

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第3955899号

(P3955899)

(45) 発行日 平成19年8月8日(2007.8.8)

(24) 登録日 平成19年5月18日(2007.5.18)

(51) Int. Cl.

G 0 1 B 11/16 (2006.01)

F I

G 0 1 B 11/16

G

請求項の数 6 (全 17 頁)

(21) 出願番号 特願2002-275775 (P2002-275775)
 (22) 出願日 平成14年9月20日(2002.9.20)
 (65) 公開番号 特開2004-109075 (P2004-109075A)
 (43) 公開日 平成16年4月8日(2004.4.8)
 審査請求日 平成17年6月2日(2005.6.2)

(73) 特許権者 504190548
 国立大学法人埼玉大学
 埼玉県さいたま市桜区下大久保255
 (74) 代理人 100097984
 弁理士 川野 宏
 (72) 発明者 豊岡 了
 埼玉県さいたま市大久保領家597-2
 (72) 発明者 門野 博史
 埼玉県所沢市東所沢1-35-4-603
 審査官 岡田 卓弥

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 電子的スペックル干渉法を用いた変形計測方法および装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

スペックル干渉法を用いて得られた、動的被観察体の位相情報を担持したスペックルパターン画像に基づき、所定位相範囲に位相ラッピングされた被観察体の位相変化曲線を解析により求め、この後、該位相変化曲線を位相アンラッピングする、電子的スペックル干渉法を用いた変形計測方法において、

所定時間毎に得られた複数の前記スペックルパターン画像に基づき、画像各点毎の時間領域における強度信号を求め、該強度信号の余弦成分を抽出し、抽出された該余弦成分に、時間領域におけるヒルベルト変換処理を施して前記強度信号の正弦成分を求め、求められた該正弦成分と前記余弦成分の比に基づいて前記画像各点毎の位相変化を求めて、前記被

10

【請求項2】

前記ヒルベルト変換処理は下式を用いて行われることを特徴とする請求項1記載の電子的スペックル干渉法を用いた変形計測方法。

【数1】

$$\hat{F}(t) = H.T.[f(t)] = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(t')}{t-t'} dt'$$

20

ここで、 t 、 t は時間、 $f(t)$ は時間の関数を表す

【請求項 3】

前記画像各点毎の時間領域における強度信号 $I(x; t)$ の位相項に、該位相項が単調増加または単調減少となるような時間キャリアを導入する位相成分 t を加算または減算することを特徴とする請求項 1 または 2 記載の電子的スペックル干渉法を用いた変形計測方法。

【請求項 4】

前記動的被観察体が引っ張り試験に供された試験片であることを特徴とする請求項 1 から 3 のうちいずれか 1 項記載の電子的スペックル干渉法を用いた変形計測方法。

【請求項 5】

スペックル干渉法を用いて得られた、動的被観察体の位相情報を担持したスペックルパターン画像に基づき、所定位相範囲に位相ラッピングされた被観察体の位相変化曲線を解析により求めるとともに、該位相変化曲線に位相アンラッピング処理を施す、電子的スペックル干渉法を用いた変形計測装置において、

所定時間毎に得られた複数の前記スペックルパターン画像に基づき、画像各点毎の時間領域における強度信号 $I(x; t)$ を求める強度信号演算手段と、

前記強度信号演算手段から出力された強度信号 $I(x; t)$ から、所定の平均強度信号 $I_0(x; t)$ を差し引いて該強度信号の余弦成分 $I_c(x; t)$ を算出する平均成分除去手段と、

前記平均成分除去手段から出力された該強度信号の余弦成分に対し、時間領域におけるヒルベルト変換処理を施して、前記強度信号の正弦成分を算出するヒルベルト変換演算手段と、

前記平均成分除去手段において算出された該強度信号の余弦成分と、前記ヒルベルト変換演算手段において算出された該強度信号の正弦成分との比の逆正接を求める演算を行い、前記被観察体の物体位相を求める物体位相決定手段と、

を備えたことを特徴とする電子的スペックル干渉法を用いた変形計測装置。

【請求項 6】

前記強度信号 $I(x; t)$ に対して適切な時間キャリア成分を重畳せしめる時間キャリア重畳手段を備え、該時間キャリア重畳手段は、スペックル干渉を生ぜしめるための 2 系の照明光束のうち的一方に、これら 2 系の照明光束の間に所定の光路長差を発生させる光路長差発生手段を設けたことを特徴とする請求項 5 記載の電子的スペックル干渉法を用いた変形計測装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、電子的スペックル干渉法を用いた変形計測方法および装置に関し、詳しくは、動的物体の時間的変形についてのスペックル干渉画像を解析する際に、位相アンラッピングを良好に行い得る電子的スペックル干渉法を用いた変形計測方法および装置に関するものである。

【0002】

【従来の技術】

干渉法によって鏡面状態にある物体の表面状態を測定するために、位相分布（表面状態に対応）を簡単に求めたいという要求は、近年の技術の高度化に伴い光学分野や電子分野を中心に極めて強いものとなっている。特に、干渉測定において、このような観察物体の位相分布を求める手法については、主として位相シフト法と空間的フーリエ変換法（空間キャリアを導入したフーリエ変換法；以下同様）を用いたものが従来より知られている。

【0003】

位相シフト法は、干渉計の物体光と参照光の間で、一般には 2 を整数分の一に分割した位相角ずつ位相をずらした各干渉パターン画像のパターン情報に基づき観察物体の位相分布を求めるもので、2 を N 等分した N 枚の干渉パターン画像から得られる所定の空間領

