

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2019-537726

(P2019-537726A)

(43) 公表日 令和1年12月26日 (2019. 12. 26)

(51) Int. Cl. F I テーマコード (参考)
G O 1 B 9/02 (2006.01) G O 1 B 9/02 2 F O 6 4

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全 31 頁)

(21) 出願番号	特願2019-526238 (P2019-526238)	(71) 出願人	598176743
(86) (22) 出願日	平成29年11月8日 (2017. 11. 8)		ザイゴ コーポレーション
(85) 翻訳文提出日	令和1年5月16日 (2019. 5. 16)		Z Y G O C O R P O R A T I O N
(86) 国際出願番号	PCT/US2017/060623		アメリカ合衆国 コネチカット州 O 6 4
(87) 国際公開番号	W02018/093637		5 5 ミドルフィールド ローレル ブルック
(87) 国際公開日	平成30年5月24日 (2018. 5. 24)		ロード (番地なし)
(31) 優先権主張番号	62/423, 856	(74) 代理人	100105957
(32) 優先日	平成28年11月18日 (2016. 11. 18)		弁理士 恩田 誠
(33) 優先権主張国・地域又は機関	米国 (US)	(74) 代理人	100068755
			弁理士 恩田 博宣
		(74) 代理人	100142907
			弁理士 本田 淳

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 干渉計の光学性能を最適化するための方法及び装置

(57) 【要約】

干渉計を備える被験物体の特性を測定する方法は、a) 干渉計の、干渉計の参照表面に関する被験物体の位置への焦点設定に関する較正情報を提供するステップと、b) 参照面に対する被験物体の位置を特定するステップと、c) 干渉計を使って、被験物体の干渉画像を、被験物体の特性の測定において使用するために収集するステップを含む。

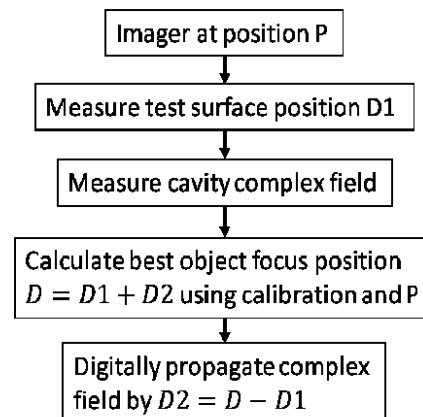


FIG. 13

【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

被験物体の特性を干渉計で測定する方法であって、

a．前記干渉計の参照面に対する前記被験物体の位置への前記干渉計の焦点設定に関する較正情報を提供すること、

b．前記参照面に対する前記被験物体の位置を特定すること、

c．前記干渉計を用いて、前記被験物体の複数の干渉画像を、前記被験物体の特性の測定において使用するために収集すること、を備え、

d．前記方法はさらに、

i．前記複数の干渉画像の少なくとも幾つかを収集する前に、前記複数の干渉画像の焦点の度合いを改善するように、前記干渉計の焦点を、前記較正情報と、前記参照面に対する前記被験物体の特定された位置とに基づいてハードウェアで調整すること、

10

i i．1つ又は複数の電子プロセッサを用いて、前記複数の干渉画像から取得された少なくとも1つの波面の焦点の度合いを改善するように、前記較正情報と、前記参照面に対する前記被験物体の特定された位置とに基づいて、前記複数の干渉画像から取得された少なくとも1つの波面を数学的に伝播させること、のうちの少なくとも1つを備える、方法。

【請求項 2】

前記干渉計は、前記被験物体を支持する罫線入りステージを含み、

前記参照面に対する前記被験物体の位置を特定することは、

20

前記罫線入りステージを手動で又は自動的に読み取ることを含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

前記干渉計は、可変波長を有する光源を備え、

前記複数の干渉画像は、前記光源の波長を調整しながら収集され、

前記参照面に対する前記被験物体の位置は、前記光源の波長を調整しながら収集された前記複数の干渉画像に基づいて特定される、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 4】

前記方法は、

ハードウェアで前記干渉計を、前記複数の干渉画像の焦点の度合いを改善するように調整することをさらに備え、

30

前記調整することは、

前記複数の干渉画像の焦点の度合いを改善するために、前記干渉計の焦点に対する機械的、光学的、又は電気光学的調整を含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 5】

前記干渉計は、

前記複数の干渉画像を検出するように用いられる検出器をさらに備え、

前記調整することは、

前記検出器の位置の調整又は前記検出器の上流の焦点光学系への調整を含む、請求項 4 に記載の方法。

40

【請求項 6】

前記方法は、

前記少なくとも1つの波面の焦点を改善するように、前記較正情報と、前記参照面に対する前記被験物体の特定された位置とに基づいて、前記複数の干渉画像から取得された前記少なくとも1つの波面を数学的に伝播させることをさらに備え、

前記被験物体の特性の測定は、伝搬された波面に基づいて特定される、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 7】

前記被験物体の測定された特性は、表面トポグラフィ、厚さプロファイル、又は材料均一性プロファイルを含む、請求項 1 に記載の方法。

50

【請求項 8】

前記被験物体の測定された特性は、厚さプロファイル又は材料均一性プロファイルを含み、

前記方法は、

前記複数の干渉画像から取得された少なくとも 1 つの他の波面を数学的に伝播させること、をさらに備える、請求項 7 に記載の方法。

【請求項 9】

前記焦点設定は、前記干渉計により生成される前記被験物体の画像のためのベストフォーカスの位置である、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 10】

前記較正情報を特定すること、をさらに備える請求項 1 に記載の方法。

【請求項 11】

前記較正情報を特定することは、

a . 前記干渉計を用いて、前記参照面に対するアーティファクト物体の異なる位置の各々の既知の表面特徴を有する前記アーティファクト物体の複数の干渉画像を収集すること、

b . 前記アーティファクト物体の異なる位置の各々について、1 つ又は複数の電子プロセッサを使って、前記複数の干渉画像から取得された波面を数学的に伝播させて、前記干渉計により生成された前記アーティファクト物体の画像のベストフォーカスの位置を特定すること、を含む、請求項 10 に記載の方法。

【請求項 12】

被験物体の特性を測定するための干渉計システムであって、

a . 前記被験物体の複数の干渉画像を収集する干渉計と、

b . 前記干渉計に結合され、収集された前記複数の干渉画像を分析する 1 つ又は複数の電子プロセッサであって、前記干渉計の参照面に対する前記被験物体の位置への前記干渉計の焦点設定に関する較正情報を記憶するように構成された 1 つ又は複数の電子プロセッサと、を備え、

c . 前記 1 つ又は複数の電子プロセッサは、

i . 前記複数の干渉画像の少なくとも幾つかを収集する前に、前記複数の干渉画像の焦点の度合いを改善するように、前記較正情報と、前記参照面に対する前記被験物体の位置についての情報とに基づいて、前記干渉計のハードウェアへの調整が行われるようにすること、及び

ii . 前記複数の干渉画像から取得された少なくとも 1 つの波面の焦点を改善するように、前記較正情報と、前記参照面に対する前記被験物体の位置についての情報とに基づいて、前記複数の干渉画像から取得された少なくとも 1 つの波面を数学的に伝播させること、の少なくとも 1 つを実行するように構成される、干渉計システム。

【請求項 13】

前記干渉計は、前記被験物体を支持する罫線入りのステージと、

前記参照面に対する前記被験物体の位置を読み取るリーダと、をさらに備え、

前記リーダは、前記参照面に対する前記被験物体の位置についての情報を前記 1 つ又は複数の電子プロセッサに供給する、請求項 12 に記載のシステム。

【請求項 14】

前記干渉計は、可変波長を有する光源を含み、

前記干渉計は、前記光源の波長を調整しながら前記複数の干渉画像を収集するように構成され、

前記 1 つ又は複数の電子プロセッサは、前記参照面に対する前記被験物体の位置についての情報を、前記光源の波長を調整しながら収集された前記複数の干渉画像に基づいて特定するように構成される、請求項 12 に記載のシステム。

【請求項 15】

前記電子プロセッサは、前記較正情報と、前記参照面に対する前記被験物体の位置につ

10

20

30

40

50

いての情報とに基づいて、前記複数の干渉画像の焦点を改善するように前記干渉計のハードウェアに対する調整が行われるように構成され、

前記ハードウェアに対する調整は、前記複数の干渉画像の焦点の度合いを改善するために、前記参照面への機械的、光学的、又は電気光学的調整を含む、請求項 1 2 に記載のシステム。

【請求項 1 6】

前記干渉計は、前記複数の干渉画像を検出するように用いられる検出器を含み、

前記ハードウェアに対する調整は、前記検出器の位置への調整を含む、請求項 1 5 に記載のシステム。

【請求項 1 7】

前記 1 つ又は複数の電子プロセッサは、前記複数の干渉画像から取得された少なくとも 1 つの波面の焦点の度合いを改善するように、前記較正情報と、前記参照面に対する前記被験物体の位置についての情報とに基づいて、前記複数の干渉画像から取得された少なくとも 1 つの波面を数学的に伝播させるように構成され、

前記 1 つ又は複数の電子プロセッサはさらに、伝播された波面に基づいて、前記被験物体の特性を特定するように構成される、請求項 1 2 に記載のシステム。

【請求項 1 8】

前記被験物体の測定された特性は、表面トポグラフィ、厚さプロファイル、又は材料均一性プロファイルを含む、請求項 1 2 に記載のシステム。

【請求項 1 9】

前記被験物体の測定された特性は、厚さプロファイル又は材料均一性プロファイルを含み、前記 1 つ又は複数の電子プロセッサはさらに、前記複数の干渉画像から取得された少なくとも 1 つの他の波面を数学的に伝播させるように構成される、請求項 1 8 に記載のシステム。

【請求項 2 0】

前記焦点設定は、前記干渉計により生成された前記被験物体の画像のベストフォーカスの位置である、請求項 1 2 に記載のシステム。

【請求項 2 1】

被験物体の特性を測定するための干渉計システムであって、

a . 前記被験物体の複数の干渉画像を収集するための干渉計と、

b . 前記干渉計に結合され、収集された複数の干渉画像を分析する 1 つ又は複数の電子プロセッサと、を備え、

c .

i . 前記干渉計は、可変波長を有する光源を含み、

i i . 前記干渉計は、前記光源の波長を調整しながら前記複数の干渉画像を収集するように構成され、

i i i . 前記 1 つ又は複数の電子プロセッサは、前記干渉計の参照面に対する前記被験物体の位置についての情報を、前記光源の前記波長を調整しながら収集された前記複数の干渉画像に基づいて特定するように構成され、

d . 前記 1 つ又は複数の電子プロセッサはさらに、前記複数の干渉画像から取得された少なくとも 1 つの波面の焦点の度合いを改善するように、前記参照面に対する前記被験物体の位置についての特定された情報に基づいて、前記複数の干渉画像から取得された少なくとも 1 つの波面を数学的に伝播させるように構成されるシステム。

【請求項 2 2】

前記 1 つ又は複数の電子プロセッサはさらに、伝搬された波面に基づいて、前記被験物体の特性を特定するように構成される、請求項 2 1 に記載のシステム。

【請求項 2 3】

前記 1 つ又は複数の電子プロセッサは、前記参照面に対する前記被験物体の位置についての情報と、前記参照面に対する前記被験物体の位置への前記干渉計の焦点設定についての較正情報とに基づいて、前記複数の干渉画像から取得された前記少なくとも 1 つの波面

