

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4385139号
(P4385139)

(45) 発行日 平成21年12月16日(2009.12.16)

(24) 登録日 平成21年10月9日(2009.10.9)

(51) Int.Cl. F I
G O 1 B 11/00 (2006.01) G O 1 B 11/00 H

請求項の数 51 (全 41 頁)

(21) 出願番号	特願2007-556824 (P2007-556824)	(73) 特許権者	504133110 国立大学法人電気通信大学 東京都調布市調布ヶ丘一丁目5番地1
(86) (22) 出願日	平成19年1月24日(2007.1.24)	(74) 代理人	100070150 弁理士 伊東 忠彦
(86) 国際出願番号	PCT/JP2007/051095	(72) 発明者	武田 光夫 東京都調布市調布ヶ丘1丁目5番地1 国立大学法人 電気通信大学内
(87) 国際公開番号	W02007/088759	(72) 発明者	ワン ウェイ 東京都調布市調布ヶ丘1丁目5番地1 国立大学法人 電気通信大学内
(87) 国際公開日	平成19年8月9日(2007.8.9)	(72) 発明者	横関 友亮 東京都調布市調布ヶ丘1丁目5番地1 国立大学法人 電気通信大学内
審査請求日	平成20年7月28日(2008.7.28)		
(31) 優先権主張番号	特願2006-24846 (P2006-24846)		
(32) 優先日	平成18年2月1日(2006.2.1)		
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		
(31) 優先権主張番号	特願2006-303238 (P2006-303238)		
(32) 優先日	平成18年11月8日(2006.11.8)		
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 変位検出方法、及び、変位検出装置、変位検出プログラム、並びに、位相特異点マッチング処理方法、位相特異点マッチング処理プログラム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

取得した画像の強度信号をフーリエ変換するフーリエ変換手順と、

前記フーリエ変換手順でフーリエ変換された信号のエルミート対称性を崩すようなフィルタリング処理を行う手順と、

前記フィルタリング処理の後にフーリエ逆変換することにより複素解析信号を得る手順と、

前記複素解析信号の実部と虚部の値が共にゼロとなる位相特異点を取得する位相特異点取得手順と、

前記位相特異点の位相構造から所定の特徴パラメータを取得し、前記特徴パラメータに基づいて前記位相特異点を特定する位相特異点特定手順と、

前記位相特異点特定手順で取得された特徴パラメータに基づいて変位後の位相特異点の位置を検出することにより変位を検出する変位検出手順とを有し、

前記位相特異点特定手順で取得される特徴パラメータは、前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の実部と虚部の値を平面で補間し、その結果、実部がゼロとなる線分と虚部がゼロとなる線分とが交差する角度であることを特徴とする変位検出方法。

【請求項2】

取得した画像の強度信号をフーリエ変換するフーリエ変換手順と、

前記フーリエ変換手順でフーリエ変換された信号のエルミート対称性を崩すようなフィルタリング処理を行う手順と、

前記フィルタリング処理の後にフーリエ逆変換することにより複素解析信号を得る手順と、

前記複素解析信号の実部と虚部の値が共にゼロとなる位相特異点を取得する位相特異点取得手順と、

前記位相特異点の位相構造から所定の特徴パラメータを取得し、前記特徴パラメータに基づいて前記位相特異点を特定する位相特異点特定手順と、

前記位相特異点特定手順で取得された特徴パラメータに基づいて変位後の位相特異点の位置を検出することにより変位を検出する変位検出手順とを有し、

前記位相特異点特定手順で取得される特徴パラメータは、前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の強度分布の形状の離心率であることを特徴とする変位検出方法。

10

【請求項3】

取得した画像の強度信号をフーリエ変換するフーリエ変換手順と、

前記フーリエ変換手順でフーリエ変換された信号のエルミート対称性を崩すようなフィルタリング処理を行う手順と、

前記フィルタリング処理の後にフーリエ逆変換することにより複素解析信号を得る手順と、

前記複素解析信号の実部と虚部の値が共にゼロとなる位相特異点を取得する位相特異点取得手順と、

前記位相特異点の位相構造から所定の特徴パラメータを取得し、前記特徴パラメータに基づいて前記位相特異点を特定する位相特異点特定手順と、

20

前記位相特異点特定手順で取得された特徴パラメータに基づいて変位後の位相特異点の位置を検出することにより変位を検出する変位検出手順とを有し、

前記位相特異点特定手順で取得される特徴パラメータは、前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の実部の勾配と前記複素解析信号の虚部の勾配とのベクトル積であることを特徴とする変位検出方法。

【請求項4】

取得した画像の強度信号をフーリエ変換するフーリエ変換手順と、

前記フーリエ変換手順でフーリエ変換された信号のエルミート対称性を崩すようなフィルタリング処理を行う手順と、

前記フィルタリング処理の後にフーリエ逆変換することにより複素解析信号を得る手順と、

30

前記複素解析信号の実部と虚部の値が共にゼロとなる位相特異点を取得する位相特異点取得手順と、

前記位相特異点の位相構造から所定の特徴パラメータを取得し、前記特徴パラメータに基づいて前記位相特異点を特定する位相特異点特定手順と、

前記位相特異点特定手順で取得された特徴パラメータに基づいて変位後の位相特異点の位置を検出することにより変位を検出する変位検出手順とを有し、

前記位相特異点特定手順は、前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の実部と虚部の値を平面で補間し、その結果、実部がゼロとなる線分と虚部がゼロとなる線分とが交差する角度と、前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の強度分布の形状の離心率と、前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の実部の勾配と前記複素解析信号の虚部の勾配とのベクトル積である渦度とを含むことを特徴とする変位検出方法。

40

【請求項5】

前記変位検出手順は、前記位相特異点特定手順で特定された位相特異点の変位前後の位置を前記特徴パラメータに基づいて特定する変位前後位置検出手順と、

前記変位前後位置検出手順で検出された変位前後の位相特異点の位置に基づいて前記位相特異点の変位を測定する変位測定手順とを有することを特徴とする請求項1乃至4のいずれか一項記載の変位検出方法。

【請求項6】

前記変位測定手順は、前記変位前後位置検出手順で検出された変位前後の位相特異点の位

50

置の座標の差分の二乗平方根を位相特異点の変位量として算出することを特徴とする請求項 5 記載の変位検出方法。

【請求項 7】

前記変位測定手順は、前記変位前後位置検出手順で検出された複数組の変位前後の位相特異点の位置を結ぶ線分の複数の垂直二等分線の距離の和が最小となる点を回転中心として求める回転中心取得手順と、

前記変位前後位置検出手順で検出された変位前後の位相特異点の位置と前記回転中心取得手順で取得した前記回転中心とからなる三角形の前記回転中心を挟む辺の角度を回転角として求める回転角度取得手順とを有することを特徴とする請求項 5 記載の変位検出方法。

10

【請求項 8】

前記フィルタリング処理は、前記フーリエ変換手順でフーリエ変換された信号に対して中心に位相特異点を持つらせん状の位相特性を持ち、かつ、ドーナツ状の振幅特性を持つラゲルガウスビームフィルタ特性による処理であることを特徴とする請求項 1 乃至 4 のいずれか一項記載の変位検出方法。

【請求項 9】

前記画像の強度信号の平均値を前記画像の各強度信号から減算した画像を前記画像とする前処理手順を有することを特徴とする請求項 1 乃至 4 のいずれか一項記載の変位検出方法。

【請求項 10】

前記フィルタリング処理は、前記フーリエ変換手順でフーリエ変換された信号に対して中心に位相特異点を持つらせん状の位相特性を持つフィルタ特性、又は、ヒルベルト変換による処理であることを特徴とする請求項 1 乃至 4 のいずれか一項記載の変位検出方法。

20

【請求項 11】

変位前の位相特異点の特徴パラメータと変位後の位相特異点の特徴パラメータとの差異に基づいて変位前の位相特異点に対応する変位後の位相特異点を探しだし、その位相特異点の地理的な位置関係の類似性から変位前の位相特異点に対応する変位後の位相特異点のマッチングを行うマッチング手順を、更に、有することを特徴とする請求項 1 乃至 4 のいずれか一項記載の変位検出方法。

【請求項 12】

前記マッチング手順は、変位前の複数の位相特異点間の特徴パラメータの総和距離と変位後の複数の位相特異点間の特徴パラメータの総和距離との差分とが最小となる特徴点の組を変位前と変位後とで互いにマッチングする特徴点として特定することを特徴とする請求項 11 記載の変位検出方法。

30

【請求項 13】

前記マッチング手順は、変位前の所定の位相特異点の特徴パラメータを T_{i1} 、 T_{i2} 、変位後の所定の位相特異点の特徴パラメータを $P_{w(i1)}$ 、 $P_{w(i2)}$ 、を縮尺としたとき、

【数 1】

$$\min = \sum_{1 \leq i1, i2 \leq n} (|T_{i1} - T_{i2}| - \alpha |P_{w(i1)} - P_{w(i2)}|)^2$$

40

が最小となる位相特異点の組を変位前後でマッチングする位相特異点の組として抽出することを特徴とする請求項 11 記載の変位検出方法。

【請求項 14】

取得した画像の強度信号をフーリエ変換するフーリエ変換手段と、

前記フーリエ変換手段でフーリエ変換された信号の複素共役の対称性を崩すようなフィルタリング処理を行う手段と、

前記フィルタリング処理の後にフーリエ逆変換することにより複素解析信号を得る手段と、

50

前記複素解析信号の実部と虚部の値が共にゼロとなる位相特異点を取得する位相特異点取得手段と、

前記位相特異点の位相構造から所定の特徴パラメータを取得し、前記特徴パラメータに基づいて前記位相特異点を特定する位相特異点特定手段と、

前記位相特異点特定手段で取得された特徴パラメータに基づいて変位後の位相特異点の位置を検出することにより変位を検出する変位検出手段とを有し、

前記位相特異点特定手段で取得される特徴パラメータは、前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の実部と虚部の値を平面で補間し、その結果、実部がゼロとなる線分と虚部がゼロとなる線分とが交差する角度であることを特徴とする変位検出装置。

【請求項 15】

取得した画像の強度信号をフーリエ変換するフーリエ変換手段と、

前記フーリエ変換手段でフーリエ変換された信号の複素共役の対称性を崩すようなフィルタリング処理を行う手段と、

前記フィルタリング処理の後にフーリエ逆変換することにより複素解析信号を得る手段と、

前記複素解析信号の実部と虚部の値が共にゼロとなる位相特異点を取得する位相特異点取得手段と、

前記位相特異点の位相構造から所定の特徴パラメータを取得し、前記特徴パラメータに基づいて前記位相特異点を特定する位相特異点特定手段と、

前記位相特異点特定手段で取得された特徴パラメータに基づいて変位後の位相特異点の位置を検出することにより変位を検出する変位検出手段とを有し、

前記位相特異点特定手段で取得される特徴パラメータは、前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の強度分布の形状の離心率であることを特徴とする変位検出装置。

【請求項 16】

取得した画像の強度信号をフーリエ変換するフーリエ変換手段と、

前記フーリエ変換手段でフーリエ変換された信号の複素共役の対称性を崩すようなフィルタリング処理を行う手段と、

前記フィルタリング処理の後にフーリエ逆変換することにより複素解析信号を得る手段と、

前記複素解析信号の実部と虚部の値が共にゼロとなる位相特異点を取得する位相特異点取得手段と、

前記位相特異点の位相構造から所定の特徴パラメータを取得し、前記特徴パラメータに基づいて前記位相特異点を特定する位相特異点特定手段と、

前記位相特異点特定手段で取得された特徴パラメータに基づいて変位後の位相特異点の位置を検出することにより変位を検出する変位検出手段とを有し、

前記位相特異点特定手段で取得される特徴パラメータは、前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の実部の勾配と前記複素解析信号の虚部の勾配とのベクトル積であることを特徴とする変位検出装置。

【請求項 17】

取得した画像の強度信号をフーリエ変換するフーリエ変換手段と、

前記フーリエ変換手段でフーリエ変換された信号の複素共役の対称性を崩すようなフィルタリング処理を行う手段と、

前記フィルタリング処理の後にフーリエ逆変換することにより複素解析信号を得る手段と、

前記複素解析信号の実部と虚部の値が共にゼロとなる位相特異点を取得する位相特異点取得手段と、

前記位相特異点の位相構造から所定の特徴パラメータを取得し、前記特徴パラメータに基づいて前記位相特異点を特定する位相特異点特定手段と、

前記位相特異点特定手段で取得された特徴パラメータに基づいて変位後の位相特異点の位置を検出することにより変位を検出する変位検出手段とを有し、

10

20

30

40

50

前記位相特異点特定手段は、前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の実部と虚部の値を平面で補間し、その結果、実部がゼロとなる線分と虚部がゼロとなる線分とが交差する角度と、前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の強度分布の形状の離心率と、前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の実部の勾配と前記複素解析信号の虚部の勾配とのベクトル積である渦度とを含むことを特徴とする変位検出装置。

【請求項 18】

前記変位検出手段は、前記位相特異点特定手段で特定された位相特異点の変位前後の位置を前記特徴パラメータに基づいて特定する変位前後位置検出手段と、

前記変位前後位置検出手段で検出された変位前後の位相特異点の位置に基づいて前記位相特異点の変位を測定する変位測定手段とを有することを特徴とする請求項 14 乃至 17 のいずれか一項記載の変位検出装置。

10

【請求項 19】

前記変位測定手段は、

前記変位前後位置検出手段で検出された変位前後の位相特異点の位置の座標の差の二乗平方根を位相特異点の変位量として算出することを特徴とする請求項 18 記載の変位検出装置。

【請求項 20】

前記変位測定手段は、前記変位前後位置検出手段で検出された複数組の変位前後の位相特異点の位置を結ぶ線分の複数の垂直二等分線の距離の和が最小となる点を回転中心として求める回転中心取得手段と、

20

前記変位前後位置検出手段で検出された変位前後の位相特異点の位置と前記回転中心取得手段で取得した前記回転中心とからなる三角形の前記回転中心を挟む辺の角度を回転角として求める回転角度取得手段とを有することを特徴とする請求項 18 記載の変位検出装置。

【請求項 21】

前記フィルタリング処理は、前記フーリエ変換手段でフーリエ変換された信号に対して中心に位相特異点を持つらせん状の位相特性を持ち、かつ、ドーナツ状の振幅特性を持つラゲルガウスビームフィルタ特性による処理であることを特徴とする請求項 18 記載の変位検出装置。

【請求項 22】

前記画像の強度信号の平均値を前記画像の各強度信号から減算した画像を前記画像とする前処理手段を有することを特徴とする請求項 14 乃至 17 のいずれか一項記載の変位検出装置。

30

【請求項 23】

前記フィルタリング処理は、前記フーリエ変換手段でフーリエ変換された信号に対して中心に位相特異点を持つらせん状の位相特性を持つフィルタ特性、又は、ヒルベルト変換による処理であることを特徴とする請求項 14 乃至 17 のいずれか一項記載の変位検出装置。

【請求項 24】

変位前の位相特異点の特徴パラメータと変位後の位相特異点の特徴パラメータとの差異に基づいて変位前の位相特異点に対応する変位後の位相特異点を探しだし、その位相特異点の地理的な位置関係の類似性から変位前の位相特異点に対応する変位後の位相特異点のマッチングを行うマッチング手段を、更に、有することを特徴とする請求項 14 乃至 17 のいずれか一項記載の変位検出装置。

