

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6680552号
(P6680552)

(45) 発行日 令和2年4月15日 (2020.4.15)

(24) 登録日 令和2年3月24日 (2020.3.24)

(51) Int.Cl. F I
G O 1 B 11/24 (2006.01) G O 1 B 11/24 D

請求項の数 5 (全 18 頁)

(21) 出願番号	特願2016-21831 (P2016-21831)	(73) 特許権者	000102692
(22) 出願日	平成28年2月8日 (2016.2.8)		N T N株式会社
(65) 公開番号	特開2017-142078 (P2017-142078A)		大阪府大阪市西区京町堀 1 丁目 3 番 1 7 号
(43) 公開日	平成29年8月17日 (2017.8.17)	(74) 代理人	110001195
審査請求日	平成31年1月28日 (2019.1.28)		特許業務法人深見特許事務所
		(72) 発明者	大庭 博明
			静岡県磐田市東貝塚 1 5 7 8 番地 N T N
			株式会社内
		審査官	仲野 一秀

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 形状測定装置および被塗布対象物の製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

対象物に白色光を照射して、前記対象物からの反射光を用いて前記対象物の形状を測定する形状測定装置であって、

前記白色光を出力する光源と、

前記白色光を二光束に分離し、一方の光束を前記対象物に照射するとともに他方の光束を参照面に照射し、前記対象物からの反射光と前記参照面からの反射光とを干渉させて干渉光を出力するように構成される二光束干渉対物レンズと、

前記二光束干渉対物レンズから出力される干渉光の画像を取得するように構成される撮像装置と、

前記光源から出力された前記白色光を、前記二光束干渉対物レンズを介して前記対象物の表面に導き、前記表面からの反射光を前記二光束干渉対物レンズを介して前記撮像装置に導く観察光学系と、

前記二光束干渉対物レンズを前記対象物に対して相対的に移動させるように構成される位置決め装置と、

前記対象物と前記二光束干渉対物レンズとの距離を前記二光束干渉対物レンズの光軸方向に変化させながら複数の画像を取得し、前記複数の画像を用いて前記対象物の形状を測定するように構成される制御装置とを備え、

前記制御装置は、

前記複数の画像における各単位領域について、前記複数の画像にわたって輝度に基づく

評価値が最大となる前記二光束干渉対物レンズの位置を当該単位領域の合焦位置として算出し、前記複数の画像における各単位領域の合焦位置に基づいて前記対象物の形状を測定し、

前記評価値として、前記複数の画像における各単位領域の輝度、および当該単位領域の輝度と当該単位領域に近接する複数の単位領域の輝度との差に相関関係のある値を用いるように構成され、

前記制御装置は、

前記複数の画像における各単位領域の輝度の最大値が閾値より大きい場合、前記輝度を前記評価値として用い、

前記最大値が前記閾値より小さい場合、前記差に相関関係のある値を前記評価値として用いる、形状測定装置。

10

【請求項 2】

前記評価値は、前記複数の画像における各単位領域の輝度と、当該単位領域に近接する複数の単位領域の輝度との分散値である、請求項 1 に記載の形状測定装置。

【請求項 3】

前記評価値は、前記複数の画像における各単位領域に隣接する単位領域間の輝度の傾きの絶対値の和である、請求項 1 に記載の形状測定装置。

【請求項 4】

前記評価値は、前記複数の画像における各単位領域と当該単位領域に隣接する複数の単位領域との間の輝度の傾きの差の絶対値の和である、請求項 1 に記載の形状測定装置。

20

【請求項 5】

請求項 1 に記載の形状測定装置を用いて被塗布対象物の形状を測定する工程を含む、被塗布対象物の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は形状測定装置および当該形状測定装置を用いた被塗布対象物の製造方法に関する。より特定的には、この発明は、金属、樹脂、およびそれらの加工品の表面形状を測定する形状測定装置、あるいは半導体基板、プリント基板、およびフラットパネルディスプレイなどの基板の表面の形状を測定するための形状測定装置、および当該形状測定装置を用いた被塗布対象物の製造方法に関する。

30

【背景技術】

【0002】

特開 2015-7564 (特許文献 1) には、基板の表面に塗布されたインクからなるインク塗布部の上方に二光束干渉対物レンズを位置決めした後、Z ステージを移動させながら干渉光の画像を取得し、当該画像を構成する複数の画素の各々についてコントラスト値がピークとなる Z ステージの位置を当該画素の合焦位置として、インク塗布部の高さを求める塗布装置が開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

40

【0003】

【特許文献 1】 特開 2015-7564 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

二光束干渉対物レンズは、対象物表面の反射光と参照光を干渉させることにより干渉光を得る。たとえば対象物が平面で、対象物が対物レンズの光軸に対して垂直に配置される場合、反射光は正反射光となり、干渉光のコントラストは大きい。しかしながら、対象物が傾斜した状態では、対物レンズの開口に戻る反射光が減少し、反射光の強度が低下する。これにより、干渉光のコントラストも低下する。

50

【0005】

干渉光のコントラストが低下すると、対象物と対物レンズとの距離を変化させた場合に、コントラストの明確なピークが生じにくくなり、ピークの検出が困難となる。ピークを検出できない場所の高さは不定となり、対象物の形状を正確に測定することは困難になる。

【0006】

この発明の主たる目的は、対象物の形状を正確に測定することができる形状測定装置を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0007】

この発明に係る形状測定装置は、対象物に白色光を照射して、対象物からの反射光を用いて対象物の形状を測定する。形状測定装置は、光源と、二光束干渉対物レンズと、撮像装置と、観察光学系と、位置決め装置と、制御装置とを備える。光源は、白色光を出力する。二光束干渉対物レンズは、光源から出力された白色光を二光束に分離し、一方の光束を対象物に照射するとともに他方の光束を参照面に照射し、対象物からの反射光と参照面からの反射光とを干渉させて干渉光を出力するように構成される。撮像装置は、二光束干渉対物レンズから出力される干渉光の画像を取得するように構成される。観察光学系は、光源から出力された白色光を、二光束干渉対物レンズを介して対象物の表面に導き、表面からの反射光を二光束干渉対物レンズを介して撮像装置に導く。位置決め装置は、二光束干渉対物レンズを対象物に対して相対的に移動させるように構成される。制御装置は、対象物と二光束干渉対物レンズとの距離を二光束干渉対物レンズの光軸方向に変化させながら複数の画像を取得し、複数の画像を用いて対象物の形状を測定するように構成される。制御装置は、複数の画像における各単位領域について、複数の画像にわたって輝度に基づく評価値が最大となる二光束干渉対物レンズの位置を当該単位領域の合焦位置として算出し、複数の画像における各単位領域の合焦位置に基づいて対象物の形状を測定するように構成される。制御装置は、評価値として、複数の画像における各単位領域の輝度、および当該単位領域の輝度と当該単位領域に近接する複数の単位領域の輝度との差に相関関係のある値を用いるように構成される。

【発明の効果】

【0008】

この発明に係る形状測定装置によれば、評価値として、複数の画像における各単位領域の輝度に加えて、当該単位領域の輝度と当該単位領域に近接する複数の単位領域の輝度との差に相関関係のある値を用いることにより、各単位領域の合焦位置を精度よく算出することができる。その結果、対象物の形状を正確に測定することができる。

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図1】この発明の一実施の形態による形状測定装置の構成を示す図である。

