

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5354675号
(P5354675)

(45) 発行日 平成25年11月27日(2013.11.27)

(24) 登録日 平成25年9月6日(2013.9.6)

(51) Int.Cl.		F I	
GO 1 B 11/00	(2006.01)	GO 1 B 11/00	G
GO 1 B 11/16	(2006.01)	GO 1 B 11/16	G
GO 1 B 9/025	(2006.01)	GO 1 B 9/025	

請求項の数 9 (全 22 頁)

(21) 出願番号	特願2009-210972 (P2009-210972)	(73) 特許権者	504145283
(22) 出願日	平成21年9月11日(2009.9.11)		国立大学法人 和歌山大学
(65) 公開番号	特開2011-59017 (P2011-59017A)		和歌山県和歌山市栄谷930番地
(43) 公開日	平成23年3月24日(2011.3.24)	(74) 代理人	100147485
審査請求日	平成24年9月10日(2012.9.10)		弁理士 杉村 憲司
特許法第30条第1項適用	(1) 平成21年8月5日	(74) 代理人	100143568
公開 発行者: 日本実験力学会 日本実験力学会2009年度年次講演会 講演論文集 第237ページ~第240ページ	(2) 平成21年8月5日公開 主催者: 日本実験力学会 日本実験力学会2009年度年次講演会で使用したスライドの写し		弁理士 英 貢
		(72) 発明者	藤垣 元治
			和歌山県和歌山市栄谷930
		(72) 発明者	森本 吉春
			大阪府泉佐野市羽倉崎2丁目1番4-804号
		(72) 発明者	征谷 明大
			和歌山県和歌山市栄谷930

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 変位分布計測方法、装置及びプログラム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

off-axis 光学系における位相シフトデジタルホログラフィにより計測物体の変形による変位を計測する変位分布計測方法であって、
 所定の波長のレーザ光を放射するステップと、
 放射された前記レーザ光を、前記計測物体に照射するための物体光と、前記物体光との干渉縞を生成するための参照光とに分離するステップと、
 前記参照光の位相を所定量だけシフトさせるステップと、
 光軸が互いに平行である所定の数の撮像素子の各々に入射するために前記位相シフトされた参照光を複数に分岐するステップと、
 前記計測物体により散乱された前記物体光と、分岐された各参照光との干渉縞を各撮像素子により撮像するステップと、
 各撮像素子により撮像された前記干渉縞の各々から前記計測物体の再生像の複素振幅分布を算出し、前記計測物体の変形前後の当該複素振幅分布の位相差から前記計測物体の変位分布を計測するステップと、
 を含むことを特徴とする変位分布計測方法。

【請求項2】

off-axis 光学系における位相シフトデジタルホログラフィにより計測物体の変形による変位を計測する変位分布計測方法であって、
 所定の波長のレーザ光を放射するステップと、

放射された前記レーザー光を、前記計測物体に照射するための物体光と、前記物体光との干渉縞を生成するための参照光とに分離するステップと、

前記物体光の位相を所定量だけシフトさせるステップと、

光軸が互いに平行である所定の数の撮像素子の各々に入射するために前記参照光を複数に分岐するステップと、

位相シフトされ、前記計測物体により散乱された前記物体光と、分岐された各参照光との干渉縞を各撮像素子により撮像するステップと、

各撮像素子により撮像された前記干渉縞の各々から前記計測物体の再生像の複素振幅分布を算出し、前記計測物体の変形前後の当該複素振幅分布の位相差から前記計測物体の変位分布を計測するステップと、

を含むことを特徴とする変位分布計測方法。

10

【請求項 3】

得られた前記計測物体の変位分布からひずみ分布を求めるステップを更に含むことを特徴とする、請求項 1 又は 2 に記載の変位分布計測方法。

【請求項 4】

前記撮像素子により撮像された前記干渉縞の各々に対して、当該干渉縞から得られた再生像の位置を調整するステップを更に含むことを特徴とする、請求項 1 ~ 3 のいずれか一項に記載の変位分布計測方法。