40

【請求項 25】

前記マッチング手段は、変位前の複数の位相特異点間の特徴パラメータの総和距離と変位後の複数の位相特異点間の特徴パラメータの総和距離との差分とが最小となる特徴点の組を変位前と変位後とで互いにマッチングする特徴点として特定することを特徴とする請求項 24 記載の変位検出装置。

【請求項 26】

50

前記マッチング手段は、変位前の所定の位相特異点の特徴パラメータを T_{i1} 、 T_{i2} 、変位後の所定の位相特異点の特徴パラメータを $P_{w(i1)}$ 、 $P_{w(i2)}$ 、を縮尺としたとき、

【数 2】

$$\min = \sum_{1 \leq i, j \leq n} (|T_{i1} - T_{j2}| - \alpha |P_{w(i1)} - P_{w(j2)}|)^2$$

が最小となる位相特異点の組を変位前後でマッチングする位相特異点の組として抽出することを特徴とする請求項 2 4 記載の変位検出装置。

【請求項 2 7】

コンピュータに、

取得した画像の強度信号をフーリエ変換するフーリエ変換手順と、

前記フーリエ変換手順でフーリエ変換された信号のエルミート対称性を崩すようなフィルタリング処理を行う手順と、

前記フィルタリング処理の後にフーリエ逆変換することにより複素解析信号を得る手順と、

前記複素解析信号の実部と虚部の値が共にゼロとなる位相特異点を取得する位相特異点取得手順と、

前記位相特異点の位相構造から特徴パラメータとして、前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の実部と虚部の値を平面で補間し、その結果、実部がゼロとなる線分と虚部がゼロとなる線分とが交差する角度を取得し、前記特徴パラメータに基づいて前記位相特異点を特定する位相特異点特定手順と、

前記位相特異点特定手順で取得された特徴パラメータに基づいて変位後の位相特異点の位置を検出することにより変位を検出する変位検出手順とを実行させる変位検出プログラム。

【請求項 2 8】

コンピュータに、

取得した画像の強度信号をフーリエ変換するフーリエ変換手順と、

前記フーリエ変換手順でフーリエ変換された信号のエルミート対称性を崩すようなフィルタリング処理を行う手順と、

前記フィルタリング処理の後にフーリエ逆変換することにより複素解析信号を得る手順と、

前記複素解析信号の実部と虚部の値が共にゼロとなる位相特異点を取得する位相特異点取得手順と、

前記位相特異点の位相構造から特徴パラメータとして、前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の強度分布の形状の離心率を取得し、前記特徴パラメータに基づいて前記位相特異点を特定する位相特異点特定手順と、

前記位相特異点特定手順で取得された特徴パラメータに基づいて変位後の位相特異点の位置を検出することにより変位を検出する変位検出手順とを実行させる変位検出プログラム。

【請求項 2 9】

コンピュータに、

取得した画像の強度信号をフーリエ変換するフーリエ変換手順と、

前記フーリエ変換手順でフーリエ変換された信号のエルミート対称性を崩すようなフィルタリング処理を行う手順と、

前記フィルタリング処理の後にフーリエ逆変換することにより複素解析信号を得る手順と、

前記複素解析信号の実部と虚部の値が共にゼロとなる位相特異点を取得する位相特異点取得手順と、

前記位相特異点の位相構造から特徴パラメータとして、前記位相特異点近傍の前記複素

10

20

30

40

50

解析信号の実部の勾配と前記複素解析信号の虚部の勾配とのベクトル積を取得し、前記特徴パラメータに基づいて前記位相特異点を特定する位相特異点特定手順と、

前記位相特異点特定手順で取得された特徴パラメータに基づいて変位後の位相特異点の位置を検出することにより変位を検出する変位検出手順とを実行させる変位検出プログラム。

【請求項 30】

コンピュータに、

取得した画像の強度信号をフーリエ変換するフーリエ変換手順と、

前記フーリエ変換手順でフーリエ変換された信号のエルミート対称性を崩すようなフィルタリング処理を行う手順と、

前記フィルタリング処理の後にフーリエ逆変換することにより複素解析信号を得る手順と、

前記複素解析信号の実部と虚部の値が共にゼロとなる位相特異点を取得する位相特異点取得手順と、

前記位相特異点の位相構造から特徴パラメータとして、前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の実部と虚部の値を平面で補間し、その結果、実部がゼロとなる線分と虚部がゼロとなる線分とが交差する角度と、前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の強度分布の形状の離心率と、前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の実部の勾配と前記複素解析信号の虚部の勾配とのベクトル積である渦度とを取得し、前記特徴パラメータに基づいて前記位相特異点を特定する位相特異点特定手順と、

前記位相特異点特定手順で取得された特徴パラメータに基づいて変位後の位相特異点の位置を検出することにより変位を検出する変位検出手順とを実行させる変位検出プログラム。

【請求項 31】

前記変位検出手順は、前記位相特異点特定手順で特定された位相特異点の変位前後の位置を前記特徴パラメータに基づいて特定する変位前後位置検出手順と、

前記変位前後位置検出手順で検出された変位前後の位相特異点の位置に基づいて前記位相特異点の変位を測定する変位測定手順とを有することを特徴とする請求項 27 乃至 30 のいずれか一項記載の変位検出プログラム。

【請求項 32】

前記変位測定手順は、前記変位前後位置検出手順で検出された変位前後の位相特異点の位置座標の差分の二乗平方根を位相特異点の変位量として算出することを特徴とする請求項 31 記載の変位検出プログラム。

【請求項 33】

前記変位測定手順は、前記変位前後位置検出手順で検出された複数組の変位前後の位相特異点の位置を結ぶ線分の複数の垂直二等分線の距離の和が最小となる点を回転中心として求める回転中心取得手順と、

前記変位前後位置検出手順で検出された変位前後の位相特異点の位置と前記回転中心取得手順で取得した前記回転中心とからなる三角形の前記回転中心を挟む辺の角度を回転角として求める回転角度取得手順とを有することを特徴とする請求項 31 記載の変位検出プログラム。

【請求項 34】

前記フィルタリング処理は、前記フーリエ変換手順でフーリエ変換された信号に対して中心に位相特異点を持つらせん状の位相特性を持ち、かつ、ドーナツ状の振幅特性を持つラゲルガウスビームフィルタ特性による処理であることを特徴とする請求項 27 乃至 30 のいずれか一項記載の変位検出プログラム。

【請求項 35】

前記画像の強度信号の平均値を前記画像の各強度信号から減算した画像を前記画像とする前処理手順を有することを特徴とする請求項 27 乃至 30 のいずれか一項記載の変位検出プログラム。

10

20

30

40

50

【請求項 36】

前記フィルタリング処理は、前記フーリエ変換手順でフーリエ変換された信号に対して中心に位相特異点を持つらせん状の位相特性を持つフィルタ特性、又は、ヒルベルト変換による処理であることを特徴とする請求項 27 乃至 30 のいずれか一項記載の変位検出プログラム。

【請求項 37】

変位前の位相特異点の特徴パラメータと変位後の位相特異点の特徴パラメータとの差異に基づいて変位前の位相特異点に対応する変位後の位相特異点を探しだし、その位相特異点の地理的な位置関係の類似性から変位前の位相特異点に対応する変位後の位相特異点のマッチングを行うマッチング手順を、更に、有することを特徴とする請求項 27 乃至 30 のいずれか一項記載の変位検出プログラム。

10

【請求項 38】

前記マッチング手順は、変位前の複数の位相特異点間の特徴パラメータの総和距離と変位後の複数の位相特異点間の特徴パラメータの総和距離との差分とが最小となる特徴点の組を変位前と変位後とで互いにマッチングする特徴点として特定することを特徴とする請求項 37 記載の変位検出プログラム。

【請求項 39】

前記マッチング手順は、変位前の所定の位相特異点の特徴パラメータを T_{i1} 、 T_{i2} 、変位後の所定の位相特異点の特徴パラメータを $P_{w(i1)}$ 、 $P_{w(i2)}$ 、を縮尺としたとき、

【数 3】

20

$$\min = \sum_{1 \leq i, j \leq n} (|T_{i1} - T_{j2}| - \alpha |P_{w(i1)} - P_{w(j2)}|)^2$$

が最小となる位相特異点の組を変位前後でマッチングする位相特異点の組として抽出することを特徴とする請求項 37 記載の変位検出プログラム。

【請求項 40】

取得した画像の強度信号をフーリエ変換するフーリエ変換手順と、

前記フーリエ変換手順でフーリエ変換された信号のエルミート対称性を崩すようなフィルタリング処理を行う手順と、

30

前記フィルタリング処理の後にフーリエ逆変換することにより複素解析信号を得る手順と、

前記複素解析信号の実部と虚部の値が共にゼロとなる位相特異点を取得する位相特異点取得手順と、

前記位相特異点の位相構造から特徴パラメータとして、前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の実部と虚部の値を平面で補間し、その結果、実部がゼロとなる線分と虚部がゼロとなる線分とが交差する角度を取得し、前記特徴パラメータに基づいて前記位相特異点を特定する位相特異点特定手順と、

前記位相特異点特定手順で取得された特徴パラメータに基づいて変位後の位相特異点の位置を検出する手順とを有し、

40

変位前の位相特異点の特徴パラメータと変位後の位相特異点の特徴パラメータとの差異に基づいて変位前の位相特異点に対応する変位後の位相特異点を探しだし、その位相特異点の地理的な位置関係の類似性から変位前の位相特異点に対応する変位後の位相特異点のマッチングを行うことを特徴とする位相特異点マッチング処理方法。

【請求項 41】

取得した画像の強度信号をフーリエ変換するフーリエ変換手順と、

前記フーリエ変換手順でフーリエ変換された信号のエルミート対称性を崩すようなフィルタリング処理を行う手順と、

前記フィルタリング処理の後にフーリエ逆変換することにより複素解析信号を得る手順と、

50

前記複素解析信号の実部と虚部の値が共にゼロとなる位相特異点を取得する位相特異点取得手順と、

前記位相特異点の位相構造から特徴パラメータとして、前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の強度分布の形状の離心率を取得し、前記特徴パラメータに基づいて前記位相特異点を特定する位相特異点特定手順と、

前記位相特異点特定手順で取得された特徴パラメータに基づいて変位後の位相特異点の位置を検出する手順とを有し、

変位前の位相特異点の特徴パラメータと変位後の位相特異点の特徴パラメータとの差異に基づいて変位前の位相特異点に対応する変位後の位相特異点を探しだし、その位相特異点の地理的な位置関係の類似性から変位前の位相特異点に対応する変位後の位相特異点のマッチングを行うことを特徴とする位相特異点マッチング処理方法。

10

【請求項 4 2】

取得した画像の強度信号をフーリエ変換するフーリエ変換手順と、

前記フーリエ変換手順でフーリエ変換された信号のエルミート対称性を崩すようなフィルタリング処理を行う手順と、

前記フィルタリング処理の後にフーリエ逆変換することにより複素解析信号を得る手順と、

前記複素解析信号の実部と虚部の値が共にゼロとなる位相特異点を取得する位相特異点取得手順と、

前記位相特異点の位相構造から特徴パラメータとして、前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の実部の勾配と前記複素解析信号の虚部の勾配とのベクトル積を取得し、前記特徴パラメータに基づいて前記位相特異点を特定する位相特異点特定手順と、

20

前記位相特異点特定手順で取得された特徴パラメータに基づいて変位後の位相特異点の位置を検出する手順とを有し、

変位前の位相特異点の特徴パラメータと変位後の位相特異点の特徴パラメータとの差異に基づいて変位前の位相特異点に対応する変位後の位相特異点を探しだし、その位相特異点の地理的な位置関係の類似性から変位前の位相特異点に対応する変位後の位相特異点のマッチングを行うことを特徴とする位相特異点マッチング処理方法。

【請求項 4 3】

取得した画像の強度信号をフーリエ変換するフーリエ変換手順と、

30

前記フーリエ変換手順でフーリエ変換された信号のエルミート対称性を崩すようなフィルタリング処理を行う手順と、

前記フィルタリング処理の後にフーリエ逆変換することにより複素解析信号を得る手順と、

前記複素解析信号の実部と虚部の値が共にゼロとなる位相特異点を取得する位相特異点取得手順と、

前記位相特異点の位相構造から特徴パラメータとして、位置情報、前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の強度分布の形状の離心率、前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の実部の勾配と前記複素解析信号の虚部の勾配とのベクトル積である渦度、及び前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の実部がゼロとなる線分と虚部がゼロとなる線分とが交わる角度を取得し、前記特徴パラメータに基づいて前記位相特異点を特定する位相特異点特定手順と、

40

前記位相特異点特定手順で取得された特徴パラメータに基づいて変位後の位相特異点の位置を検出する手順とを有し、

変位前の位相特異点の特徴パラメータと変位後の位相特異点の特徴パラメータとの差異に基づいて変位前の位相特異点に対応する変位後の位相特異点を探しだし、その位相特異点の地理的な位置関係の類似性から変位前の位相特異点に対応する変位後の位相特異点のマッチングを行うことを特徴とする位相特異点マッチング処理方法。

【請求項 4 4】

変位前の複数の位相特異点間の特徴パラメータの総和距離と変位後の複数の位相特異点間

50

の特徴パラメータの総和距離との差分とが最小となる位相特異点の組を変位前と変位後とで互いにマッチングする位相特異点として特定することを特徴とする請求項 40 乃至 43 のいずれか一項記載の位相特異点マッチング処理方法。

【請求項 45】

変位前の所定の位相特異点の特徴パラメータを T_{i1} 、 T_{i2} 、変位後の所定の位相特異点の特徴パラメータを $P_{w(i1)}$ 、 $P_{w(i2)}$ 、を縮尺としたとき、

【数 4】

$$\min = \sum_{1 \leq i1, i2 \leq n} (|T_{i1} - T_{i2}| - \alpha |P_{w(i1)} - P_{w(i2)}|)^2$$

10

が最小となる位相特異点の組を変位前後でマッチングする位相特異点の組として抽出することを特徴とする請求項 40 乃至 43 のいずれか一項記載の位相特異点マッチング処理方法。

【請求項 46】

コンピュータに、

取得した画像の強度信号をフーリエ変換するフーリエ変換手順と、

前記フーリエ変換手順でフーリエ変換された信号のエルミート対称性を崩すようなフィルタリング処理を行う手順と、

前記フィルタリング処理の後にフーリエ逆変換することにより複素解析信号を得る手順と、

20

前記複素解析信号の実部と虚部の値が共にゼロとなる位相特異点を取得する位相特異点取得手順と、

前記位相特異点の位相構造から特徴パラメータとして、前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の実部と虚部の値を平面で補間し、その結果、実部がゼロとなる線分と虚部がゼロとなる線分とが交差する角度を取得し、前記特徴パラメータに基づいて前記位相特異点を特定する位相特異点特定手順と、

前記位相特異点特定手順で取得された特徴パラメータに基づいて変位後の位相特異点の位置を検出する手順とを有し、

変位前の位相特異点の特徴パラメータと変位後の位相特異点の特徴パラメータとの差異に基づいて変位前の位相特異点に対応する変位後の位相特異点を探しだし、その位相特異点の地理的な位置関係の類似性から変位前の位相特異点に対応する変位後の位相特異点のマッチングを行うことを特徴とするコンピュータ読み取り可能な位相特異点マッチング処理プログラム。

30

【請求項 47】

コンピュータに、

取得した画像の強度信号をフーリエ変換するフーリエ変換手順と、

前記フーリエ変換手順でフーリエ変換された信号のエルミート対称性を崩すようなフィルタリング処理を行う手順と、

前記フィルタリング処理の後にフーリエ逆変換することにより複素解析信号を得る手順と、

40

前記複素解析信号の実部と虚部の値が共にゼロとなる位相特異点を取得する位相特異点取得手順と、

前記位相特異点の位相構造から特徴パラメータとして、前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の強度分布の形状の離心率を取得し、前記特徴パラメータに基づいて前記位相特異点を特定する位相特異点特定手順と、