【図2】図1に示した制御装置の機能を説明するための機能ブロック図である。

【図3】図1に示した二光束干渉対物レンズの構成を示す図である。

【図4】図1に示した観察光学系の構成を示す図である。

【図5】図1に示した二光束干渉対物レンズを光軸方向に移動させた場合の干渉光の強度の変化を示す図である。

【図6】二光束干渉対物レンズを光軸方向に移動させた場合の干渉光の強度の分散値の変化を示す図である。

【図7】注目画素に隣接する画素を示す図である。

【図8】撮像装置によって取得される画像を構成する画素を模式的に示す図である。

【図9】制御装置の演算処理部によって行なわれる形状測定処理を示すフローチャートである。

【図10】位置指令値配列と、配列の順番を示す配列番号との関係を例示するグラフである。

10

20

30

40

50

【図 1 1】演算処理部が各画像の各画素の輝度および分散値を算出する処理を説明するためのフローチャートである。

【図 1 2】合焦位置を検出する処理を具体的に示すフローチャートである。

【図 1 3】Z ステージの光軸方向の座標値と干渉光の強度との関係を示す曲線と、当該曲線の包絡線を示す図である。

【図 1 4】本発明の実施の形態に従う形状測定装置を備える塗布装置の模式的な斜視図である。

【図 1 5】図 1 4 の塗布装置において行なわれる基板の製造工程を示すフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

10

【0010】

[形状測定装置の構成]

図 1 は、この発明の一実施の形態による形状測定装置 1 の構成を示す図である。図 1 において、この形状測定装置 1 は、光源 2、光源制御器 3、二光束干渉対物レンズ 4、観察光学系 5、撮像装置 6、Z ステージ 7、Z ステージ制御器 8、支持部材 9、ベース板 10、制御装置 11、キーボード 12、マウス 13、およびモニタ 14 を備える。観察光学系 5 は、支持部材 9 を介してベース板 10 に取り付けられる。平板状の被測定部品 15 は、ベース板 10 の表面に置かれる。形状測定装置 1 は、被測定部品 15 表面の形状を測定する。

【0011】

20

光源 2 は、観察光学系 5 の側面に設けられ、白色光を出射する。光源制御器 3 は、光源 2 に接続され、制御装置 11 からの指示に従って白色光の明るさを制御する。光源制御器 3 は、たとえば光源 2 に供給される電力を制御することにより、白色光の明るさを制御することができる。光源 2 から出射された白色光は、観察光学系 5 を介して二光束干渉対物レンズ 4 に入射される。被測定部品 15 に照射される光が白色光である場合、レーザなどの単一波長の光と異なり、撮像装置 6 で取得される干渉光の画像における輝度は、一般的に二光束干渉対物レンズ 4 の合焦位置で最大になる。そのため、合焦位置に基づいて被測定部品 15 の形状を測定するには、白色光が適している。

【0012】

二光束干渉対物レンズ 4 は、Z ステージ 7 を介して観察光学系 5 の下端に設けられる。二光束干渉対物レンズ 4 は、光源 2 からの白色光を二光束に分離する。二光束干渉対物レンズ 4 は、一方の光束を被測定部品 15 の表面に照射するとともに他方の光束を参照面に照射する。二光束干渉対物レンズ 4 は、被測定部品 15 の表面からの反射光と参照面からの反射光とを干渉させて干渉光を生成する。実施の形態では、二光束干渉対物レンズ 4 としてミラウ型干渉対物レンズを用いる場合について説明する。二光束干渉対物レンズ 4 は、マイケルソン型やリニーク型の干渉対物レンズを用いてもよい。

30

【0013】

観察光学系 5 は、二光束干渉対物レンズ 4 によって生成された干渉光を観察するために設けられている。

【0014】

40

撮像装置 6 は、制御装置 11 によって制御され、観察光学系 5 を介して干渉光の画像を一定周期で取得する。撮像装置 6 は、取得した画像を制御装置 11 に出力する。

【0015】

Z ステージ 7 は、観察光学系 5 の下端に設けられ、二光束干渉対物レンズ 4 をその光軸方向に移動させる。

【0016】

Z ステージ制御器 8 は、制御装置 11 からの指示に従って Z ステージ 7 を二光束干渉対物レンズ 4 の光軸方向に移動させる。

【0017】

Z ステージ 7 によって二光束干渉対物レンズ 4 を移動させる代わりに、被測定部品 15

50

をテーブルで上下させてもよい。あるいは、二光束干渉対物レンズ 4 と観察光学系 5 の連結部にテーブルなどを取り付けて二光束干渉対物レンズ 4 の光軸方向の位置を調整してもよい。あるいは、これらのテーブルとして、位置決めを圧電素子で行うピエゾテーブルを用いてもよい。

【0018】

制御装置 11 は、たとえばパーソナルコンピュータによって構成されている。制御装置 11 には、キーボード 12、マウス 13、およびモニタ 14 が接続されている。形状測定装置 1 の使用者は、キーボード 12 およびマウス 13 を用いて、形状測定の開始、終了などを制御装置 11 に指令し、測定された被測定部品 15 の形状をモニタ 14 で確認する。制御装置 11 は、キーボード 12、マウス 13 などからの信号に従って、形状測定装置 1 全体を制御し、被測定部品 15 の形状を測定する。

10

【0019】

[制御装置の構成]

図 2 は、図 1 に示した制御装置 11 の機能を説明するための機能ブロック図である。図 2 に示されるように、制御装置 11 は、演算処理部 41、画像入力部 42、データ記憶部 43、位置制御値出力部 44、および照明制御値出力部 45 を含む。

【0020】

演算処理部 41 は、キーボード 12、マウス 13 などを用いて与えられた情報に基づいて、Z ステージ 7 の高さに応じた電圧値に対応する値を格納する位置指令値配列、および Z ステージ 7 の高さに応じた光源 2 の明るさに対応する値を格納する照明指令値配列を生成する。位置指令値配列は、Z ステージ 7 の位置（被測定部品 15 からの高さ）を制御するために用いられる。照明指令値配列は、Z ステージ 7 の位置に応じて光源 2 の明るさを制御するために用いられる。演算処理部 41 は、位置指令値配列および照明指令値配列をデータ記憶部 43 に書き込む。実施の形態においては、光源 2 の明るさをほぼ一定に保つため、照明指令値配列の値は一定である。

20

【0021】

位置制御値出力部 44 は、データ記憶部 43 から位置指令値配列を読み出す。位置制御値出力部 44 は、位置指令値配列に従って制御電圧 E_Z を出力する。

【0022】

Z ステージ制御器 8 は、位置制御値出力部 44 から出力される制御電圧 E_Z に応じた位置に Z ステージ 7 を移動させる。

30

【0023】

照明制御値出力部 45 は、データ記憶部 43 から照明指令値配列を読み出す。照明制御値出力部 45 は、照明指令値配列に従って制御電圧 E_L を出力する。実施の形態においては、照明指令値配列はほぼ一定であるため、制御電圧 E_L はほぼ一定である。

【0024】

光源制御器 3 は、照明制御値出力部 45 から出力される制御電圧 E_L に応じて、光源 2 の明るさを変化させることができる。

【0025】

画像入力部 42 は、位置制御値出力部 44 によるデータ記憶部 43 からの位置指令値配列の読込みに同期して動作する。画像入力部 42 は、撮像装置 6 によって撮影された画像を一定周期で取得する。画像入力部 42 は、取得した画像をデータ記憶部 43 に格納する。