10

20

30

40

50

を数学的に伝播させるように構成される、請求項 2 1 に記載のシステム。

【請求項 2 4】

前記被験物体の測定された特性は、表面トポロジ、厚さプロファイル、又は材料均一性プロファイルを含む、請求項 2 3 に記載のシステム。

【発明の詳細な説明】

【背景技術】

【0 0 0 1】

光波面及び表面トポグラフィ測定のための干渉法は、現在もこれまでも、その使いやすさ、性能、及び多用途性により、高精度測定用として人気の高い技術である。位相シフト干渉計 (PSI : phase shifting interferometry) は 1 つの干渉法である。P S I には、例えば圧電トランスデューサ (PZT : piezo-electric transducer) を使ってキャビティの表面のうちの 1 つ (典型的に参照面) を正確に移動させながら、キャビティの干渉を被験面に合焦されたカメラ上で観察することを含む。干渉パターンの変化を分析することにより、被験面と参照面との間の差に関する複素フィールドを計算することができる。参照面の形態がわかっている場合、被験面の形態は、測定されたフィールドから高い精度で抽出され得る。焦点合わせは典型的に手動で行われ、オペレータは表面の特徴又は縁が視覚的に最も鮮鋭になるまで焦点を調節する。しかしながら、表面の特徴がない場合、正確な視覚的焦点合わせは難しくなり、使用者は、例えばくっきりとした縁を有する柔らかい無反射面 (紙等) を被験面と接触させて、そこに焦点を合わせるための代用の特徴として機能させる等、その他の方法に頼ることが多い。

10

20

【0 0 0 2】

初期の機器は比較的低密度の撮像デバイス (すなわち、V G A 密度 3 2 0 × 2 4 0 又は 6 4 0 × 4 8 0 画素) を使用していたが、これは、より高密度の撮像デバイスが当時は入手不能か又は高額すぎたからである。これらの撮像デバイスで得られる測定可能な空間周波数はそれほど高くなかったため、視覚的な焦点合わせでも十分であった。現代の機器は当たり前のように高密度撮像フォーマットを使用しており、1 M p i x ~ 4 M p i x カメラが定型であり、より大きなフォーマット (2 5 M p i x) が考えられる。

【発明の概要】

【0 0 0 3】

現代の干渉法のための機器に一般的な高密度撮像フォーマットは、使用者が視覚的に見定める能力をはるかに超える空間分解能を実現できることがわかっており、したがって、視覚的焦点合わせが依然として利用されているということは、これらの機器がほとんどベストフォーカスでは操作されていないことを意味しており、これにより光学的性能が決まる可能性がある。

30

【0 0 0 4】

必要なものは、機器の焦点を対話的若しくは自動的に合わせるか、又は干渉パターンのライブ画像の視覚的解釈を超えた焦点ずれの状態を補償する方法である。このニーズに対処するために、本明細書に記載の実施形態は、干渉法により生成される表面トポグラフィ又は波面マップの品質を最適化するように、機器の焦点を測定して補正するための方法及び装置を提供する。

40

【0 0 0 5】

概して、1 つの態様において、被験物体の特性を干渉計で測定する方法が開示される。方法は、a) 干渉計のための、干渉計の参照面に対する被験物体の位置への焦点設定に関する校正情報を提供するステップと、b) 参照面に対する被験物体の位置を特定するステップと、c) 干渉計を使って、被験物体の複数の干渉画像を、被験物体の特性の測定において使用するために収集するステップと、を含む。例えば、焦点設定は、干渉計により生成される物体の画像のためのベストフォーカスの位置であってもよい。方法は、i) 複数の干渉画像の少なくとも幾つかを収集する前に、ハードウェアの干渉計の焦点を、校正情報と、参照面に対する被験物体の特定された位置とに基づいて調整し、複数の干渉画像の焦点の度合いを改善するステップと、i i) 1 つ又は複数の電子プロセッサを使って、較

50

正情報と、参照面に対する被験物体の特定された位置とに基づいて複数の干渉画像から得られた少なくとも1つの波面を数学的に伝播させて、複数の干渉画像から得られた波面の焦点の度合いを改善するステップとの少なくとも1つをさらに含む。

【0006】

方法の実施形態は、以下の特徴の何れかを含んでいてもよい。

干渉計は、被験物体を支持するための罫線入りステージを含んでいてもよく、参照面に対する被験物体の位置を特定するステップは、罫線入りステージを手動で又は自動的に読み取るステップを含む。その代わりに、又はそれに加えて、干渉計は、可変波長を有する光源を含み、複数の干渉画像は光源の波長を調整しながら収集され、参照面に対する被験物体の位置は、光源の波長を調整しながら収集された複数の干渉画像に基づいて特定される。

10

【0007】

方法は、ハードウェアにおいて干渉計を調整して、複数の干渉画像の焦点の度合いを改善するステップをさらに含んでいてもよく、調整には、複数の干渉画像の焦点の度合いを改善するための干渉計の焦点に対する機械的、光学的、又は電気光学的調整が含まれる。例えば、干渉計は、複数の干渉画像を検出するために使用される検出器を含んでいてもよく、調整は、検出器の位置の調整又は検出器の上流の焦点光学系への調整を含む。その代わりに、又はそれに加えて、方法は、波面の焦点を改善するための、較正情報及び、参照面に対する被験物体の特定された位置に基づく複数の干渉画像から得られた波面の数学的伝播を含んでいてもよく、被験物体の特性の測定は伝搬された波面に基づいて特定される。

20

【0008】

被験物体の測定された特性には、表面トポグラフィ、厚さプロファイル、又は材料均一性プロファイルが含まれていてもよい。例えば、被験物体の測定された特性に厚さプロファイル又は材料均一性プロファイルが含まれる場合、方法は、複数の干渉画像から得られた少なくとも1つの他の波面を数学的に伝播させるステップをさらに含んでいてもよい。

【0009】

方法は、較正情報を特定するステップをさらに含んでいてもよい。例えば、較正情報を特定するステップは、a) 干渉計を使って、参照面に対するアーティファクト物体の異なる位置の各々についての既知の表面特徴を有するアーティファクト物体の複数の干渉画像を収集するステップと、b) アーティファクト物体の異なる位置の各々について、1つ又は複数の電子プロセッサを使って、複数の干渉画像から得られた波面を数学的に伝播させて、干渉計により生成されたアーティファクト物体の画像のベストフォーカスの位置を特定するステップと、を含んでいてもよい。

30

【0010】

概して、他の態様において、被験物体の特性を測定するための干渉計システムが開示される。システムは、a) 被験物体の複数の干渉画像を収集するための干渉計と、b) 収集された複数の干渉画像を分析するための、干渉計に連結された1つ又は複数の電子プロセッサであって、干渉計の、干渉計の参照面に対する被験物体の位置への焦点設定に関する較正情報を記憶するように構成された1つ又は複数の電子プロセッサと、を含む。例えば、焦点設定は、干渉計により生成された物体の画像のベストフォーカスの位置であってもよい。1つ又は複数の電子プロセッサは、以下のうちの少なくとも1つを行うように構成される：i) 複数の干渉画像の少なくとも幾つかを収集する前に、複数の干渉画像の焦点の度合いを改善するために、較正情報及び、参照面に対する被験物体の位置についての情報に基づいて、干渉計のハードウェアの調整が行われるようにすること、及びii) 較正情報及び、参照面に対する被験物体の位置についての情報に基づいて、複数の干渉画像から得られた少なくとも1つの波面を数学的に伝播させて、複数の干渉画像から得られた波面の焦点を改善すること。

40

【0011】

システムの実施形態は、以下の特徴の何れかを含んでいてもよい。

50

干渉計は、被験物体を支持するための罫線入りのステージと、参照面に対する被験物体の位置を読み取るためのリーダであって、参照面に対する被験物体の位置についての情報を1つ又は複数の電子プロセッサに提供するリーダと、を含んでいてもよい。その代わりに、又はそれに加えて、干渉計は可変波長を有する光源を含んでいてもよく、干渉計は、光源の波長を調整しながら複数の干渉画像を収集するように構成され、1つ又は複数の電子プロセッサは、参照面に対する被験物体の位置についての情報を、光源の波長を調整しながら収集された複数の干渉画像に基づいて特定するように構成される。

【0012】

電子プロセッサは、較正情報及び、参照面に対する被験物体の位置についての情報に基づいて、複数の干渉画像の焦点を改善するために干渉計のハードウェアが調整されるように構成されていてもよく、ハードウェア調整は、複数の干渉画像の焦点の度合いを改善するための参照面への機械的、光学的、又は電気光学的調整を含む。例えば、干渉計は、複数の干渉画像を検出するために使用される検出器を含んでいてもよく、ハードウェア調整は、検出器の位置への調整を含む。その代わりに、又はそれに加えて、1つ又は複数の電子プロセッサは、複数の干渉画像から得られた波面の焦点の度合いを改善するために、較正情報及び、参照面に対する被験物体の位置についての情報に基づいて、複数の干渉画像から得られた少なくとも1つの波面を数学的に伝播させるように構成されていてもよく、1つ又は複数のプロセッサはさらに、伝播された波面に基づいて、被験物体の特性を特定するように構成される。

【0013】

被験物体の測定された特性は、表面トポグラフィ、厚さプロファイル、又は材料均一性プロファイルを含んでいてもよい。例えば、被験物体の測定された特性が厚さプロファイル又は材料均一性プロファイルである場合、1つ又は複数の電子プロセッサは、複数の干渉画像から得られた少なくとも1つの他の波面を数学的に伝播させるようにさらに構成されていてもよい。

【0014】

一般に、また別の態様において、被験物体の特性を測定するための干渉計システムが開示される。例えば、測定された特性は表面トポグラフィ、厚さプロファイル、又は材料均一性プロファイルを含んでいてもよい。システムは、a)被験物体の複数の干渉画像を収集するための干渉計と、b)収集された複数の干渉画像を分析するための、干渉計に連結された1つ又は複数の電子プロセッサと、を含む。干渉計は、可変波長を有する光源を含み、光源の波長を調整しながら複数の干渉画像を収集するように構成される。さらに、1つ又は複数の電子プロセッサは、干渉計の参照面に対する被験物体の位置についての情報を、光源の波長を調整しながら収集された複数の干渉画像に基づいて特定するように構成される。1つ又は複数の電子プロセッサはさらに、複数の干渉画像から得られた波面の焦点の度合いを改善するために、参照面に対する被験物体の位置についての特定された情報に基づいて、複数の干渉画像から得られた少なくとも1つの波面を数学的に伝播させるように構成される。

【0015】

システムの実施形態は、先のシステムについて上述したものに加えて、以下の特徴の何れかを含んでいてもよい。

1つ又は複数の電子プロセッサはさらに、伝搬された波面に基づいて、被験物体の特性を特定するように構成されていてもよい。

【0016】

1つ又は複数の電子プロセッサは、参照面に対する被験物体の位置についての情報及び、干渉計の、参照面に対する被験物体の位置への焦点設定についての較正情報に基づいて、複数の干渉画像から得られた少なくとも1つの波面を数学的に伝播させるように構成されていてもよい。

【0017】

本明細書で使用されるかぎり、「カメラ」及び「検出器」及び「撮像デバイス」は、被

10

20

30

40

50

験対象の複数の干渉画像を含む画像を記録するための装置を指すために互換可能に使用され、電荷結合素子（CCD）検出器、相補型金属酸化膜半導体（CMOS）検出器、マイクロボロメータ検出器（micro bolometer detector）、及びその他のこのような検出器を含むが、これらに限定されない。

【0018】

本発明の1つ又は複数の実施形態の詳細が、添付の図面及び以下の説明の中に示されている。本発明のその他の特徴、目的、及び利点は、説明及び図面から、並びに特許請求の範囲から明らかとなるであろう。