前記位相特異点特定手順で取得された特徴パラメータに基づいて変位後の位相特異点の位置を検出する手順とを有し、

変位前の位相特異点の特徴パラメータと変位後の位相特異点の特徴パラメータとの差異に基づいて変位前の位相特異点に対応する変位後の位相特異点を探しだし、その位相特異

50

点の地理的な位置関係の類似性から変位前の位相特異点に対応する変位後の位相特異点のマッチングを行うことを特徴とするコンピュータ読み取り可能な位相特異点マッチング処理プログラム。

【請求項 48】

コンピュータに、

取得した画像の強度信号をフーリエ変換するフーリエ変換手順と、

前記フーリエ変換手順でフーリエ変換された信号のエルミート対称性を崩すようなフィルタリング処理を行う手順と、

前記フィルタリング処理の後にフーリエ逆変換することにより複素解析信号を得る手順と、

前記複素解析信号の実部と虚部の値が共にゼロとなる位相特異点を取得する位相特異点取得手順と、

前記位相特異点の位相構造から特徴パラメータとして、前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の実部の勾配と前記複素解析信号の虚部の勾配とのベクトル積を取得し、前記特徴パラメータに基づいて前記位相特異点を特定する位相特異点特定手順と、

前記位相特異点特定手順で取得された特徴パラメータに基づいて変位後の位相特異点の位置を検出する手順とを有し、

変位前の位相特異点の特徴パラメータと変位後の位相特異点の特徴パラメータとの差異に基づいて変位前の位相特異点に対応する変位後の位相特異点を探しだし、その位相特異点の地理的な位置関係の類似性から変位前の位相特異点に対応する変位後の位相特異点のマッチングを行うことを特徴とするコンピュータ読み取り可能な位相特異点マッチング処理プログラム。

【請求項 49】

コンピュータに、

取得した画像の強度信号をフーリエ変換するフーリエ変換手順と、

前記フーリエ変換手順でフーリエ変換された信号のエルミート対称性を崩すようなフィルタリング処理を行う手順と、

前記フィルタリング処理の後にフーリエ逆変換することにより複素解析信号を得る手順と、

前記複素解析信号の実部と虚部の値が共にゼロとなる位相特異点を取得する位相特異点取得手順と、

前記位相特異点の位相構造から特徴パラメータとして、位置情報、前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の強度分布の形状の離心率、前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の実部の勾配と前記複素解析信号の虚部の勾配とのベクトル積である渦度、及び前記位相特異点近傍の前記複素解析信号の実部がゼロとなる線分と虚部がゼロとなる線分とが交わる角度を取得し、前記特徴パラメータに基づいて前記位相特異点を特定する位相特異点特定手順と、

前記位相特異点特定手順で取得された特徴パラメータに基づいて変位後の位相特異点の位置を検出する手順とを有し、

変位前の位相特異点の特徴パラメータと変位後の位相特異点の特徴パラメータとの差異に基づいて変位前の位相特異点に対応する変位後の位相特異点を探しだし、その位相特異点の地理的な位置関係の類似性から変位前の位相特異点に対応する変位後の位相特異点のマッチングを行うことを特徴とするコンピュータ読み取り可能な位相特異点マッチング処理プログラム。

【請求項 50】

変位前の複数の位相特異点間の特徴パラメータの総和距離と変位後の複数の位相特異点間の特徴パラメータの総和距離との差分とが最小となる位相特異点の組を変位前と変位後とで互いにマッチングする位相特異点として特定することを特徴とする請求項 46 乃至 49 のいずれか一項記載の位相特異点マッチング処理プログラム。

【請求項 51】

10

20

30

40

50

変位前の所定の位相特異点の特徴パラメータを T_{i1} 、 T_{i2} 、変位後の所定の位相特異点の特徴パラメータを $P_{w(i1)}$ 、 $P_{w(i2)}$ 、を縮尺としたとき、

【数 5】

$$\min = \sum_{1 \leq i, j \leq n} (|T_{i1} - T_{j2}| - \alpha |P_{w(i1)} - P_{w(j2)}|)^2$$

が最小となる位相特異点の組を変位前後でマッチングする位相特異点の組として抽出することを特徴とする請求項 4 6 乃至 4 9 のいずれか一項記載の位相特異点マッチング処理プログラム。

10

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は変位検出方法、及び、変位検出装置、変位検出プログラム、並びに、位相特異点マッチング処理方法、位相特異点マッチングプログラムに係り、特に、変位前後の位相特異点から変位を検出する変位検出方法、及び、変位検出装置、変位検出プログラム、並びに、位相特異点マッチング処理方法、位相特異点マッチング処理プログラムに関する。

【背景技術】

【0002】

近年、レーザースペckルパターンやランダムドットパターンなどのように空間的にランダムな構造をもつパターンやテクスチャを指標として物体の微小変位を非接触で計測する技術は非破壊検査や材料強度試験など産業応用上の重要な位置を占めている。パターンやテクスチャを用いて微小変位を検出する際の信号処理技術として相関法が知られている。

20

【0003】

図 3 8、図 3 9 は相関法の動作を説明するため図を示す。図 3 8 (A) は場の変位、図 3 8 (B) 相関法の概念図、図 3 8 (C) は本測定法の概念図を示している。また、図 3 9 (A) は物体 A の一方向への変位、図 3 9 (B) は物体 A の回転変位を説明するための図を示している。

【0004】

相関法を用いて変位を検出する場合、図 3 8 (A) に矢印で示すように場の変位が位置により異なるときには図 3 8 (B) に示すように各領域に分けて計算する必要があり、各点での相関値を決定するごとに 2 次元相関積分計算または 2 次元フーリエ変換・逆変換を行う必要があったため、1 ピクセル以下での変位検出の分解能を上げようとしてピクセル内部での相関値の計算点数を増やすと計算時間が膨大になっていた。

30

【0005】

また、従来の相関法では、図 3 9 (A) に示すように一方向の変位に対しては相関をとることにより変位量を求めることができるが、図 3 9 (B) に示すように回転に対しては適用できなかった。

【0006】

なお、位相情報を利用する相関関数の計算方法としては、位相限定相関法が知られている(特許文献 1 参照)。この相関法は、複素関数である合成スペクトルの振幅を一定化又は対数関数等により抑制し、位相情報のみからなる振幅限定複素合成スペクトルを作成してこれをフーリエ逆変換して相互相関関数を求めるものである。

40

【先行技術文献】

【特許文献 1】

特許第 3 0 3 5 6 5 4 号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

50

しかるに、従来の変位検出方法では、計算時間が膨大になるとともに、回転変位の検出が容易に行えないなどの問題点があった。

【0008】

本発明は上記の点に鑑みてなされたもので、位相特異点の構造を特徴付ける特徴パラメータから所望の位相特異点を特定することにより変位前後の位相特異点を確実に特定し、その変位を容易、かつ、確実に、さらには、回転変位を含む種々の変位を検出できる変位検出方法、及び、変位検出装置、変位検出プログラム、並びに、位相特異点マッチング処理方法、位相特異点マッチング処理プログラムを提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0009】

本発明は、取得した画像の強度信号をフーリエ変換するフーリエ変換手順と、フーリエ変換手順でフーリエ変換された信号のエルミート対称性を崩すようなフィルタリング処理を行う手順と、フィルタリング処理の後にフーリエ逆変換することにより複素解析信号を得る手順と、複素解析信号の実部と虚部の値が共にゼロとなる位相特異点を取得する位相特異点取得手順と、位相特異点の位相構造から所定の特徴パラメータを取得し、特徴パラメータに基づいて前記位相特異点を特定する位相特異点特定手順と、位相特異点特定手順で取得された特徴パラメータに基づいて変位後の位相特異点の位置を検出することにより変位を検出する変位検出手順とを有することを特徴とする。

【0010】

このとき、取得される特徴パラメータは、位相特異点近傍の実部と虚部の値を平面で補間し、その結果、実部がゼロとなる線分と虚部がゼロとなる線分とが交差する角度、位相特異点近傍の強度分布の形状の離心率、位相特異点近傍の強度の勾配であることを特徴とする。

【0011】

また、特定された位相特異点の変位前後の位置を特徴パラメータに基づいて特定し、特定された変位前後の位相特異点の位置に基づいて位相特異点の変位を測定することを特徴とする。このとき、変位前後の位相特異点の位置の座標の差分の二乗平方根を位相特異点の変位量として算出することを特徴とする。

【0012】

複数組の変位前後の位相特異点の位置を結ぶ線分の複数の垂直二等分線の距離の和が最小となる点を回転中心として求め、変位前後の位相特異点の位置と回転中心とからなる三角形の回転中心を挟む辺の角度を回転角として求めることを特徴とする。

【0013】

さらに、本発明は、取得した画像の強度信号をフーリエ変換し、フーリエ変換された信号の複素共役の対称性を崩すようなフィルタリング処理を行い、擬似位相情報を取得し、取得した擬似位相情報に基づいて位相特異点を取得することを特徴とする。

【0014】

このとき、フーリエ変換された信号に対して中心に位相特異点を持つらせん状の位相特性を持ち、かつ、ドーナツ状の振幅特性を持つラゲールガウスビームフィルタ特性によりフィルタリングすることを特徴とする。また、画像の強度信号の平均値を画像の各強度信号から減算した画像を元画像とすることを特徴とする。

【0015】

さらに、フーリエ変換された信号に対して中心に位相特異点を持つらせん状の位相特性を持つフィルタ特性、又は、ヒルベルト変換によりフィルタリングを行い、擬似位相情報を取得することを特徴とする。

【0016】

また、本発明は、変位前に特定された位相特異点と変位後に特定された位相特異点とをマッチングを行うポイントマッチング処理方法であって、変位前の位相特異点の特徴パラメータと変位後の位相特異点の特徴パラメータとの差異に基づいて変位前の位相特異点に対応する変位後の位相特異点を探しだし、その位相特異点の地理的な位置関係の類似性が

10

20

30

40

50

ら変位前の位相特異点に対応する変位後の位相特異点のマッチングを行うことを特徴とする。

【0017】

また、このとき、本発明は、変位前の複数の位相特異点間の特徴パラメータの総和距離と変位後の複数の位相特異点間の特徴パラメータの総和距離との差分とが最小となる位相特異点の組を変位前と変位後とで互いにマッチングする特徴点として特定することを特徴とする。

【0018】

さらに、本発明は、変位前の所定の位相特異点の特徴パラメータを T_{i1} 、 T_{i2} 、変位後の所定の位相特異点の特徴パラメータを $P_{w(i1)}$ 、 $P_{w(i2)}$ 、 を縮尺としたとき、

10

【0019】

【数1】

$$\min = \sum_{1 \leq i1, i2 \leq n} (|T_{i1} - T_{i2}| - \alpha |P_{w(i1)} - P_{w(i2)}|)^2$$

が最小となる位相特異点の組を変位前後でマッチングする位相特異点の組として抽出することを特徴とする。

【0020】

なお、位相特異点は、画像の強度情報に基づいて取得される位相特異点であることを特徴とし、位相特異点は特徴パラメータとして位置情報、離心率、及び、渦度、並びに、実軸と虚軸とが交わる角度を有することを特徴とする。

20

【発明の効果】

【0021】

本発明によれば、位相特異点の位相構造から所定の特徴パラメータを取得し、特徴パラメータに基づいて位相特異点を特定することにより、変位前後の各位相特異点を一意に特定することができ、これによって、変位後の位相特異点を追跡できるなどの効果を得られる。

【図面の簡単な説明】

【0022】

30

【図1】本発明の一実施例のシステム構成図である。

【図2】変位検出プログラムの処理フローチャートである。

【図3】位相特異点取得処理の処理フローチャートである。

【図4】位相特異点取得処理の動作説明図である。

【図5】位相特異点取得処理の動作説明図である。

【図6】位相特異点の位置をサブピクセルで決定する動作を説明するための図である。

【図7】位相特異点の位置をサブピクセルで決定する動作を説明するための図である。

【図8】位相特異点の位置をサブピクセルで決定する動作を説明するための図である。

【図9】位相特異点特定処理の処理フローチャートである。

【図10】離心率 e 、渦度 を取得する動作を説明するための図である。

40

【図11】離心率 e 、渦度 を取得する動作を説明するための図である。

【図12】離心率 e 、渦度 を取得する動作を説明するための図である。

【図13】全位相特異点の位置の差を求め x 方向、 y 方向の変位をヒストグラムに表した図である。

【図14】回転変位の検出動作を説明するための図である。

【図15】シミュレーション実験を説明するための図である。

【図16】回転前後の位相特異点の数をヒストグラムで表した図である。

【図17】回転前後の位相特異点の回転角 θ をヒストグラムで表した図である。

【図18】回転前後の角度 の差をヒストグラムで表した図である。

【図19】回転前後の対応する位相特異点の離心率 e をヒストグラムで表した図である。

50

【図 2 0】回転前後の対応する位相特異点の渦度 の差をヒストグラムで表した図である。

【図 2 1】ポイントマッチング処理の動作説明図である。

【図 2 2】ポイントマッチング処理のフローチャートである。

【図 2 3】マッチングアルゴリズムの処理動作を説明するための図である。

【図 2 4】マッチングアルゴリズムの処理動作を説明するための図である。

【図 2 5】マッチングアルゴリズムの処理動作を説明するための図である。

【図 2 6】実験・検証に用いた L G フィルタの振幅特性図である。

【図 2 7】マッチング処理の動作説明図である。

【図 2 8】マッチング処理の動作説明図である。

10

【図 2 9】実験・検証結果を説明するための図である。

【図 3 0】実験・検証結果を説明するための図である。

【図 3 1】実験・検証結果を説明するための図である。

【図 3 2】実験・検証結果を説明するための図である。

【図 3 3】実験・検証結果を説明するための図である。

【図 3 4】実験・検証結果を説明するための図である。

【図 3 5】実験・検証結果を説明するための図である。

【図 3 6】点間総和距離の差によりマッチングを行う動作を説明するための図である。

【図 3 7】点間総和距離の差によりマッチングを行う動作を説明するための図である。

【図 3 8】相関法の動作を説明するため図である。

20

【図 3 9】相関法の動作を説明するため図である。

【発明を実施するための形態】

【0023】

〔システム構成〕

図 1 は本発明の一実施例のシステム構成図を示す。

【0024】

本実施例の変位検出装置 101 は、画像検出部 111 及び信号処理部 112 から構成されている。

【0025】

画像検出部 111 は、光源 121 及び撮像装置 122 から構成されている。画像検出部 111 は、光源 121 から測定対象 102 に光を照射し、撮像装置 122 により測定対象 102 の表面画像を撮像する。

30

【0026】

画像検出部 111 で撮像された画像は、信号処理部 112 に供給される。信号処理部 112 は、例えば、コンピュータシステムであり、フレームメモリ 131、処理部 132、フーリエ変換部 133、ROM 134、ハードディスクドライブ 135、ディスプレイ 136、入力装置 137 から構成されている。

【0027】

フレームメモリ 131 は、画像検出部 111 からの画像をフレーム毎に記憶する。処理部 132 は、ハードディスクドライブ 135 に予めインストールされた変位検出プログラムに基づいて測定対象 102 の微小変位を検出するための処理を実行する。