10

20

30

40

50

域における強度信号は下記(1)式で与えられる。

【0004】

【数2】

$$I_i(x, y) = I_0 [1 + \gamma \cos\{\phi(x, y) + 2\pi i/N\}] \quad i = 0, 1, \dots, (N-1) \quad \dots(1)$$

【0005】

ここで、 (x, y) は求めるべき位相である。また、 I_0 は平均強度、 ϕ は干渉パターンの可視度(モジュレーション)であり、いずれも未知量である。簡単な例として、 $N = 4$ の場合は、下記(2)式より求められる。

【0006】

【数3】

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

【0007】

次に、フーリエ変換法について説明する。干渉計の一方の光路を y 軸周りに微小角だけ傾けると、下記(3)式で与えられる空間的な強度分布が得られる。

【0008】

【数4】

$$\begin{aligned} I(x, y) &= I_0 [1 + \gamma \cos\{\phi(x, y) + 2\pi x \sin \theta / \lambda\}] \\ &= I_0 [1 + \gamma \cos\{\phi(x, y) + 2\pi f_0 x\}] \end{aligned} \quad \dots(3)$$

【0009】

ここで、 $f_0 = \sin \theta / \lambda$ は、光路を傾けたことによって生じたキャリア縞の空間周波数である。上記(3)式を x 方向にフーリエ変換すると、下記(4)式が求まる。

【0010】

【数5】

$$\begin{aligned} J(f, y) &= \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y) \exp(-j2\pi fx) dx \\ &= J_0(f, y) + J_1(f + f_0, y) + J_1^*(f - f_0, y) \end{aligned} \quad \dots(4)$$

【0011】

この(4)式の右辺は、 f_0 が十分大きければ空間周波数軸上で3つの項を互いに分離できることを示している。そこで、 f_0 を十分大きくとって右辺の第2項のみを取り出し、他の項をカットするフィルタに通すと、下記(5)式が得られる。

【0012】

【数6】

$$I_r = I_0 \gamma \exp[i\phi(x, y)] \quad \dots(5)$$

【0013】

この(5)式の右辺の実部と虚部の比(逆正接)から、下記(6)式が求められる。

【 0 0 1 4 】

【 数 7 】

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[I_r]}{\text{Re}[I_r]} \quad \dots(6)$$

上述した従来の2方法は、いずれも、求めようとする未知量 (x, y) が他の未知量 I_0 、 I_1 とは無関係に求められる。位相値は $[-\pi, \pi]$ の間の主値として求められる。位相シフト法を用いた際に、位相が線形的に変化する様子を図8に示す。上記(6)式の分母が余弦関数、分子が正弦関数であり、その比の逆正接により、2ごとに位相跳びが生じる鋸歯状の位相分布が得られる。位相跳びの位置を判定し、この各位値の右側のデータに2の位相値を加える(または差し引く)ことによって位相跳びを補正し、物体の形状に比例した位相分布を得ることができる。この処理を位相アンラッピングと称する。

【 0 0 1 5 】

一般に、位相シフト法では2次元干渉パターンの中の1点の位相を、その点の位相シフトした複数のデータから解析することができる。したがって、空間的に別の点の影響を受けることはない。それに対して、フーリエ変換法においては、空間キャリアからなる1直線上のデータ全てに亘ってフーリエ変換の演算を施さなければならないので、各点の位相を他の点と独立に求めることはできない。

【 0 0 1 6 】

その一方で、位相シフト法では複数枚の位相シフトした干渉パターン画像を取り込む期間に亘って観察物体が静止していなければならない。それに対して、フーリエ変換法においては、キャリア成分さえ作っておけば1枚の干渉パターン画像から位相解析ができるので、動的な現象に適しているといえる。換言すれば、位相シフト法は観察対象に対して空間的な制限は緩いが時間的には定常であることが必須であり、フーリエ変換法においては観察対象は空間的には空間キャリア周期に比べて十分緩やかな分布あるいは一様とする必要があるが、時間的には動いていてもかまわないといえる。

【 0 0 1 7 】

しかしながら、観察対象が時間的に変化し、かつ空間的にも一様でないあるいは急激に変化する場合にはこれらの方法を適用することはできない。例えば、材料の塑性変形から破壊に至る過程は非線形的で、その歪測定においては、時間的かつ空間的な変形分布を測定する必要があるが、このような測定において上記2つの方法を適用することは理論的に難しい。

【 0 0 1 8 】

このような時間的、かつ空間的な変動がある場合に有効な干渉法としては、動的スペックル干渉法が知られている。

【 0 0 1 9 】

スペックル干渉法は、粗面物体をレーザ光で照射したときに観察面に生じる斑点状の模様(スペックルパターン)を利用する干渉法である。スペックルパターンは一般の結像系では画像ノイズとして好ましくないものとされる。しかし、位相情報を担っておりその変化から変形を見積もることができる。また、スペックル干渉法では光の波長を基準とした高精度な変形測定が可能になる。

【 0 0 2 0 】

図9に、2光束照射型のスペックル干渉装置を示す。粗面物体である観察物体100は、 xz 面内で略対称に配された、レーザ光源101からの2光束102A、102Bによって照明される。観察物体100によって拡散反射した光束はCCDカメラ103の結像面上に干渉スペックルパターンを形成する。この後、得られた干渉スペックルパターン画像を解析して、観察物体100の表面形状に応じた位相解析を行うこととなる。

この位相解析手法として、和差法なる手法が知られている。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 1 】