40

【0026】

[合焦位置検出の原理]

図 3 は、図 1 に示した二光束干渉対物レンズ 4 の構成を示す図である。図 3 に示されるように、二光束干渉対物レンズ 4 は、レンズ 21、参照鏡 22、およびビームスプリッタ 23 を含む。参照鏡 22 は、レンズ 21 の、被測定部品 15 を向いている側の中央部に設けられている。ビームスプリッタ 23 は、レンズ 21 と被測定部品 15 との間に設けられている。

50

【0027】

レンズ21に入射した光は、ビームスプリッタ23によって被測定部品15の方向に通過する光と参照鏡22の方向に反射する2つの光に分けられる。被測定部品15の表面で反射した光L1と参照鏡22の表面で反射した光L2は再びビームスプリッタ23で合流し、レンズ21によって集光される。

【0028】

図4は、図1に示した観察光学系5の構成を示す図である。図4に示されるように、観察光学系5は、集光レンズ31、ハーフミラー32、および結像レンズ33を含む。二光束干渉対物レンズ4の光軸と、結像レンズ33の光軸とはほぼ一致しており、ともに撮像装置6の撮像面6Aの中心を通過している。光源2の光軸と集光レンズ31の光軸とはほぼ一致しており、ともに二光束干渉対物レンズ4の光軸とはほぼ直交している。光源2と集光レンズ31との間には、不要な波長の光を除去するためのフィルタ34が設けられている。ハーフミラー32は、光源2の光軸と二光束干渉対物レンズ4の光軸との交点に設けられている。ハーフミラー32は、光源2の光軸および二光束干渉対物レンズ4の光軸の各々に対してほぼ45度の角度で配置されている。

10

【0029】

光源2から出射されてフィルタ34を通過した光は、ハーフミラー32によってレンズ21の方向に反射される。レンズ21に入射した光は、ビームスプリッタ23によって被測定部品15の方向に通過する光と参照鏡22の方向に反射する2つの光に分けられる。被測定部品15および参照鏡22の表面で反射した光は再びビームスプリッタ23で合流し、レンズ21によって集光される。レンズ21から出た光は、ハーフミラー32を通過して、結像レンズ33を経て撮像装置6の撮像面6Aに入射する。

20

【0030】

撮像面6Aにおいて、被測定部品15の表面で反射した光L1と参照鏡22の表面で反射した光L2との干渉光の画像が取得される。干渉光の強度は、光L1の光路長および光L2の光路長の差に応じて変化する。

【0031】

図5は、二光束干渉対物レンズ4を光軸方向に移動させた場合の干渉光の強度の変化を示す図である。図5の横軸は、光軸方向の座標（Zステージ7の位置）を示す。図5の縦軸は、撮像面6Aにおいて取得される画像における干渉光の強度を示している。

30

【0032】

二光束干渉対物レンズ4は、対象物表面の反射光と参照光を干渉させることにより干渉光を得る。干渉光の強度は、図5に示されるようにZステージ7の位置に応じて、ある値を中心にして一定周期で振動し、その振幅はコントラストに相当する。また、振幅が最大となるP1はレンズ21の合焦位置である。ここで、たとえば被測定部品15が平面で、被測定部品15が対物レンズの光軸に対して垂直に配置された場合、反射光は正反射光となり、干渉光のコントラストは大きい。しかしながら、被測定部品15が傾斜した状態では、対物レンズ21の開口に戻る光L1が減少し、反射光の強度が低下する。これにより、干渉光のコントラストも低下する。

【0033】

干渉光のコントラストが低下すると、対象物と対物レンズとの距離を変化させた場合に、コントラストの明確なピークが生じにくくなり、ピークP1の検出が困難となる。ピークを検出できない場所の高さは不定となり、対象物の形状を正確に測定することは困難になる。

40

【0034】

しかしながら、被測定部品15の表面の凹凸による反射光量の違いは、撮像装置6で取得される画像における画素間の明暗の差として確認することができる場合がある。

【0035】

そこで実施の形態では、合焦位置を求めるために必要な評価値として、合焦位置を算出する対象である注目画素の輝度に加えて、注目画素の輝度と注目画素に近接する複数の単

50

位領域の輝度との差に相関関係のある評価値として、注目画素の輝度と注目画素に近接する近接領域に含まれる画素の輝度との分散値を用いて、各画素の合焦位置を算出する。

【0036】

図6は、二光束干渉対物レンズ4を光軸方向に移動させた場合の干渉光の強度の分散値の変化を示す図である。図6の横軸は、光軸方向の座標（Zステージ7の位置）を示す。図6の縦軸は、干渉光の強度の分散値を示している。図6に示されるように、被測定部品15と二光束干渉対物レンズ4との距離を変化させた場合に、分散値に関して明確なピークP2が生じている。ピークP2に対応する位置FP2は、合焦位置にほぼ一致する。そのため、分散値を用いることにより注目画素の合焦位置を精度よく算出することができる。その結果、被測定部品15の形状を正確に測定することができる。

10

【0037】

図7は、撮像装置6によって取得される画像を構成する複数の画素を模式的に示す図である。撮像装置6によって取得される画像を構成する各画素は、位置（x，y）によって特定される。画素の座標値xは、0から M_x までのいずれかの値をとる。画素の座標値yは、0から M_y までのいずれかの値をとる。実施の形態において、画像上の位置が（x，y）である画素 C_{xy} における分散値 $V(x, y)$ は、画素 C_{xy} を中心とする $A \times B$ の近接領域 R_{AB} に含まれる画素の輝度 $G(i, j)$ を用いて、以下の式（1）で表される。

【0038】

【数1】

$$V(x, y) = \frac{\sum_{j=y-B/2}^{y+B/2} \sum_{i=x-A/2}^{x+A/2} \{G(i, j) - G_{ave}\}^2}{AB} \quad \cdots (1)$$

20

【0039】

式（1）においては、 G_{ave} は近接領域 R_{AB} の輝度の平均値であり、以下の式（2）で表される。

【0040】

【数2】

$$G_{ave} = \frac{\sum_{j=y-B/2}^{y+B/2} \sum_{i=x-A/2}^{x+A/2} G(i, j)}{AB} \quad \cdots (2)$$

30

【0041】

輝度に関する分散値以外に、注目画素を含む近接領域を構成する複数の画素の各々の輝度と注目画素の輝度との差に相関関係があり、合焦位置でピークを示す評価値として、たとえば、画像のエッジ検出に用いられる輝度に関する一次微分値、あるいは二次微分値を挙げることができる。輝度に関する一次微分値としては、以下の式（3）で表されるグラディエントD1aを挙げることができる。

【0042】

$$D1a(x, y) = |G(x+1, y-1) - G(x-1, y-1)| + |G(x+1, y) - G(x-1, y)| + |G(x+1, y+1) - G(x-1, y+1)| + |G(x-1, y+1) - G(x-1, y-1)| + |G(x, y+1) - G(x, y-1)| + |G(x+1, y+1) - G(x+1, y-1)| \quad \cdots (3)$$

40

グラディエントD1aは、注目画素に隣接する画素のうち、画素の位置を規定する座標軸のx軸方向に向き合う画素間の輝度の傾きの絶対値、およびy軸方向に向き合う画素間の輝度の傾きの絶対値の和である。なお、画素間の輝度の傾きとは、画素間の輝度の差である。