【請求項 5】

off-axis 光学系における位相シフトデジタルホログラフィにより計測物体の変形による変位を計測する変位分布計測装置であって、

所定の波長のレーザー光を発生する光照射手段と、

発生された前記レーザー光を前記計測物体に照射するための物体光と、前記物体光との干渉縞を生成するための参照光とに分離する分離手段と、

前記参照光の位相を所定量だけシフトさせる位相シフト手段と、

光軸が互いに平行である所定の数の撮像素子の各々に入射するために前記位相シフトされた参照光を複数に分岐する分岐手段と、

前記計測物体により散乱された前記物体光と、分岐された各参照光との干渉縞を各撮像素子により撮像する複数の撮像素子と、

各撮像素子により撮像された前記干渉縞の各々から前記計測物体の再生像の複素振幅分布を算出し、前記計測物体の変形前後の当該複素振幅分布の位相差から前記計測物体の変位分布を算出する変位分布算出手段と、

を備えることを特徴とする変位分布計測装置。

20

30

【請求項 6】

off-axis 光学系における位相シフトデジタルホログラフィにより計測物体の変形による変位を計測する変位分布計測装置であって、

所定の波長のレーザー光を発生する光照射手段と、

発生された前記レーザー光を前記計測物体に照射するための物体光と、前記物体光との干渉縞を生成するための参照光とに分離する分離手段と、

前記物体光の位相を所定量だけシフトさせる位相シフト手段と、

光軸が互いに平行である所定の数の撮像素子の各々に入射するために前記位相シフトされた参照光を複数に分岐する分岐手段と、

位相シフトされ、前記計測物体により散乱された前記物体光と、分岐された各参照光との干渉縞を各撮像素子により撮像する複数の撮像素子と、

各撮像素子により撮像された前記干渉縞の各々から前記計測物体の再生像の複素振幅分布を算出し、前記計測物体の変形前後の当該複素振幅分布の位相差から前記計測物体の変位分布を算出する変位分布算出手段と、

を備えることを特徴とする変位分布計測装置。

40

【請求項 7】

得られた前記計測物体の変位分布からひずみ分布を求めるひずみ分布解析手段を更に備

50

えることを特徴とする、請求項 5 又は 6 に記載の変位分布計測装置。

【請求項 8】

前記撮像素子により撮影された前記干渉縞の各々に対して、当該干渉縞から得られた再生像の位置を調整する再生像位置調整手段を更に備えることを特徴とする、請求項 5 ~ 7 のいずれか一項に記載の変位分布計測装置。

【請求項 9】

請求項 5 ~ 8 のいずれか一項に記載の変位分布計測装置における前記変位分布算出手段として構成するコンピュータに、

各撮像素子により撮像された前記干渉縞の各々から前記計測物体の再生像の複素振幅分布を算出するステップと、

前記計測物体の変形前後の当該複素振幅分布の位相差から前記計測物体の変位分布を算出するステップと、

を実行させるための変位分布計測プログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、変位分布計測方法、装置及びプログラムに関し、特に、位相シフトデジタルホログラフィにより複数台の撮像素子を使用して計測物体の変位分布を計測する変位分布計測方法、装置及びプログラムに関するものである。

【背景技術】

【0002】

機械構造物の応力・変位・ひずみ計測を高精度に行うことは、多くの産業分野における重要な課題である。特に、橋梁などのインフラ構造物の欠陥検査を効率よく行うことは重要であり、高速かつ効率のよい変位分布やひずみ分布（以下、総括して「変位分布」と称する）を計測する技法の開発が求められている。

【0003】

位相シフトデジタルホログラフィ（Phase-shifting Digital Holography, PSDH）は、非接触かつ表面処理なしに計測物体の微小な変位分布やひずみ分布の計測ができる新しい方法である。この方法では、計測物体の変形前後の干渉縞を CCD カメラにより撮像してコンピュータにより再生し、フィルムを現像する工程を省略できるため、計測物体表面の変位量等を高速に計測することができる（例えば、非特許文献 1 参照）。

【0004】

位相シフトデジタルホログラフィによる変位分布計測装置は、小型化により外部からの振動の影響を受けにくくなるため、光学実験台上でなくても屋外にて計測実験が可能になる。そのため、計測装置の小型化に対する研究が行われており、光学系をコンパクトに作成して一体化された可搬型の変位分布計測装置が望まれる。