【図面の簡単な説明】

【0019】

10

【図1】干渉計システムの概略図である。

【図2】直径100mmの視野にわたり撮影された、4MPixイメージャを使って目視で焦点合わせが行われた場合（左）とデジタル処理により焦点調整された場合（右）の撮像システムに関する装置伝達関数（ITF：instrument transfer function）の横並びのグラフである。

【図3】焦点調整された位置に関する焦点メトリック（ストレール比）のグラフである。

【図4】被験光学的平坦部を測定するための典型的なフィゾー干渉計の場合の図1の干渉計システムの別の図であり、TF - 被験平坦部のキャビティの長さはGである。

【図5】物体空間処理を用いた焦点機構の較正を示す概略図である。

20

【図6】物体空間処理を用いた焦点機構の較正を示すフローチャートである。

【図7】物体空間処理を用いた焦点機構の較正を示す概略図である。

【図8】物体空間処理を用いた焦点機構の較正を示すフローチャートである。

【図9】周波数変換位相シフト干渉法（FTPSI：frequency transform phase-shifting interferometry）を実装する波長走査位相シフト干渉法（SWPSI：scanning wavelength phase-shifting interferometry）の概略図である。

【図10】較正及び焦点機構を用いた焦点調整を示す概略図である。

【図11】較正及び焦点機構を用いた焦点調整を示すフローチャートである。

【図12】較正及びキャビティ波面の複素フィールドのデジタル伝播を用いたベストフォーカスへの焦点調整を示す概略図である。

【図13】較正及びキャビティ波面の複素フィールドのデジタル伝播を用いたベストフォーカスへの焦点調整を示すフローチャートである。

30

【図14】較正及び複数のキャビティ波面の各々の複素フィールドのデジタル伝播を用いたベストフォーカスへの3面キャビティにおける焦点調整を示す概略図である。

【図15】較正及び複数のキャビティ波面の各々の複素フィールドのデジタル伝播を用いたベストフォーカスへの3面キャビティにおける焦点調整を示すフローチャートである。

【図16】較正及び複数のキャビティ波面の各々の複素フィールドのデジタル伝播を用いたベストフォーカスへの4面キャビティにおける焦点調整を示す概略図である。

【図17】較正及び複数のキャビティ波面の各々の複素フィールドのデジタル伝播を用いたベストフォーカスへの4面キャビティにおける焦点調整を示すフローチャートである。

40

【発明を実施するための形態】

【0020】

各種の図面中の同様の参照記号は同様の要素を示す。

本明細書では、表面トポグラフィ、形状若しくはテクスチャ（texture）又は光波面（optical wavefront）を測定するための干渉計が開示され、この干渉計は、距離測定システムを使って試験対象物体の位置を特定し、最終的な凹凸像の品質及び分解能を最適化するために干渉計の光学的合焦特性（optical focusing properties）を自動的又は対話的に調整するための手段を含む。干渉計の使用方法も開示される。

【0021】

干渉計の使用方法の特定の実施形態において、最終的な凹凸像の最適化は、以下の3つのステップを含む：i）被験物体の位置に応じた参照位置に関する適正な焦点設定を特定

50

するための初期校正、 $i i$) 距離測定システムにより、参照位置に対する被験物体表面の位置を特定すること、及び $i i i$) 被験物体表面をベストフォーカスにするためのハードウェア又はソフトウェア面での機器の調整。

【0022】

概して、参照位置は、非常に低空間周波数成分を有する表面、例えば典型的な干渉計においては参照平坦部に対応する。

よく知られた表面特徴を有するアーティファクト (artifact) 又はその他の部品を使って、焦点機構をセットアップ及び校正することができる。これは、関心対象の表面高さにばらつきがあるが、それ以外は、最適な焦点位置を特定することに関する特徴を持たないテストサンプルと対照的である。この校正は、1 回のみ、周期的に、又は毎回の測定前に行うことができる。

10

【0023】

いくつかの実施形態において、距離測定システムは、参照面に対する被験物体の表面の位置をマークするための被験物体ステージ上のルーラ (ruler) 等の単純な機械的システムとすることができる。ルーラは、使用者が直接読み取ることができ、又は自動光学リーダ (automated optical reader) を使って被験物体表面の位置に関する情報を、干渉計システムを操作するために電子コントローラに提供することもできる。また別の実施形態において、単純なルーラではなく、参照位置に対する被験物体表面上の被験物体の位置は、光学リーダを使ってエンコーダスケールから読み取ることができる。

【0024】

20

さらに、幾つかの実施形態において、参照面に対する被験物体表面の距離測定は、光源の波長を調整しながら取得した干渉データを分析することによって特定できる。このような実施形態において、距離測定システムは、波長走査干渉計システムのための全体的なデータ分析システムの一部であり、これについては後述する。さらに、このような実施形態において、試験対象物体は、複数の表面 (例えば、サンプルの前面及び後面) を含むことができ、データ分析システムは、参照面に対する被験物体の複数の表面の各々の位置を特定し、選択的に 1 つ又は複数の表面に合焦させ、及び / 又は焦点ずれを補正することができる。

【0025】

概して、距離測定の所望の精度は、少なくとも試験対象物体をカメラに画像化するために使用される撮像システムの焦点深度のオーダーであり、多くの具体化において、物体空間内で数百マイクロメートル、又はさらには数ミリメートルのオーダーである。

30

【0026】

焦点位置の補正がハードウェアで具体化される場合、実施形態は、被験物体の焦点を調整するための機械的、光学的、又は電気光学的手段の何れかを含むことができる。例えば、カメラを支持する自動機械ステージを使って、距離測定に基づいてカメラの位置を調整し、被験物体表面の焦点が合った状態にすることができる。また別の例において、1 つ又は複数の要素の位置及び / 又はパワー (power) は、被験面をカメラ上によりよく合焦させるために調整できる。

【0027】

40

焦点位置の補正がソフトウェアで具体化される場合、干渉画像 (interferometric image) を分析するための電子処理システムは、関心対象の各被験面と参照面により形成されるキャビティに対応する波面を抽出し、その波面を距離測定に基づいてよりよい焦点位置へとデジタル処理で伝播させる。

【0028】

カメラにより収集される干渉画像の焦点位置を改善すると、システムは被験物体についての情報をより高い精度で特定でき、この情報には表面高さプロファイル、厚さプロファイル、及び / 又は材料均一性プロファイル等の情報が含まれる。

【0029】

例示的な干渉計システム

50

図1は、フィゾー干渉計100を含む一実施形態を示す。フィゾー干渉計100は、光源102を含む。光源102は波長が633nmの光を発するヘリウム・ネオン（HeNe）レーザ等のレーザ源とすることができる。レンズとして図式的に描かれている光学素子102（図1では1つの素子のみが示されている）は、光源102から発せられた光をコリメートするように使用され得る。光の一部は、ビームスプリッタ108を透過してから、半透過性の後方参照面115を有する半透過性の参照光学素子114に当たる。半透過性参照面115は、光を参照ビームと測定ビームとに分ける。測定ビームは、後方参照面115を透過して、関心対象物体104に伝播し、関心対象物体104の前面は平面106内にある。較正中（詳しくは後述する）、関心対象物体104は、（図1では示されていない）既知の特長を有する1つ又は複数の表面特徴を含むアーティファクトとすることができる。これらの特長は、特徴の高さ、特徴の線幅、及び/又は特徴間の間隔を含むことができる。

10

【0030】

測定ビーム及び参照ビームはビームスプリッタ108で反射し、（図1では1つの素子として示されている）光学素子112により検出器110上に結像される。アーティファクト104の前面から反射した光は、検出器110において参照光学素子114の後面115で反射した参照光と結合され、検出器110は、結果として得られた干渉パターンを電子的に画像化する。検出器110は、画素の2次元アレイを有するCCDカメラ等の2次元検出器とすることができる。キャリア縞干渉法（carrier fringe interferometry）は、本明細書に記載の方法及び装置を使用できる手段の1種である。例えば、キャリア縞干渉法において、反射した測定及び参照ビームは、検出器110に高密度の干渉縞が生じるような角度である。光学場全体の縞の数はキャリア周波数と呼ばれ、この周波数は非常に高く、機器の視野（FOV：field of view）上で数百本のオーダである。FOVは機器により観察される空間的範囲であり、光学構成に依存しうる。FOVは通常、例えば機器の「ズーム」を調整することによって変更できる。キャリア縞方式では、位相情報の空間エンコーディングがある。ビームを大きくすると、観察可能な空間的範囲は小さくなるが、サンプリング密度は増大し、通常、より微細な詳細部を解像できる。

20

【0031】

位相シフト方式を使用するシステムのような、他の干渉計機器を使用できる。位相シフト方式では、位相情報は時間的に変化させられて、一連のインタフェログラムフレーム（interferogram frame）が生成される。概して、本明細書に記載の方法及び装置はあらゆる干渉計、すなわち、アーティファクトの表面のトポグラフィ表現を生成するもので使用できる。

30

【0032】

検出器110により記録された測定データ118は、電子プロセッサ114に送信される。送信される測定データ118は、物体104の電子像面ホログラム（electronic image-plane hologram）である検出された干渉パターンを含むことができ、そこから反射物体波面のデジタル画像をフーリエ処理を使って計算できる。フーリエ処理は、DFT、FFT、及び空間的に周期的な特徴を空間周波数に、及びその逆に変換するその他の周波数変換を広く含む。電子プロセッサ114は、これらのホログラムを処理して波面の位相を直接測定し、物体表面の電子3D画像を生成することを可能にするソフトウェアを含む。電子プロセッサ114はまた、少なくともステージ117上で支持される被験物体104のz位置を報告する測位装置からの情報116を受信することもできる。測位装置119は、例えば光学的、音響的、又は機械的なものとすることができ、又は焦点合わせの用途に必要な測位の精度を提供する他の何れの方法を使用することもできる。例えば、1つの実施形態において、測位装置119は光学エンコーダシステムである。

40

【0033】

さらに、焦点補正がハードウェアで具体化される実施形態の場合、システムは、被験物体104に関するz位置情報に基づくプロセッサ114からの情報123に基づいて、カメラ110（又は、その代わりに撮像光学系）を光軸に沿って移動させて、被験面が焦点

50

の合った状態となるようにするエンコード式電動焦点機構 (encoded, motorized focus mechanism) 1 2 1 を含むことができる。

【 0 0 3 4 】

焦点設定の性能の特定

特別に設計されたアーティファクトの測定を通じて干渉計の装置伝達関数 (ITF : instrument transfer function) を正確に評価する方法は、本願と共通の所有者による、2 0 1 5 年 1 2 月 3 1 日に出願された「干渉計の光学性能を最適化するための方法及び装置 (Method and Apparatus for Optimizing the Optical Performance of Interferometers)」と題する米国仮特許出願第 6 2 / 2 7 3 , 9 7 2 号に記載されており、その内容の全体を本願に援用する。このような方法は、本明細書において、被験物体を支持するステージの最適な位置を、まずステージにより支持されるアーティファクトの焦点の度合いを測定することによって特定するために具体化できる。アーティファクトは、位相又は強度特徴を含むことができる。具体的には、上述の仮特許出願には、アーティファクトの P S I (phase shifting interferometry : 位相シフト干渉法) による測定から得られた複素波面を、測定された複素フィールド (complex field) の光学伝播の後にアーティファクトの測定された表面特徴から得られたストレール比 (Strehl ratio) に基づいてメトリクス (metric) を近似的に最大化することによって処理して、ベストフォーカス平面までの距離を特定する方法が記載されており、本明細書ではこのプロセスを「焦点処理 (focus processing)」と呼ぶ。図 2 は、試験対象表面上で正しく焦点を合わせることの重要性を示している。具体的には、図 2 は、純粹に視覚的な焦点合わせ (左のグラフ) と、本明細書に記載され、前述の仮特許出願に記載されているようなデジタル焦点調整 (右のグラフ) の両方に基づく異なる空間周波数での干渉計システムの I T F 性能を比較している。