40

【0028】

フーリエ変換部 133 は、画像検出部 111 で撮像された画像に対してフーリエ変換を行う。メモリ 134 は、処理部 132 の作業用記憶領域として用いられる。ハードディスクドライブ 135 は、変位検出プログラムや画像検出部 111 で検出された画像データ、あるいは、変位検出プログラムでの途中結果、変位検出結果などのデータが記憶される。

【0029】

ディスプレイ 136 は、LCD、CRT などから構成されており、画像、変換画像、途中結果、変位検出結果などの処理部 132 での処理結果を表示する。入力装置 137 は、キーボード、マウスなどから構成されており、データ入力や各種コマンドの入力するため

50

に用いられる。

【 0 0 3 0 】

本実施例の変位検出装置 1 0 1 は、インストールされた変位検出プログラムに基づいて測定対象 1 0 2 から取得した画像を解析して、その変位を検出する。

【 0 0 3 1 】

〔変位検出プログラム〕

図 2 は変位検出プログラムの処理フローチャートを示す。

【 0 0 3 2 】

処理部 1 3 2 は、まず、変位検出プログラムに従って、ステップ S 1 - 1 で変位前後の対象画像をハードディスクドライブ 1 3 5 からメモリ 1 3 4 などに読み出す。

10

【 0 0 3 3 】

次に処理部 1 3 2 は、ステップ S 1 - 2 で、読み出された変位前後の対象画像に対して各々位相特異点を取得するための位相特異点取得処理を実行する。

【 0 0 3 4 】

次に処理部 1 3 2 は、ステップ S 1 - 3 で変位前後の対象画像から取得した位相特異点を持つ、実部と虚部とのゼロクロス角度、離心率、渦度などの特徴パラメータにより位相特異点を特定する位相特異点特定処理を実行する。

【 0 0 3 5 】

次に処理部 1 3 2 は、ステップ S 1 - 4 で、実部と虚部とのゼロクロス角度、離心率、渦度などの位相特異点に特有の特徴パラメータにより変位前後で対応する位相特異点を特定し、変位前後の位相特異点の位置から対象画像の変位を検出する変位検出処理を実行する。

20

【 0 0 3 6 】

位相特異点によって、対象画像の変位を検出することで対象画像の変位を正確に特定することが可能となる。

【 0 0 3 7 】

〔複素解析信号取得処理〕

次にステップ S 1 - 2 の位相特異点取得処理について説明する。

【 0 0 3 8 】

図 3 は位相特異点取得処理の処理フローチャート、図 4、図 5 は位相特異点取得処理の動作説明図を示す。

30

【 0 0 3 9 】

ステップ S 1 - 2 の位相特異点取得処理は、取得した画像の強度信号をフーリエ変換し、フーリエ変換された信号の複素共役の対称性を崩すようなフィルタリング処理を行い、擬似位相情報を取得し、取得した擬似位相情報に基づいて位相特異点を取得する処理である。

【 0 0 4 0 】

処理部 1 3 2 は、まず、ステップ S 2 - 1 で前処理を行う。ステップ S 2 - 1 の前処理は、対象画像の全体の強度情報の平均値を求め、求めた全体画像の強度情報の平均値を対象画像の強度情報から減算する処理を行う処理であり、この処理によって、画像データ強度情報中の直流成分が除去される。直流成分が除去されることにより、位相特異点が強調される。

40

【 0 0 4 1 】

次に、処理部 1 3 2 は、ステップ S 2 - 2 でフーリエ変換部 1 3 3 を制御して、強度情報に対して 2 次元高速フーリエ変換を行い、空間周波数スペクトルを得る。

【 0 0 4 2 】

例えば、図 4 において、画像検出部 1 1 1 で得られた物体のテクスチャの強度情報 2 1 の関数 2 0 1 を

【 0 0 4 3 】

【数 2】

50

$$g_0(x,y)$$

とする。この強度情報を 2 次元フーリエ変換することにより、空間周波数スペクトル

【 0 0 4 4 】

【 数 3 】

$$F \{g_0(x,y)\}$$

10

を求めることができる。なお、図 4 において 2 1 2 は空間周波数スペクトルの振幅分布、2 1 3 は位相分布を示している。空間周波数スペクトルは、実部のみをもつ強度情報をフーリエ変換したものであるため、周波数原点に対して複素共役の対称性、すなわちエルミート対称性をもつ。F F T を関数 F とすると、例えば、式 2 0 2 のように表せる。

【 0 0 4 5 】

そこで、処理部 1 3 2 は、ステップ S 2 - 3 で実部を基に虚部を作り出して複素解析信号を得るために、図 4 に 2 2 1 ~ 2 2 5 で示すような分布を持つ、周波数領域上の複素共役の対称性を崩すようなフィルタリング処理を行う。フィルタリング処理では、例えば、ヒルベルト変換、スパイラル位相フィルタ、L G (ラゲールガウス) フィルタなどが用いられる。なお、図 4 において 2 2 1 はヒルベルト変換の振幅分布、2 2 2 はスパイラル位相フィルタの位相分布、2 2 4 は L G フィルタの振幅分布、2 2 5 は L G フィルタの位相分布を示している。

20

【 0 0 4 6 】

ヒルベルト変換の演算式は、例えば、図 4、2 0 3 で表すことができる。また、スパイラル位相フィルタの演算式は、例えば、図 4、2 0 4 で表すことができる。L G フィルタの振幅透過分布 2 2 4 の演算式は、図 4、2 0 5 (A) で表すことができる。L G フィルタは、中心を対称に複素共役を位相上で だけずらすことにより、ドーナツ状の振幅透過率分布が得られる。なお、L G フィルタの位相分布 2 2 5 の演算式は、例えば、図 4、2 0 5 (A) に角度 を導入することにより図 4、2 0 5 (B) に示すように表される。

30

【 0 0 4 7 】

以上のように、演算式 2 0 2 に演算式 2 0 3、2 0 4、2 0 5 などを乗算することにより、本実施例で必要となる解析信号を得ることができる。また、エラーの原因となる高周波数成分を除去でき、直流成分を自動的に、かつ、連続的にゼロにできる。さらに、ドーナツ状の強度分布により低周波数成分を取り除くことにより、位相特異点の数を増やすことができる。

【 0 0 4 8 】

さらに、本実施例ではランダムなパターンの強度情報を用いて解析を行っており、測定対象 1 0 2 の構造などによってスペックルという丸い斑点のようなパターンが多数存在することになる。このスペックルは、本実施例で指標としている位相特異点に対応関係がある。

40

【 0 0 4 9 】

このスペックルのサイズによりフーリエ変換したときの周波数領域に位相特異点の情報を多く含む周波数成分が変化する。例えば、スペックルのサイズが小さいと位相特異点の情報を多く含む周波数成分は高くなり、逆にサイズが大きいと位相特異点の情報を多く含む周波数成分は低くなる。つまり、位相特異点の情報を高精度に求めるにはドーナツ状の強度分布をもつ L G フィルタが最適であり、ドーナツ状の幅のサイズをスペックルのサイズに合わせて調節することにより、より位相特異点の情報を高精度に求めることができる。一方、ローパスフィルタでは、低周波数成分を強調し、位相特異点の情報をうまく取り出すことができない。

50

【 0 0 5 0 】

以上のように、本実施例における解析信号の生成過程ではL Gフィルタを用いることが最適となる。

【 0 0 5 1 】

なお、図4において214はフィルタリング処理後の振幅分布、215はフィルタリング処理後の位相分布を示しており、その演算式は、例えば、図4、206で表すことができる。

【 0 0 5 2 】

なお、221、223に示すようなヒルベルト変換またはスパイラル位相フィルタをかけても同種の解析信号を得ることはできるが、ヒルベルト変換またはスパイラル位相フィルタを使うためには予め直流成分を除去しておかなければならない。

10

【 0 0 5 3 】

処理部132は、ステップS2-4でフィルタをかけた空間周波数スペクトルをフーリエ逆変換して複素解析信号

【 0 0 5 4 】

【 数 4 】

$$\hat{g}_0(x,y)$$

20

を得る。なお、図4において216はフーリエ逆変換後の振幅分布、217はフーリエ逆変換後の位相特性を示しており、その演算式は、例えば、図4、207で表すことができる。

【 0 0 5 5 】

図5(A)はフーリエ逆変換後の振幅分布を拡大したものであり、図5(B)は図5(A)の所定の部分を更に拡大したものである。

【 0 0 5 6 】

この複素解析信号の擬似位相情報から図5(B)に示すような位相特異点Pを取得することができる。

【 0 0 5 7 】

次に処理部132は、ステップS2-5で位相特異点の位置を1ピクセルより小さい分解能であるサブピクセルの分解能で決定する処理を行う。

30

【 0 0 5 8 】

図6、図7、図8は位相特異点の位置をサブピクセルで決定する動作を説明するための図を示す。

【 0 0 5 9 】

図6(A)は擬似位相情報、図6(B)は位相特異点周辺画素の拡大図、図6(C)は実部、図6(D)は虚部を示している。また、図7(A)は位相特異点近傍の擬似位相情報、図7(B)は位相特異点近傍の擬似位相情報の虚部、図7(C)は位相特異点近傍の擬似位相情報の実部、図7(D)は位相特異点近傍の擬似位相情報を直線補間したもの、図7(E)は位相特異点近傍の擬似位相情報の虚部を直線補間したもの、図7(F)は位相特異点近傍の擬似位相情報の実部を直線補間したものを示している。

40

【 0 0 6 0 】

擬似位相は(- ,)までの値をとり、図6、図7において黒から白になるにしたがって値が大きくなる。

【 0 0 6 1 】

位相特異点Pは、その点を囲む閉経路上の位相勾配の積分が ± 2 の整数倍になり、また、複素解析信号の実部と虚部が共にゼロとなるという性質を持っている。

【 0 0 6 2 】

図6(B)、図7(C)に示すような互いに隣接しあう4画素を結ぶ正方形閉経路に対

50

して位相勾配の積分が ± 2 の整数倍になるという性質を用いて位相特異点の存在している位置を決定していた。このため、1ピクセル以上の分解能をもって位相特異点の位置を決定することができない。

【0063】

本実施例では、複素解析信号の実部と虚部が共にゼロとなるという性質を用いて1ピクセルの分解能より小さいサブピクセルの分解能で位相特異点の位置を決定するようにしている。本実施例では、図7(B)、図7(C)に示す特異点近傍の離散化された実部と虚部を平面で線形補間することにより図7(E)、図7(F)に示すように実部及び虚部を共に滑らかな構造として、実部がゼロとなる線分 L_{re0} 、虚部がゼロとなる線分 L_{im0} を求める。図7(D)に示すように位相特異点の位置は実部がゼロとなる線分 L_{re0} と虚部が

10

ゼロとなる線分 L_{im0} の交わる点を位相特異点 $P0$ として設定することによりサブピクセルの分解能をもって位相特異点を決定することができる。

図8(A)に示すように位相勾配の積分が ± 2 の整数倍になる性質を用いる方法では、1ピクセルの面積を持つ正方形の閉経路内のどこかに位相特異点が存在することはわかっていてもその位置を特定することができなかつた。これに対して図8(B)に示すように複素解析信号の実部と虚部が共にゼロとなるという性質を用いて実部と虚部の内挿と実部と虚部のゼロの交差点から位相特異点を求めることにより1ピクセルより小さいサブピクセルの分解能をもって位相特異点の位置を決定できている。

【0064】

〔位相特異点特定処理〕

20

図9は位相特異点特定処理の処理フローチャートを示す。

【0065】

ステップS1-3の位相特異点特定処理は、位相特異点の位相構造から所定の特徴パラメータを取得し、特徴パラメータに基づいて位相特異点を特定する処理である。

【0066】

処理部132は、ステップS3-1で位相特異点を特定する特徴パラメータとしてゼロクロス角を取得する。ゼロクロス角は、図7(D)、図8(B)に示す実部がゼロとなる線分 L_{re0} と虚部がゼロとなる線分 L_{im0} との交差する角度である。

【0067】

また、処理部132は、ステップS3-2で位相特異点を特定する特徴パラメータとして離心率 e を取得し、ステップS3-3で渦度 ω を取得する。

30

【0068】

図10、図11、図12は離心率 e 、渦度 ω を取得する動作を説明するための図を示す。図10(A)は擬似位相情報、図10(B)は擬似位相情報の位相特異点近傍の振幅分布、図10(C)は位相分布を示している。

【0069】

図10(B)に示すように振幅分布は位相特異点近傍に近づくにつれて暗くなっている、これは値がゼロに近づいていることを示している。

【0070】

また、図11は特異点近傍の振幅分布の構造図を示している。図11(A)は振幅を等高線で表示したものを示しており、図11(B)は三次元表示したものを示す。

40

【0071】

図11(A)に示すように位相特異点近傍の等振幅の分布は略楕円形状をしている。一般に位相特異点近傍の振幅分布は略楕円形をしており、その形状は位相特異点に応じて異なっており、位相特異点を特定する特徴パラメータとして用いることができる。この楕円形状の特徴を二次曲線の特徴を表す値である離心率によって示すことによって、位相特異点を特定することが可能となる。

【0072】

例えば、図12に示すような楕円の場合、一般に数式で、

【0073】

50

【数 5】

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

で表せる。図 1 2 に示す楕円の離心率 e は a : 長軸半径, b : 短軸半径, f : 焦点距離とすると、離心率 e は

【0074】

【数 6】

$$e = \frac{f}{a} = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$$

ただし、 $0 \leq \text{離心率} e < 1$

10

で表させる。

【0075】

図 1 1 (B) に示される振幅を三次元で表示した図を見ると位相特異点近傍の形状は楕円形の円錐のような構造をしていることが分かる。したがって、本実施例では、各位相特異点を特定する特徴パラメータの一つとして位相特異点近傍の渦度を求める。渦度とは微小部分の局所的な回転の強さと回転の方向を表す量である。図 1 1 (A) では振幅の等高線の間隔が狭いほど渦度は大きくなり、図 1 1 (B) では三次元表示した位相特異点近傍の勾配 (変化の度合い) が急になるほど渦度は大きくなる。すなわち、渦度は位相特異点近傍の振幅の大きさに依存する。

20

【0076】

渦度 は次式で表される。

【0077】

【数 7】

$$\omega = \nabla r \times \nabla i$$

(r :実部、 i :虚部である。)

30

以上のように位相特異点は位置 (x 、 y) , ゼロクロス角 , 離心率 e , 渦度 の特徴パラメータを持っていて、これらの特徴パラメータを用いて各位相特異点を一意に特定することができる。このとき、複数の特徴パラメータを用いることにより確実に位相特異点を特定することができる。

【0078】

〔直線変位検出〕

次にステップ S 1 - 4 の位相特異点変位検出処理について説明する。

【0079】

位相変位検出処理では、変位前後の位相特異点を上記の特定方法により特定することにより変位量を検出する。

【0080】

このとき、まず、変位前後で位相特異点をそれぞれ一意に特定するためのパラメータとして前述のように求めたゼロクロス角 , 離心率 e , 渦度 を用いて位相特異点を特定する。その方法は変位前の各パラメータを 1、 e_1 、 ω_1 、変位後の各パラメータを 2、 e_2 、 ω_2 とする。

40

【0081】

50

上記パラメータ (θ_1, e_1, r_1)、(θ_2, e_2, r_2)のそれぞれの差 ($\theta_2 - \theta_1, e_2 - e_1, r_2 - r_1$)の絶対値がある値より小さい時に同一の位相特異点であるとみなす。各位相特異点をそれぞれ一意に特定できるため、変位前後で各位相特異点がどこに移動したのか分かる。このとき、変位前の位相特異点の位置 (x_1, y_1)と変位後の位相特異点の位置 (x_2, y_2)の差から変位量を求めることができる。

