

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5352997号  
(P5352997)

(45) 発行日 平成25年11月27日(2013.11.27)

(24) 登録日 平成25年9月6日(2013.9.6)

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

請求項の数 11 (全 10 頁)

(21) 出願番号	特願2007-328925 (P2007-328925)	(73) 特許権者	000004112 株式会社ニコン 東京都千代田区有楽町1丁目12番1号
(22) 出願日	平成19年12月20日(2007.12.20)	(74) 代理人	100072718 弁理士 古谷 史旺
(65) 公開番号	特開2009-150773 (P2009-150773A)	(74) 代理人	100116001 弁理士 森 俊秀
(43) 公開日	平成21年7月9日(2009.7.9)	(72) 発明者	佐々木 秀貴 東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内
審査請求日	平成22年12月10日(2010.12.10)	審査官	岸 智史

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 三次元形状計測装置、三次元形状計測方法およびプログラム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

輝度分布が正弦波状に変化するパターン光を測定対象物に照射する投影部と、  
前記投影部の投影方向と異なる方向から前記測定対象物に投影された前記パターン光による像を撮像し、各画像間で前記パターン光の位相が互いにずれた n 枚 の画像からなる画像群を取得する撮像部と、

前記 n 枚 の画像から  $n \cdot C_3$  通りの画像組 を抽出し、抽出した該画像組毎から光源に依存するパラメータをそれぞれ求める演算部と、

前記画像組毎から求められた複数の前記光源に依存するパラメータ同士の整合性に基づいて、前記画像群のいずれかの画像に異常出力点が含まれるか否かを判定する判定部と、  
を備え、

前記 n は、4 以上の整数である、  
ことを特徴とする三次元形状計測装置。

【請求項2】

請求項1に記載の三次元形状計測装置において、  
前記パラメータは、前記パターン光の振幅値、前記パターン光のオフセット値、前記パターン光の位相のいずれかを含むことを特徴とする三次元形状計測装置。

【請求項3】

請求項2に記載の三次元形状計測装置において、  
前記判定部は、複数の前記光源に依存するパラメータ同士の分散値に基づいて、前記判

定を行うことを特徴とする三次元形状計測装置。

【請求項 4】

請求項 2 に記載の三次元形状計測装置において、

前記演算部は、前記画像群の各画像の同一点における輝度変化に基づいて第 1 位相を求めるとともに、前記画像組からそれぞれ求めた複数の位相を平均した第 2 位相を求め、

前記判定部は、同一点での前記第 1 位相と前記第 2 位相との差に基づいて、前記判定を行うことを特徴とする三次元形状計測装置。

【請求項 5】

請求項 1 から請求項 4 のいずれか 1 項に記載の三次元形状計測装置において、

前記判定部は、前記画像のうちでコントラストが閾値以下となる部分領域および前記画像のうちで輝度値が所定の範囲から外れる部分領域の少なくとも一方を対象として前記判定を行うことを特徴とする三次元形状計測装置。

10

【請求項 6】

請求項 1 から請求項 4 のいずれか 1 項に記載の三次元形状計測装置において、

前記画像の部分領域の指定入力を受け付ける入力部をさらに備え、

前記判定部は、前記指定入力された部分領域を対象として前記判定を行うことを特徴とする三次元形状計測装置。

【請求項 7】

請求項 1 から請求項 5 のいずれか 1 項に記載の三次元形状計測装置において、

前記判定部は、前記異常出力点が含まれると判定したときに、前記異常出力点の位置を示す判定結果データを出力することを特徴とする三次元形状計測装置。

20

【請求項 8】

請求項 1 から請求項 5 のいずれか 1 項に記載の三次元形状計測装置において、

前記判定部は、前記異常出力点が含まれると判定したときに、前記異常出力点の計測データを周囲の計測データで補間することを特徴とする三次元形状計測装置。

【請求項 9】

請求項 1 から請求項 5 のいずれか 1 項に記載の三次元形状計測装置において、

前記判定部は、前記異常出力点が含まれると判定したときに、前記撮像部に前記画像群の再取得を指示することを特徴とする三次元形状計測装置。

30

【請求項 10】

輝度分布が正弦波状に変化するパターン光を測定対象物に照射するとともに、前記投影部の投影方向と異なる方向から前記測定対象物に投影された前記パターン光による像を撮像し、各画像間で前記パターン光の位相が互いにずれた n 枚の画像からなる画像群を取得し、