【0043】

図8は、注目画素 C_{xy} に隣接する画素を示す図である。図8に示されるように、注目

50

画素 $C_{x,y}$ は、画素 $C_{x-1,y}$, $C_{x,y+1}$, $C_{x+1,y+1}$, $C_{x+1,y}$, $C_{x+1,y-1}$, $C_{x,y-1}$, $C_{x-1,y-1}$, $C_{x-1,y}$ に囲まれている。図 8 および式 (3) を参照しながら、グラディエント $D1a$ は、 x 軸方向に向き合う画素 $C_{x+1,y-1}$ および $C_{x-1,y-1}$ の間の輝度の傾きの絶対値 ($|G(x+1,y-1) - G(x-1,y-1)|$)、画素 $C_{x+1,y}$ および $C_{x-1,y}$ の間の輝度の傾きの絶対値 ($|G(x+1,y) - G(x-1,y)|$)、画素 $C_{x+1,y+1}$ および $C_{x-1,y+1}$ の間の輝度の傾きの絶対値 ($|G(x+1,y+1) - G(x-1,y+1)|$)、 y 軸方向に向き合う画素 $C_{x-1,y+1}$ および $C_{x-1,y-1}$ の間の輝度の傾きの絶対値 ($|G(x-1,y+1) - G(x-1,y-1)|$)、画素 $C_{x,y+1}$ および $C_{x,y-1}$ の間の輝度の傾きの絶対値 ($|G(x,y+1) - G(x,y-1)|$)、並びに画素 $C_{x+1,y+1}$ および $C_{x+1,y-1}$ の間の輝度の傾きの絶対値 ($|G(x+1,y+1) - G(x+1,y-1)|$) の和である。

10

【0044】

輝度に関する一次微分値としては、以下の式 (4) で表されるグラディエント $D1b$ を用いることもできる。

【0045】

$$D1b(x, y) = D1a(x, y) + |G(x+1, y+1) - G(x-1, y-1)| + |G(x+1, y-1) - G(x-1, y+1)| \quad \cdots (4)$$

グラディエント $D1b$ は、注目画素に隣接する画素のうち、画素の位置を規定する座標軸の対角線方向に向き合う画素間の輝度の傾きの絶対値を、グラディエント $D1a$ に加えたものである。

20

【0046】

図 8 および式 (4) を参照しながら、グラディエント $D1b$ は、グラディエント $D1a$ 、対角線方向に向き合う画素 $C_{x+1,y+1}$ および $C_{x-1,y-1}$ の間の輝度の傾きの絶対値 ($|G(x+1,y+1) - G(x-1,y-1)|$)、並びに対角線方向に向き合う画素 $C_{x+1,y-1}$ および $C_{x-1,y+1}$ の間の輝度の傾きの絶対値 ($|G(x+1,y-1) - G(x-1,y+1)|$) の和である。

【0047】

輝度に関する二次微分値としては、以下の式 (5) で表されるラプラシアン $D2a$ を用いることができる。

30

【0048】

$$D2a(x, y) = |\{G(x, y) - G(x-1, y)\} - \{G(x+1, y) - G(x, y)\}| + |\{G(x, y) - G(x, y-1)\} - \{G(x, y+1) - G(x, y)\}| = |2G(x, y) - G(x-1, y) - G(x+1, y)| + |2G(x, y) - G(x, y-1) - G(x, y+1)| \quad \cdots (5)$$

ラプラシアン $D2a$ は、画素の位置を規定する座標軸の x 軸方向に注目画素と隣接する画素と注目画素との間の輝度の傾きの差と、 y 軸方向に注目画素と隣接する画素間の輝度の傾きの差との和である。

【0049】

図 8 と式 (5) を参照しながら、ラプラシアン $D2a$ は、注目画素 $C_{x,y}$ および x 軸方向に注目画素 $C_{x,y}$ に隣接する画素 $C_{x-1,y}$ の間の傾き ($G(x, y) - G(x-1, y)$) と、注目画素 $C_{x,y}$ および x 軸方向に注目画素 $C_{x,y}$ に隣接する画素 $C_{x+1,y}$ の間の傾き ($G(x+1, y) - G(x, y)$) との差の絶対値、および注目画素 $C_{x,y}$ および y 軸方向に注目画素 $C_{x,y}$ に隣接する画素 $C_{x,y-1}$ の間の傾き ($G(x, y) - G(x, y-1)$) と、注目画素 $C_{x,y}$ および y 軸方向に注目画素 $C_{x,y}$ に隣接する画素 $C_{x,y+1}$ の間の傾き ($G(x, y+1) - G(x, y)$) との差の絶対値の和である。

40

【0050】

輝度に関する二次微分値としては、以下の式 (6) で表されるラプラシアン $D2b$ を用いることもできる。

50

【0051】

$$D2b(x, y) = D2a(x, y) + |\{G(x, y) - G(x-1, y-1)\} - \{G(x+1, y+1) - G(x, y)\}| + |\{G(x, y) - G(x-1, y+1)\} - \{G(x+1, y-1) - G(x, y)\}| = D2a(x, y) + |2G(x, y) - G(x-1, y-1) - G(x+1, y+1)| + |2G(x, y) - G(x-1, y+1) - G(x+1, y-1)| \cdots (6)$$

ラプラシアンD2bは、ラプラシアンD2aに画素の位置を規定する座標軸の対角線方向に注目画素に隣接する画素と注目画素との間の輝度の傾きの差を加えたものである。

【0052】

図8と式(6)を参照しながら、ラプラシアンD2bは、ラプラシアンD2a、注目画素 $C_{x,y}$ および対角線方向に注目画素 $C_{x,y}$ に隣接する画素 $C_{x-1,y-1}$ の間の傾き $(G(x, y) - G(x-1, y-1))$ と、注目画素 $C_{x,y}$ および対角線方向に注目画素 $C_{x,y}$ に隣接する画素 $C_{x+1,y+1}$ の間の傾き $(G(x+1, y+1) - G(x, y))$ との差の絶対値、および注目画素 $C_{x,y}$ および対角線方向に注目画素 $C_{x,y}$ に隣接する画素 $C_{x-1,y+1}$ の間の傾き $(G(x, y) - G(x-1, y+1))$ と、注目画素 $C_{x,y}$ および対角線方向に注目画素 $C_{x,y}$ に隣接する画素 $C_{x+1,y-1}$ の間の傾き $(G(x+1, y-1) - G(x, y))$ との差の絶対値の和である。

【0053】

[形状測定処理]

図9は、制御装置11の演算処理部41によって行なわれる形状測定処理を示すフローチャートである。図9に示されるように、演算処理部41は、ステップS1（以下ではステップを単にSと表す。）において位置指令値配列および照明指令値配列を作成し、処理をS2に進める。

【0054】

演算処理部41は、S2において、光源2の輝度を照明指令値配列によって決定される輝度に設定して被測定部品15に白色光を照射するとともに、位置指令値配列の各値によって決定される位置にZステージ7を移動させて、各位置において干渉光の画像を取得するとともに、取得した各画像のそれぞれについて、当該画像を構成する各画素の評価値を算出し、処理をS3に進める。