【0082】

実際の変位量 L は、 $x = (x_2 - x_1)$ 、 $y = (y_2 - y_1)$ とすると、

【0083】

【数8】

$$\Delta L = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

で表すことができる。

【0084】

なお、図13は、全位相特異点の位置の差を求め x 方向、 y 方向の変位をヒストグラムに表した図を示す。図13(A)は x 方向の変位、図13(B)は y 方向の変位を示している。

【0085】

図13に示すように全位相特異点の位置が x 方向に略平行に変位したことがわかる。

【0086】

〔回転変位検出〕

また、本実施例では、各位相特異点を回転変位前後で特定できるため、回転の検出も可能である。

【0087】

図14は回転変位の検出動作を説明するための図を示す。

【0088】

図14(A)に示すように回転前の2組の位相特異点 P_{11} 、 P_{12} の x, y 座標をそれぞれ (x_1, y_1)、(x_2, y_2)

とし、回転後の対応する位相特異点 P_{21} 、 P_{22} の x, y 座標をそれぞれ

(x'_1, y'_1)、(x'_2, y'_2)

とすると、回転の中心

(x_c, y_c)

は図14(A)に示すように回転前後の位相特異点 P_{11} 、 P_{12} と位相特異点 P_{21} 、 P_{22} の垂直二等分線

【0089】

【数9】

$$l'_1, l'_2$$

の交わる点となる。

【0090】

一般的に回転の中心を求めるには2組の回転前後の位相特異点が分かれば十分であるが、実際は多数の位相特異点が存在するので回転前後の各位相特異点から得られる垂直二等分線が図14(B)に示すに必ずしも1点では交わらない。このような場合には、回転の中心 (x_c, y_c)と各垂直二等分線との距離の和が最小となるような回転の中心 (x_c, y_c)を最小二乗法により求めるようにする。

【0091】

以上により回転中心を決定できる。

10

20

30

40

50

【0092】

次に図14(C)に示すように回転前後の各位相特異点P11、P12と回転中心(x_c 、 y_c)からなる三角形に対して余弦定理を用いることによって、回転角 θ を求めることができる。

【0093】

以上により、本実施例によれば、回転変位の検出を行うことが可能となる。

【0094】

〔シミュレーション実験結果〕

実験で得た強度情報をコンピュータ内部で90度だけ回転させて、回転させる前後の強度情報を用いてシミュレーション実験を行った。

10

【0095】

図15はシミュレーション実験を説明するための図を示す。なお、図15は、画素数が 1024×1024 で、回転させる前後の強度情報からLGフィルタを用いて2つの解析信号を得たときの振幅分布と位相分布を表示したものである。図15(A)は回転変位前の擬似位相情報、図15(B)は回転変位前の擬似位相情報の振幅分布、図15(C)は回転変位前の擬似位相情報の位相分布、図15(D)は回転変位後の擬似位相情報、図15(E)は回転変位後の擬似位相情報の振幅分布、図15(F)は回転変位後の擬似位相情報の位相分布を示している。

【0096】

この回転前後の位相特異点の数は両方とも正の位相特異点が322個、負の位相区異点321個の合計643個で同数の位相特異点が存在していた。図15(B)及び図15(E)に示される振幅分布からも明らかなように回転前の三角で囲った2つのリング状の振幅が回転後には回転の中心(全画素の中心)に対して90°回転している。

20

【0097】

次に位相特異点を特定するための特徴パラメータである $Re=0$ と $Im=0$ の直線の交わる角度： θ 、離心率(eccentricity)： e 、渦度(vorticity)： ω を回転前後の全位相特異点に対して求める。回転前後で対応する位相特異点を探す条件は以下の条件を用いた。

【0098】

条件1： $Re=0$ と $Im=0$ の直線の交わる角度 θ の差が ± 0.5 度以下

条件2：回転前後の離心率 e の差が ± 0.005 以下

条件3：回転前後の渦度 ω の差が ± 0.05 以下

回転前の位相特異点に対応する回転後の位相特異点が1対1の対応になっているのかを調べた。

30

【0099】

図16は回転前の位相特異点に対応する回転後の位相特異点の数をヒストグラムで表した図を示す。

【0100】

回転前後でほぼ全ての位相特異点が一意に特定できた。

シミュレーションで得られた測定結果の回転の中心は

$(x_c, y_c) = (511.5, 511.5)$

となった。これは設定した回転の中心

$(x_c, y_c) = (511.5, 511.5)$

と一致する。

40

【0101】

図17は回転前の位相特異点に対応する回転後の位相特異点と回転の中心から求めたそれぞれの回転角 θ_i をヒストグラムで表した図を示す。

【0102】

シミュレーション結果である回転角のヒストグラムは ± 0.001 度の精度で全位相特異点が90度回転していることを示している。シミュレーション実験では、測定対象102を90度回転させており、図17に示す測定結果も90度回転していることを示しているの

50

で、この測定結果から本発明が回転に対しても有効に計測できることを確認できる。

【0103】

図18は回転前後の対応する位相特異点の角度の差をヒストグラムで表した図、図19は回転前後の対応する位相特異点の離心率 e の差をヒストグラムで表した図、図20は回転前後の対応する位相特異点の渦度の差をヒストグラムで表した図を示す。

【0104】

図18、図19、図20に示すようにゼロ付近に固まっており、誤差が少なく、位相特異点を確実に特定できていることがわかる。

【0105】

なお、上記実施例では、位相特異点を用いて回転変位を検出する処理について説明したが縮尺、移動、回転を簡単な処理により検出することも可能である。

10

【0106】

〔ポイントマッチング処理〕

ポイントマッチング処理は、任意の複数点の位置関係と、その点の空間構造の類似性を用いて変位前のパターンから変位後のパターンを検出する処理である。

【0107】

すなわち、位相構造が類似する点を候補点として、その候補点を含んだパターン内の点間の距離が最小となる点を変位後のパターンとして決定するというものである。

【0108】

以下にポイントマッチング処理の手順を説明する。

20

【0109】

まず、変位前後の2つの強度分布画像に対して各々前述の位相特異点を抽出するためのフィルタ演算を行うことにより位相特異点を抽出する。抽出した位相特異点近傍にある実部及び虚部を線形補間することによって、サブピクセルの精度で全位相特異点の位置を特定する。更に、位置が特定された各位相特異点に対して離心率 e 、実軸と虚軸との角、渦度を求め、ラベリングを行う。

【0110】

図21は、ポイントマッチング処理の動作説明図を示す。図21(A)は変位前の位相特異点の状態、図21(B)は変位後の位相特異点の状態を示している。

【0111】

まず、図21(A)に示す位相特異点から黒丸で示す位相特異点を選択する。選択する位相特異点はその特徴パラメータである離心率 e 、実軸と虚軸との角、渦度が他の多くの位相特異点とは明らかにことなるものを抽出することが望ましい。これによって、変位後の位相特異点を特定しやすくなる。

30

【0112】

図21(A)に示す変位前の画像から選択した位相特異点の特徴パラメータと位置と図21(B)に示す変位後の画像から選択した位相特異点の特徴パラメータと位置とから図21(B)に黒丸で示すように図21(A)に黒丸で示す位相特異点に対応する位相特異点を検出する。

【0113】

位相特異点の特徴パラメータ、離心率 e 、渦度、実軸と虚軸との角は、変位前後で同じであるか、または、ほとんど変化しない。このため、変位前後の位相特異点を正確に特定することによって移動、回転、縮尺などを正確に測定することができる。

40

【0114】

図22はポイントマッチング処理のフローチャートを示す。

【0115】

まず、処理部132は、ステップS4-1で、図3とともに説明した位相特異点取得処理によって変位前後の位相特異点を取得し、ラベリングする。

【0116】

次に、処理部132は、ステップS4-2で変位前の各位相特異点にほぼ同じ、あるいは

50

は、所定の範囲内に近似した特徴パラメータを持つ位相特異点を変位後の位相特異点から探索する。

【 0 1 1 7 】

次に処理部 1 3 2 は、ステップ S 4 - 3 で変位前の位相特異点から所定の 2 点を選択し、それを組み合わせて組み合わせ M とする。次に、処理部 1 3 2 は、ステップ S 4 - 4 で変数 k に「 3 」が代入される。

【 0 1 1 8 】

次に、処理部 1 3 2 は、ステップ S 4 - 5 で変数 k が定数 n より小さいか否かを判定する。なお、定数 n は、探索する位相特異点の数である。

【 0 1 1 9 】

次に処理部 1 3 2 は、ステップ S 4 - 6 で選択された複数の位相特異点から次の探索対象となる位相特異点を抽出する。

【 0 1 2 0 】

次に処理部 1 3 2 は、ステップ S 4 - 7 で新たに抽出された位相特異点に対して特徴パラメータが近似する変位後の位相特異点を探索し、組み合わせ M として追加する。

【 0 1 2 1 】

次に処理部 1 3 2 は、ステップ S 4 - 8 で組み合わせ M の位相特異点の特徴パラメータに対して下記の式 (1) によって計算を行い、閾値以下のものを変位前の位相特異点と変位後の位相特異点との有力な組み合わせの候補として残す。

【 0 1 2 2 】

【 数 1 0 】

$$\min = \sum_{1 \leq i, j \leq n} (|T_{i1} - T_{i2}| - \alpha |P_{w(i1)} - P_{w(i2)}|)^2 \quad \dots (1)$$

式 (1) において T_i と $P_{w(i)}$ は変位前と変位後の点を表している。なお、 T_i は $P_{w(i)}$ と対応している。

$T = \{ T_1, T_2, T_3, \dots, T_n \}$

は変位前の位相特異点の組み合わせを表している。そして、

$P = \{ P_1, P_2, P_3, \dots, P_n \}$

は変位後の位相特異点の組み合わせを表している。

【 0 1 2 3 】

また、 $|T_{i1} - T_{i2}|$ は、点 T_{i1} と点 T_{i2} との間の距離、 α は縮尺のスケール(度合い)を表している。さらに、変数 w は T - P の対応関係を表している。

【 0 1 2 4 】

なお、上記式 (1) の関数をコスト関数 (cost function) と呼ぶ。

【 0 1 2 5 】

処理部 1 3 2 は、ステップ S 4 - 9 で変数 k に (k + 1) を代入し、ステップ S 4 - 5 に戻る。処理部 1 3 2 は、上記ステップ S 4 - 6 ~ S 4 - 9 をステップ S 4 - 5 で変数 k が定数 n より大きくなるまで繰り返す。

【 0 1 2 6 】

次に処理部 1 3 2 は、ステップ S 4 - 1 0 で残った組み合わせ M の位相特異点の特徴パラメータ間の距離が最小となるものをマッチングパターンとして抽出する。

【 0 1 2 7 】

次に、処理部 1 3 2 は、ステップ S 4 - 1 1 で抽出した特徴パラメータ間の距離が最小となる位相特異点の変換パラメータ、例えば、平行移動(shift)、回転(rotation)、縮尺(scale)を計算する。

【 0 1 2 8 】

上記ポイントマッチング処理により、目標はパターン内の複数の点の位置関係において変位前後で最も良く一致するものを見つけ出すことができる。

10

20

30

40

50

【 0 1 2 9 】

次に、上記マッチングアルゴリズムの処理動作を、図面を用いてさらに詳細に説明する。

【 0 1 3 0 】

図 2 3、図 2 4、図 2 5 はマッチングアルゴリズムの処理動作を説明するための図を示す。

【 0 1 3 1 】

図 2 3 (A) は変位前の位相特異点の中から複数の位相特異点の組を選んだものであり、これを T 空間とし、 $t_i (i = 1, \dots, n)$ 、 $T_i (X_i, Y_i, e_i, \theta_i, \omega_i)$ で表す。図 2 3 (B) は変位後の位相特異点で P 空間とし、 $p_j (j = 1, \dots, k)$ 、 $P_j (X_j, Y_j, e_j, \theta_j, \omega_j)$ で表される。

10

【 0 1 3 2 】

まず、図 2 3 (A) に黒丸で示すように、変位前の位相特異点から任意の個数の位相特異点を選ぶ。

【 0 1 3 3 】

変位前のパターン内のそれぞれの位相特異点 t_i の特徴パラメータである離心率 e_{t_i} 、ゼロクロス角 θ_{t_i} 、渦度 ω_{t_i} と変位後の位相特異点 p_j の特徴パラメータである離心率 e_{p_j} 、ゼロクロス角 θ_{p_j} 、渦度 ω_{p_j} との差を閾値と比較する。それは、例えば、次式で表せる。

【 0 1 3 4 】

20

【 数 1 1 】

$$N(t_i) = \{ |e_{t_i} - e_{p_j}| \leq e_{th}, |\omega_{t_i} - \omega_{p_j}| / |\omega_{t_i} + \omega_{p_j}| \leq \omega_{th}, |\theta_{t_i} - \theta_{p_j}| \leq \theta_{th} \} \dots (2)$$

なお、式 (2) で 2 番目の分母の $|\omega_{t_i} + \omega_{p_j}|$ は正規化するために付け加えたものである。実際のプログラム内ではこの形で使われている。また、 e_{th} は離心率の閾値、 θ_{th} はゼロクロス角の閾値、 ω_{th} は渦度の閾値を示している。

30

【 0 1 3 5 】

次に T 空間の位相特異点の組と P 空間の位相特異点の組とのマッチングを行う。

【 0 1 3 6 】

図 2 4 において、実線で示す丸印は正の位相特異点を示しており、破線で示した丸印は負の位相特異点を点線で示している。

【 0 1 3 7 】

まず、図 2 4 (A) に示す T 空間の 2 個の位相特異点の極性、正か負か符号と、その位置関係とに基づいて図 2 4 (B) に破線の直線で示すように P 空間に存在しうる可能性のある 2 個の位相特異点の組を探索する。

40

【 0 1 3 8 】

このマッチングでは移動(shift)、回転(rotation)、だけでなく縮尺(scale)も考慮しているので、T 空間での初めの 2 つの組を P 空間の中から 2 つを選ぶ組み合わせは、この例では正の位相特異点と負の位相特異点の組み合わせ全てであり、正が 7 個、負が 6 個なので 4 2 通り存在する。

【 0 1 3 9 】

なお、ここで、正の位相特異点と負の位相特異点というのは特徴パラメータの渦度(vorticity)の値が正のものを正の位相特異点、また、負のものを " 負の位相特異点" としている。

【 0 1 4 0 】

50

この得られた位相特異点の組み合わせに対して、位相特異点の特徴パラメータの条件に合わない組み合わせを切り捨てる。このとき、各特徴パラメータは実験環境により変化しやすいことを考え、条件を緩くとることが好ましい。ここで言う条件とは、式(2)の閾値 e_{th} 、 t_{th} 、 t_h のことである。

【0141】

次に、ステップS4-3で空間T内の2つの位相特異点 t_{i1} 、 t_{i2} を選ぶ。この位相特異点 t_{i1} 、 t_{i2} は少なくとも1つのマッチング候補点を持っている。位相特異点 t_{i1} は n_1 個のマッチング候補の点を、位相特異点 t_{i2} は n_2 個のマッチング候補点を持つ。したがって、変位後の空間P内の候補点の組み合わせは $n_1 n_2$ 通りあることがわかる。それをテンポラルマッチング(temporal matching)と呼ぶことにする。

10

【0142】

次に、図25のようにT空間の位相特異点を1つ増やし、P空間の中から3点目として可能性のある点を探す。これにより3点目を含む組み合わせが得られる。なお、特徴パラメータを用いて明らかに間違っただ点は除外される。このような操作をT空間で選択される位相特異点が n 個になるまで繰り返す。