前記 n 枚の画像から  $n \cdot C_3$  通りの画像組を抽出し、抽出した該画像組毎から光源に依存するパラメータをそれぞれ求め、該複数の光源に依存するパラメータ同士の整合性に基づいて、前記画像群のいずれかの画像に異常出力点が含まれるか否かを判定し、

前記 n は、4 以上の整数である、

ことを特徴とする三次元形状計測方法。

【請求項 11】

請求項 10 に記載の三次元形状計測方法をコンピュータに実行させるためのプログラム

40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、位相シフト法による三次元形状計測装置とその周辺技術に関する。

【背景技術】

【0002】

従来から、測定対象物の三次元形状を計測する方法として、特許文献 1 に示すような位相シフト法が知られている。この位相シフト法では、正弦波状の強度分布を持つ縞パター

50

ンを被計測物の表面に複数回投影して正弦波の位相を求め、その情報をもとに三次元形状を復元する。

【特許文献1】米国特許第6075605号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0003】

ところで、位相シフト法による三次元形状の計測では、位相のパターンを除いて複数の画像をそれぞれ同じ条件で撮影することが前提となる。そのため、例えば、外部の照明環境の変化や三次元形状計測装置の異常などの外乱によって、複数の画像のいずれかに異常が生じると測定の精度が大幅に低減する。一方、位相シフト法で撮影された個々の画像のみから上記の異常の有無を判定することは非常に困難であるので、その改善がなお要請されていた。

10

【0004】

そこで、本発明の目的は、位相シフト法による三次元形状の計測において、画像の異常出力点を判定する手段を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0005】

一の形態に係る三次元形状計測装置は、投影部と、撮像部と、演算部と、判定部とを備える。投影部は、輝度分布が正弦波状に変化するパターン光を測定対象物に照射する。撮像部は、投影部の投影方向と異なる方向から測定対象物に投影されたパターン光による像を撮像し、各画像間でパターン光の位相が互いにずれた  $n$  枚の画像からなる画像群を取得する。演算部は、 $n$  枚の画像から  $n C_3$  通りの画像組を抽出し、抽出した画像組毎から光源に依存するパラメータをそれぞれ求める。判定部は、画像組毎から求められた複数の光源に依存するパラメータ同士の整合性に基づいて、画像群のいずれかの画像に異常出力点が含まれるか否かを判定する。  $n$  は、4以上の整数である。

20

【0006】

なお、上記の一の形態の三次元形状計測装置を三次元形状計測方法として表現したものや、上記の三次元形状計測方法をコンピュータに実行させるためプログラムやその記憶媒体も本発明の具体的態様として有効である。

【発明の効果】

30

【0007】

本発明によれば、複数の画像組から求めたパラメータによって、画像の異常出力点を判定できる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0008】

図1は、一実施形態である三次元形状計測装置の構成例を示している。

【0009】

三次元形状計測装置は、基準面上に測定対象物11が載置されるステージ12と、投影部13と、撮像部14と、CPU15と、記憶部16と、モニタ17と、入力部18とを有している。ここで、投影部13、撮像部14、記憶部16、モニタ17および入力部18はそれぞれCPU15と接続されている。

40

【0010】

投影部13は、ステージ12の基準面に対して光軸が斜めになるように配置されており、ステージ12の測定対象物11に向けてパターン光を投影する。この投影部13は、光源21と、照明光学系22と、パターン形成部23と、投影光学系24とで構成されている。照明光学系22は、光源21からの照明光を光軸方向に偏光させる。パターン形成部23は、照明光学系22によって光軸方向と平行になった光束にパターンを付与する。このパターン形成部23では、一方向に正弦波状の輝度変化をもつ縞模様(正弦格子)のパターン光を形成する。また、パターン形成部23は、正弦格子の位相を投影部13の光軸と垂直方向にシフトさせることが可能である。なお、パターン形成部23で形成されたパ

50

ターン光は、投影光学系 24 を介してステージ 12 上の測定対象物 11 に照射されることとなる。

【0011】

撮像部 14 は、ステージ 12 の基準面に対して光軸が垂直となるように配置されており、ステージ 12 上の測定対象物 11 に投影されたパターン光による像を撮像する。この撮像部 14 は、測定対象物 11 からの反射光を結像する結像光学系 25 と、測定対象物 11 の画像を撮像する撮像素子 26 とを有している。