【0055】

演算処理部41は、S3において、各画素の評価値が最大となるZステージ7の位置を当該画素の合焦位置として検出し、処理をS4に進める。

【0056】

演算処理部41は、各画素の合焦位置に基づいて被測定部品15の形状をモニタ14に表示し、処理を終了する。

【0057】

以下、S1～S3の各々について詳細に説明する。

演算処理部41は、S1において、位置指令値配列および照明指令値配列を作成し、データ記憶部43にそれぞれ格納する。実施の形態では、照明指令値配列は一定値である。以下では位置指令値配列の作成方法について説明する。

【0058】

位置指令値配列のi番目の値であるEZ[i]は、EZ[i]に対応するZステージ7の座標値Z[i]、Zステージ7の最大高さZ_{max}、Zステージ7の最小高さZ_{min}、最大高さZ_{max}に対応する制御電圧EZ_{max}、および最小高さZ_{min}に対応する制御電圧EZ_{min}を用いて以下の式(7)で表される。

【0059】

$$EZ[i] = Z[i] (EZ_{max} - EZ_{min}) / (Z_{max} - Z_{min}) \cdots (7)$$

Zステージ7は、画像を取得する間、一定の速度W(μm/秒)で移動し、途中で停止しない。位置指令値配列が先頭から順に一定の時間間隔ΔT1(秒)で参照されるとする

と、座標値 $Z[i]$ は、以下の式 (8) と表される。

【0060】

$$Z[i] = i \times \Delta T1 \times W \quad \cdots (8)$$

式 (8) を式 (7) に代入すると、位置指令値 $EZ[i]$ は以下の式 (9) で表される。

【0061】

$$EZ[i] = (i \times \Delta T1 \times W) (EZ_{\max} - EZ_{\min}) / (Z_{\max} - Z_{\min}) \quad \cdots (9)$$

実施の形態では、 $EZ_{\max} = 10$ (V)、 $EZ_{\min} = 0$ (V)、 $Z_{\max} = 100$ (μm)、 $Z_{\min} = 0$ (μm) である。i 番目の位置指令値 $EZ[i]$ は以下の式 (10) で表される。

【0062】

$$EZ[i] = (i \times \Delta T1 \times W) / 10 \quad \cdots (10)$$

なお、配列の要素の個数 N は、Z ステージ 7 の移動距離を D (μm) とおくと、 $N = D / (\Delta T1 \times W)$ である。

【0063】

図 10 は、位置指令値配列と、配列の順番を示す配列番号 i との関係を例示するグラフである。図 10 の横軸は配列番号 i を示し、縦軸は位置指令値 $EZ[i]$ を示している。図 10 に示されるように、位置指令値 $EZ[i]$ は配列番号 i に比例して増大する。

【0064】

再び図 9 を参照して S 2 の説明を行なう。制御装置 11 は、S 2 において、S 1 で作成した位置指令値配列および照明指令値配列に基づいて Z ステージ 7 の位置および光源 2 の明るさを制御しながら、干渉光の画像を取得する。

【0065】

演算処理部 41 からの開始トリガに応答して、位置制御値出力部 44 および照明制御値出力部 45 は、それぞれ制御電圧 EZ および EL の出力を開始する。位置制御値出力部 44 は、位置指令値配列を先頭から順次参照し、一定の時間間隔 $\Delta T1$ (秒) で制御電圧 EZ を変更する。位置指令値配列の最後の番号に達したら、位置制御値出力部 44 は制御電圧 EZ の出力を終了する。

【0066】

画像入力部 42 は、演算処理部 41 からの開始トリガに応答して、撮像装置 6 からの画像の取り込みを開始する。画像入力部 42 は、一定の周期 $\Delta T2$ で撮像装置 6 から出力された画像を取り込む。画像入力部 42 は、取り込んだ画像を DMA (Direct Memory Access) 転送方式を用いてデータ記憶部 43 へ画像を転送する。DMA 転送は、周期 $\Delta T2$ と比較して短い時間で完了する。

【0067】

以下の説明においては、 (x, y) は、撮像装置 6 によって取得される画像上の画素の位置を表す。 $G[k](x, y)$ は、撮像装置 6 によって取得される複数の画像のうち、 k 番目に取得された画像の位置 (x, y) の画素の輝度を表す。 $G_{\max}(x, y)$ は、位置 (x, y) の画素の輝度の、撮影された複数の画像における最大値を表す。 $IDG_{\max}(x, y)$ は、位置 (x, y) の画素の輝度が最大となる画像の番号を表す。

【0068】

$V[k](x, y)$ は、撮像装置 6 によって取得される複数の画像のうち、 k 番目に取得された画像の位置 (x, y) の画素における分散値を表す。 $V_{\max}(x, y)$ は、位置 (x, y) の画素における分散値の、撮像装置 6 によって取得された複数の画像における最大値を表す。 $IDV_{\max}(x, y)$ は、位置 (x, y) における分散値が最大となる画像の番号を表す。

【0069】

演算処理部 41 は、画像番号 k を変化させながら、撮像装置 6 によって k 番目に取得された画像を処理の対象とする。演算処理部 41 は、 k 番目に取得された画像について、 x

および y を変化させながら、当該画像を構成する各画素について、分散値 $V[k](x, y)$ を算出する。演算処理部 41 は、撮像装置 6 によって取得される画像上の各画素について、最大輝度 $G_{max}(x, y)$ 、最大分散値 $V_{max}(x, y)$ 、最大輝度番号 $IDG_{max}(x, y)$ 、最大分散値番号 $IDV_{max}(x, y)$ を算出する。以下では、各値の導出過程について詳細に説明する。

【0070】

図 11 は、演算処理部 41 が各画像の分散値、最大輝度、最大分散値、最大輝度番号、および最大分散値番号を算出する処理を説明するためのフローチャートである。図 11 に示されるように、演算処理部 41 は、S20 において初期化処理を行なう。演算処理部 41 は、初期化処理において、最大輝度 $G_{max}(x, y)$ および最大分散値 $V_{max}(x, y)$ を 0 に初期化する。演算処理部 41 は、最大輝度番号 $IDG_{max}(x, y)$ および最大分散値番号 $IDV_{max}(x, y)$ を -1 に初期化する。この初期化処理は、たとえば、演算処理部 41 が開始トリガを出す直前に行なわれる。

10

【0071】

演算処理部 41 は、撮像装置 6 によって k 番目に取得された画像について、 x を 0 から M_x まで変化させるとともに、 y を 0 から M_y まで変化させながら、S21～S28 までの処理を行なう。

【0072】

演算処理部 41 は、S21 において、位置 (x, y) の画素について、輝度の差 $G[k](x, y) - G[k-1](x, y)$ を算出し、処理を S22 に進める。演算処理部 41 は、S22 において、輝度の差の下限值 TG 以上であるか否か（以下の式 (11) を満たすか否か）を判定する。ここで、輝度の差を図 5 の干渉光の振幅とみなし、下限値 TG と比較することにより振幅の小さい画像番号 k の画像を検出対象から除外する。

20

【0073】

$$TG \leq G[k](x, y) - G[k-1](x, y) \quad \cdots (11)$$

式 (11) が満たされる場合 (S22 において YES)、演算処理部 41 は、S23 に処理を進め、輝度 $G[k](x, y)$ と最大輝度 $G_{max}(x, y)$ とを比較する。輝度 $G[k](x, y)$ が最大輝度 $G_{max}(x, y)$ よりも大きい場合 (S23 において YES)、演算処理部 41 は、S24 に処理を進める。演算処理部 41 は、S24 において、最大輝度 $G_{max}(x, y)$ を輝度 $G[k](x, y)$ に更新するとともに最大輝度番号 $IDG_{max}(x, y)$ を画像番号 k に更新し、処理を S25 へ進める。