【0143】

つまり、新しいマッチングポイントを加えつつ、上記テンポラルマッチングを最終的にすべての位相特異点のマッチング点が決まるまで繰り返す。

【0144】

この操作を行うためには、新しく追加されていく点の地理的な位置関係が変位前と変位後で類似性があるかどうか調べる必要がある。

20

【0145】

式(1)では、テンポラルマッチングの類似性を調べると同時に距離の閾値は間違っただ検出されたマッチングポイントを除外する操作も行っていることになる。

【0146】

最終的に得られた位相特異点の組み合わせMの中から式(1)の評価式によりT空間の全位相特異点間の距離と対応するP空間の位相特異点間の空間的な距離及び特徴点の距離の差の総和が最小になるものを選び出してマッチングを行っている。

【0147】

さらに、図面を用いて説明を続ける。

30

【0148】

図26、図27はマッチング処理の動作説明図を示す。図26(A)~(C)、図27(A)~(C)は変位前の位相特異点の分布、すなわち、T空間における位相特異点の分布、図26(D)~(F)、図27(D)~(F)は変位後の位相特異点の分布、すなわち、P空間における位相特異点の分布を示す。

【0149】

まず、図26(A)、(D)に示すようにT空間及びP空間のそれぞれの位相特異点の特徴パラメータを計算し、注目ポイントを選択する。図26(A)では、 t_1 、 t_2 、 t_4 の組み合わせを選択した。

【0150】

次に、図26(B)、(E)に示すようにT空間内のそれぞれの点の特徴パラメータと似たP空間の候補点P1~P4を探索する。

40

【0151】

次に、図26(C)、(E)に示すようにT空間内の2つの位相特異点 t_1 、 t_2 を選択して、P空間内の対応する2つの位相特異点 p_1 、 p_2 を選択し、組み合わせMとする。

【0152】

次に、図27(A)、(D)に示すように既を選択した位相特異点以外で候補となる位相特異点 t_3 、 t_4 及びそれに対応するP空間内の位相特異点 p_3 、 p_4 を探索する。

【0153】

次に、図27(B)、(F)に示すようにT空間の位相特異点 t_1 、 t_2 、 t_4 とP空間

50

の位相特異点 p_1 、 p_2 、 p_4 の特徴パラメータを式 (1) に代入して、式 (1) の値を算出する。同様に、T空間の注目位相特異点 t_1 、 t_2 、 t_4 と P空間の位相特異点 p_1 、 p_2 、 p_3 の特徴パラメータを式 (1) に代入して、式 (1) の値を算出する。

【0154】

算出結果のうち閾値より小さい位相特異点の組を抽出する。例えば、ここでは、組み合わせ M_1 (p_1 、 p_2 、 p_4) 及び M_2 (p_1 、 p_2 、 p_3) が抽出されたとする。抽出された位相特異点の組 M_1 、 M_2 をマッチングした組み合わせとして抽出する。

【0155】

次に図 27 (C)、(G) に示すようにマッチングした組 M_1 、 M_2 のうち最もコスト、すなわち、式 (1) の値が低い組 M_1 をマッチングした組として抽出する。

10

【0156】

以上は、説明を簡単にするために注目する位相特異点の数を 3 点とした場合について説明したが、3 点以上の位相特異点に注目して同様な処理を行うことも可能である。

【0157】

次に、ステップ S4-11 で算出される変換パラメータについて説明する。すなわち、位相特異点の移動が平行移動、回転、縮尺の 3 つのパラメータに分解できることについて説明する。

【0158】

一般に、流体力学の観点からどんな複雑な動きもそれを平行移動 (transition)、回転 (rotation)、縮尺 (scale) で表すことができることが知られており、変位前後座標の回転関係式は次式で表すことができる。

20

【0159】

【数12】

$$\begin{aligned} x'_i - \bar{x}'_i &= \alpha \cos \theta (x_i - \bar{x}) + \alpha \sin \theta (y_i - \bar{y}_i), \\ y'_i - \bar{y}'_i &= -\alpha \sin \theta (x_i - \bar{x}) + \alpha \cos \theta (y_i - \bar{y}_i), \end{aligned}$$

30

ここで、 (x_i, y_i) は変位前の位相特異点の座標、 (x'_i, y'_i) は変位後の位相特異点の座標、 α は縮尺、 θ は回転角である。

【0160】

【数13】

$$\bar{x} = \sum_i x_i / N, \bar{y} = \sum_i y_i / N$$

40

は変位前の位相特異点の重心、

【0161】

【数14】

$$\bar{x}_i = \sum_i x_i' / N, \bar{y}_i = \sum_i y_i' / N$$

は変位後の位相特異点の重心を表している。

まず、はじめに、マッチングを表すのに適した関数について説明する。

【 0 1 6 2 】

この関数はそれぞれ変位前後で対応している位相特異点の差を足し合わせた形で書ける。

【 0 1 6 3 】

【数 1 5 】

$$E = \sum_i \{ [x_i' - \bar{x} - C(x_i - \bar{x}) - S(y_i - \bar{y})]^2 + [y_i' - \bar{y} + S(x_i - \bar{x}) - C(y_i - \bar{y})]^2 \}$$

ここで、 $C = \cos$ 、 $S = \sin$ を表している。E の値の最小値を見つけるためにはそれぞれのパラメータをまず計算しなければならない。例えば、

【 0 1 6 4 】

【数 1 6 】

$$\partial E / \partial C = 0, \partial E / \partial S = 0$$

などである。

【 0 1 6 5 】

ここで、

【 0 1 6 6 】

【数 1 7 】

$$\begin{aligned} x_i' &= x_i' - \bar{x}, \\ x_i &= x_i - \bar{x}, \\ y_i' &= y_i' - \bar{y}, \\ y_i &= y_i - \bar{y} \end{aligned}$$

とおくと、

【 0 1 6 7 】

【数 1 8 】

$$\partial E / \partial C = 0$$

から次式が得られる。

【 0 1 6 8 】

【数 1 9 】

10

20

30

40

$$\sum_i (\mathbf{x}'_i - C\mathbf{x}_i - S\mathbf{y}_i)(-\mathbf{x}_i) + \sum_i (\mathbf{y}'_i + S\mathbf{x}_i - C\mathbf{y}_i)(\mathbf{y}_i) = 0.$$

これを解くと次のようになる。

【 0 1 6 9 】

【 数 2 0 】

$$C = \frac{\sum_i (\mathbf{x}'_i \mathbf{x}_i + \mathbf{y}'_i \mathbf{y}_i)}{\sum_i (\mathbf{x}_i^2 + \mathbf{y}_i^2)}.$$

10

同様にして

【 0 1 7 0 】

【 数 2 1 】

$$\partial E / \partial S = 0$$

から次式が得られる。

20

【 0 1 7 1 】

【 数 2 2 】

$$\sum_i (\mathbf{x}'_i - C\mathbf{x}_i - S\mathbf{y}_i)(-\mathbf{y}_i) + \sum_i (\mathbf{y}'_i + S\mathbf{x}_i - C\mathbf{y}_i)(\mathbf{x}_i) = 0$$

これを解くと次式が得られる。

【 0 1 7 2 】

【 数 2 3 】

30

$$S = \frac{\sum_i (\mathbf{x}_i \mathbf{y}'_i - \mathbf{x}'_i \mathbf{y}_i)}{\sum_i (\mathbf{x}_i^2 + \mathbf{y}_i^2)}.$$

S と C の定義より以下のパラメータが得られる。

【 0 1 7 3 】

【 数 2 4 】

$$\begin{aligned} \alpha &= \sqrt{S^2 + C^2}, \\ \theta &= \arctan(S/C), \\ \Delta x &= \overline{\overline{x}} - \overline{x}, \\ \Delta y &= \overline{\overline{y}} - \overline{y}. \end{aligned}$$

40

このように、位相特異点の移動は、平行移動 x 、 y 、回転、縮尺の3つのパラメータで表せることがわかる。この3つのパラメータを変換パラメータと呼び、ステップ S 4 - 1 1 で算出される。

【 0 1 7 4 】

〔 実験・検証 〕

次に、上記マッチング処理方法の実験・検証結果について説明する。

50

【 0 1 7 5 】

図 2 8 は実験・検証に用いられた L G フィルタの振幅特性図、図 2 9 ~ 図 3 5 は実験・検証結果を説明するための図を示す。図 2 9 は実験画像を示す図であり、図 2 9 (A) は変位前の画像、図 2 9 (B) は変位後の画像を示している。図 3 0 は図 2 9 に示す画像から抽出された位相特異点を示す画像であり、図 2 9 (A) は変位前の位相特異点の分布、図 2 9 (B) は変位後の位相特異点の分布を示している。図 3 1 は選択した位相特異点を拡大した図であり、図 3 1 (A) は変位前、図 3 1 (B) は変位後の拡大図を示している。

【 0 1 7 6 】

まず、今回の実験では、対象としてみどりふぐを使用し、高速 C C D カメラを用いて秒間 3 0 枚、連続撮影した画像を用いてマッチング処理を検証している。

10

【 0 1 7 7 】

撮影した画像に対して L G フィルタ演算を行い、位相特異点を得る。このとき、L G フィルタのフィルタ幅は、 $\lambda^2 = 30$ としている。なお、L G フィルタは、spiral phase filter にバンドパスフィルタの特性を加えたものであり、図 2 8 に示すような振幅特性とした。なお、L G フィルタの振幅幅を広くとれば、出てくる位相特異点の数は多くなり、逆に狭くすれば少なくなる。

【 0 1 7 8 】

図 2 9 に示す変位前後の画像に対して今回提案したマッチングアルゴリズムを適用した例について説明する。図 2 9 に示す画像の変位前後の位相特異点の分布は図 3 0 に示すようになる。図 3 0 (A) に示す変位前の位相特異点から黒丸で示される 6 つの位相特異点を選択してマッチングを行った。

20

【 0 1 7 9 】

図 3 0 (B) において、黒丸で示す位相特異点は変位前の黒丸で示す位相特異点に対応しており、実際にマッチングアルゴリズムにより検出されたパターンである。

【 0 1 8 0 】

図 3 1 は変位前に選んだ位相特異点の組み合わせと、ポイントマッチングアルゴリズムによって検出された変位後の位相特異点の組み合わせを拡大図示したものである。このように変位前、変位後のパターンを見比べると移動、回転、縮尺を組み合わせた変形が起きているがマッチングアルゴリズムによって検証された。

30

【 0 1 8 1 】

異なる 2 枚の画像に対して異なったパターンに着目して、本実施例のポイントマッチング処理を採用した場合の結果についても検証した。

【 0 1 8 2 】

図 3 2 は異なる 2 枚の画像に対して異なったパターンに着目して、本実施例のポイントマッチング処理を採用した場合の変位前後の位相特異点の分布を示す図であり、図 3 2 (A) は変位前の分布、図 3 2 (B) は変位後の分布を示している。図 3 3 は図 3 2 に示した位相特異点の変位を示す図であり、図 3 3 (B) は選択された位相特異点を拡大した図である。

【 0 1 8 3 】

この検証例においても図 3 2 (A) に示すように変位前の 4 つの位相特異点に変位後、図 3 2 (B) に示す位置に移動し、図 3 3 に示すように注目した 4 つの位相特異点に変位していることが検証できた。

40

【 0 1 8 4 】

さらに同じ作業をふぐの連続撮影画像 1 0 0 枚に対して行った。

【 0 1 8 5 】

図 3 4 は連続した画像について実験・検証例を行った場合の画像を示す図である。図 3 4 (A) は最初の画像、図 3 4 (B) は最後の画像を示している。図 3 5 は図 3 4 に示す画像から 6 つの位相特異点に注目し、その軌跡を追跡したものである。

【 0 1 8 6 】

50

このように、本実施例のポイントマッチング処理を用いることにより、位相特異点を連続して追跡できる。

【0187】

さらに、任意の位相特異点の組み合わせに対して位相特異点を持つ位相構造と他の位相特異点との距離とによって対応する位相特異点の組を検出し、それらの位相特異点の組を追跡することによってランダムな動きを追跡できることがわかる。特徴パラメータが変化してしまう理由で計測不可能であった大きな変位を伴った物体の運動変位計測が可能となった。

【0188】

また、本実施例では、位相特異点の組のうち式(1)が最小となる組み合わせを検出することにより、マッチングを行ったが、位相特異点の点間総和距離の差を算出し、変位前のパターンと変位後のパターンとで点間総和距離の差が最小となる位相特異点を検出することによりマッチングを行うようにしてもよい。

【0189】

図36、図37は点間総和距離の差によりマッチングを行う動作を説明するための図を示す。

【0190】

図36(A)、図37(A)は変位前の位相特異点の分布、図36(B)、図37(B)は変位後の位相特異点の分布を示す。

【0191】

まず、変位前の画像から位相特異点 $p_1 \sim p_4$ を抽出するとともに、変位後の画像から位相特異点 p_1', p_2', p_3', p_4' を抽出し、変位前の位相特異点 $p_1 \sim p_4$ と変位後の位相特異点 p_1', p_2', p_3', p_4' との点間総和距離の差 S_1 を求める。点間総和距離の差 S_1 は、

$$S_1 = (|p_1 p_3| - |p_1' p_3'|)^2 + (|p_1 p_2| - |p_1' p_2'|)^2 \\ + (|p_2 p_3| - |p_2' p_3'|)^2 + (|p_3 p_4| - |p_3' p_4'|)^2 \\ + (|p_1 p_4| - |p_1' p_4'|)^2 + (|p_2 p_4| - |p_2' p_4'|)^2$$

で求められる。

ここで、 $|p_i p_j|$ は、点 p_i と点 p_j との間の距離を表している。

【0192】

また、変位後の画像から位相特異点 p_1', p_2', p_3', p_4' とは異なる位相特異点 $p_1'', p_2'', p_3'', p_4''$ を抽出し、変位前の位相特異点 $p_1 \sim p_4$ と変位後の位相特異点 $p_1'', p_2'', p_3'', p_4''$ との点間総和距離の差 S_2 を求める。点間総和距離の差 S_2 は、

$$S_2 = (|p_1 p_3| - |p_1'' p_3''|)^2 + (|p_1 p_2| - |p_1'' p_2''|)^2 \\ + (|p_2 p_3| - |p_2'' p_3''|)^2 + (|p_3 p_4| - |p_3'' p_4''|)^2 \\ + (|p_1 p_4| - |p_1'' p_4''|)^2 + (|p_2 p_4| - |p_2'' p_4''|)^2$$

で求められる。

【0193】

このとき、例えば、 $S_2 < S_1$ であれば、変位前の画像から位相特異点 $p_1 \sim p_4$ は、位相特異点 $p_1'', p_2'', p_3'', p_4''$ に対応すると判定する。

【0194】

なお、ここでは、説明を簡単にするために4点について説明したが、2点以上であれば、点間総和距離の差によりマッチングを行うことが可能であることは言うまでもない。

【0195】

本実施例のポイントマッチング処理は、複数の位相特異点の位置関係を用いるので縮尺、移動そして、回転により変位前後で完全にその位置関係が一致しなくてもポイントマッチングを行うことで一番近い組を選び出すことができるので、本発明はあらゆる変位を計測することができる。

【0196】

なお、本実施例では、特徴点として位置情報、離心率、渦度、実部がゼロとなる線分 L

10

20

30

40

50

re0と虚部がゼロとなる線分 Lim0との交叉角度であるゼロクロス角を特徴パラメータとして持つ位相特異点を例に説明したが、特徴パラメータはこれに限定されるものではなく、例えば、位置情報だけであってもよい。