一般に、スペックルパターン画像の位相解析においては、観察物体 1 0 0 の変形前後のスペックルパターンを撮像し、それらの画像点毎の強度の差を計算する。相関の強い場所、すなわち変形による位相変化が 0 または 2π の整数倍の位置では差強度が 0 に近くなり、一方、相関の弱い場所では差強度が大きな値をとることから、2 画像の強度差 I_{sub} の絶対値を計算することによって、変形量に応じた相関パターンが得られる。

【 0 0 2 2 】

上述した和差法においては、強度差 I_{sub} の情報に加えて強度和 I_{add} の情報を利用することによって、可視度 (モジュレーション) とは無関係に位相を求める。

【 0 0 2 3 】

ここで、図 9 に示すように、2 つの光束 1 0 2 A、1 0 2 B の各光路上にそれぞれシャッタ 1 0 4 A、1 0 4 B を置き、一方の光束のみで物体を照射したときの時間領域における画像点毎の各強度分布 $I_1(x; t)$ 、 $I_2(x; t)$ をあらかじめ測定しておく。スペックル干渉装置の光学系 (面内変形あるいは面外変形測定系) において得られる干渉パターン $I(x; t)$ は一般的に下記 (7) 式のように表される。

【 0 0 2 4 】

【 数 8 】

$$I(x; t) = I_0(x; t) [1 + \gamma(x; t) \cos(\theta(x; t) + \phi(x; t))] \quad \dots (7)$$

【 0 0 2 5 】

ここで、 $I_0(x; t)$ は $I_1(x; t)$ および $I_2(x; t)$ の平均強度、 $\theta(x; t)$ はランダムなスペックル位相、 $\phi(x; t)$ は変調度 (モジュレーション)、 $\phi_0(x; t)$ は物体位相である。

【 0 0 2 6 】

次に、物体変形前の強度を $I_{before}(t = t_1)$ とし、変形後の強度を $I_{after}(t = t_2)$ とするとそれぞれ下記 (8) 式、(9) 式のように表される。

【 0 0 2 7 】

【 数 9 】

$$I_{before} = I(x; t_1) = I_0 [1 + \gamma_m \cos(\theta + \phi_1)] \quad \dots (8)$$

$$I_{after} = I(x; t_2) = I_0 [1 + \gamma_m \cos(\theta + \phi_2)] \quad \dots (9)$$

【 0 0 2 8 】

これらの強度パターンに対して差 I_{sub} および和 I_{add} を計算し同時に局所平均を取ると、下記 (10) 式、(11) 式のように表される。

【 0 0 2 9 】

【 数 1 0 】

$$I_{sub} = \langle |I_{after} - I_{before}| \rangle = c \langle |\sin(\theta + \Delta\phi/2)| \rangle \langle |\sin(\Delta\phi/2)| \rangle \approx c' |\sin(\Delta\phi/2)| \quad \dots (10)$$

$$I_{add} = \langle |I_{after} + I_{before} - 2I_0| \rangle = c \langle |\cos(\theta + \Delta\phi/2)| \rangle \langle |\cos(\Delta\phi/2)| \rangle \approx c' |\cos(\Delta\phi/2)| \quad \dots (11)$$

10

20

30

40

50

【0030】

ここで、 $\langle \rangle$ は局所的空間平均を表す。 c_1, c_2 は定数である。平均強度 I_0 は局所的な時間平均により求めることができる。また、 $\Delta\phi = 2\pi(c_2 - c_1)t$ であり時刻 t_1 と時刻 t_2 の間の物体の変形を表す。

これら2つの成分に対して下記(12)式で表される演算を行うことにより、物体位相が求められることになる。

【0031】

【数11】

$$\Delta\phi = 2 \tan^{-1} \frac{I_{sub}}{I_{add}} \quad \dots(12) \quad 10$$

【0032】

しかしながら、上述した和差法を用いた場合には、上述した(10)式および(11)式に示すように正弦および余弦の各成分に対して絶対値をとっているため、図10に示すような直線的に増加する物体位相に対して、実際に得られる位相曲線は、前述したような位相跳びは生じないが、その代わりに図10の実線で示されるような位相の折り返しを有する。これに対しては、折り返しの各区画に番号 n を付け、下記(13)式を用いて位相を接続する(位相アンラッピングする)ことで元の物体位相を復元することができる。

【0033】

【数12】

$$\Delta\phi' = 2\pi \text{int} \left(\frac{n}{2} \right) + (-1)^{n-1} \Delta\phi \quad \dots(13) \quad 20$$

$$n = 1, 2, 3, 4, \dots$$

【0034】

【発明が解決しようとする課題】

ところで、一般的な干渉法では、物体位相を求めるための、上記(12)式に対応する演算(例えば上記(6)式)に用いる正弦成分および余弦成分は絶対値を用いないため、得られる位相の折りたたみは図11(あるいは図8)に示すように鋸歯状の位相跳びが生じる。この場合は2の明確な不連続点が生じるため物体位相復元のための位相接続処理は比較的容易に実行できる。すなわち不連続点を自動的に(ソフトウェアにより)検出しその区間に2の整数倍のオフセットを加算あるいは減算すればよい。しかしながら、上述した和差法では図10に示すように特異な位相の折りたたみが発生する。よって、不連続点が生じないため、折りたたみの区間をソフトウェアにより自動処理することは容易ではない。一般に、スペックル干渉法では図12に示すようにスペックルノイズが顕著である。特に、スペックル相関パターン(縞)が密になる領域、すなわち変形量が大きい領域では、和差法での位相接続処理が特に困難となり多くの場合自動化処理が不可能となる。 40