【0005】

こうした中、計測物体に 2 方向からレーザを照射し、計測物体の面内方向及び面外方向の変位を高精度に計測することを可能にする技術が既知である（例えば、特許文献 1 参照）。

【0006】

しかし、デジタルホログラフィによる変位分布計測では、3 方向の変位を計測するためには、独立した 3 方向からの受光情報が必要なため、最低 3 光束の入射光が必要であり、3 光束の光学系を小型の装置に組み込むためには、かなり複雑な光学系の設計が必要となる。

【0007】

そこで、物体光として 3 方向から同時にレーザを照射し、7 回の位相シフトによって撮影されたデジタルホログラムから各方向の成分を抽出し、得られた成分から 3 次元の変位分布と 2 次元のひずみ分布を計測する技術が提案されている（例えば、特許文献 2 参照）

10

20

30

40

50

。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0008】

【特許文献1】特開2007-071584号公報

【特許文献2】特開2007-240465号公報

【非特許文献】

【0009】

【非特許文献1】高橋功、他4名、「位相シフトデジタルホログラフィを用いた面外変位計測」、実験力学、2003年6月、Vol.3、No.2、p.98-102

10

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0010】

しかし、特許文献1の技術は、1つの撮像素子で機械的にシャッターを使って照射方向を順番に切り替えて各画像を順に撮影するため変位分布の計測に多くの時間を要する。

【0011】

一方、特許文献2の技術は、小型化に関して特許文献1の発明による装置より有利であるものの、レーザ光源と物体光を作る光学系が3個必要であるため、更なる改善の余地を有している。また、撮影の際に位相シフトする回数が7回以上必要であるため、撮影に要する時間に関しても更なる改善が望まれる。

20

【0012】

そこで本発明の目的は、装置の小型化とともに計測物体の変位分布の計測時間を短縮できる位相シフトデジタルホログラフィによる変位分布計測方法、装置及びプログラムを提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0013】

本願の発明者らは、変位分布計測装置の小型化及び変位分布等を高速に計測する方法について鋭意検討した結果、変位分布計測装置に撮像素子を複数台備えて物体光を1つにする構成とし、通常は物体光と参照光とをCCDセンサに平行に入射するon-axis構成とするところを、あえて物体光と参照光とを平行に入射しないoff-axis構成とすることにより光学系を簡素化することができ、計測装置の小型化とともに位相シフトの回数の低減やシャッター切り換え工程の省略により変位分布等の計測を高速に実行できることを見出した。即ち、デジタルホログラフィにおいては、撮像素子の画素ピッチがホログラム乾板の粒子サイズよりも大きいために、物体光と参照光が同じ方向となるon-axis光学系が用いられてきたが、実際にはon-axis構成は必須ではなく、off-axis光学系であってもホログラムを撮影することができることを実証した。また、本願の本発明者らは、off-axis光学系においては実際には計測物体は撮像素子の正面ではなく斜め前方にあるが、再生時の計算にフーリエ変換を用いることにより再生像は撮像素子の正面に現れることを利用し、1光束に対して複数個の撮像素子を用いることにより、独立な異なる方向からの受光情報を撮像素子と同数だけ得ることができるようになり、光学系を簡素化する。

30

40

【0014】

即ち、本発明による変位分布計測方法は、off-axis光学系における位相シフトデジタルホログラフィにより計測物体の変形による変位を計測する変位分布計測方法であって、所定の波長のレーザ光を放射するステップと、放射された前記レーザ光を、前記計測物体に照射するための物体光と、前記物体光との干渉縞を生成するための参照光とに分離するステップと、前記参照光の位相を所定量だけシフトさせるステップと、光軸が互いに平行である所定の数の撮像素子の各々に入射するために前記位相シフトされた参照光を複数に分岐するステップと、前記計測物体により散乱された前記物体光と、分岐された各参照光との干渉縞を各撮像素子により撮像するステップと、各撮像素子により撮像された