【0197】

以上、本実施例によれば、干渉計なしで空間的なランダムパターンの強度情報を位相情報に対応づけ、位相情報の中に存在する全位相特異点の特徴を基に変位前後で各位相特異点がどこに移動したか特定することにより、計測物体の全体の変位計測に対しても、物体の局所領域における変位計測のいずれに対しても適用することができ、さらに場の回転の計測をも実現した変位検出装置を提供することができる。

【0198】

本国際出願は、2006年2月1日に提出した日本国特許出願2006-024846号、及び、2006年11月8日に提出した日本国特許出願2006-303238号に基づく優先権を主張するものであり、日本国特許出願2006-024846号、及び、日本国特許出願2006-303238号の全内容を本国際出願に援用する。

【符号の説明】

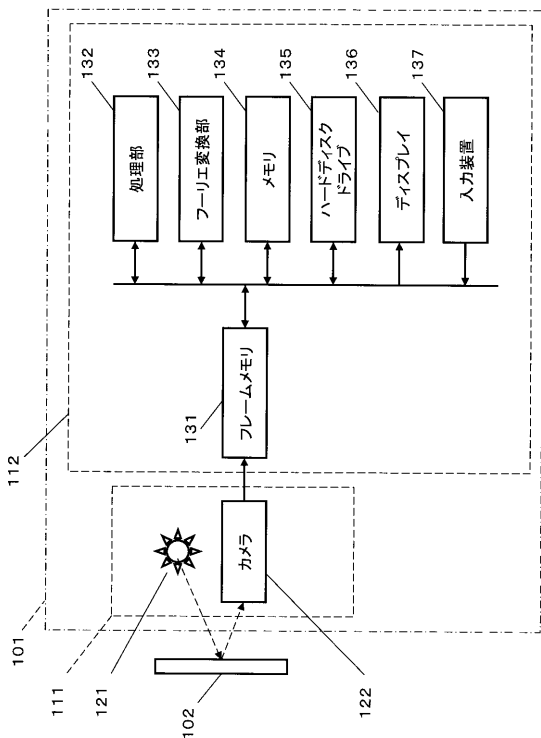
【0199】

- 101 変位検出装置、102 測定対象
- 111 画像検出部、112 信号処理部
- 121 光源、122 撮像装置
- 131 フレームメモリ、132 処理部、133 フーリエ変換部
- 134 ROM
- 135 ハードディスクドライブ、136 ディスプレイ、137 入力装置