【0035】

また、和差法では上記(10)、(11)式に見られるように、局所的な空間平均を取ることが原理的に不可欠であり、この操作によって空間分解能の低下が生じる。その結果として、位相の折り返し点を検出することがさらに困難となり、位相接続処理は極めて困難なものとなる。

【0036】

本願発明者等は、このような和差法の位相接続処理の困難性に鑑み、その改良手法を提案しており(特開2001-311613号公報)、それによって位相の折り返し点の検出精度が向上しているが、位相の折り返し点を自動検出し得るまでには至っていない。

【0037】

なお、空間キャリアを導入する空間的フーリエ変換法とは異なり、時間キャリアを導入する時間的フーリエ変換法が近年注目されているが、相対的にノイズ成分が大きい信号を用いる上述したスペックル干渉法に対してこの時間的フーリエ変換法を適用した場合には、上記信号について最適なバンドパスフィルタを自動的に決定して処理を行なうことが困難となる。

【0038】

本発明は、上記事情に鑑みなされたもので、電子的スペックル干渉法においても、位相アンラッピング処理を行う際に、位相分布曲線における位相の接続点の検出を自動化する程度まで容易なものとすることができ、観察物体の動的な変形、振動、歪等を高精度に解析し得る電子的スペックル干渉法を用いた変形計測方法および装置を提供することを目的とするものである。

10

【0039】

【課題を解決するための手段】

本発明の電子的スペックル干渉法を用いた変形計測方法は、スペックル干渉法を用いて得られた、動的被観察体の位相情報を担持したスペックルパターン画像に基づき、所定位相範囲に位相ラッピングされた被観察体の位相変化曲線を解析により求め、この後、該位相変化曲線を位相アンラッピングする方法において、

所定時間毎に得られた複数の前記スペックルパターン画像に基づき、画像各点毎の時間領域における強度信号を求め、該強度信号の余弦成分を抽出し、抽出された該余弦成分に、時間領域におけるヒルベルト変換処理を施して前記強度信号の正弦成分を求め、求められた該正弦成分と前記余弦成分の比に基づいて前記画像各点毎の位相変化を求めて、前記被観察体の位相変化曲線を求めることを特徴とするものである。

20

この場合において、前記ヒルベルト変換処理は下式を用いて行われる。

【0040】

【数13】

$$\hat{F}(t) = H.T.[f(t)] = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(t')}{t-t'} dt'$$

ここで、 t 、 t' は時間、 $f(t)$ は時間の関数を表す

30

【0041】

また、前記画像各点毎の時間領域における強度信号 $I(x; t)$ の位相項に、該位相項が単調増加または単調減少となるような時間キャリアを導入する位相成分 t を加算または減算することが好ましい。

また、本発明の電子的スペックル干渉法を用いた変形計測方法は、前記動的被観察体が引っ張り試験に供された試験片であるような場合に特に有用である。

【0042】

また、本発明の電子的スペックル干渉法を用いた変形計測装置は、前記スペックル干渉法を用いて得られた、動的被観察体の位相情報を担持したスペックルパターン画像に基づき、所定位相範囲に位相ラッピングされた被観察体の位相変化曲線を解析により求めるとともに、該位相変化曲線に位相アンラッピング処理を施す装置であって、

40

所定時間毎に得られた複数の前記スペックルパターン画像に基づき、画像各点毎の時間領域における強度信号 $I(x; t)$ を求める強度信号演算手段と、

前記強度信号演算手段から出力された強度信号 $I(x; t)$ から、所定の平均強度信号 $I_0(x; t)$ を差し引いて該強度信号の余弦成分 $I_c(x; t)$ を算出する平均成分除去手段と、

前記平均成分除去手段から出力された該強度信号の余弦成分に対し、時間領域におけるヒルベルト変換処理を施して、前記強度信号の正弦成分を算出するヒルベルト変換演算手段

50

と、

前記平均成分除去手段において算出された該強度信号の余弦成分と、前記ヒルベルト変換演算手段において算出された該強度信号の正弦成分との比の逆正接を求める演算を行い、前記被観察体の物体位相を求める物体位相決定手段と、
を備えたことを特徴とするものである。

【0043】

また、前記強度信号 $I(x; t)$ に対して適正な時間キャリア成分を重畳せしめる時間キャリア重畳手段は、例えば、スペックル干渉を生ぜしめるための2系の照明光束のうちの一方向に、これら2系の照明光束の間に所定の光路長差を発生させる光路長差発生手段とする。

10

【0044】

【発明の実施の形態】

以下、本発明に係る電子的スペックル干渉法を用いた変形計測方法の実施形態について図面を用いて説明する。

【0045】

<基本構成>

図1および図2は、それぞれ観察物体の面内変位および面外変位をスペックル干渉測定する光学系の一例を示すものである。

【0046】

図1に示す面外変位計測用の干渉光学系装置では、半導体レーザー光源(LD)11より出射したレーザー光が観察物体12の前方に配置された拡散板(Diffuser)13により一部が散乱されてランダムなスペックルパターンを形成する。一方、拡散板13を透過したレーザー光は観察物体12を照明し、その表面で散乱されて、上記と同様にスペックルパターンを形成する。これら2つの散乱光はCCDカメラ14の撮像面上に、ランダムな干渉スペックルパターンの像を形成し、この干渉パターンが光電的に読み取られる。また、図2に示す面内変位計測用の干渉光学系装置では、観察物体12が、ハーフミラー17により分割された、物体法線に対して略対称な2つのレーザー光により照明されて各々独立なスペックルパターンが形成され、それら2つのスペックルパターンの干渉によりCCDカメラ14の撮像面上に干渉スペックルパターンの像が形成される。この後、上記と同様に、この干渉スペックルパターンが光電的に読み取られる。なお、PZT15については後述する。