30

【0074】

式 (11) が満たされない場合 (S22 において NO)、あるいは輝度 $G[k](x, y)$ が最大輝度 $G_{max}(x, y)$ 以下である場合 (S23 において NO)、演算処理部 41 は、処理を S25 へ進める。

【0075】

演算処理部 41 は、S25 において、位置 (x, y) の画素について、式 (1) を用いて分散値 $V[k](x, y)$ を算出し、処理を S26 へ進める。演算処理部 41 は、S26 において、分散値 $V[k](x, y)$ が下限値 TV 以上であるか否かを判定する。分散値 $V[k](x, y)$ が下限値 TV 以上である場合 (S26 において YES)、演算処理部 41 は、処理を S27 へ進め、分散値 $V(x, y)$ と最大分散値 $V_{max}(x, y)$ とを比較する。分散値 $V[k](x, y)$ が最大分散値 $V_{max}(x, y)$ より大きい場合 (S27 において YES)、演算処理部 41 は、最大分散値 $V_{max}(x, y)$ を分散値 $V[k](x, y)$ に更新するとともに、最大分散値番号 $IDV_{max}(x, y)$ を画像番号 k に更新する。

40

【0076】

分散値 $V[k](x, y)$ が下限値 TV 未満である場合 (S26 において NO)、あるいは分散値 $V[k](x, y)$ が最大分散値 $V_{max}(x, y)$ 以下である場合 (S27 において NO)、演算処理部 41 は、処理を S29 へ進める。

【0077】

50

演算処理部 41 は、S 29 において、番号 k の画像に含まれる全画素について処理を完了したか否かを判定する。番号 k の画像に含まれる全画素について処理を完了していない場合（S 29 において NO）、演算処理部 41 は、画素の位置 (x, y) を次の画素の位置に更新して処理を S 21 へ戻す。番号 k の画像に含まれる全画素について処理を完了した場合（S 29 において YES）、演算処理部 41 は、処理を S 30 へ進める。

【0078】

演算処理部 41 は、S 30 において撮像装置 6 によって取得された全画像について処理を完了したか否かを判定する。全画像について処理が完了していない場合（S 30 において NO）、演算処理部 41 は、画像番号 k を次の画像番号に更新して処理を S 21 へ戻す。全画像について処理が完了した場合（S 30 において YES）、処理を終了する。

10

【0079】

S 2 が終了したとき、撮像装置 6 によって取得された画像番号が 0 から k_{max} の複数の画像について、最大輝度 $G_{max}(x, y)$ には位置 (x, y) における画素の輝度の最大値が格納されている。最大輝度番号 $IDG_{max}(x, y)$ には、位置 (x, y) における画素の輝度 $G[k](x, y)$ が最大となる画像番号 k が格納されている。最大分散値 $V_{max}(x, y)$ には位置 (x, y) における輝度の分散値 $V[k](x, y)$ の最大値が格納されている。最大分散値番号 $IDV_{max}(x, y)$ には、位置 (x, y) における輝度の分散値 $V[k](x, y)$ が最大となる画像番号 k が格納されている。

【0080】

S 3 において、演算処理部 41 は、S 2 で求めた最大輝度番号 $IDG_{max}(x, y)$ および最大分散値番号 $IDV_{max}(x, y)$ に基づいて、各画素の合焦位置を検出する。

20

【0081】

図 12 は、合焦位置を検出する処理（図 9 の S 3）をより具体的に示すフローチャートである。以下では、記載を単純にするために最大輝度番号 $IDG_{max}(x, y)$ を最大輝度番号 M_{xy} と表す。

【0082】

図 12 に示されるように、演算処理部 41 は、S 31 において最大輝度番号 M_{xy} が -1 以外の値に更新されているか否かを判定する。最大輝度番号 M_{xy} が -1 以外の値に更新されている場合（S 31 において YES）、演算処理部 41 は、S 32 に処理を進めて干渉光の輝度が最大となる Z ステージ 7 の位置に基づいて合焦位置を検出する。最大輝度番号 M_{xy} が -1 以外の値に更新されていない場合（S 31 において NO）、演算処理部 41 は、S 33 に処理を進めて干渉光の輝度の分散値が最大となる Z ステージ 7 の位置に基づいて合焦位置を検出する。以下では、S 32 および S 33 の詳細について説明する。

30

【0083】

S 32 は、最大輝度番号 M_{xy} が -1 以外の値に更新されている場合（S 31 において YES）に行なわれる。最大輝度番号 M_{xy} が -1 以外の値であるということは、S 2 において、位置 (x, y) の画素の輝度に関する式 (11) が満たされる場合があったということである。このような場合、位置 (x, y) の画素の輝度について明確なピークが得られているとして、干渉光の輝度に基づいて合焦位置を検出する。具体的には、 $(M_{xy} - L)$ 番目から $(M_{xy} + L)$ 番目の各画像について、以下の式 (12) で表される包絡線の値 $M[k](x, y)$ を画像番号 k の画像上の各画素 (x, y) について計算する。整数 L は、正の整数であり、たとえば 5 である。

40

【0084】

【数 3】

$$M[k](x, y) = \frac{\sqrt{(G[k-1](x, y) - G[k+1](x, y))^2 - (G[k-2](x, y) - G[k](x, y))(G[k](x, y) - G[k+2](x, y))}}{2}$$

… (12)

50

【0085】

図13は、Zステージ7の光軸方向の座標値Zと干渉光の強度との関係を示す曲線Cと、曲線Cの曲線Eを示す図である。画像番号kに対応するZステージ7の光軸方向の座標値Zと包絡線の値M[k](x, y)との関係は、図13の曲線Eとして表される。

【0086】

以下の式(13)により、式(12)によって算出された包絡線の値M[k](x, y)を用いて、各画素の合焦位置f(x, y)を算出する。

【0087】

【数4】

$$f(x, y) = \frac{\sum_{k=M_{xy}-L}^{M_{xy}+L} M[k](x, y) \times k}{\sum_{k=M_{xy}-L}^{M_{xy}+L} M[k](x, y)} \quad \cdots (13)$$

10

【0088】

式(13)は、図13に示される曲線Eの重心を求めるための計算式である。包絡線の値M[k](x, y)が図13に示されるような曲線Eの頂点を中心とした左右対称のデータの場合、重心はその中心位置となるピークP3を示す。合焦位置f(x, y)は、図13のピークP3に対応する位置FP3となる。

20

【0089】

再び図12を参照して、S33は、最大輝度番号M_{xy}が初期値である-1のままである場合(S31においてNO)に行なわれる。最大輝度番号M_{xy}が初期値のままであるということは、S2において位置(x, y)の画素の輝度に関する式(11)が満たされる場合がなかったということである。このような場合、位置(x, y)の画素の輝度についてピークが得られていないとして、実施の形態においては、式(1)によって算出される分散値を用いて合焦位置を検出する。具体的には、(M_{xy}-L)番目から(M_{xy}+L)番目の各画像について、式(1)に基づいて画像上の位置(x, y)にある画素について分散値V[k](x, y)を用いて、以下の式(14)により各画素の合焦位置f(x, y)を算出する。