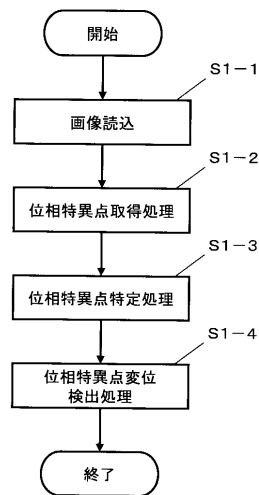
10

20

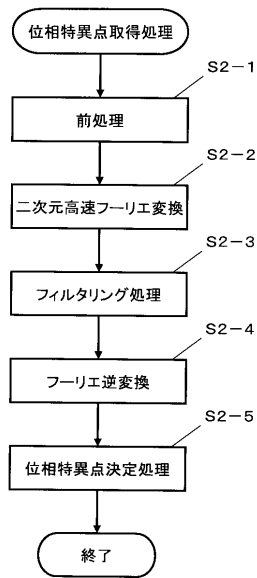
【図1】



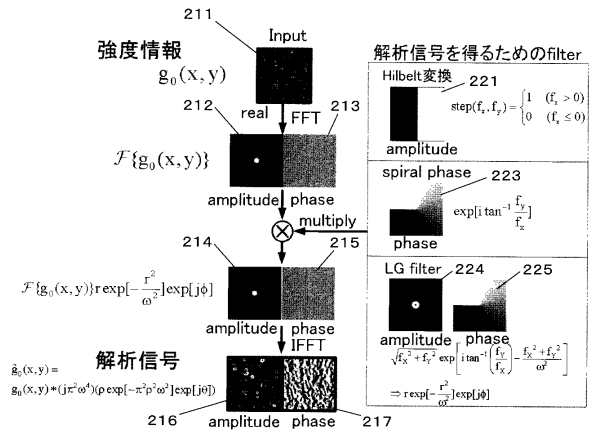
【図2】



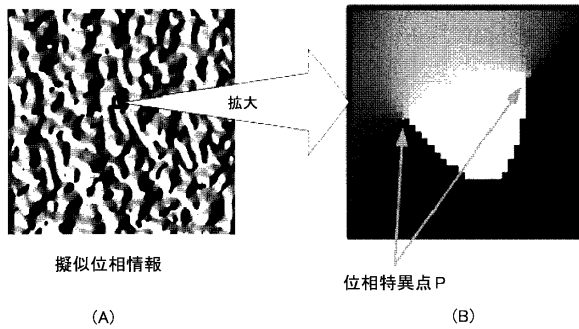
【 図 3 】



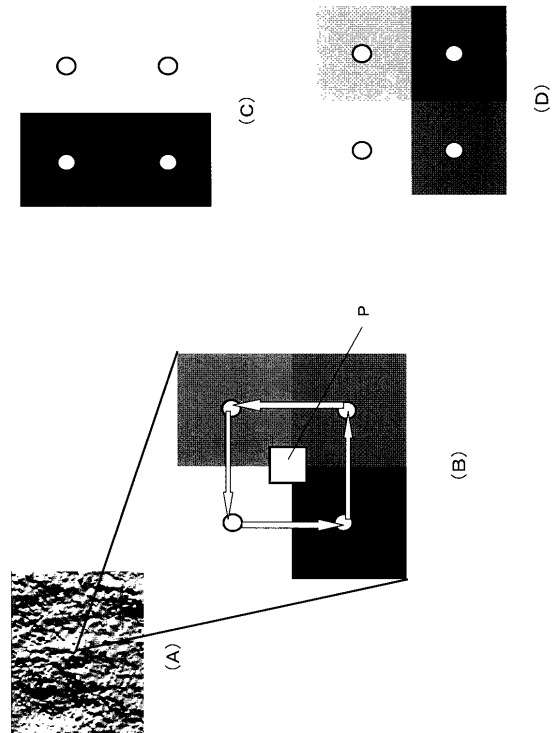
【 図 4 】



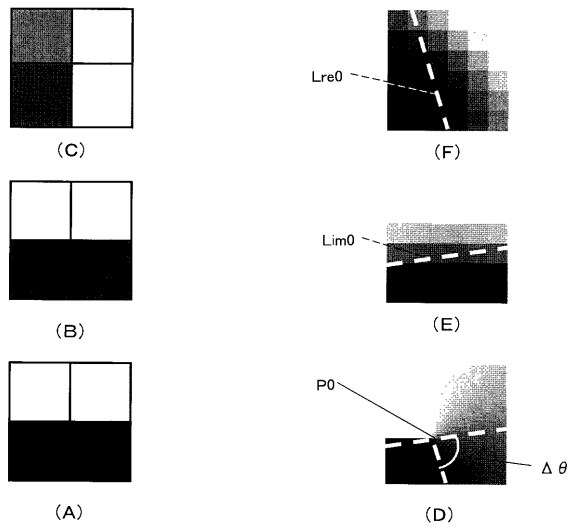
【 図 5 】



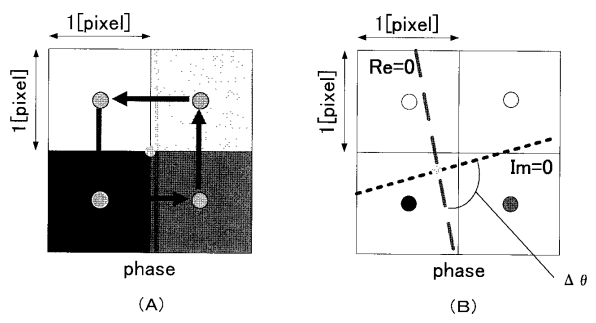
【 図 6 】



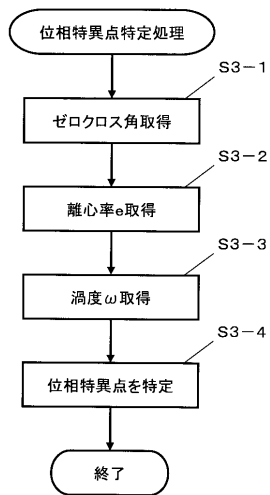
【図7】



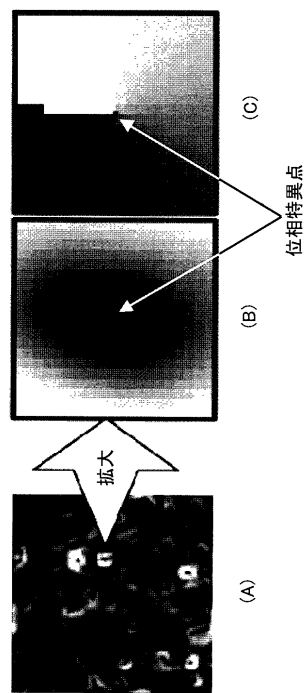
【図8】



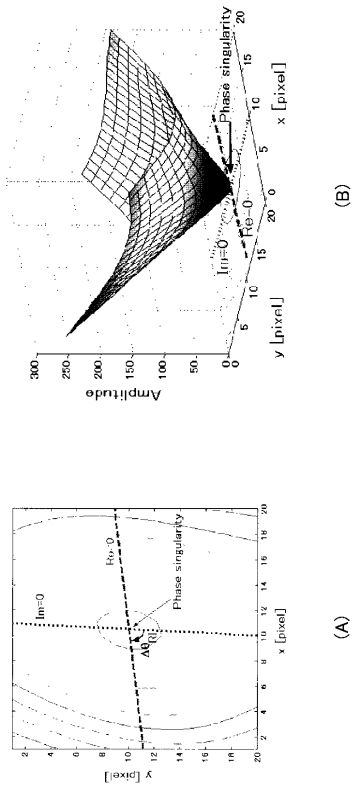
【図9】



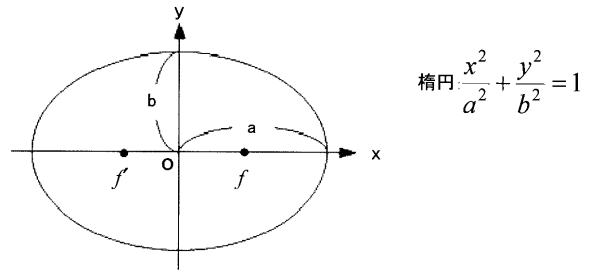
【図10】



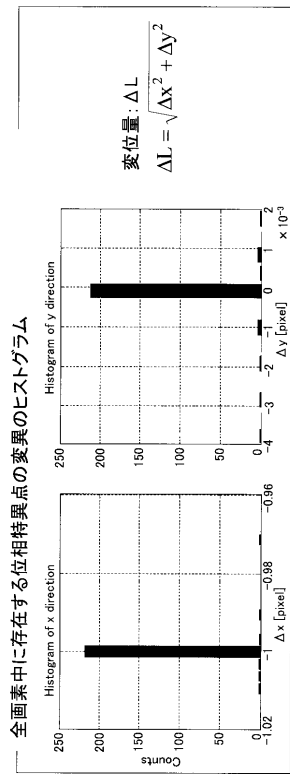
【 図 1 1 】



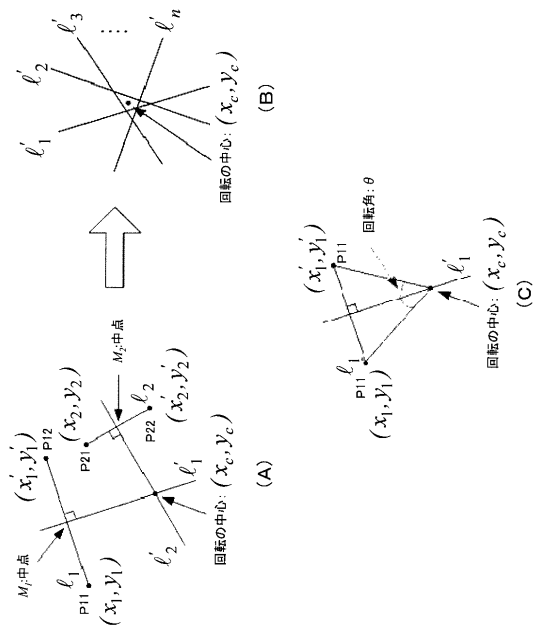
【 図 1 2 】



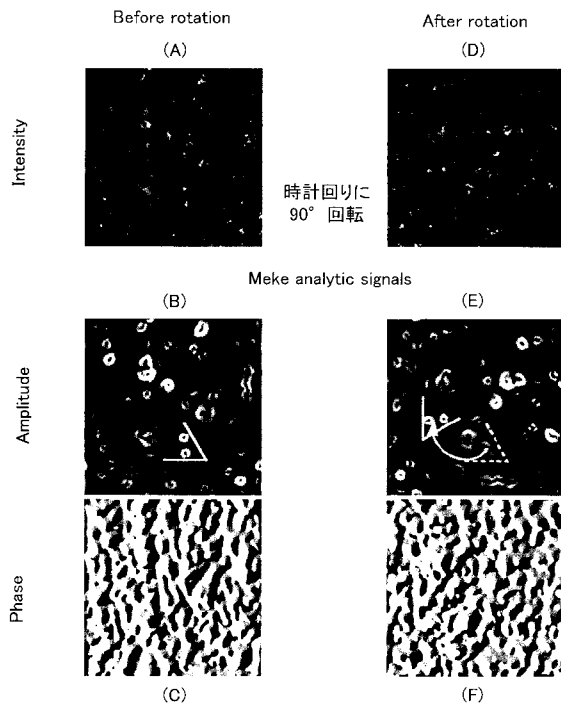
【 図 1 3 】



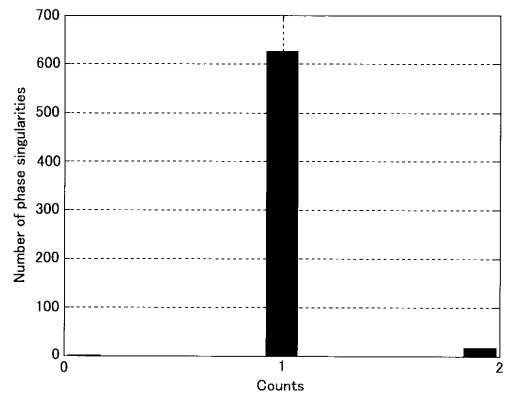
【 図 1 4 】



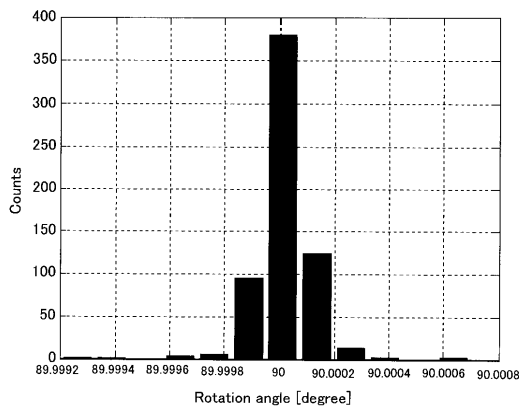
【 図 1 5 】



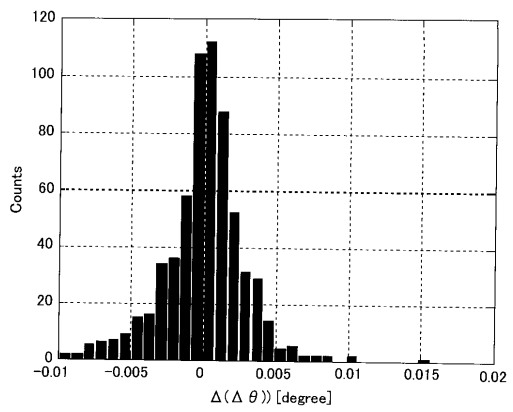
【 図 1 6 】



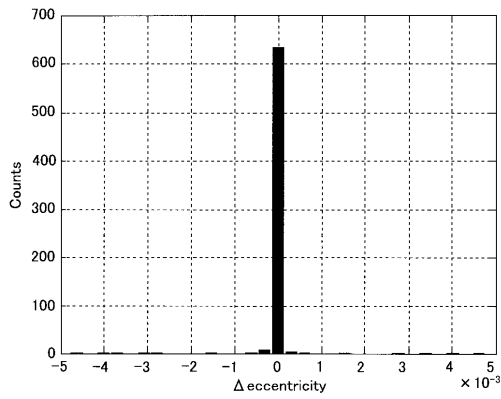
【 図 1 7 】



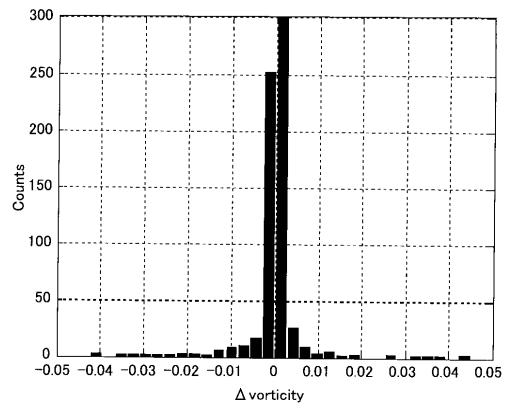
【 図 1 8 】



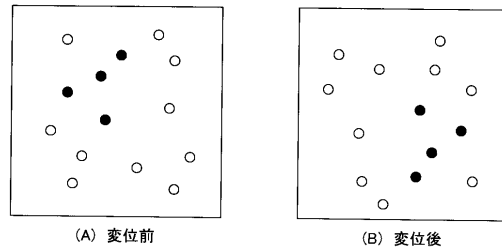
【図19】



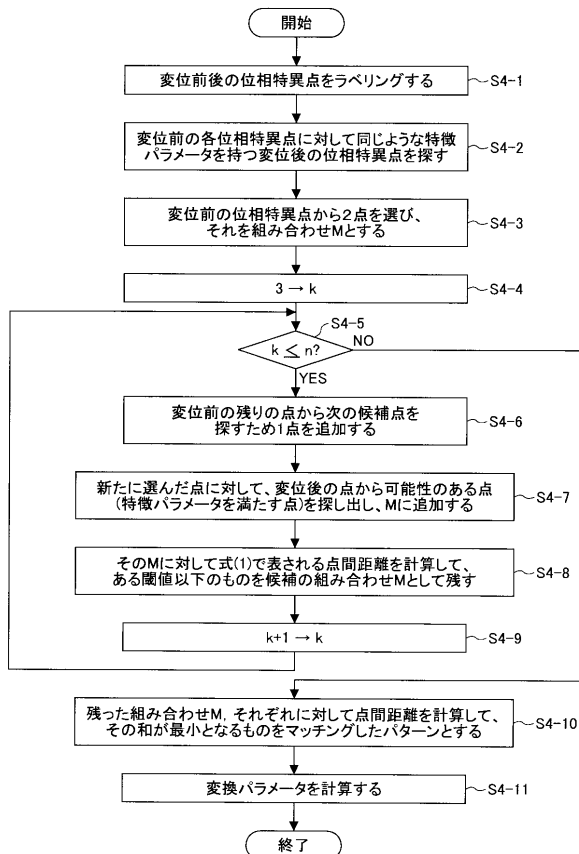
【図20】



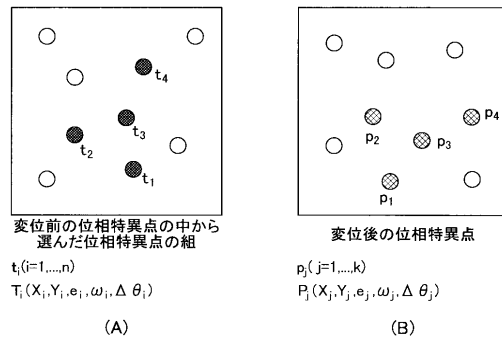
【図21】



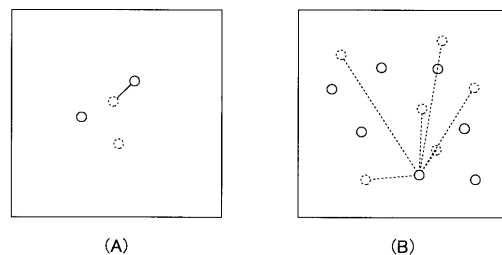
【図22】



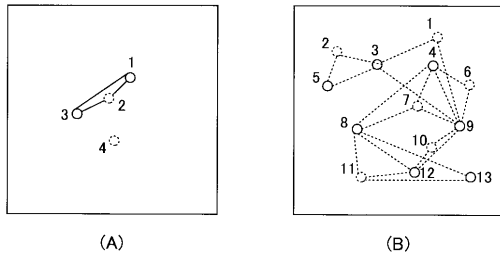
【図23】



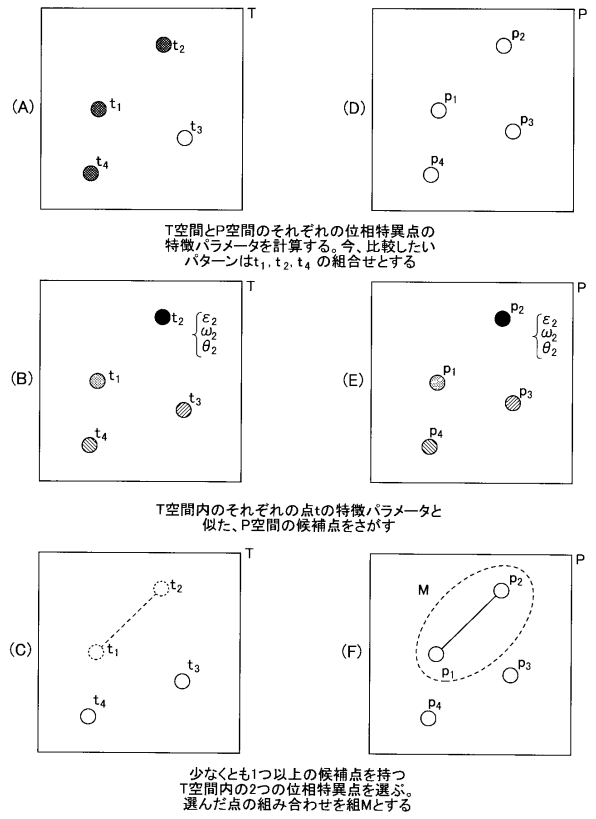
【図24】



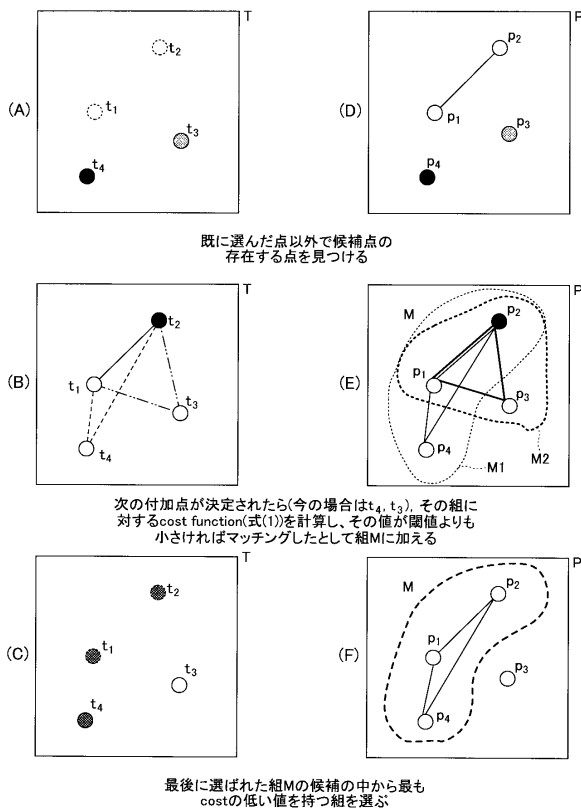
【 図 2 5 】



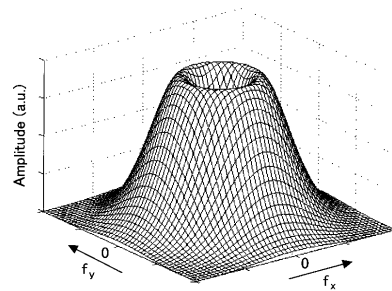
【 図 2 6 】



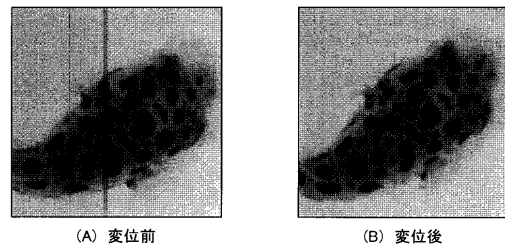
【 図 2 7 】



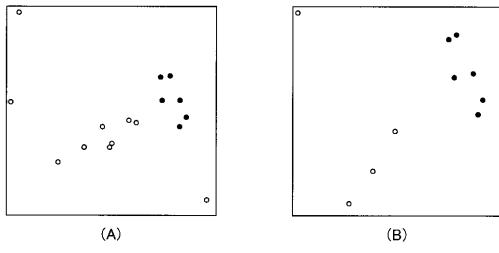
【 図 2 8 】



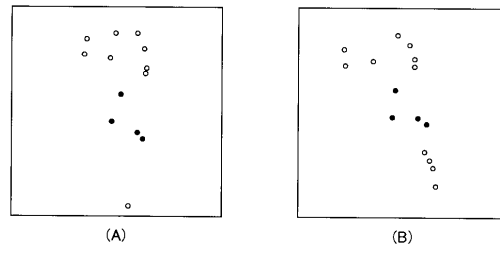
【 図 2 9 】



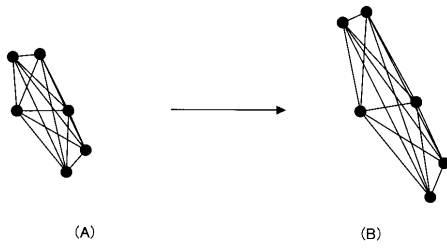
【 図 3 0 】



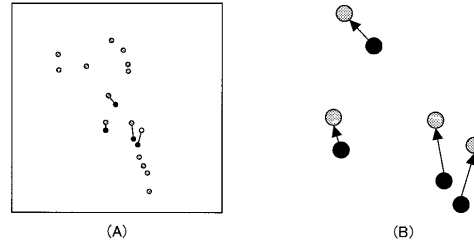
【 図 3 2 】



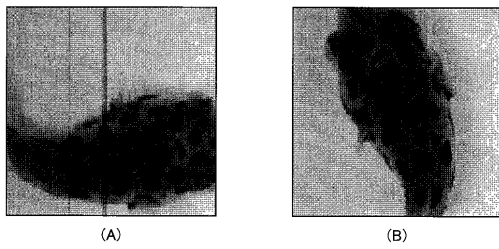
【 図 3 1 】



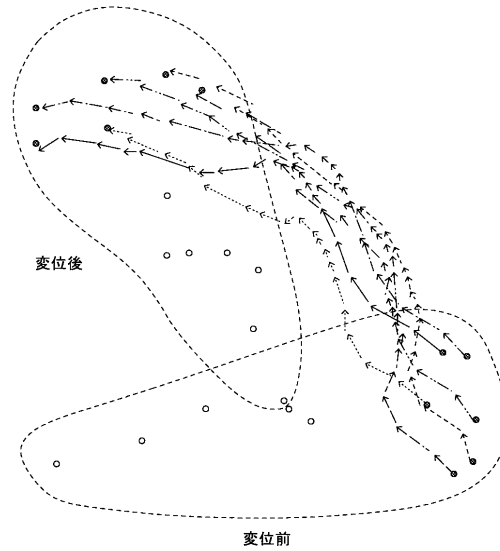
【 図 3 3 】



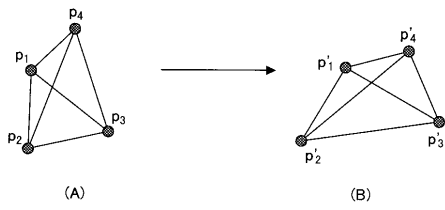
【 図 3 4 】



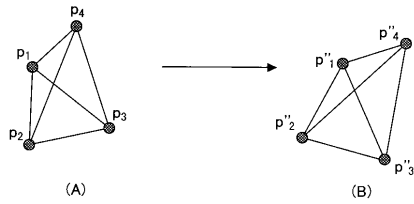
【 図 3 5 】



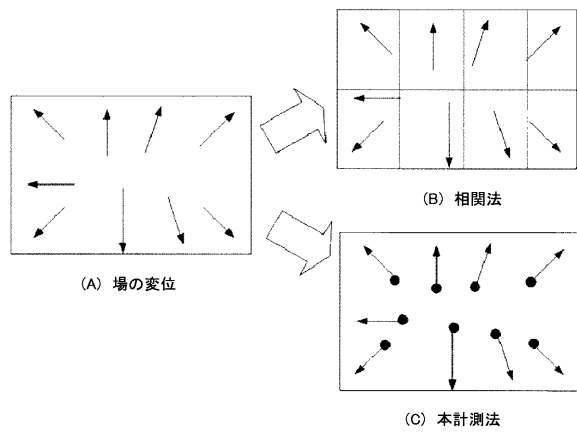
【図36】



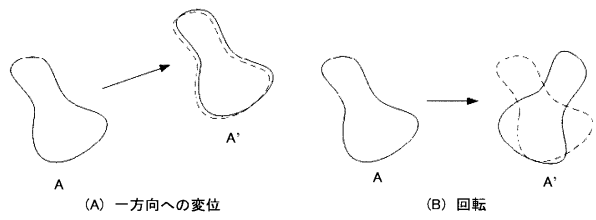
【図37】



【図38】



【図39】



フロントページの続き

- (72)発明者 石島 玲華
東京都調布市調布ヶ丘1丁目5番地1 国立大学法人 電気通信大学内
- (72)発明者 チャオ ユー
東京都調布市調布ヶ丘1丁目5番地1 国立大学法人 電気通信大学内

審査官 後藤 昌夫

- (56)参考文献 特開2002-190020(JP,A)
特開2002-171395(JP,A)
横関 友亮、Wei Wang、石島 玲華、和田 篤、Steen Hanson、宮本 洋子、武田 光夫、スペックルパターンのRiesz変換解析信号の位相特異点を用いたナノ変位計測、Optics Japan 2005 日本光学学会年次学術講演会 講演予稿集、日本、2005年11月23日、P.702-703
K.G.Larkin, D.J.Bone, M.A.Oldfield, Natural demodulation of two-dimensional fringe patterns. I. General background of the spiral phase quadrature transform, Journal of the Optical Society of America. A. Optics, 米国, 2001年 8月, Vol.18, No.8, P.1862-1870
- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01B 11/00 - 11/30
G06T 1/00
G06T 7/00 - 7/60