20

30

【0047】

上述したいずれの装置においてもCCDカメラ14により検出されるランダムな干渉パターンの強度 $I(x; t)$

は下記(14)式のように表される。

【0048】

【数14】

$$I(x;t) = I_0(x;t) [1 + \gamma(x;t) \cos(\theta(x;t) + \phi(x;t))] \quad \dots(14)$$

40

【0049】

ここで、 x は座標、 t は時刻、 $I_0(x; t)$ は平均強度、 $\gamma(x; t)$ は変調度、 $\theta(x; t)$ はランダムなスペックル位相、 $\phi(x; t)$ は観察物体の変位に伴う物体位相である。

【0050】

なお、本実施形態では、上記物体位相 $\phi(x; t)$ を高精度で求めることが目標となる。そこで本実施形態においては、まず、上記(14)式の強度に対して局所的な時間平均により平均強度 $I_0(x; t)$ を求め、干渉パターンの強度 $I(x; t)$ から差し引くことにより干渉パターン強度の余弦成分のみを取り出す。これを $I_c(x; t)$ とおけば下記(15)式のように表すことができる。

50

【 0 0 5 1 】

【 数 1 5 】

$$I_c(x;t) = I(x;t) - I_0(x) \cong I(x;t) - \langle I(x;t) \rangle_t \propto \cos(\theta(x;t) + \phi(x;t)) \quad \dots(15)$$

次に、上記(15)式で表される時間信号に対してHilbert変換を適用する。

関数 $f(t)$ に対するHilbert変換は下記(16)式で定義される。

【 0 0 5 2 】

【 数 1 6 】

$$\hat{F}(t) = H.T.[f(t)] = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(t')}{t-t'} dt' \quad \dots(16)$$

10

【 0 0 5 3 】

上記(15)式の余弦成分に対してHilbert変換を施すことにより、下記(17)式のような正弦成分が得られる。

【 0 0 5 4 】

【 数 1 7 】

$$I_s(x;t) = H.T.[I_c(x;t)] \propto \sin(\theta(x;t) + \phi(x;t)) \quad \dots(17)$$

20

【 0 0 5 5 】

上述した余弦成分 $I_c(x;t)$ および正弦成分 $I_s(x;t)$ の比を求め、さらにこの比の逆正接を求めることにより下記(18)式のように物体位相が決定される。

【 0 0 5 6 】

【 数 1 8 】

$$\theta(x;t) + \phi(x;t) = \tan^{-1} \left[\frac{I_s(x;t)}{I_c(x;t)} \right] \quad \dots(18)$$

30

【 0 0 5 7 】

通常、ランダムなスペックル位相 $(x;t)$ の変化は物体位相の変化に比べて遅いので下記(19)式のように近似することができる。

【 0 0 5 8 】

【 数 1 9 】

$$\theta(x;t) \cong \theta(x;0) \quad \dots(19)$$

40

【 0 0 5 9 】

よって求める物体位相は下記(20)式のように決定される。

【 0 0 6 0 】

【 数 2 0 】

$$\phi(x;t) \equiv \tan^{-1} \left[\frac{I_s(x;t)}{I_c(x;t)} \right] - \theta(x;0) \quad \dots(20)$$

【0061】

また、観測時間 t ($0 < t < t_0$) が長く (19) 式が成り立たない場合は観測時間 t をスペckル位相が一定と見なせる n 個の区間 t_d ($t_0 = n t_d$) に分割し、(20) 式において $(x; 0)$ を $(x; k t_d)$, $k = 0, 1, \dots, n-1$ と置き換えること

10

により各区間において物体位相を求める。すなわち適宜参照位相の更新を行なう。最終的に各区間を接続することにより長時間に亘る動的な現象を解析することが可能となる。このようにして求められた、時間領域における位相曲線は、前述したように、位相値が $-$ および $+$ を主値として、ラッピングされた (折りたたまれた) 状態となっている。そこで、このようなラッピングされた (折りたたまれた) 位相曲線に対して、これを本来の曲線に戻す位相アンラッピング処理を施す。

【0062】

以上の演算処理をスペckル干渉画像上の画像各点毎に行うことにより、観察物体の変形を動的に、かつ高精度に定量化して解析することができる。

【0063】

20

< 位相項の符号の確定 >

ところで、上述した原理の説明においては、式 (15) から明らかなように位相項の符号に不確定性が生じる。この不確定性を取り除くためには、式 (15) の位相項に意図的に既知の位相成分 t を導入する。すなわち、下記 (21) 式において位相項である $(x; t) + (x; t) + t$ が単調増加あるいは単調減少となるように決定された位相成分 t を、いわゆる時間キャリア成分として導入する。

【0064】

【数21】

$$I(x;t) = I_0(x;t) [1 + \gamma(x;t) \cos(\theta(x;t) + \phi(x;t) + \omega t)] \quad \dots(21)$$

30

【0065】

具体的には、例えば図1に示すような、半導体レーザ11の注入電流を変調する方法、あるいは図2に示すような、ミラー16を圧電素子(PZT)15によって移動させることにより光路長を変化させる方法等の種々の周知の手法により行うことができる。