50

前記干渉縞の各々から前記計測物体の再生像の複素振幅分布を算出し、前記計測物体の変形前後の当該複素振幅分布の位相差から前記計測物体の変位分布を計測するステップとを含むことを特徴とするものである。

【0015】

また、本発明による変位分布計測方法は、off-axis光学系における位相シフトデジタルホログラフィにより計測物体の変形による変位を計測する変位分布計測方法であって、所定の波長のレーザ光を放射するステップと、放射された前記レーザ光を、前記計測物体に照射するための物体光と、前記物体光との干渉縞を生成するための参照光とに分離するステップと、前記物体光の位相を所定量だけシフトさせるステップと、光軸が互いに平行である所定の数の撮像素子の各々に入射するために前記参照光を複数に分岐するステップと、位相シフトされ、前記計測物体により散乱された前記物体光と、分岐された各参照光との干渉縞を各撮像素子により撮像するステップと、各撮像素子により撮像された前記干渉縞の各々から前記計測物体の再生像の複素振幅分布を算出し、前記計測物体の変形前後の当該複素振幅分布の位相差から前記計測物体の変位分布を計測するステップと、を含むことを特徴とするものである。

10

【0016】

また、本発明による変位分布計測方法において、得られた前記計測物体の変位分布からひずみ分布を求めるステップを更に含むことを特徴とするものである。

【0017】

また、本発明による変位分布計測方法において、前記撮像素子により撮像された前記干渉縞の各々に対して、当該干渉縞から得られた再生像の位置を調整するステップを更に含むことを特徴とするものである。

20

【0018】

また、本発明による変位分布計測装置は、off-axis光学系における位相シフトデジタルホログラフィにより計測物体の変形による変位を計測する変位分布計測装置であって、所定の波長のレーザ光を発生する光照射手段と、発生された前記レーザ光を前記計測物体に照射するための物体光と、前記物体光との干渉縞を生成するための参照光とに分離する分離手段と、前記参照光の位相を所定量だけシフトさせる位相シフト手段と、光軸が互いに平行である所定の数の撮像素子の各々に入射するために前記位相シフトされた参照光を複数に分岐する分岐手段と、前記計測物体により散乱された前記物体光と、分岐された各参照光との干渉縞を各撮像素子により撮像する複数の撮像素子と、各撮像素子により撮像された前記干渉縞の各々から前記計測物体の再生像の複素振幅分布を算出し、前記計測物体の変形前後の当該複素振幅分布の位相差から前記計測物体の変位分布を算出する変位分布算出手段とを備えることを特徴とするものである。

30

【0019】

また、本発明による変位分布計測装置は、off-axis光学系における位相シフトデジタルホログラフィにより計測物体の変形による変位を計測する変位分布計測装置であって、所定の波長のレーザ光を発生する光照射手段と、発生された前記レーザ光を前記計測物体に照射するための物体光と、前記物体光との干渉縞を生成するための参照光とに分離する分離手段と、前記物体光の位相を所定量だけシフトさせる位相シフト手段と、光軸が互いに平行である所定の数の撮像素子の各々に入射するために前記位相シフトされた参照光を複数に分岐する分岐手段と、位相シフトされ、前記計測物体により散乱された前記物体光と、分岐された各参照光との干渉縞を各撮像素子により撮像する複数の撮像素子と、

40

各撮像素子により撮像された前記干渉縞の各々から前記計測物体の再生像の複素振幅分布を算出し、前記計測物体の変形前後の当該複素振幅分布の位相差から前記計測物体の変位分布を算出する変位分布算出手段とを備えることを特徴とするものである。

【0020】

また、本発明による変位分布計測装置において、得られた前記計測物体の変位分布からひずみ分布を求めるひずみ分布解析手段を更に備えることを特徴とするものである。

50

【 0 0 2 1 】

また、本発明による変位分布計測装置において、前記撮像素子により撮影された前記干渉縞の各々に対して、当該干渉縞から得られた再生像の位置を調整する再生像位置調整手段を更に備えることを特徴とするものである。