【 0 0 3 5 】

現在光学測定のために製造されている民生用の干渉計は、焦点の設定に視覚的な焦点合わせの方法を採用している。図 2 に示されるように、横方向分解能を高くするために新しいより高密度の撮像デバイス (imager) が干渉計に組み込まれているので、視覚的な焦点合わせは不十分である。本明細書に記載されている実施形態、例えば図 1 の干渉計及びその動作は、これらの機器を自動的に最適に合焦させるための方法とシステムを説明する。

【 0 0 3 6 】

カメラ 1 1 0 により記録される複数の干渉画像に基づき、電子プロセッサは、参照平坦部 (reference flat) 1 1 4 の参照面と被験物体 1 0 4 の前面により形成されるキャビティの「複素フィールド」を抽出し、複素フィールドは、被験物体の横方向座標 (例えば、 x 及び y 座標) の関数である。例えば、位相シフト干渉法 (「P S I : phase shifting interferometry」) システムの場合、 N 個の画像のシーケンスが N 回の異なる位相シフトについて記録される。光学波長のオーダーで、光学撮像システムの焦点深度よりはるかに小さい位相シフトは、被験物体を支持するステージ 1 1 7 上の圧電トランスデューサにより導入できる。この場合、複素フィールドは P S I 取得中に得られる位相シフトされたフレーム群から、以下のように特定される。

【 0 0 3 7 】

N フレーム P S I アルゴリズムの複素係数を C_j とし、 $j = 0 \dots N - 1$ である。様々な N フレーム P S I アルゴリズムが当該技術分野においてよく知られており、例えば本願と共通の所有者による米国特許第 5 , 4 7 3 , 4 3 4 号明細書及び同第 7 , 9 3 3 , 0 2 5 号明細書を参照されたく、両特許の内容の全体を参照により本願に援用する。画素 x に関する N 個の測定された強度を $I_{x,j}$ で表すものとする。すると、「複素フィールド」 F_x は：

【 0 0 3 8 】

【数 1】

$$F_x = \sum_j C_j I_{x,j} = A_x \exp[i\phi_x] \quad (1)$$

10

20

30

40

により表され、式中、画素 x の位相 φ_x は：

【 0 0 3 9 】

【 数 2 】

$$\varphi_x = \arg(F_x) = \text{atan}\left(\frac{\text{Im}[F_x]}{\text{Re}[F_x]}\right) \quad (2)$$

により求められ、

振幅 A_x は：

【 0 0 4 0 】

【 数 3 】

$$A_x = |F_x| = \sqrt{(\text{Im}[F_x])^2 + (\text{Re}[F_x])^2} \quad (3)$$

により求められる。

【 0 0 4 1 】

相対強度は $|F_x|^2 = A_x^2$ である。

焦点合わせを改善するためにあるキャビティに対応する光波面をソフトウェアで数学的に伝播させる (mathematically propagate) ために、新しい z' 平面へと伝搬されるのはこの複素フィールド F_x であり、 F_x' となり、そこから $\varphi_x' = \arg(F_x')$ の改善された焦点の位相マップを抽出できる。このような「光学伝播」は、 z 方向に沿ったフレネル伝播を使って具体化でき、これは例えば J. グッドマン (J. Goodman) 著、「フーリエ光学入門 (Introduction to Fourier Optics)」第 3 編、ロバーツ・アンド・カンパニ (Roberts and Co.) (2005 年) に記載されている。

【 0 0 4 2 】

例えば、 z_1 から z_2 へと伝搬する平面波に基づく分解及び再構成のステップは以下のとおりである：

a. z_1 での複素波面、 $U(x, y; z_1)$ をフーリエ変換し、角周波数スペクトル

【 0 0 4 3 】

【 数 4 】

$$A\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; z_1\right)$$

を得る。式中、 α 、 β は x 、 y に沿った方向余弦である。

【 0 0 4 4 】

b. 角周波数スペクトルに伝播カーネル

【 0 0 4 5 】

【 数 5 】

$$\exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}(z_2 - z_1)\sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2}\right)$$

を乗じる。式中 $z_2 - z_1$ は初期波面平面と伝搬した波面平面との間の距離を表す。

【 0 0 4 6 】

c. エバネッセント周波数を除く ($\alpha^2 + \beta^2 > 1$ となる周波数をゼロにする)。

d. 逆フーリエ変換し、新しい平面での複素波面 $U(x, y; z_2)$ を得る。

球面波の場合、上述の数学的理論は、伝搬中の倍率の変化を考慮するために、ジクラス (Sziklas) 座標変換を使って変更される。例えば、E. ジクラス (E. Sziklas) 及び A. シーグマン (A. Siegman) 著、「FFT 法を用いた回折計算 (Diffraction Calculations using FFT methods)」、米国電気電子学会議会論文 (Proc. IEEE) 412 - 410、

10

20

30

40

50

1974年を参照されたい。これで、すべての z がビームウェスト位置 (beam waist position) に関して測定される。したがって、 z_1 から z_2 への球面波の伝播に関するステップは以下のとおりである：

a. 座標は、 $x_{1,2}' = x_{1,2} / z_{1,2}$ 、 $y_{1,2}' = y_{1,2} / z_{1,2}$ 、及び

【0047】

【数6】

$$z_2' - z_1' = \frac{z_2 - z_1}{z_2 z_1}$$

10

として変換する。

【0048】

b. これらの変換により、伝搬は上述の平面波のシーケンスと同じように進む。

ある焦点設定の性能を特定するために、較正アーティファクトを干渉計システムにより測定し、複素フィールドを特定する。この複素フィールドを処理して、ITFを示すメトリクスを抽出することができる。さらに、複素フィールドは、他の焦点位置へとデジタル処理で伝播させることができ、同じメトリクスが計算される。異なる焦点位置の結果を比較することにより、最適な焦点位置を特定できる。上で言及し、その全体を参照によって本願に援用した米国仮特許出願第62/273,972号明細書には、この焦点性能メトリクスを計算するための各種の方法と技術が記載されている。あるキャビティに対応する波面のこのような「焦点処理」の一例は、波面に関する複素フィールド及び段差のある縁を有する較正アーティファクトに適用される以下のステップが含まれる：

20

1) 新しい z 平面への光学的伝播

2) 新しい z 平面内の各トレース (較正アーティファクトの段差のある縁の付近に中心を置き且つその縁と垂直な一連の画素) について：

a. 伝播したフィールドからトレース位相プロファイルを抽出する。

【0049】

b. このプロファイルを段差に適合させて、段差の高さと位相ティルト (phase tilt) (すなわち、全体としてのサンプルティルト (sample tilt)) を特定する。

30

c. 位相ティルトを除去し、適合により特定された段差の高さで割ることにより、トレースを正規化する。

【0050】

d. 正規化されたトレースを位置に関して微分し (例えば、最近傍差)、フーリエウィンドウを適用する (これによって、DC成分のばらつきによるエラーが最小化される)。

【0051】

e. トレースをその中心 (段差の位置) の周囲で循環シフトさせる。

f. 逆フーリエ変換する。

g. 各周波数成分における位相及び振幅を計算する。

40

【0052】

h. 加重線形適合 (重みは振幅から得られる) で位相勾配を計算する。

i. 位相勾配を取り除き、位相残差を求める。

j. トレースをその中心の周囲で循環シフトさせる (これによりステップ2. eのシフトが除かれる)。

【0053】

k. 位相残差及び各周波数での振幅を使って複素フィールドを再構成する (ステップe ~ jはトレースをデジタル処理して、段差のある縁をトレースの中央に、また光軸に対して垂直にする点に留意されたい)。

【0054】

50

3) すべての複素トレーススペクトルを平均する(複素値の平均化は確率ノイズを減らす傾向がある点に留意されたい。その結果は、アーティファクトの段差が完璧であると仮定すると、ステップ2.dの微分及びステップ2.cの正規化によるITFと等しい)。

【0055】

4) 平均スペクトルの少なくともある部分のスペクトル成分を加算する。

5) ステップ4の合計が最大となるまで、異なる焦点面についてステップ1~4を繰り返す。

【0056】

ベストフォーカス平面が見つかったら、表面フィールドをこの平面までフレネル伝播させて、ステップ2及び3を使って最終的なITFを計算する。

ステップ2に概要を記したシーケンスは1つの使用可能なシーケンスである点に留意されたい。その他のシーケンスも使用できる。しかしながら、概して、結果がその段差の位相トレンド除去スペクトルを生成することが好ましい。具体的には、撮像デバイスのサンプリングポイントに関する、段差のある縁の不整合を考慮することが重要である。

【0057】

この手順では、先験的に段差の高さがわかっている必要がない(それはトレースごとに測定される)。縁の横方向シフトはフーリエドメインでの位相ティルトと等しいため、位相ティルトを取り除くことにより各トレースでの縁の不整合がなくなる。最後に、複素トレーススペクトルを平均化することにより、1つのトレースのフーリエ振幅のランダムな変動が最小化される。

【0058】

スペクトル成分の合計を焦点メトリクスとして使用することは非常に有効であり、ストレーン比に大まかに関係する。図3は、名目上、焦点の合っている表面に関するフィールド伝播距離の関数としてのこのメトリクスの値を示す。ベストフォーカスの位置は、焦点メトリクスが最大となる位置により示される。

【0059】

例示的なフィゾー干渉計システムの焦点校正

図4は、図1の干渉計100のような干渉計の別の概略図である。干渉計は、被験物体平坦部(test object flat)(図4の「被験平坦部」)の表面トポロジを測定するためのものであり、フィゾー形状(Fizeau geometry)を有する。伝達平坦部(図4の「TF」)は、干渉基準としての役割を果たし、被験平坦部はTFからある距離だけ離して位置付けられ、整列されるため、干渉縞はカメラにおいて生成される。干渉計はまた、エンコーダ式電動焦点機構(図4の「焦点機構」)も含み、この機構はカメラ(又はその代わりに撮像光学系)を光軸に沿って移動させて、被験面の焦点を合わせる。コンピュータは、測定プロセスを制御し、データを分析し、結果を計算して提示する。図4の干渉計は、カメラにより記録された画像のシフトシーケンス内に位相シフトを導入するための圧電トランスデューサ(図4の「PZT位相モジュレータ」)をさらに含む。

【0060】

図4を参照し、TF-被験面のキャビティ長さ(G)がわかっていると仮定すると、被験平坦部が既知の特長を有する表面特徴(強度又は位相)を含む場合、PSIにより測定された複素フィールドの焦点処理(前述のとおり)で、被験面から物体空間内のベストフォーカス平面までの追加の距離を求めることができる。TF位置がシステム内で固定され、TF位置が単純にGとこの伝播距離との合計であるので、TFに関するベストフォーカス位置を測定することは好都合である。その物体空間位置は像空間内の撮像デバイスの位置と光学的に共役である。それゆえ、これら2つの共役位置を特定できる。上述の焦点処理は物体空間内で行われたが、例えば、物体空間内でのサンプリングがあまりわからない場合、これを像空間で行うことが有利であり得ることもある。