30

【0090】

【数5】

$$f(x, y) = \frac{\sum_{j=M_{xy}-L}^{M_{xy}+L} V[j](x, y) \times j}{\sum_{j=M_{xy}-L}^{M_{xy}+L} V[j](x, y)} \quad \cdots (14)$$

【0091】

撮像装置6によって画像が取得される周期ΔT2と、Zステージ7の速度W(μm/秒)とを用いると、合焦位置f(x, y)における合焦位置配列F(x, y)は、以下の式(15)で表される。

40

【0092】

$$F(x, y) = \Delta T2 \times W \times f(x, y) \quad \cdots (15)$$

制御装置11は、式(15)で表される合焦位置配列F(x, y)をモニタ14に3次元表示することにより、被測定部品15の立体形状を表示することができる。

【0093】

実施の形態によれば、合焦位置を求めるために必要な評価値として、合焦位置を算出する対象である注目画素の輝度に加えて、注目画素の輝度と注目画素に近接する複数の単位領域の輝度との差に相関関係のある評価値として、注目画素の輝度と注目画素に近接する近接領域に含まれる画素の輝度との分散値を用いることにより、画像に含まれる複数の画

50

素の合焦位置を精度よく算出することができる。その結果、被測定部品 15 の形状を正確に測定することができる。

【0094】

図 14 は、本発明の実施の形態に従う形状測定装置を備える塗布装置 100 の模式的な斜視図である。図 14 に示されるように、塗布装置 100 は、形状測定装置 1A と、塗布機構 50 とを備える。形状測定装置 1A は、被塗布対象物である基板 15A の形状を測定する。塗布機構 50 は、基板 15A に、塗布機構 50 に設けられた塗布針を用いて、基板 15A の被塗布対象面（上面側）に塗布材料を塗布し、回路パターンを描画する。

【0095】

図 15 は、基板 15A の製造工程を示すフローチャートである。S51 において塗布工程が行なわれる。塗布工程においては、基板 15A の被塗布面に回路パターンを描画する。S51 に続いて、S52 において形状測定工程が行なわれる。形状測定工程においては、形状測定装置 1A を用いて基板 15A の被塗布面の形状が測定される。S52 に続いて、S53 において検査工程が行なわれる。検査工程においては、S51 において回路パターンが描画された被塗布面の形状を検査する。S53 の終了により、基板 15A の製造工程が完了する。

【0096】

今回開示された実施の形態はすべての点で例示であって制限的なものではないと考えられるべきである。本発明の範囲は上記した説明ではなくて特許請求の範囲によって示され、特許請求の範囲と均等の意味および範囲内でのすべての変更が含まれることが意図される。

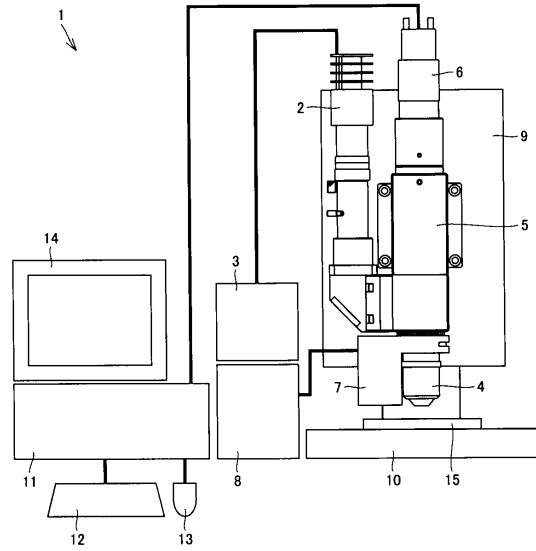
【符号の説明】

【0097】

1, 1A 形状測定装置、2 光源、3 光源制御器、4 二光束干渉対物レンズ、5 観察光学系、6 撮像装置、6A 撮像面、7 Z ステージ、8 Z ステージ制御器、9 支持部材、10 ベース板、11 制御装置、12 キーボード、13 マウス、14 モニタ、15 被測定部品、15A 基板、21 レンズ、22 参照鏡、23 ビームスプリッタ、31 集光レンズ、32 ハーフミラー、33 結像レンズ、34 フィルタ、41 演算処理部、42 画像入力部、43 データ記憶部、44 位置制御値出力部、45 照明制御値出力部、50 塗布機構、100 塗布装置、 C_{xy} 画素、D1a, D1b グラディエント、D2a, D2b ラプラシアン、E 曲線、EL, EZ 制御電圧、L1, L2 光、 R_{AB} 近接領域。