【0012】

CPU 15 は、三次元形状計測装置の動作を統括的に制御するプロセッサである。例えば、CPU 15 は、プログラムに従って投影部 13 および撮像部 14 を動作させて、パターン光が重畳した測定対象物 11 の画像を撮像する。また、CPU 15 は、複数の画像のデータを用いることで測定対象物 11 の三次元形状を求める。

【0013】

また、CPU 15 は、プログラムの実行によって演算部 15a および判定部 15b として機能する。ここで、演算部 15a は、複数の画像の輝度変化に基づいて、撮像部 14 の撮影範囲に対応する画面の各位置でのパラメータ（パターン光の振幅値、オフセット値、位相）を求める。また、判定部 15b は、演算部 15a の求めたパラメータに基づいて、上記の画面内に異常出力点が含まれるか否かを判定する。

【0014】

記憶部 16 は、フラッシュメモリ等の不揮発性の記憶媒体で構成されている。記憶部 16 には、撮像部 14 の撮像した画像のデータや、CPU 15 が演算した後述の点群データを記憶できる。また、記憶部 16 には、CPU 15 により実行されるプログラムが記憶されている。

【0015】

モニタ 17 には、CPU 15 の指示に応じて撮像部 14 の撮像した画像などが表示される。また、入力部 18 は、計測開始指示を含む各種の入力を受け付ける。

【0016】

次に、本実施形態での位相シフト法による三次元形状の測定原理を簡単に説明する。なお、本実施形態では、4パケット法で測定対象物 11 の形状を求める例を説明する。

【0017】

本実施形態では、静止した測定対象物 11 に正弦格子のパターン光を投影し、このパターン光の位相を  $\pi/2$  ずつ移動させて測定対象物 11 を 4 回撮像する。撮像された 4 フレームにおける座標  $(x, y)$  での輝度値  $(I_1, I_2, I_3, I_4)$  に着目すると、それらの相対的な明度差は必ずパターン光の位相差分の変化を示す。したがって、以下の式 (1) によって、座標  $(x, y)$  での投影されたパターン光の位相  $\alpha$  を求めることができる。

【0018】

【数 1】

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \quad \dots(1)$$

そして、画面内の各位置で位相  $\alpha$  をそれぞれ求めた後に、位相  $\alpha$  が等しい点を連結して等位相線を得る。この等位相線は、測定対象物 11 を所定の平面で切断したときの断面形状を表している。そのため、投影部 13 および撮像部 14 の位置関係が既知であれば、三角測量の原理によって、この等位相線から測定対象物 11 の各位置の高さを示す三次元的な距離画像のデータ（点群データ）を得ることができる。

【0019】

ところで、上記の三次元形状の測定では、例えば、外部の照明環境の変化や三次元形状計測装置の異常などの外乱によって、輝度値  $(I_1, I_2, I_3, I_4)$  のいずれかに異常があると正しい位相を求めることができない。そのため、本実施形態では、以下の要領で画

10

20

30

40

50

面内での異常出力点の判定を行う。以下、図2の流れ図を参照しつつ、本実施形態の三次元形状計測装置の動作例を説明する。

【0020】

ステップS101：CPU15は、入力部18からの計測開始指示に応じて、測定対象物11にパターン光を照射して4フレームの画像群を取得する。このとき、CPU15は、4フレームでパターン光の位相が一周分移動するように、1フレームごとにパターン光の位相を  $\pi/2$  移動させて測定対象物11を撮像する。

【0021】

ステップS102：CPU15は、4フレームの画像群(S101)の輝度値を用いて、上記の式(1)から画面内の各位置での位相  $\phi$  を求める。なお、S102で求めた画面内の各位置での位相  $\phi$  は、CPU15によって記憶部16に記録される。

10

【0022】

ステップS103：CPU15は、4フレームの画像群(S101)から3フレームを抽出して4つの異なる画像組を生成する。

【0023】

ステップS104：CPU15は、4つの画像組(S103)のそれぞれにおいて、画像組に含まれる3フレームの画像を用いて光源に依存するパラメータ(パターン光の振幅値、パターン光のオフセット値、パターン光の位相)を求める。

【0024】

一例として、第1フレーム、第2フレーム、第3フレームを含む画像組について、S104でのCPU15は以下の要領で各パラメータの演算を行う。

20

【0025】

ここで、第1フレーム、第2フレーム、第3フレームにおける座標  $(x, y)$  での輝度値  $I_1, I_2, I_3$  は、それぞれ以下の式(2)のように示すことができる。