【0061】

したがって、この基本的な方法には、キャビティの長さGと、キャビティ内の光学的分布を説明する複素フィールドとがわかっている必要がある。しかしながら、キャビティ

10

20

30

40

50

の長さについての情報は先験的に特定でき、被験物体の z 位置の検査により特定でき、及び/又は例えば波長チューニング(詳しくは後述する)を使って干渉データ自体から特定できる。同様に、キャビティ内の光学的分布を示す複素フィールドの認識は、例えば一連の位相シフト干渉画像の処理によることを含め、カメラにより記録された複数の干渉画像から抽出される。この方法の様々な変形型が、焦点を見つけ、エンコーダ式焦点機構を較正し、焦点のずれた測定を補正するために使用される。

【0062】

焦点機構を使用できるまでは、フィゾー干渉計は、画像位置が特定の物体位置のベストフォーカスに対応するものを達成するように較正される。この較正は、像空間又は物体空間の何れかで行うことができる。図5は、較正アーティファクトを用いた物体空間内での較正を示している。コリメータがTFのすぐ左に位置付けられ、TFはフィゾー干渉計に固定されているため、TFは好都合の像/物体空間の境界の役割を果たし、左は像空間、右は物体空間である。

10

【0063】

図のように設置された較正アーティファクト(図5の「アーティファクト」)により、PSI測定でキャビティの複素フィールドが得られる。TF-アーティファクトキャビティ長さ(D_1)と物体空間内の空間サンプリングの両方がわかっていると仮定すると、アーティファクトの表面とベストフォーカスとの間の距離(物体空間内の D_2)は、キャビティの複素フィールドの焦点処理により得ることができる。すると、物体空間位置 $D_1 + D_2$ はエンコーダ位置Pにある撮像面と共役となる。焦点エンコーダ(focus encoder)は、撮像デバイス(すなわち、カメラ)を異なるエンコーダ位置に設置してこの測定を繰り返すことにより、測定空間全体について較正できる。この例示的な手順は、図6に概略的に示されている。具体的には、この手順において、カメラの複数の位置の各々について、被験物体のベストフォーカス位置は、伝搬距離の関数としての伝播複素フィールドから得られたITFに基づいてメリット関数を最適化することにより特定される。

20

【0064】

その代わりに、較正は、図7に示されるように像空間で行うことができる。この場合、試験アーティファクトの複数の位置の各々について、像空間内のベストフォーカス位置は、像空間複素フィールドの焦点処理により特定される。物体空間と像空間との間の変換は通常、物体空間内の試験アーティファクトの既知の特徴と像空間内のカメラの既知の画素間隔とに応じた測定画像に基づいて行うことができる。焦点エンコーダは、アーティファクトを異なる物体空間位置に設置してこの測定を繰り返すことによって、測定空間全体について較正できる。この例示的な手順は、図8に概略的に示されている。

30

【0065】

焦点測定機構

較正手法は、参照面とアーティファクト面との間のキャビティ長さ「 D_1 」がわかっていることを前提としている。さらに、較正及びその後の焦点補正を被験物体に適用するには、キャビティ長さ D_1 がわかっていることが必要である。この情報を得るために多くの可能な方法があるが、2つの選択肢を詳しく説明する。

【0066】

40

(1) ルーラ又はエンコーダ式ステージ(encoded stage)を使ったキャビティ長さの直接測定

ルーラ又は罫線入りステージ(ruled stage)は最も簡単な選択肢である。すると、キャビティ長さの情報は、システムに手動で入力できる。その代わりに、被験物体がその上に支持されるステージをエンコードし、光学リーダを含めることにより、干渉計システムはエンコーダを自動的に読み取ることができ、それによってキャビティ長さを手動で入力する必要がなくなる。例えば、このことは測位装置119が z 位置情報116を、カメラ110により撮影された干渉画像の処理において使用するために電子プロセッサ114に提供する上述の図1の干渉計に示されている。

【0067】

50

(2) 機械的 P S I の波長調整及び F T P S I 処理への置き換え

また別の実施形態において、機械的な位相シフトの代わりに、一連の位相シフト干渉画像に対応する位相シフトを導入するために波長調整が使用される。具体的には、干渉計の光源は波長調整レーザであり、一連の波長シフトについての一連の干渉画像がカメラによって記録され、それによって一連の位相シフトインタフェログラム (phase-shifted interferograms) を得るための代替的な非機械的手段が提供される。このような手法は、機械的 P S I と区別するために、スイープ波長 P S I (S W P S I : Swept Wavelength PSI) と呼ぶことができる。さらに、周波数変換 P S I (F T P S I : Frequency Transform PSI) 分析法を S W P S I データに適用して、キャビティ長さを正確に特定することができる。さらに、1つ又は複数の追加の表面を有し、相互及び参照面との干渉法のためのキャビティを作る試験サンプルの場合、F T P S I はこのようなキャビティのすべてについてのキャビティ長さを抽出できる。それに加えて、F T P S I 処理を用いる S W P S I は、改善された均質性測定を提供し、高速球面キャビティ (fast spherical cavities) を測定する際に、空間依存の位相シフトを排除することが実証されている。F T P S I は、本願と共通の所有者による米国特許第 6, 882, 432 号明細書及び同第 6, 924, 898 号明細書に記載されており、その内容の全体を参照によって本願に援用する。完全を期し、F T P S I を実装する S W P S I 干渉計の 1 つの実施形態を以下に説明する。

10

【0068】

S W P S I 干渉計システム及び F T P S I 処理の例

このような S W P S I 干渉計システム 900 の概略図が図 9 に示されている。システム 900 は、透明測定物体 901 (例えば、光学的平坦部 (optical flat) の前面 902 と後面 903 からの反射間の光学的干渉を測定するようになされている。測定される光学干渉は、それぞれ参照物体 910 及び 920 の表面 911 及び 921 からの追加の反射からの寄与を含む。例えば、参照物体 910 及び 920 は、十分に特徴付けされた表面を有する参照平坦部であってもよい。表面 902 は表面 921 からギャップ (gap) 925 により分離され、表面 903 は表面 911 から別のギャップ 915 により分離されている。システム 900 は、参照物体 910 及び 920 に関する物体 901 を位置決めするためのマウント (図示せず) と、コンピュータ 990 と、を含む。システム 900 はそれに加えて、調整可能光源 940 (例えば、レーザダイオード) と、光源 940 に接続された、その出力の光学周波数を調整するためのドライバ 945 と、ビームスプリッタ 950 と、コリメーティング光学系 (collimating optic) 930 と、撮像光学系 (imaging optic) 960 と、カメラ 970 と、カメラ 970 により検出された画像を保存するためのフレーム取込み装置 980 と、を含む。幾つかの実施形態において、1つの装置が制御及び測定機能の両方を実行できる (例えば、フレーム取込み装置 980 はコンピュータ 990 に組み込まれてもよい)。ドライバ 945 は、光源 940 の光学周波数 ν を、名目上の光学周波数 ν_0 を中心とする周波数範囲 ν にわたり調整する。

20

30

【0069】

動作中、コントローラ 990 は、ドライバ 945 に光源 940 から発せられた光の光学周波数を制御させ、フレーム取込み装置 980 に、明示された光学周波数の各々についてカメラ 970 により検出された光学干渉の画像を保存させる。フレーム取込み装置 980 は、画像の各々をコントローラ 990 に送信し、コントローラ 990 が、P S I アルゴリズムを使ってこれら进行分析する。幾つかの実施形態において、ドライバ 945 は、一連の干渉画像が記録される間に、光学 940 の光学周波数を線形に変調する。その代わりに、他の実施形態では、ドライバは光学周波数を個別のステップで、又は他の関数に応じて変調できる。

40

【0070】

動作中、光源 940 は、光学周波数 ν を有する光をビームスプリッタ 950 へと案内し、すると、ビームスプリッタ 950 は光をコリメーティングレンズ 930 に案内して、光が平面フィールドへとコリメートされるようにする。任意選択により、第二のビームスプリッタ (図示せず) は、光の一部を光学周波数モニタへと案内する。表面 921 は光の第

50

一の部分を反射させて、第一の参照波面 905 a を形成し、物体 901 の表面 902 及び 903 は光のその他の部分を反射させて、それぞれ波面 905 b 及び 905 c を形成する。表面 911 もまた、光の一部を反射させて、第二の参照波面 905 d を形成する。レンズ 930 及び 960 はすると、波面 905 a、905 b、905 c、及び 905 d をカメラ 970 上に結像させ、そこで波面 905 a、905 b、905 c、及び 905 d は光学干渉パターンを形成する。光学干渉パターンはまた、キャビティ 909 内のより高次反射からの寄与も含む。より高次反射には、例えば表面 921 で反射した光と、表面 902 でまず反射し、その後表面 921 で、その後再び表面 902 で反射した光との間の干渉も含まれる。

【0071】

10

以下の分析の中では、まず、基本的な 2 面干渉計キャビティ、例えば、表面 921 及び表面 902 により形成されるキャビティにおける光学周波数調整により生成される光学干渉パターンを考える。表面は、物理的ギャップ L により分離され、屈折率 n の媒質を含んでいる。例えば、ギャップは空気で満たすことができ、その屈折率は約 1 である。屈折率及びギャップ厚さの積 n L は光学厚さと呼ばれる（空気の場合、これは物理厚さ L と等しい）。表面 902 で反射した波数 k の光線と表面 903 で p 回反射した光線との間の総位相差 は：

【0072】

【数 7】

$$\varphi(x, y) = 2pknL(x, y) + \Phi = 2pnL(x, y) \frac{2\pi\nu}{c} + \Phi \quad (4)$$

20

により得られ、式中、 ν は光の光学周波数、 c は光の速度、 Φ は全体の定位相である。ギャップ L 及び位相 Φ の x 及び y 依存性は式 (4) の中に明確に示されており、位相内の空間的ばらつきを示している。幾つかの実施形態において、屈折率 n もまた x 及び y 依存性を有していてもよい。この位相ばらつきプロファイル、すなわち位相マップの抽出は、PSI において典型的に関心対象となる情報である。この明確な x 及び y 依存性は、明瞭にするために以下の式では省かれる。

【0073】

光源の光学周波数 ν を調整することにより、干渉計の位相ばらつき $\dot{\varphi}$ が生じ、これは光学周波数調整率

30

【0074】

【数 8】

$$\dot{\varphi}$$

及びキャビティの光路差 $2pnL$ に、

【0075】

【数 9】

$$\dot{\varphi} = \frac{4\pi pnL\dot{\nu}}{c} \quad (5)$$

40

のように依存し、式中、点 $\dot{}$ は時間に関する微分を表す。したがって、キャビティ干渉は周波数 f_c で変化し、これは：

【0076】

【数 10】

$$f_c = \frac{2pnL\dot{\nu}}{c} \quad (6)$$

で求められる。

【0077】

50

したがって、基本的キャビティにおいては、複数の反射イベントが一次（すなわち、 $p = 1$ ）周波数の高調波である周波数で干渉を生成する。

いくつかの実施形態において、周波数 f_c は、光学厚さ nL の名目上の値及び光学周波数調整率

【 0 0 7 8 】

【 数 1 1 】

\dot{v}

がわかっていれば、式（ 6 ）から特定できる。

【 0 0 7 9 】

10

それに加えて、周波数 f_c は、カメラ 970 により測定された干渉強度データを周波数ドメインに（例えば、フーリエ変換を使って）変換して、周波数スペクトルを生成し、スペクトル内の対応するピークの周波数を識別することによって識別できる。

【 0 0 8 0 】

f_c が特定されると、実質的に線形の周波数調整の場合、何れの基本的キャビティの干渉位相も干渉の離散フーリエ変換（DFT：Discrete Fourier Transform）の複素振幅から回復でき、これはそのキャビティの代表的な一次周波数 f_c において、