【0066】

< 装置構成 >

図3は、本発明の実施形態に係る電子的スペckル干渉法を用いた変形計測装置を示す概略構成図である。なお、この装置は観察物体の面内変位計測を行う装置の一例である。

【0067】

40

図2においても説明したように、観察物体12は、ハーフミラー17により分割された、物体法線に対して略対称な2つのレーザ光により照明され、それら2つのレーザ光の観察物体12上からの散乱により各々独立にランダムなスペckルパターンが形成される。これら2つのスペckルパターンの干渉によりCCDカメラ14の撮像面上に干渉パターンが形成される。ここで圧電素子(PZT)15は前述した時間キャリア成分を導入する目的で、干渉計の片方の系の光路長を変化させるために用いる。圧電素子15、CCDカメラ14および半導体レーザ(LD)11はタイミング制御装置(コントローラ)21により制御され、CCDカメラ14により取り込まれた干渉パターンの画像データはコンピュータ22内のメモリに格納される。コンピュータ22においては、この画像データに対し、ヒルベルト変換法を用いた位相解析処理を施し、観察物体の変形歪量等の各情報を得る。得

50

られた観察物体に関する各情報は表示装置（ディスプレイ）23に表示される。

【0068】

なお、スペックル画像は、図4に示すように、所定時間毎に取り込まれるようになっており、これにより、この画像内の画像各点毎に強度 $I(x, y; t)$ の時間変化（図4右端のグラフ参照）が得られることになる。

ここで、上記画像内の1点 (x, y) の強度 $I(x, y; t)$ は下記（22）式により表される。

【0069】

【数22】

$$I(x, y; t) = I_0(x, y; t) [1 + \gamma(x, y; t) \cos(\theta_i(x, y; t) + \phi(x, y; t) + \omega t)] \dots (22)$$

10

【0070】

ここで、 t は時間キャリア成分であるがこれを導入しない場合は $\omega = 0$ とする。

【0071】

また、上記コンピュータ22における各演算処理は、図5のブロック図に示されるように、入力信号としての上記強度 $I(x, y; t)$ （以下、単に $I(x; t)$ と記す）に対し、平均成分除去手段32、ヒルベルト変換演算手段33、物体位相導出手段34および位相接続手段35において順次なされるようになっている。

20

なお、上記強度 $I(x; t)$ は、前述したPZT等の時間キャリア重畳手段により適切な時間キャリア成分が重畳されたものとされている。

【0072】

入力された強度 $I(x; t)$ は、まず平均成分除去手段32において上記（15）式を用いて平均強度 $I_0(x; t)$ を除去する演算処理がなされる。

また、ヒルベルト変換演算手段33においては、上記（17）式を用いて、ヒルベルト変換による正弦成分の算出が行われる。

【0073】

さらに、物体位相導出手段34においては、上記（18）式を用いて余弦成分と正弦成分の比の逆正接を求める演算がなされ、次に、上記（20）式を用いて物体位相が決定される。

30

【0074】

この後、位相接続手段35において、物体位相曲線のアンラッピング演算処理が行われて、観察物体の動的変形情報が求められる。すなわち、前述したように、位相曲線の位相跳びの位置を判定し、その判定位置毎に、その位置の右側のデータに対して、さらに2の位相値を加える（または差し引く）ことによって位相跳びを補正し、物体の変形に比例した位相分布を得る。

【0075】

最後に、3次元の変形分布形成手段36により、上記で得られた、画像各点についての、位相アンラッピング処理がなされて得られた位相曲線から、図6に示す如き3次元の変形分布を得、このデータをディスプレイ23上で3次元的に表示し得るような形態に変換して出力する。

40

なお、上記各手段32～36はコンピュータ22内に格納されたプログラムにより構成されている。

【0076】

なお、本発明方法は、例えば材料の引っ張り試験（あるいは疲労試験）を行う際等の変形計測に適用すると特に有効であるから、以下、アルミニウム合金の引っ張り試験において刻々変化するその変形の解析処理に本発明方法を適用した場合の効果について、具体的な実施例を用いて説明する。

【0077】

50

< 実施例 >

一般に、アルミニウム合金等の材料を引っ張った場合、弾性変形領域では一様な伸びが生じる。これをスペックル干渉法 (ESPI) で観察すると、図 7 (A) に示すような一様な縞が認識される。位置によって縞の方向や密度が異なるのは、変形以外に予期できない試験片の設置誤差等による回転が生じていることによるものである。変形が降伏点を越え、塑性変形領域になると、変形はすべり帯と称される、一般には引張り方向に略 45° 傾いた狭い領域に局在する。これをスペックル干渉法 (ESPI) で観察すると、図 7 (B) に示すように、局在部に縞が密集して現れる。

【 0 0 7 8 】

さらに、変形速度に対して相対的に長い差分時間をもって観察すると、内部の縞構造が消失したような帯状の部分が現れ、時間的に略一定の速度で上下に移動していく様子が観察される。この部分について差分時間を十分に短くとると、縞構造が現れてくる。この部分を拡大して詳細に観察すると、図 7 (C) (最左図から最右図まで 3.6 秒毎に観察) に示すように、局在する変形が複雑に非線型的に伸展している様子がわかる。しかし、このような従来のスペックル干渉法 (ESPI) では、変形の時間的変化を定性的に把握することは可能であるが、変形の大きさを定量的に求めることはできない。

【 0 0 7 9 】

これに対し、その変形の解析処理に本発明方法を適用すれば、S/N比が比較的小さい場合等においても、上記変形の大きさを定量的に、高精度かつ容易に把握することができる。

【 0 0 8 0 】

以下、上記実施形態装置を用い、下記実験条件で、観察物体の面内変形による位相分布を解析した。その結果を図 6 (A) に示す。

なお、比較例として、同様の実験条件で、前述した和差法を用いて得られた結果を図 6 (B) に示す。

【 0 0 8 1 】

(1) 実験条件

物体：アルミ合金 (厚み 5 mm)