【0026】

【数2】

$$\begin{aligned} I_1 &= a \cos \phi + b \\ I_2 &= a \cos \left( \phi + \frac{\pi}{2} \right) + b \quad \dots(2) \\ I_3 &= a \cos (\phi + \pi) + b \end{aligned}$$

30

式(2)において、「a」はパターン光の振幅値を示している。また、「b」はパターン光のオフセット値を示している。また、「 $\phi$ 」はパターン光の位相を示している。

【0027】

そして、上記の式(2)を  $a, b, \phi$  について解くと、式(3)のように変形できる。

【0028】

【数3】

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{\frac{(I_1 - I_2)^2 + (I_2 - I_3)^2}{2}} \\ b &= \frac{I_1 + I_3}{2} \quad \dots(3) \\ \phi &= \cos^{-1} \frac{I_1 - b}{a} \end{aligned}$$

40

そのため、CPU15は、第1フレームから第3フレームまでの座標  $(x, y)$  の輝度値  $I_1, I_2, I_3$  を用いて式(3)を解くことで、画面内の座標  $(x, y)$  における各パ

50

ラメータの値（パターン光の振幅値  $a$ 、パターン光のオフセット値  $b$ 、パターン光の位相）を求める。勿論、CPU 15 は、同じ画像組における画面内の他の座標についても同様に各パラメータの値を求める。そして、上記の画像組から求めた各位置のパラメータの値は、CPU 15 によって記憶部 16 に記録される。

【0029】

なお、他の3つの画像組についても、式(2)および式(3)とほぼ同様の演算によって、CPU 15 は各パラメータの値をそれぞれ求める。

【0030】

ステップ S 105 : CPU 15 は、画像組ごとに求めた光源に依存するパラメータ (S 104) を用いて、画面内の異常出力点を検出する。例えば、S 105 での CPU 15 は、以下の (A) または (B) の処理によって画面内の異常出力点を検出する。なお、S 105 で検出された画面内の異常出力点の位置は、CPU 15 によって記憶部 16 に記録される。

10

【0031】

(A) CPU 15 は、画面内の各位置において、4つの画像組から求めたパラメータ ( $a$ ,  $b$ , ) を用いて分散値を求める。具体的には、画面内の座標 ( $x$ ,  $y$ ) に着目すると、各画像組から  $a$ ,  $b$ , の値はそれぞれ1つずつ求められるので (S 104)、座標 ( $x$ ,  $y$ ) に対応する  $a$ ,  $b$ , の値は、それぞれ4つ存在することとなる。そのため、CPU 15 は、画面内の座標 ( $x$ ,  $y$ ) について、4組の  $a$ ,  $b$ , の値から  $a$ ,  $b$ , の各分散値を求めることができる。

20

【0032】

そして、CPU 15 は、上記の  $a$ ,  $b$ , のいずれかの分散値が閾値よりも大きい場合、画面内の座標 ( $x$ ,  $y$ ) を異常出力点として検出する。すなわち、S 101 で撮像した4フレームのいずれにも異常がない場合には、4組の  $a$ ,  $b$ , の値はほぼ同じとなる。一方、S 101 で撮像した4フレームのいずれかに異常がある場合には、4組の  $a$ ,  $b$ , の値がばらつくため、 $a$ ,  $b$ , の分散値が閾値を上回ることとなる。

【0033】

(B) CPU 15 は、画面内の各位置において、4つの画像組から求めた位相の平均値を求める。その後、CPU 15 は、画面内の同じ位置における位相の平均値と S 102 で求めた位相との差を求める。そして、CPU 15 は、上記の差が閾値よりも大きくなる画面内の位置を異常出力点として検出する。すなわち、S 101 で撮像した4フレームのいずれにも異常がない場合には、位相の値と4つの位相との値はほぼ同じとなる。一方、S 101 で撮像した4フレームのいずれかに異常がある場合には、4つの値がばらつくため、位相の平均と位相との差が閾値を上回ることとなる。

30

【0034】

ステップ S 106 : CPU 15 は、S 105 で異常出力点が検出されたか否かを判定する。上記要件を満たす場合 (YES 側) には S 107 に処理が移行する。一方、上記要件を満たさない場合 (NO 側) には S 108 に処理が移行する。