【 0 0 2 2 】

また、本発明による変位分布計測プログラムは、請求項 5 ~ 8 のいずれか一項に記載の変位分布計測装置における前記変位分布算出手段として構成するコンピュータに、各撮像素子により撮像された前記干渉縞の各々から前記計測物体の再生像の複素振幅分布を算出するステップと、前記計測物体の変形前後の当該複素振幅分布の位相差から前記計測物体の変位分布を算出するステップとを実行させるものである。

10

【発明の効果】

【 0 0 2 3 】

本発明によれば、光源を 1 つにして光学系を簡素化することにより計測装置を小型化できるとともに、位相シフト回数の低減とシャッターの切り換え工程の省略により計測物体の変位分布やひずみ分布を高速に計測することができる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 2 4 】

【図 1】本発明による実施例 1 の変位分布計測装置のブロック図である。

【図 2】位相シフトデジタルホログラフィ干渉法における物体光と参照光との回折現象を示す図である。

20

【図 3】ホログラム面と再生面における複素振幅分布の対応関係を示す図である。

【図 4】(a) o n - a x i s 構成及び (b) o f f - a x i s 構成に対する、位相シフト時における撮像素子の各画素上での干渉縞パターンの模式図である。

【図 5】2 個の C C D センサ、物体の配置及び再生像の位置関係を示す図である。

【図 6】再生面に対して面内方向に隣接する空間における再生の概念図である。

【図 7】ホログラム面及び再生面における光軸の移動を示す図である。

【図 8】本発明による光軸調整により再生面上での再生像の移動を示す図である。

【図 9】本発明の実施例 1 による面内変位計測実験において使用される計測試料である。

【図 10】本発明の実施例 1 において、(a) C C D センサ 1 5 及び (b) C C D センサ 1 6 により得られた変形前の再生像を示す図である。

30

【図 11】本発明の実施例 1 において、(a) C C D センサ 1 5 及び (b) C C D センサ 1 6 により得られた変形前後の位相差を示す図である。

【図 12】本発明の実施例 1 により得られた変形後の x 方向の変位分布を示す図である。

【図 13】本発明の実施例 1 により得られた変形後の x 方向のひずみ分布を示す図である。

【図 14】本発明による実施例 2 の変位分布計測装置のブロック図である。

【図 15】(a) ~ (d) は、本発明による実施例 1 及び 2 の変位分布計測装置における撮像素子 (C C D センサ) の構成例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【実施例 1】

40

【 0 0 2 5 】

まず、本発明による実施例 1 の計測物体の変位分布及びひずみ分布を計測する装置について説明する。

【 0 0 2 6 】

図 1 は、本発明による実施例 1 の変位分布計測装置の構成を示すブロック図である。変位分布計測装置 1 は、レーザ光源 1 1 と、スペイシャルフィルタ 1 2 と、凸レンズ 1 3 と、ビームスプリッタ 1 4 と、撮像素子 (例えば、2 次元撮像素子の C C D センサ 1 5 及び 1 6) と、ペリクルビームスプリッタ 1 7 及び 1 8 と、ハーフミラー 1 9 と、ミラー付き P Z T ステージ 2 0 と、N D フィルタ 2 1 と、ミラー 2 2 と、変位分布算出装置 2 4 とを備える。

50

【 0 0 2 7 】

レーザ光源 1 1 は、例えば波長 6 3 2 . 8 n m、出力 5 m W の H e - N e レーザ光源とすることができ、所定の波長を有するホログラムの記録及び再生用のレーザ光を放射する。

【 0 0 2 8 】

スペイシャルフィルタ 1 2 は、レーザ光源 1 1 から放射されたレーザ光から空間ノイズを除去して凸レンズ 1 3 に出力する。

【 0 0 2 9 】

凸レンズ 1 3 は、スペイシャルフィルタ 1 2 から出力されたレーザ光を平行光にして出力する。

10

【 0 0 3 0 】

ビームスプリッタ 1 4 は、凸レンズ 1 3 からの平行光を計測物体 2 3 に照射するための物体光と、再生面における計測物体 2 3 の変形前後の複素振幅分布の位相差を計算するための基準とする参照光とに分離する。