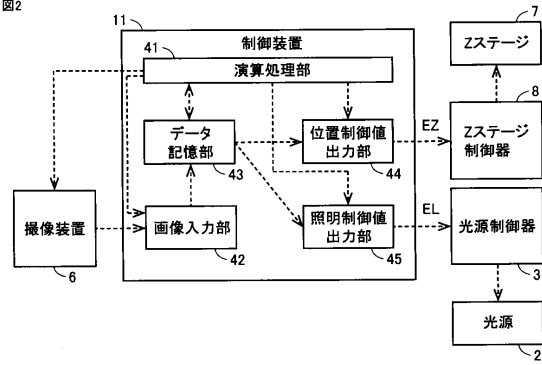
【図 1】

図1



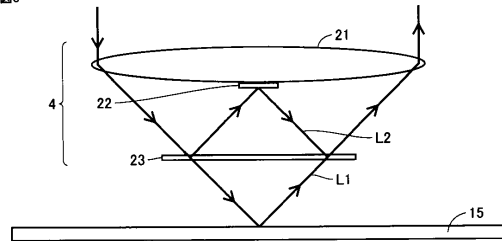
【図 2】

図2



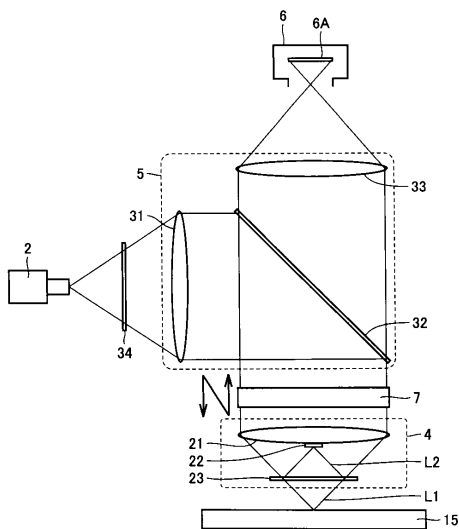
【図 3】

図3



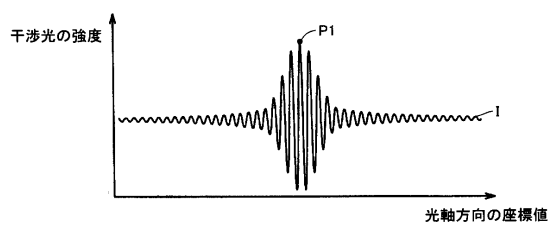
【図 4】

図4



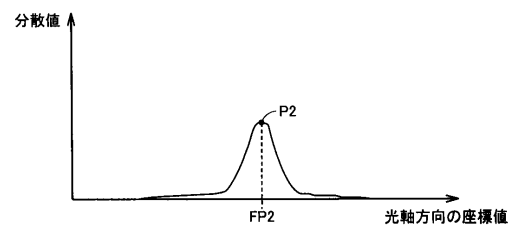
【図 5】

図5



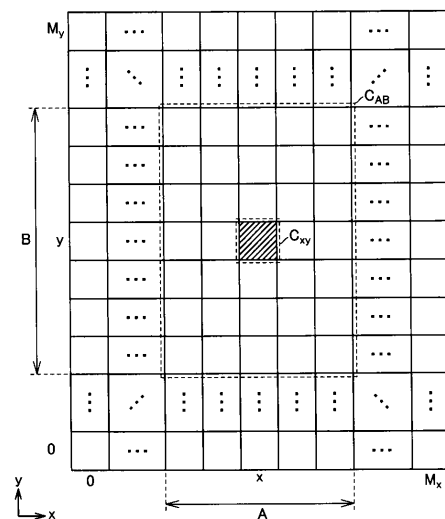
【図 6】

図6



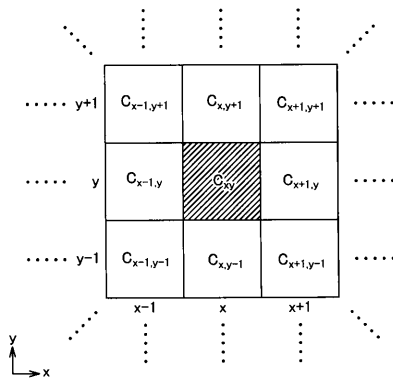
【図 7】

図7



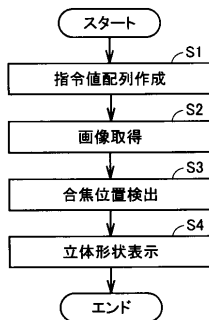
【図 8】

図8



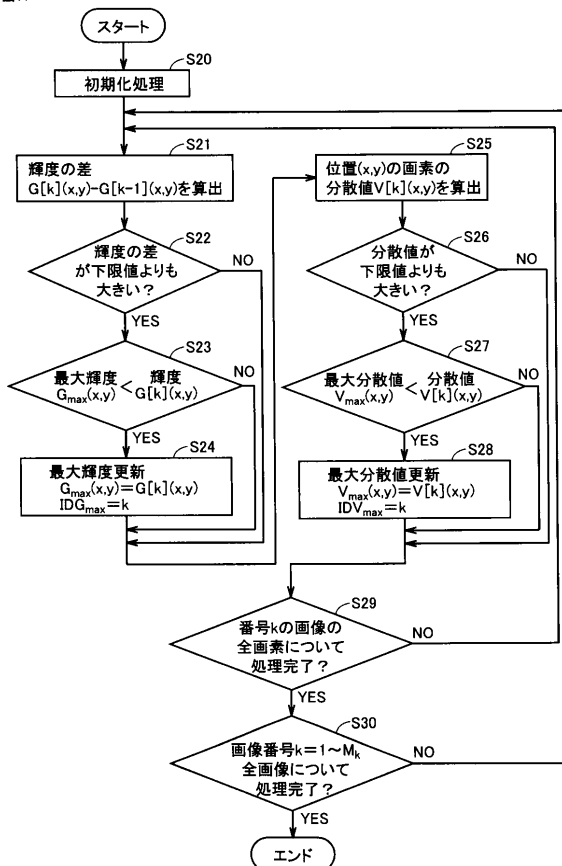
【図 9】

図9



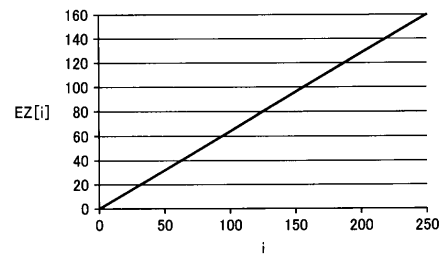
【図 11】

図11



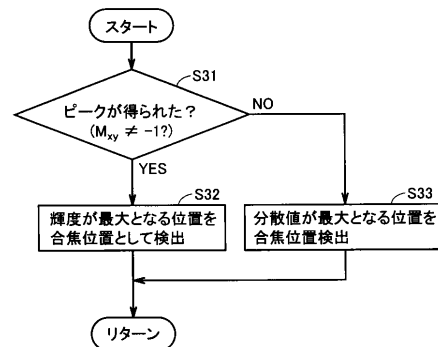
【図 10】

図10



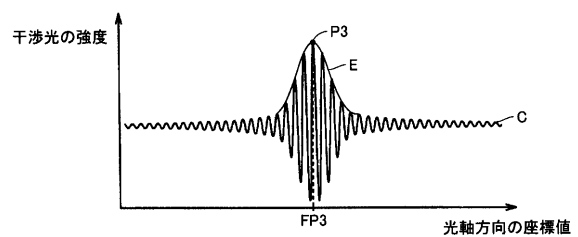
【図 12】

図12



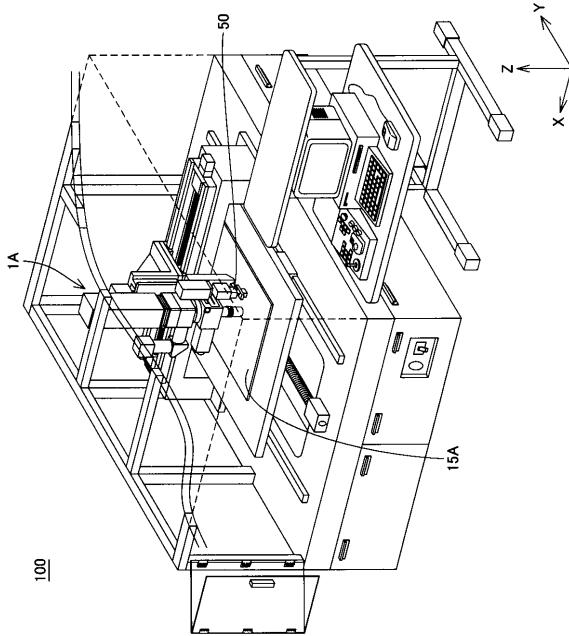
【図 13】

図13



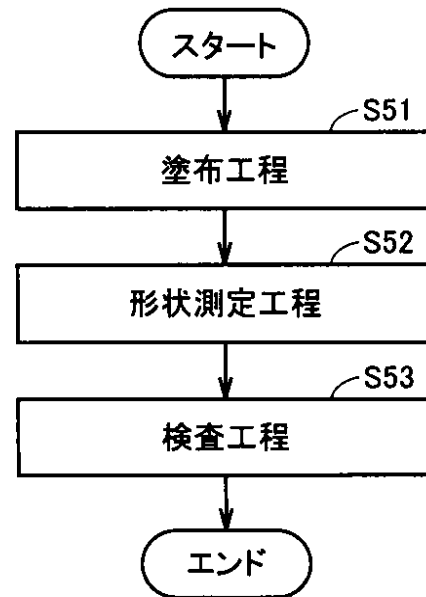
【図 14】

図14



【図 15】

図15



フロントページの続き

(56)参考文献 特開2013-36848 (JP, A)

米国特許出願公開第2014/0168660 (US, A1)

米国特許出願公開第2006/0018514 (US, A1)

特開2015-7564 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01B 11/00-11/30

G01C 3/06