【0035】

ステップ S 107 : CPU 15 は、異常出力点の検出に伴う例外処理を実行する。具体的には、CPU 15 は、以下の (1) から (3) の少なくとも1つの処理を実行する。なお、CPU 15 は、S 107 の例外処理への移行に伴って、モニタ 17 での表示やスピーカー (不図示) の音声によって外部へ警告を行うようにしてもよい。

40

【0036】

(1) CPU 15 は、異常出力点の位置 (S 105) を示す判定結果データを生成する。一例として、CPU 15 は、画面内の異常出力点の座標を示すテキストデータや、画面内の異常出力点の位置分布を示す画像のデータを生成する。CPU 15 は、上記の判定結果データの記憶部 16 への記録またはモニタ 17 への表示を行う。

【0037】

なお、判定結果データの生成後に、CPU 15 は S 108 の処理に移行してもよい (図

50

2ではS108への移行の図示は省略する)。この場合には、CPU15は、最終的な点群データにおいて異常出力点のデータを欠落させるようにしてもよい。

【0038】

(2) CPU15は、異常出力点の計測値をその周囲の計測値を用いて補間する。具体的には、CPU15は、異常出力点の位置(S105)に対応する座標(x, y)の輝度値(I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>, I<sub>3</sub>, I<sub>4</sub>)を、その周囲の画素の輝度値で補間する。そして、CPU15は、上記の補間後の輝度値を用いて、座標(x, y)の位相を求める。その後、CPU15はS108の処理に移行する(図2ではS108への移行の図示は省略する)。

【0039】

(3) CPU15は、投影部13および撮像部14に画像の再撮影を指示する。この場合、CPU15は、S101に移行して上記の動作を繰り返す(図2ではS101への移行の図示は省略する)。

10

【0040】

ステップS108: CPU15は、画面内の各位置における位相(S102)に基づいて、測定対象物11の点群データを生成する。なお、S108で生成された点群データは、CPU15によって記憶部16に記録される。以上で、図2の説明を終了する。

【0041】

以下、本実施形態の作用効果を説明する。本実施形態の三次元形状計測装置では、パターン光の位相をずらす以外は同一の条件で撮像した4フレームの画像のうち、3フレームの画像から光源に依存するパラメータ(a, b, )を求め、このパラメータの整合性をみることで画面内の異常出力点の有無を判定する。そのため、本実施形態の三次元形状計測装置では、信頼性の高い三次元計測のデータを得ることができる。

20

【0042】

<実施形態の補足事項>

(1) 上記実施形態では、撮影範囲の全体を対象として光源に依存するパラメータを求める例を説明したが、撮影範囲の一部を対象として光源に依存するパラメータを求めるようにしてもよい。このとき、光源に依存するパラメータを求める領域は、CPU15が画像を解析して自動的に設定してもよく、あるいはユーザーに範囲指定をさせて設定してもよい。

【0043】

30

一例として、CPU15は、任意のフレームのうちでコントラストが閾値以下となる低コントラストの領域や、画像の輝度値が第1の輝度閾値以上となる高輝度領域や、画像の輝度値が第2の輝度閾値以下となる低輝度領域を抽出する。そして、CPU15は、これらの低コントラスト領域、高輝度領域、低輝度領域の少なくとも1つを対象として、上記の光源に依存するパラメータを求めてもよい。これにより、データの信頼性が低いと考えられる部分のみを演算対象とすることで、CPU15の演算負荷を軽減することができる。

【0044】

また、上記の第1の輝度閾値や第2の輝度閾値は、撮像部14への入射光量に対して出力される輝度レベルが線形性を有する範囲を基準として設定してもよい。換言すれば、撮像部14の出力特性が高輝度側や低輝度側で二領域を有する場合には、CPU15は二領域に対応する輝度値を示す部分で光源に依存するパラメータを求めてもよい。さらに、CPU15は、上記の第1の輝度閾値や第2の輝度閾値を撮像部14の出力特性の飽和レベルに合わせて、白とびや黒つぶれが生じている部分で光源に依存するパラメータを求めてもよい。

40

【0045】

また、他の例として、CPU15は、撮像した画像をモニタ17に表示し、光源に依存するパラメータを求める範囲指定の入力を入力部18から受け付ける。そして、CPU15は、上記の範囲指定に対応する部分領域で光源に依存するパラメータを求める。これにより、ユーザーの経験からデータの信頼性が低いと考えられる部分のみを演算対象とする