【 0 0 3 1 】

ミラー付き P Z T ステージ 2 0 は、ハーフミラー 1 9 を通過した参照光の位相を所定量だけシフトさせてハーフミラー 1 9 に反射する。

【 0 0 3 2 】

N D フィルタ 2 1 は、ハーフミラー 1 9 により反射された参照光の強度が物体光の強度と同程度となるように所定量だけ調整して出力する。

20

【 0 0 3 3 】

ペリクルビームスプリッタ 1 7 は、N D フィルタ 2 1 により強度が調整され、ミラー 2 2 により反射された光を参照光の一部を C C D センサ 1 5 に反射し、残りをペリクルビームスプリッタ 1 8 に透過する。

【 0 0 3 4 】

ペリクルビームスプリッタ 1 8 は、ペリクルビームスプリッタ 1 7 を透過した参照光の一部を C C D センサ 1 6 に反射する。

【 0 0 3 5 】

C C D センサ 1 5 及び 1 6 は、それぞれペリクルビームスプリッタ 1 7 及び 1 8 により反射された参照光と、ビームスプリッタ 1 4 により分離されて計測物体 2 3 により反射された物体光との干渉縞をホログラムとして取得して、変位分布算出装置 2 4 に送出する。

30

【 0 0 3 6 】

変位分布算出装置 2 4 は、位相差解析機能 2 4 a と、変位解析機能 2 4 b と、ひずみ解析機能 2 4 c とを有し、C C D センサ 1 5 及び 1 6 から取得した干渉縞の各々に対して、干渉縞から再生像の複素振幅分布を算出し、計測物体 2 3 の変形前後の当該複素振幅分布の位相差から計測物体 2 3 の変位分布を算出する。尚、C C D センサ 1 5 , 1 6 によりホログラムとして取得した干渉縞をメモリ (図示せず) に記録しておくことができる。

【 0 0 3 7 】

位相差解析機能 2 4 a は、C C D センサ 1 5 及び 1 6 によりホログラムとして記録された計測物体 2 3 の変形前後の物体光と参照光との干渉縞から再生面での位相差を計算する機能である。

40

【 0 0 3 8 】

変位解析機能 2 4 b は、位相差解析機能 2 4 a により得られた再生面での位相差から、計測物体 2 3 の変位を解析する機能である。

【 0 0 3 9 】

ひずみ解析機能 2 4 c は、変位解析機能 2 4 b により得られた計測物体 2 3 の変位からひずみを計算する機能である。

【 0 0 4 0 】

このように、本発明による変位分布計測装置 1 により、光源が 1 つになるため光学系が簡素化でき、計測装置を小型化できるとともに、位相シフト回数が低減されるため計測物

50

体 2 3 の変位分布及びひずみ分布を高速に計測できる。

【 0 0 4 1 】

変位分布計測装置 1 において、レーザ源 1 1 により放射されてビームスプリッタ 1 2 により物体光と参照光に分離され、参照光は、ミラー付き P Z T ステージ 2 0 により所定量だけ位相シフトされ、ペリクルビームスプリッタ 1 7 及び 1 8 により C C D センサ 1 5 及び C C D センサ 1 6 に正面から入射する。

【 0 0 4 2 】

一方、物体光は、C C D センサ 1 5 及び 1 6 の間と通過して物体 1 8 に正面から照射され、物体 1 8 の表面で反射された散乱光が C C D センサ 1 5 及び 1 6 に入射する。こうして入射した物体光及び参照光の干渉縞が、C C D センサ 1 5 及び 1 6 の双方において、ホ

10

【 0 0 4 3 】

ここで、C C D センサ 1 5 及び 1 6 により撮影された干渉縞から、計測物体 2 3 の変位及びひずみを解析する変位分布算出装置 2 4 の動作について詳細に説明する。

【 0 0 4 4 】

図 2 は、位相シフトデジタルホログラフィ干渉法における物体光と参照光とが干渉する様子を示している。撮像素子 (C C D センサ 1 5 , 1 6) の記録面上の座標を (X , Y) とすると、撮像素子表面における物体光の複素振幅 $A_o(X, Y)$ 、参照光の複素振幅 $A_r(X, Y)$ は以下のように表すことができる。