引っ張り速度：0.5 μ m/秒

観察領域：80mm \times 30mm

フレームレート：30フレーム/秒

照明光：半導体レーザー光

照明光の波長：532nm

【 0 0 8 2 】

(2) 実験結果

図 6 (A) と図 6 (B) の比較から明らかなように、和差法を用いた場合には、位相接続が正しく行われていないために極めて不正確な解析結果となっているのに対し、本発明方法を用いた場合には、変形の大きさを正確に得ることができる。

【 0 0 8 3 】

< 他の手法を用いた場合との比較 >

上述したように、電子的スペックル干渉法を用いて、時間領域における観察物体の変形計測を行う場合に、本発明方法に替えて他の手法を用いると種々の問題が生じる。

【 0 0 8 4 】

すなわち、位相シフト法や空間的フーリエ変換法を用いた場合には、いずれも時間的かつ空間的に変化するスペックルパターンを扱うこと自体が困難である。また、時間的フーリエ変換法においては、S/N比が小さいスペックル干渉法における信号に対して、自動的に最適なバンドパスフィルタを決定することが困難である。さらに、和差法を用いた場合には位相接続点の特定が難しく、多くの場合自動化処理が不可能であり、データ取得条件が良好な場合を除いて、上記比較例に示すように、極めて不正確な解析結果しか得られない。

【 0 0 8 5 】

10

20

30

40

50

これに対して、本発明方法を用いた場合には、上述したような各従来手法のような問題が生じる虞がなく、良好な解析結果を得ることができる。

【0086】

< 態様の変更 >

なお、本発明の実施形態方法においては種々の態様の変更が可能であり、例えば、位相ラッピングされた位相データに対してローパスフィルタによる平滑化処理や、スケルトニング処理（細線化処理）を施すようにしてもよい。

【0087】

また、本発明の適用対象は動的物体全般に及ぶものであり、例えば、上述した材料の引っ張り試験等の項目を含む、材料の疲労試験全般に適用可能であることは勿論のこと、動植物の各構成部分、特に人体組織の微小な動的変化にも適用可能である

【発明の効果】

以上、詳細に説明したように、本発明に係る電子的スペックル干渉法を用いた変形計測方法および装置によれば、被観察体の干渉スペックルパターン強度の余弦成分を抽出し、抽出された該余弦成分に、時間領域におけるヒルベルト変換処理を施して前記強度の正弦成分を求め、求められた正弦成分と余弦成分に基づいて前記画像各点毎の位相を求めて、前記被観察体の位相分布曲線を求めるようにしており、時間的かつ空間的に変化する被観察体であっても、容易に位相分布曲線を求めることができる上、スペックル干渉法に典型的なノイズを多く含む信号からも位相接続点の特定が容易であるから、自動化処理も可能で、極めて高精度な解析結果を得ることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明方法の概念を説明するための面外変位スペックル干渉測定光学系の一例を示す概略図

【図2】本発明方法の概念を説明するための面内変位スペックル干渉測定光学系の一例を示す概略図

【図3】本発明の実施形態装置の構成を示す概略図

【図4】本発明の実施形態装置に取り込まれる干渉パターン画像を概念的に示す図

【図5】本発明の実施形態装置のコンピュータに含まれる各手段を示すブロック図

【図6】本実施例および比較例による、観察物体の面内変形による位相分布の解析結果を示す図

【図7】アルミニウム合金等の材料を引張った場合における、従来のスペックル干渉法（ESPI）で観察した場合の変形分布を示す図

【図8】位相シフト法における位相ラッピング曲線を示すグラフ

【図9】2光束照射型のスペックル干渉装置（測定光学系）を示す概略図

【図10】和差法における位相の折りたたみ状態を示す図

【図11】一般的な干渉法における位相の折りたたみ状態を示す図

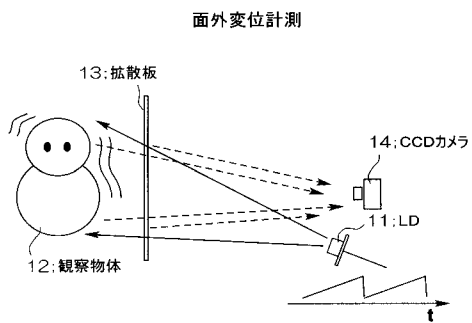
【図12】スペックル干渉法により得られた画像におけるスペックルノイズを示す図

【符号の説明】

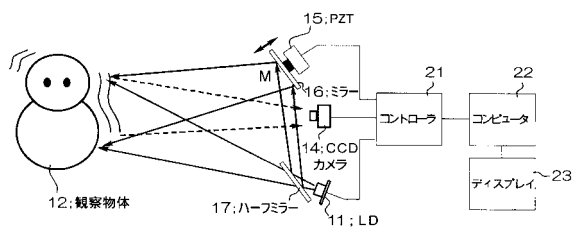
1 1	半導体レーザ光源（LD）	
1 2、1 0 0	観察物体	40
1 3	拡散板（Diffuser）	
1 4、1 0 3	CCDカメラ	
1 5	圧電素子（PZT）	
1 6	ミラー	
1 7	ハーフミラー	
3 2	平均成分除去手段	
3 3	ヒルベルト変換演算手段	
3 4	物体位相導出手段	
3 5	位相接続手段	
3 6	3次元の変形分布形成手段	50