50

ことで、CPU 15の演算負荷を軽減することができる。また、ユーザーが画面のうちで測定対象物11の外縁を指定すれば、測定対象物11の撮影されていない部分を演算対象から除外することもできる。なお、図3に、上記の範囲指定のときの表示画面の例を模式的に示す。

【0046】

(2) 上記実施形態では4バケット法の場合について説明したが、本発明は、位相シフト法による三次元形状の計測で4フレーム以上の撮像を行う多バケット法の場合にも当然に適用できる。このとき、nフレームから任意の3フレームの画像組を抽出する組み合わせは ${}_n C_3$ 通りあるが、CPU 15はこれらの画像組のそれぞれで光源に依存するパラメータ(a, b, )を演算し、画像組間でパラメータの整合性を確認すればよい。

10

【0047】

(3) 上記実施形態では、CPU 15がプログラムによって演算部15aおよび判定部15bの機能をソフトウェア的に実現する例を説明したが、これらの構成をASICによってハードウェア的に実現しても勿論かまわない。

【0048】

(4) なお、上記実施形態で記憶部16に記憶されているプログラムは、バージョンアップなどで更新されたファームウェアプログラムであってもよい。すなわち、既存の三次元形状計測装置のファームウェアプログラムを更新することで、本実施形態の三次元形状計測装置の機能を提供するようにしてもよい。

【0049】

20

なお、本発明は、その精神またはその主要な特徴から逸脱することなく他の様々な形で実施することができる。そのため、上述した実施形態はあらゆる点で単なる例示に過ぎず、限定的に解釈してはならない。本発明は、特許請求の範囲によって示されるものであって、本発明は明細書本文にはなんら拘束されない。さらに、特許請求の範囲の均等範囲に属する変形や変更は、全て本発明の範囲内である。

【図面の簡単な説明】

【0050】

【図1】三次元形状計測装置の構成例を示す図

【図2】本実施形態の三次元形状計測装置の動作例を示す流れ図

【図3】範囲指定のときの表示画面の例を示す模式図

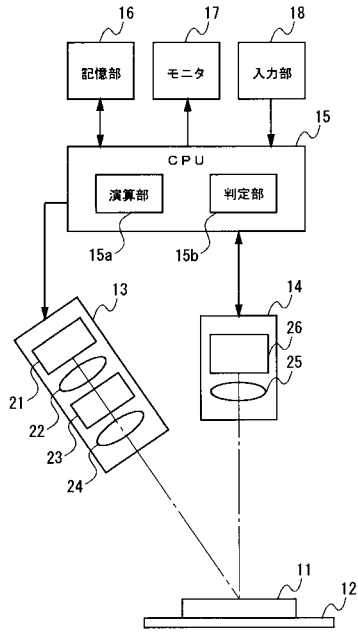
30

【符号の説明】

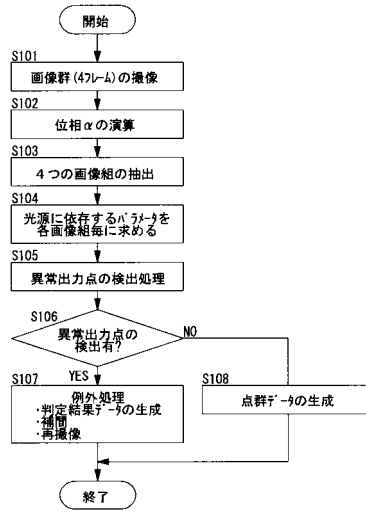
【0051】

11...測定対象物、13...投影部、14...撮像部、15...CPU、16...記憶部、17...モニタ、18...入力部

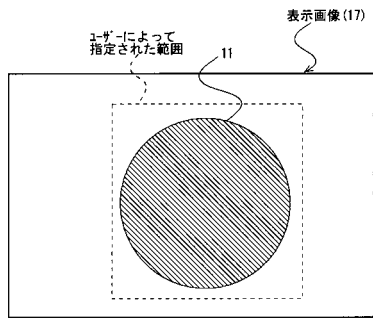
【図1】



【図2】



【図3】



---

フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2006-023178(JP,A)  
特開2004-325232(JP,A)  
特開2000-149024(JP,A)  
特開2003-121115(JP,A)  
特開2005-164294(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01B 11/00 - 11/30