【 0 0 8 1 】

【 数 1 2 】

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(\text{DFT}(f_c))}{\text{Re}(\text{DFT}(f_c))} \right) \quad (7)$$

20

から評価され、

【 0 0 8 2 】

【 数 1 3 】

$$\text{DFT}(f_c) = \sum_{j=0}^{N-1} I_j W_j \exp[i \frac{2\pi j f_c}{f_s}] \quad (8)$$

30

である。

【 0 0 8 3 】

式（ 8 ）中、 I_j は光学周波数調整の j 番目の光学周波数で測定された強度のサンプルである。 N は取得した強度サンプルの総数である。 W_j は、フーリエウィンドウ W に関連付けられたサンプリング重みであり、 f_s はサンプリングレートである。フーリエウィンドウ W は通常、 f_c から離れた追加の周波数から、及び有限観察インターバル（finite observation interval）の影響からの位相評価への寄与を抑制するように選択される。フーリエウィンドウの例は、ハミングウィンドウ及びターキーウィンドウ（Tukey windows）が含まれる。ターキーウィンドウは、 f_c に近い 1 つ又は複数の追加の周波数ピークを有する実施形態において有利となり、それは、ウィンドウのテーパ幅を、 f_c でのこれらの追加の周波数を有効に重みゼロとするように選択できるからである。

40

【 0 0 8 4 】

すべての画素を通じた式（ 8 ）の $\text{DFT}(f_c)$ の複素値により、機械的 P S I 分析の式（ 1 ）と同様に、キャビティに対応する波面の「複素フィールド」が得られる。さらに、キャビティ長さ D_1 は式（ 6 ）の nL に対応し、これは抽出された一次（ $p = 1$ ）周波数 f_c 及び光学周波数調整率

【 0 0 8 5 】

【 数 1 4 】

\dot{v}

50

から計算できる。

【0086】

各カメラ画素の位相の抽出により、キャビティの位相分布 (x, y) (すなわち、位相マップ) が得られる。光学的厚さのばらつき (すなわち、相対的光学的厚さ) は、式 (4) から特定できる。さらに、参照面 921 の表面プロファイルがすでにわかっている場合、位相分布は表面 902 の表面プロファイルを特定するために使用できる。式 (7) 及び (8) により定義される位相抽出の結果から、位相モジュロ (phases modulo) 2 が生成されることがわかる。これらの位相アンビギュイティ (phase ambiguity) は位相マップの中で、当該技術分野において一般的に知られている従来の 2 位相アンビギュイティ・アンラッピング技術 (phase ambiguity unwrapping techniques) を用いて考慮できる。

10

【0087】

上述の位相抽出分析では、キャビティについての相対的情報 (すなわち、画素間のばらつき) が提供される。キャビティについての絶対的情報を特定することも可能である。式 (6) により、一次ピーク周波数 f_c 及び周波数調整率

【0088】

【数15】

$$\dot{\nu}$$

から絶対的光学厚さ nL を特定できる。しかしながら、この特定の精度は、 f_c 及び

20

【0089】

【数16】

$$\dot{\nu}$$

をどれだけ正確に特定できるかに依存する。さらに、絶対的光学厚さ nL の x 及び y 依存性は、一次周波数 f_c をカメラ 970 の各画素に対応する干渉強度データから別々に識別することによって特定できる。

【0090】

いくつかの実施形態において、(例えば、1つのカメラ画素に対応する) キャビティの小さい部分の高分解能周波数スペクトルは、 f_c を正確に特定するために得ることができる。これから、キャビティの光学的厚さの正確な値をキャビティのその部分について特定できる。別の測定において、キャビティ全体の低分解能周波数スペクトルを得ることができる。式 (7) 及び (8) を使って、この情報をキャビティの位相マップ及び光学的厚さのばらつきを特定するために使用できる。すると、キャビティ全体の光学的厚さは、光学的厚さのばらつきを、キャビティのその小さい部分について特定された光学的厚さに関連付けることによって特定できる。周波数スペクトルの分解能及びスペクトル分解限界に影響を与えるパラメータについては後述する。

30

【0091】

上記の分析は、物体 901 が不透明で、物体 901 の表面 902 からの反射のみを考慮すればよい状況について十分に説明する。しかしながら、幾つかの実施形態において、物体 901 は透明であり、表面 921、902、及び 903 からの反射を考慮すべきである。以下の分析では、参照平坦部 910 の表面 911 からの反射は無視できる。例えば、参照平坦部 910 は無反射ビームストップに置き換えることができる。ここで、表面 921 及び 902、921 及び 903、並びに 902 及び 903 にそれぞれ対応する 3つの基本的 2面キャビティがある。表面 921 及び表面 902 は距離 L (すなわち、ギャップ 925) で分離される。以下において、ギャップ 925 は空気で満たされて、「1」と等しい屈折率を有すると仮定する。物体 901 は厚さ T と屈折率 n を有する。干渉計が、すべての基本的キャビティが固有の OPD を有するように構成されると仮定する。すると、一次周波数が分光的に分離され、何れの基本的キャビティの干渉位相でも、式 (7) 及び (8) により求められる周波数の分解及び位相抽出を使って抽出できる。それゆえ、複数の基

40

50

本キャビティについての相対的及び絶対的光学厚さプロファイルの両方を同時に作成できる。

【0092】

各キャビティのピーク周波数 f_c を正確に特定するために（正確な絶対的光学的厚さ測定に必要）、関心対象の各ピークを分光的に分解する必要がある。フーリエ分解のスペクトル分解限界は観察時間に反比例するため、最小分解可能干渉周波数は、

【0093】

【数17】

$$f_{\min} = \frac{1+\mu}{\Delta t} = \frac{(1+\mu)f_s}{N} \quad (9)$$

10

となる。

【0094】

すべての一次周波数は、分解するのに f_{\min} だけ分離させるべきである。パラメータ μ が通常の方法で導入される。理論的分解限界は $\mu = 0$ のときに生じるが、現実には、最小分解可能周波数は、装置の欠陥の可能性と位相エラーによる影響の大きさを考慮するために、幾分大きくすべきである。

【0095】

$f_c = f_{\min}$ と設定すると、式(6)は、 v_{\max} の調整範囲の最小分解可能光路差が、

20

【0096】

【数18】

$$\Gamma = \frac{c(1+\mu)}{\Delta v_{\max}} \quad (10)$$

で求められることを示唆している。

【0097】

これは、例えば $\mu = 0$ の場合に 80 ギガヘルツの最大調整範囲について 3.75 ミリメートルとなる。主要キャビティギャップは、一次周波数を分離するために、式(10)で示唆される限界より大きくすべきである。さらに、一次ピーク周波数を正確に特定したい場合、調整範囲は式(10)により要求されるものより大きくなければならない。

30

【0098】

ここで、適用される分析方法の概要を記す：干渉計キャビティを構成して、各基本的キャビティの固有のOPDを作成し、それによって、式(6)で固有の干渉周波数が確実に得られるようにする。次に、インタフェログラム(interferogram)は、光学周波数が増加される間にサンプリングされる。すると、各画素で記録されるインタフェログラムは、フーリエ変換等の周波数変換で分光的に分解されてよく、基本的キャビティに対応する一次周波数ピークは変換されたデータから識別される。

【0099】

幾つかの実施形態において、式(8)を使用した特定の一次周波数での周波数変換がデータに適用されて、各基本的キャビティの位相マップが別々に（式(7)を使って）評価される。位相マップは、例えばキャビティ表面の1つ又は複数の表面プロファイル、及び/又は基本的キャビティの1つ又は複数の相対的な光学厚さ等の情報を特定するために使用できる。

40

【0100】

その代わりに、又はそれに加えて、ピーク周波数の値そのものは、調整範囲が十分な分解能を提供すれば、対応するキャビティの絶対的な光学厚さを特定するために使用できる。各キャビティの光学厚さ及び光学厚さのばらつきについての情報を組み合わせて、各キャビティの完全な光学厚さプロファイルを特定できる。

【0101】

50

較正された焦点機構を用いた焦点の設定

焦点機構が較正されると、システムは、たとえ被験物体がそれ以外に特徴を持たず、それによってカメラでの被験物体の単純な観察では相対的な焦点についての情報が得られない場合であっても、較正空間内で被験物体の何れの位置にも焦点を合わせることができる。図 10 に示されているように、関心対象の被験面が干渉計の中に置かれ、キャビティ長さ D_1 が（例えば、エンコーダ式ステージの手動で若しくは自動的検査により、又は $SWPSI$ 干渉計の場合には $FTPSI$ 処理によって）特定される。 D_1 を入力として使用し、較正を記憶した電子プロセッサは、較正に基づいてベストフォーカスの画像位置 P を特定し、焦点機構に撮像デバイス（すなわち、カメラ）を位置 P へと駆動させて、被験面の焦点が合うようにさせる。すると、システムは焦点の合った表面を測定する。この手順のステップが図 11 に概略的に示されている。

10

【0102】

較正された焦点機構を用いた焦点ずれの補正

また別の実施形態において、焦点のずれた状態で測定された被験面は、図 12 に示されるように補正できる。関心対象の被験面が干渉計内に設置され、キャビティ長さ D_1 が特定され、 PSI （又は $FTPSI$ ）測定により（焦点の合っていない）複素フィールドが得られる。 D_1 及び較正を用いて、ベストフォーカスの物体位置が特定され（ $D_1 + D_2$ ）、システムは、例えば前述のフレネル伝播を使用して、複素フィールドを距離 D_2 にわたりその位置までデジタル処理で伝播させる。すると、被験面の位相情報は伝搬されたフィールドから回復される。この手順のステップは図 13 に概略的に示されている。

20

【0103】

$SWPSI$ 及び $FTPSI$ を用いた複数のキャビティ形状における焦点合わせ

複数の光学キャビティを生じさせた被験物体の複数のキャビティ長さを正確に特定する $FTPSI$ の能力は、適正な焦点合わせという本明細書に記載の問題に関係が深い。具体的には、関心対象の 1 つの表面に物理的に焦点があっても、関心対象の 1 つ又は複数の他の被験面は焦点が合っていないことが必然的に推測される。しかしながら、 $SWPSI$ 干渉計と $FTPSI$ を使用することにより、1 つ又は複数のキャビティに対応する複素フィールドをベストフォーカス位置までデジタル処理で伝播させることができ、それによってその後の位相抽出を、最適な焦点合わせにより実現する改善された横方向分解能で実行できる。参照面又は、複数の面がある場合は複数の参照面が焦点効果のスケールでは平滑であると仮定される点に留意されたい。

30

【0104】

上で、また先に引用し、参照によって本願に援用する本願と共通の所有者の米国特許第 6,882,432 号明細書及び同第 6,924,898 号明細書に記載されているように、 $SWPSI$ 及び $FTPSI$ を平行な光学的平坦部の各種のキャビティ形状に適用して、平坦部の両方の表面についての個別の測定値、光学的厚さ、物理的厚さ、及び均質性を 1 回の取得から提供できる。アーティファクトは光軸上の異なる位置を占めるため、測定中にすべての表面を焦点の合った状態にすることは不可能である。本明細書に記載の技術は、この問題に対処できる。前面 S_1 及び平坦部の光学的厚さ nT （物理的厚さ $T \times$ 光学指数 n ）の測定に使用される、図 14 に示される 3 面フィゾー形状を考える。撮像デバイスは、 P で示されるある点に位置決めされ、すると、焦点機構の較正から特定された共役焦点位置は BF となる。 TF から BF までの距離（ L ）は、 P 及び焦点機構の較正から特定され、この距離 D_1 及び nT は $FTSPI$ 処理又は他の何れかの手段から見いだされる。 $TF : S_1$ キャビティからの複素フィールドは距離 $L - D_1$ にわたってデジタル処理で伝播されて、 S_1 表面の焦点調整が行われ、 $TF : S_2$ キャビティのフィールドは距離 $L - D_1 - nT$ にわたってデジタル処理で伝播されて、 S_2 表面の焦点調整が行われる。この手順のステップは、図 15 に概略的に示されている。

