1 1 】



計測する石膏像の外観

【 図 1 3 】



【 図 1 2 】

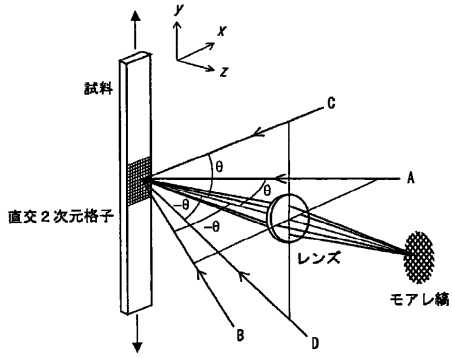


物体に投影した輝度合成格子の一例

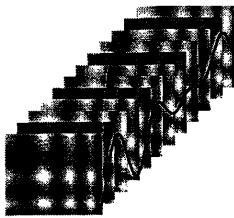
【 図 1 4 】



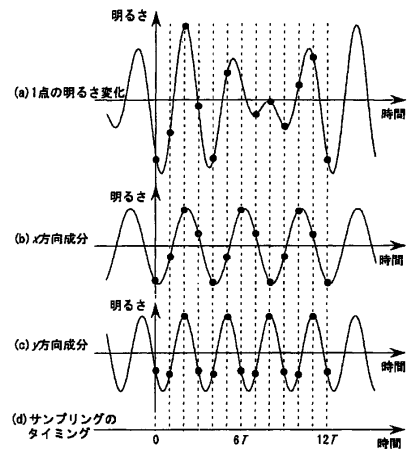
【 図 1 5 】



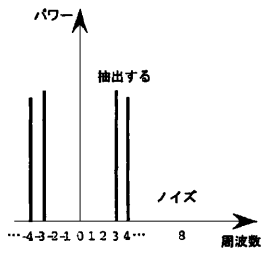
【 図 1 6 】



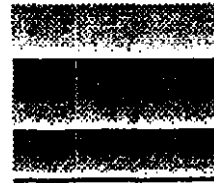
【 図 1 7 】



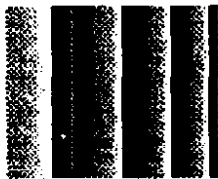
【 図 1 8 】



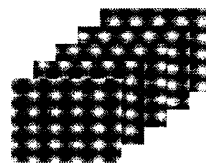
【 図 2 0 】



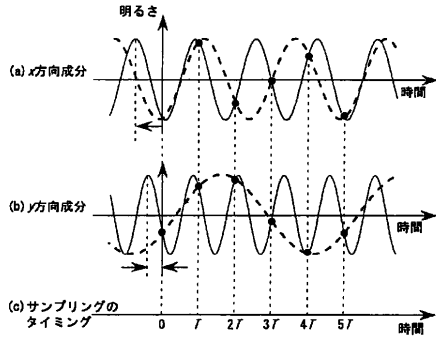
【 図 1 9 】



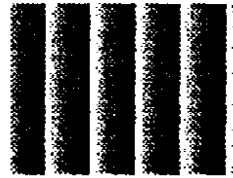
【 図 2 1 】



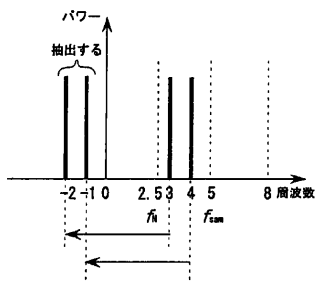
【 図 2 2 】



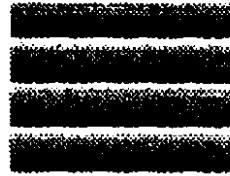
【 図 2 4 】



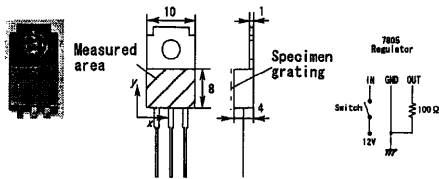
【 図 2 3 】



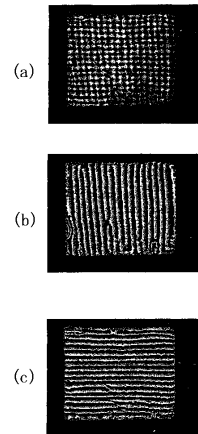
【 図 2 5 】



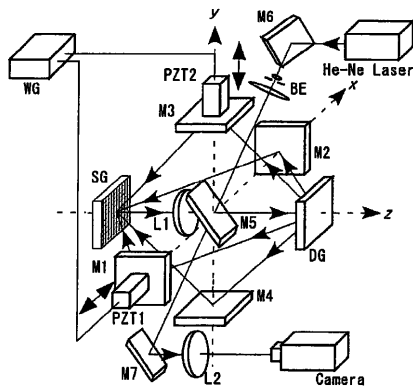
【 図 2 6 】



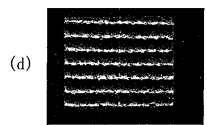
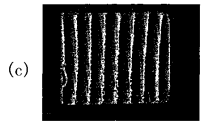
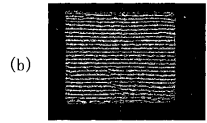
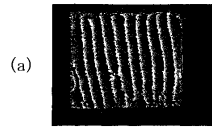
【 図 2 8 】



【 図 2 7 】



【 図 29 】



フロントページの続き

- (72)発明者 森本 吉春
大阪府泉南郡田尻町りんくうポート北5 - 17
- (72)発明者 藤垣 元治
和歌山県和歌山市木ノ本1496 - 164
- (72)発明者 米山 聡
東京都北区岩淵町26 - 11 NK赤羽岩淵309
- (72)発明者 山本 裕子
和歌山県海草郡下津町下津1602
- (72)発明者 池田 泰之
京都府綾部市味方町宮ノ上53 - 1

審査官 岡田 卓弥

- (56)参考文献 特開2002 - 303508 (JP, A)
特表平02 - 500217 (JP, A)
特開2001 - 141740 (JP, A)
特表平06 - 503186 (JP, A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01B11/00 - 11/30
G01B9/00 - 9/10