- 101 レーザ光源
- 102 A、102 B 光束
- 104 A、104 B シャッタ

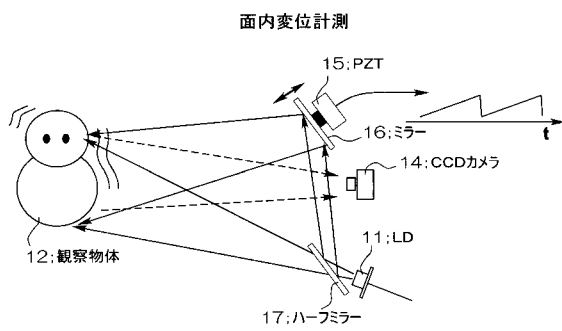
【図1】



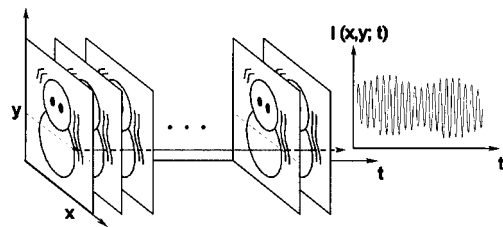
【図3】



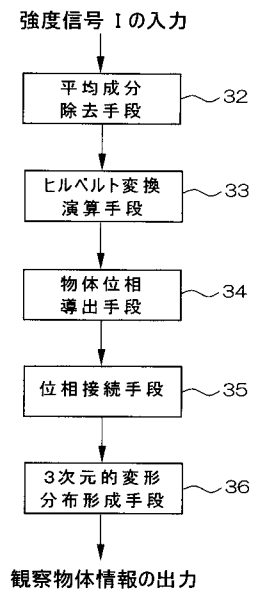
【図2】



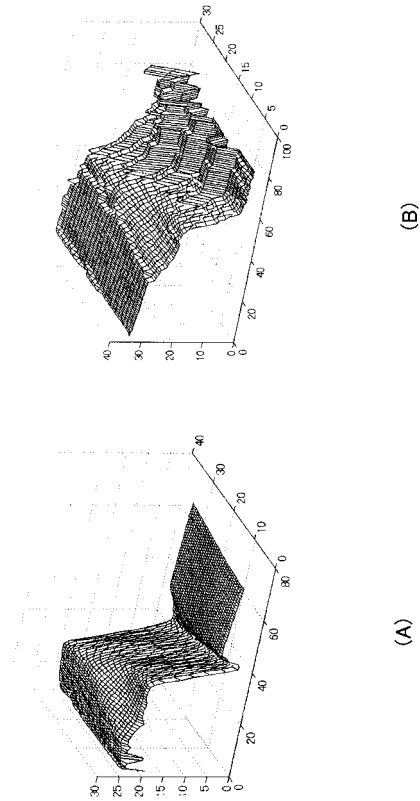
【図4】



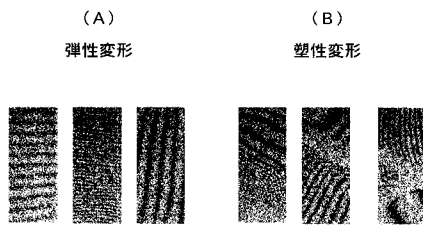
【 図 5 】



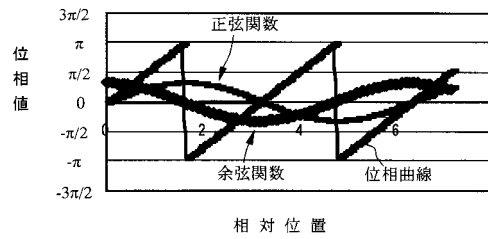
【 図 6 】



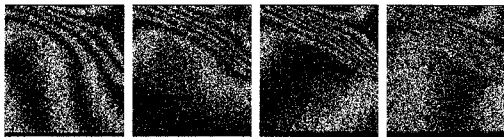
【 図 7 】



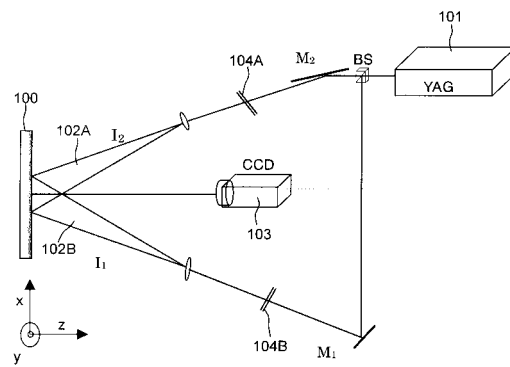
【 図 8 】



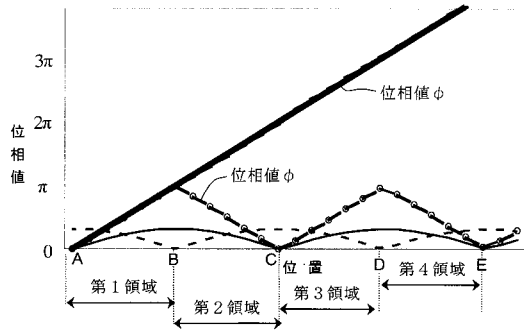
(C)



【 図 9 】



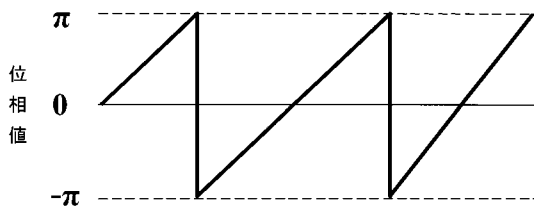
【 図 1 0 】



【 図 1 2 】



【 図 1 1 】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開2001-311613(JP,A)
特表2000-508066(JP,A)
特表2002-531854(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01B 9/00-11/30