40

【0105】

照明波面が被験平坦部（test flat）を通過する際、この照明波面は表面及び指数不均質性により変調される。波面はさらに、それが下流に伝播する際に回折する。被験平坦部

50

の下流の表面（S2表面等）の焦点ずれを補正する場合、上述の方法の有効性は、照明波面への被験平坦部の寄与の空間周波数成分に依存する。被験平坦部からの波面の寄与の空間周波数成分が十分に小さく、回折変化が小さい場合、焦点ずれの補正は有効となる。そうでない場合、発生する波面によるエラーが生じる可能性がある。

【0106】

また別の実施形態において、図16に示される4面フィゾー形状が光学的平坦部の表面S1及びS2の両方、物理的厚さ及び光学的厚さ、並びに均質性（空のキャビティの測定と組み合わせた場合）を測定するために使用される。例えば、撮像デバイスが、焦点機構の較正から特定されたその共役焦点位置がBFである、ある点Pに位置決めされるようにする。TFからBFまでの距離Lは、P及び焦点機構の較正から特定され、D1、D2、及びnTはFTSPI処理により見いだされる。TF：S1キャビティからの複素フィールドが距離L-D1にわたりデジタル処理で伝播されて、S1表面の焦点調整が行われる。S2：RFフーリエピークから直接的に計算された複素フィールドはTFに関連付けられない。S2：RFキャビティの焦点調整を適正に行うために、構成S2：RF=TF：RF-TF：S2が使用され、TF：Xキャビティの各々は、これらがTFに関連付けられるため、別々に焦点調整される。TF：S2キャビティフィールドからの複素フィールドは距離L-D1-Tnにわたりデジタル処理で伝播されて、S2表面の焦点調整が行われ、TF：RFキャビティフィールドからの複素フィールドは距離L-D1-Tn-D2にわたりデジタル処理で伝播されて、TF表面の焦点調整が行われる。すると、焦点調整されたフィールドの各々から得られた2つの面が差し引かれて、S2：RFキャビティからの焦点の合った表面が得られる。その代わりに、同等に、表面は1つのフィールドともう一方の共役との積からも得ることができる。前述のように、RF：S2キャビティの焦点ずれ補正は、被験平坦部からの照明波面への寄与による影響を受けやすい。この手順のステップは、図17に概略的に示されている。

【0107】

範囲

本明細書に記載の焦点補正方式は、多くの異なる種類の干渉計に応用できる。例えば、干渉計は以下の種類、すなわちフィゾー、トワイマン・グリーン、ミロー、リニク、マイケルソン、シャリング、又は表面若しくは波面の断面プロファイル若しくはフル3Dイメージングのための一般的な種類の干渉計の他の何れかのうちの何れとすることもできる。また、本明細書に記載の焦点補正は、干渉計が採用する測定の種類、すなわち表面形状、波形、粗さ等の何れのためのものかに左右されない。さらに、焦点補正は試験対象表面と基準との間の干渉が観察されるかぎり、光源波長又はコヒーレンス特性に関係なく、干渉計に適用できる。さらに、特にSWPSI及びFTPSIを使用する場合、焦点補正は、適当な光学距離が測定されるか、それ以外に特定されるかぎり、何れの数々の表面又はキャビティに係る測定にも適用できる。

【0108】

データ処理要素の特徴は、デジタル電子回路において、又はコンピュータハードウェア、ファームウェア、又はこれらの組合せにおいて実装できる。特徴は、情報キャリアの中、例えば機械可読記憶装置の中に有形に具現化された、プログラム可能プロセッサにより実行されるためのコンピュータプログラム製品において実装でき、特徴は、プログラム可能なプロセッサが命令のプログラムを実行して入力データにより動作し、出力を生成することにより記載の実装の機能を実行することによって実行できる。記載の特徴は、データ記憶システム、少なくとも1つの入力デバイス、及び少なくとも1つの出力デバイスからデータ及び命令を受信し、それにデータ及び命令を送信するために連結された少なくとも1つのプログラム可能プロセッサを含むプログラム可能なシステム上で実行可能な1つ又は複数のコンピュータプログラムで実装できる。コンピュータプログラムは命令群を含み、この命令群は直接又は間接に、コンピュータにおいて特定の行動を実行するか、又は特定の結果をもたらすために使用できる。コンピュータプログラムは、コンパイル型又はインタプリト型言語を含む何れの形態のプログラミング言語でも書くことができ、スタンド

アロン型プログラムとして、又はモジュール、コンポーネント、サブルーチン、若しくはコンピューティング環境での使用に適したその他のユニットを含む、何れの形態でもデプロイされる (deployed)。

【0109】

命令のプログラムを実行するのに適したプロセッサには、例えば汎用及び特定用途マイクロプロセッサの両方並びにあらゆる種類のコンピュータの複数のプロセッサの1つが含まれる。一般に、プロセッサはリードオンリメモリ又はランダムアクセスメモリ又はそれらの両方から命令及びデータを受信する。コンピュータは、命令を実行するためのプロセッサと、命令及びデータを記憶するための1つ又は複数のメモリと、を含む。一般に、コンピュータはまた、データファイルを記憶するための1つ又は複数の大容量記憶装置を含むか、又はそれと通信するように動作的に連結され、このような装置は、内蔵ハードディスク及びリムーバブルディスク等の磁気ディスク、磁気光ディスク、及び光ディスクが含まれる。コンピュータプログラム命令及びデータを有形に具現化するのに適した記憶装置は、あらゆる形態の不揮発性メモリを含み、これには例えばEPROM、EEPROM、及びフラッシュメモリデバイス等の半導体メモリデバイス、内蔵ハードディスク及びリムーバブルディスク等の磁気ディスク、磁気光ディスク、並びにCD-ROM及びDVD-ROMディスクが含まれる。プロセッサ及びメモリは、ASIC (特定用途集積回路) により補足され、又はその中に組み込まれることができる。

10

【0110】

ユーザとの対話を提供するために、特徴は、CRT (ブラウン管)、LCD (液晶ディスプレイ) モニタ、e インクディスプレイ、若しくはユーザに対して情報を表示するためのその他の種類のディスプレイ等の表示装置並びに、キーボード及び、それによってユーザがコンピュータに入力を提供できるマウス又はトラックボール等のポインティングデバイスを有するコンピュータで実装できる。

20

【0111】

本明細書には多くの具体的な実装の詳細が含まれているが、これらは何れの発明又は特許請求されているものの範囲も限定するものとは解釈されるべきではなく、特定の発明の特定の実施形態に特有の特徴を説明するものと解釈されるべきである。

【0112】

本明細書において別々の実施形態に関して記載されている特定の特徴はまた、1つの実施形態に関連しても実装できる。反対に、1つの実施形態に関して記載されている各種の特徴はまた、複数の実施形態において別々にも、又は何れの適当な副結合においても実装できる。

30

【0113】

さらに、特徴は特定の組合せで機能すると上述され、さらには当初はそのように特許請求されている可能性があるが、特許請求されている組合せからの1つ又は複数の特徴は、場合によってはその組合せから削除でき、特許請求された組合せは副結合又は副結合の変形型に向けられてもよい。

【0114】

同様に、動作は図中で特定の順序で描かれているが、これは、そのような動作が図に示された特定の順序、又は逐次的な順序で実行されること、及び所望の結果を達成するには図示されたすべての動作が実行されることを要求していると理解すべきではない。特定の状況では、マルチタスキング及び平行処理が有利である可能性がある。さらに、前述の実施形態の中の各種のシステム構成要素の分離は、すべての実施形態においてそのような分離を要求していると理解されるべきではなく、記載されているプログラム構成要素及びシステムは一般に、1つのソフトウェア製品と一緒に統合し、又は複数のソフトウェア製品にパッケージできると理解されるべきである。

40

【0115】

それゆえ、主旨の特定の実施形態が説明されている。他の実施形態は、以下の特許請求の範囲の範囲内に含まれる。幾つかのケースでは、特許請求の範囲に記載された動作は異

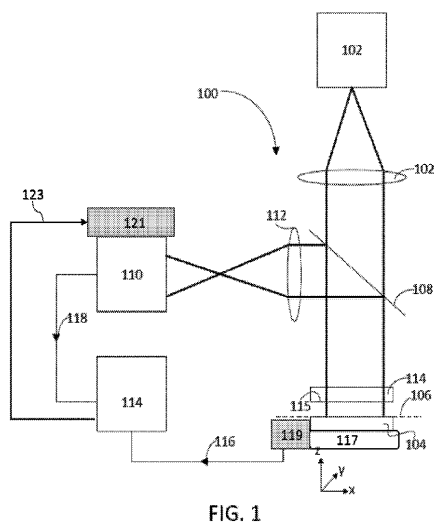
50

なる順序で実行でき、それでも所望の結果は得られる。さらに、添付の図面に描かれているプロセッサは、所望の結果を達成するために、図示された特定の順序、又は逐次的順序を必ずしも要求していない。特定の実装においては、マルチタスキング及び平行処理が有利である可能性がある。

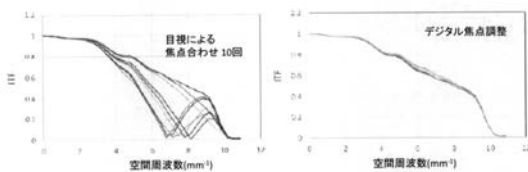
【 0 1 1 6 】

本発明の複数の実施形態について説明した。しかしながら、本発明の主旨と範囲から逸脱することなく、様々な変更が加えられてもよいことがわかるであろう。したがって、他の実施形態も以下の特許請求の範囲の範囲内に含まれる。

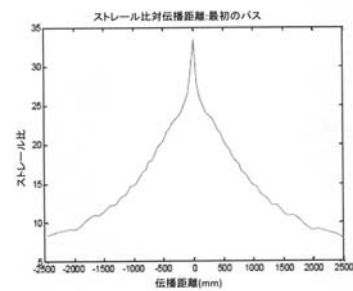
【 図 1 】



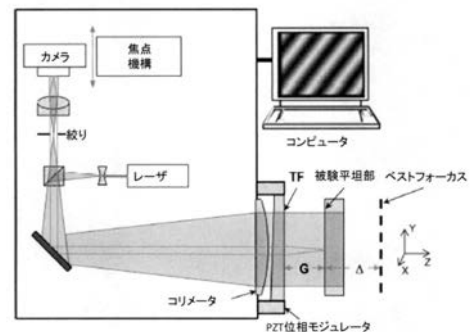
【 図 2 】



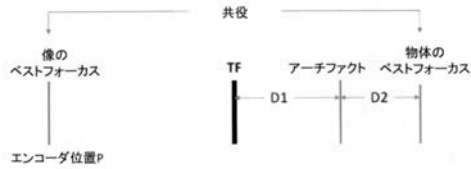
【 図 3 】



【 図 4 】



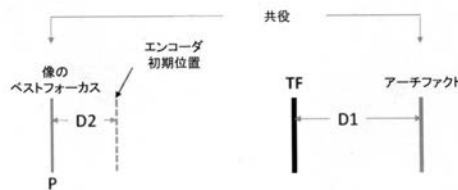
【図 5】



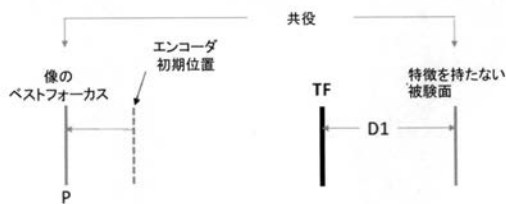
【図 6】



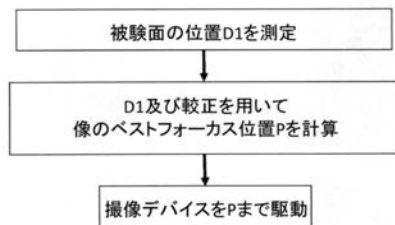
【図 7】



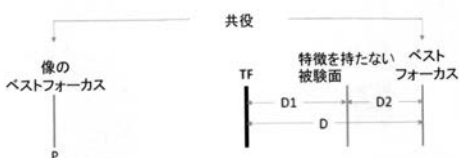
【図 10】



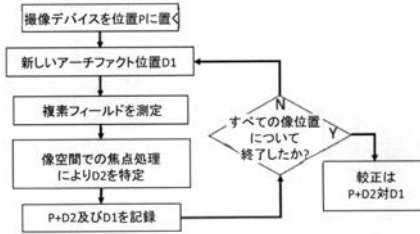
【図 11】



【図 12】



【図 8】



【図 9】

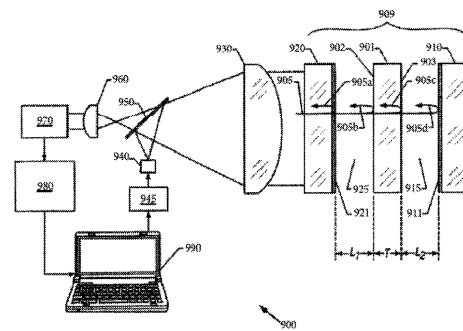
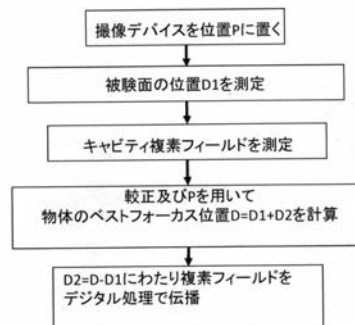
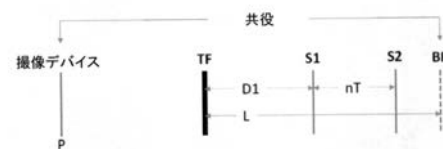


FIG. 9

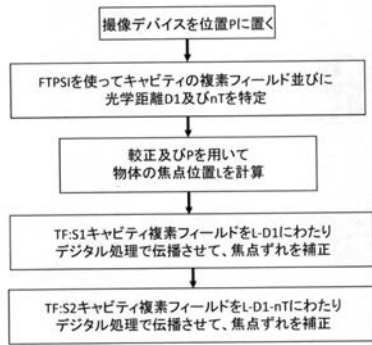
【図 13】



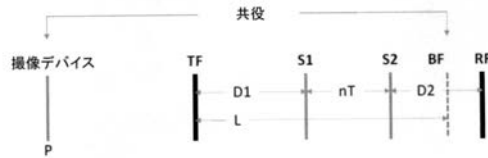
【図 14】



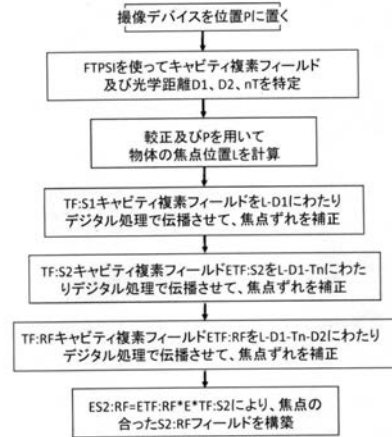
【図 15】



【図 16】



【図 17】



【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International application No. PCT/US2017/060623
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
G01B 9/02(2006.01)i, G01N 21/45(2006.01)i, G01N 21/77(2006.01)i		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G01B 9/02; G02B 21/00; G01B 11/02; G02B 21/36; G01N 21/45; G01N 21/77		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Korean utility models and applications for utility models Japanese utility models and applications for utility models		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) eKOMPASS(KIPO internal) & Keywords: calibration, interferometer, position, ruled stage and artifact		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US 2003-0160968 A1 (DECK, LESLIE L.) 28 August 2003 See paragraphs [0010]-[0039], [0065]-[0089], [0156]-[0161] and figure 1.	1-24
Y	US 2006-0114475 A1 (DE GROOT, PETER J. et al.) 01 June 2006 See paragraphs [0012]-[0016], [0084], [0108] and figures 3-4, 19(A)-19(B).	1-24
Y	US 2015-0192769 A1 (ZYGO CORPORATION) 09 July 2015 See paragraphs [0014], [0120].	9, 11, 13, 20
A	US 2013-0265585 A1 (FELD, DAVID et al.) 10 October 2013 See paragraphs [0108]-[0117], [0135]-[0137] and figures 1, 6(A)-6(B).	1-24
A	US 2013-0155413 A1 (LIESENER, JAN et al.) 20 June 2013 See paragraphs [0252]-[0256], [0286]-[0292] and figures 11, 26-27.	1-24
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p> <p>"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>"&" document member of the same patent family</p>		
Date of the actual completion of the international search 06 February 2018 (06.02.2018)		Date of mailing of the international search report 06 February 2018 (06.02.2018)
Name and mailing address of the ISA/KR International Application Division Korean Intellectual Property Office 189 Cheongsu-ro, Seo-gu, Daejeon, 35208, Republic of Korea Facsimile No. +82-42-481-8578		Authorized officer LEE, Se Gyoung Telephone No. +82-42-481-8740

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No.

PCT/US2017/060623

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2003-0160968 A1	28/08/2003	AT 445140 T	15/10/2009
		AU 2002-353038 A1	23/06/2003
		AU 2002-353038 A8	23/06/2003
		AU 7816201 A	18/02/2002
		EP 1307702 A1	07/05/2003
		EP 1307702 B1	07/10/2009
		EP 1451524 A2	01/09/2004
		EP 1451524 B1	20/04/2011
		HK 1055788 A1	24/12/2009
		JP 2004-510958 A	08/04/2004
		JP 2005-512075 A	28/04/2005
		JP 4250530 B2	08/04/2009
		JP 4951189 B2	13/06/2012
		KR 10-0746515 B1	06/08/2007
		KR 10-0858447 B1	12/09/2008
		KR 10-0941928 B1	11/02/2010
		KR 10-2003-0051613 A	25/06/2003
		KR 10-2004-0074069 A	21/08/2004
		KR 10-2008-0042187 A	14/05/2008
		TW 200303979 A	16/09/2003
		TW I269022 B	21/12/2006
		US 2002-0109851 A1	15/08/2002
		US 6882432 B2	19/04/2005
		US 6924898 B2	02/08/2005
		WO 2002-012825 A1	14/02/2002
		WO 2002-012825 A9	03/04/2003
		WO 2003-050470 A2	19/06/2003
		WO 2003-050470 A3	17/07/2003
US 2006-0114475 A1	01/06/2006	CN 1397908 A	19/02/2003
		EP 1278374 A2	22/01/2003
		EP 1278374 A3	22/12/2004
		EP 1278374 B1	16/07/2008
		EP 1436570 A1	14/07/2004
		EP 1436570 B1	23/06/2010
		JP 2003-032453 A	31/01/2003
		JP 2005-505771 A	24/02/2005
		JP 2010-025950 A	04/02/2010
		JP 4856358 B2	18/01/2012
		KR 10-0488183 B1	10/05/2005
		US 2003-0011784 A1	16/01/2003
		US 2003-0025815 A1	06/02/2003
		US 2004-0239947 A1	02/12/2004
		US 6714307 B2	30/03/2004
		US 7030996 B2	18/04/2006
		US 7126698 B2	24/10/2006
		WO 2003-033994 A1	24/04/2003
US 2015-0192769 A1	09/07/2015	CN 106030241 A	12/10/2016

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No.

PCT/US2017/060623

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2013-0265585 A1	10/10/2013	EP 3092459 A1	16/11/2016
		JP 2017-505434 A	16/02/2017
		KR 10-2016-0107267 A	13/09/2016
		TW 201539031 A	16/10/2015
		TW 201643501 A	16/12/2016
		TW 1553342 B	11/10/2016
		US 9798130 B2	24/10/2017
		WO 2015-105980 A1	16/07/2015
US 2013-0155413 A1	20/06/2013	AU 2002-357307 A1	30/06/2003
		CA 2469817 A1	26/06/2003
		CA 2469817 C	14/02/2012
		CA 2529942 A1	06/01/2005
		CN 100590421 C	17/02/2010
		CN 1826518 A	30/08/2006
		EP 1456600 A1	15/09/2004
		EP 1456600 B1	12/02/2014
		EP 1644720 A2	12/04/2006
		JP 2005-513429 A	12/05/2005
		JP 2007-524075 A	23/08/2007
		JP 2013-152243 A	08/08/2013
		JP 4550423 B2	22/09/2010
		JP 5416883 B2	12/02/2014
		US 2003-112444 A1	19/06/2003
		US 2005-057756 A1	17/03/2005
		US 2005-105097 A1	19/05/2005
		US 2010-094135 A1	15/04/2010
		US 6934035 B2	23/08/2005
		US 7365858 B2	29/04/2008
		US 7557929 B2	07/07/2009
		US 8334982 B2	18/12/2012
		US 9528817 B2	27/12/2016
		WO 2003-052345 A1	26/06/2003
		WO 2005-001445 A2	06/01/2005
		WO 2005-001445 A3	15/12/2005
		CN 102057269 A	11/05/2011
		CN 102057269 B	13/08/2014
		EP 2238430 A2	13/10/2010
		EP 2238430 B1	30/03/2016
		EP 2238430 B9	13/07/2016
		JP 2011-508241 A	10/03/2011
		JP 5536667 B2	02/07/2014
		KR 10-1191842 B1	18/10/2012
		KR 10-1530898 B1	23/06/2015
		KR 10-2010-0094584 A	26/08/2010
		KR 10-2012-0053043 A	24/05/2012
		TW 201037267 A	16/10/2010
		TW 201129775 A	01/09/2011
		TW I425184 B	01/02/2014

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No.

PCT/US2017/060623

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
		TW I425188 B	01/02/2014
		US 2010-0128276 A1	27/05/2010
		US 2010-0128278 A1	27/05/2010
		US 2010-0128280 A1	27/05/2010
		US 2010-0128283 A1	27/05/2010
		US 7978338 B2	12/07/2011
		US 8004688 B2	23/08/2011
		US 8120781 B2	21/02/2012
		US 8379218 B2	19/02/2013
		US 8902431 B2	02/12/2014
		WO 2010-062853 A2	03/06/2010
		WO 2010-062853 A3	19/08/2010
		WO 2010-062860 A2	03/06/2010
		WO 2010-062860 A3	26/08/2010

フロントページの続き

(81)指定国・地域 AP(BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), EP(AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT

(72)発明者 デック、レスリー エル.

アメリカ合衆国 06455-0448 コネチカット州 ミドルフィールド ローレル ブルックロード 21

Fターム(参考) 2F064 AA09 CC01 EE05 FF01 GG11 GG22 GG53 HH08 JJ01