【 数 1 】

$$A_o(X, Y) = a_o(X, Y) \exp i \Phi_o(X, Y) \quad (1)$$

20

【 数 2 】

$$A_r(X, Y) = a_r(X, Y) \exp i \{ \Phi_r(X, Y) + \alpha \} \quad (2)$$

ここで、 $a_o(X, Y)$ 、 $a_r(X, Y)$ はそれぞれ物体光と参照光の振幅分布、 $\Phi_o(X, Y)$ 、 $\Phi_r(X, Y)$ はそれぞれ物体光と参照光の位相分布、 α は参照光の位相シフト量である。式 (1) 及び (2) から、C C D センサ 1 5 , 1 6 で記録される干渉縞 $I(X, Y, \alpha)$ は以下のように表すことができる。

【 数 3 】

$$I(X, Y, \alpha) = |a_o(X, Y)|^2 + |a_r(X, Y)|^2 + 2a_o(X, Y)a_r(X, Y) \cos[\Phi_o(X, Y) - \{ \Phi_r(X, Y) + \alpha \}] \quad (3)$$

30

こうして得られた干渉縞がホログラムとして記録される。

【 0 0 4 5 】

参照光としては平行光を用いるため、C C D センサ 1 5 , 1 6 の記録面における振幅は一定で位相の変化はないとみなすことができ、 $a_r(X, Y) = 1$ 、 $\Phi_r(X, Y) = 0$ としても差し障りない。これにより、C C D センサ 1 5 , 1 6 の記録面での物体光のみの振幅 $a_o(X, Y)$ 及び位相 $\Phi_o(X, Y)$ を、 $g(X, Y)$ を複数の値に変化させる位相シフト法によって求めることができる。この位相と振幅より C C D センサ 1 5 , 1 6 の記録面での複素振幅分布 $g(X, Y)$ は、

40

【 数 4 】

$$g(X, Y) = a_o(X, Y) \exp i \Phi_o(X, Y) \quad (4)$$

となり、C C D センサ 1 5 , 1 6 の記録面における物体光のみの複素振幅分布を求めることができる。

【 0 0 4 6 】

次に、再生面における複素振幅分布を求める。図 3 に示すように、計測物体 2 3 の表面における複素振幅分布は、C C D センサ 1 5 , 1 6 の記録面における複素振幅分布 $g(X, Y)$ を計測物体 2 3 までの距離 (再生距離) R を与えて、式 (5) に示すフレネル変換

50

を行うことで求めることができる。

【数 5】

$$u(x,y) = \exp\left[\frac{ik(x^2+y^2)}{2R}\right] F\left\{\exp\left[\frac{ik(X^2+Y^2)}{2R}\right] g(X,Y)\right\} \quad (5)$$

ここで、 $u(x, y)$ は再生面での複素振幅分布、 R は再生距離（記録面と再生面の距離）、 k は波数、 F はフーリエ変換を表す演算子である。こうして得られた再生面での複素振幅分布 $u(x, y)$ の強度を計算することにより再生像を得ることができる。

【0047】

更に、計測物体 23 の変形前後における複素振幅分布の位相差を求めることによって光路長の変化を求めることができ、得られた光路長の変化から計測物体 23 の変位分布やひずみ分布等を求めることが可能となる。

10

【0048】

続いて、本発明において用いられる *off-axis* 光学系による面内変位分布計測について説明する。

【0049】

図 4 に、位相シフト時における撮像素子の各画素上での干涉縞のパターンを模式的に示す。図 4 (a) 及び (b) は、それぞれ *on-axis* 構成及び *off-axis* 構成の場合の干涉縞（点線で示す）を示している。撮像素子は、各画素の受光面が所定の面積を有しているため、当該受光面上での強度の積分値がその画素の輝度値として出力される。図 4 において、縦線は各画素の境界を表し、横の実線はその画素における輝度の出力値を表す。

20

【0050】

図 4 (a) に示すように、*on-axis* の場合は、干涉縞のピッチが 1 画素のサイズよりも大きいため、各画素の輝度の出力値は空間的にも干涉縞の強度分布とほぼ同じ変化となり、位相シフトに対しても干涉縞の強度分布とほぼ同じ振幅で同じ変化を示す。

【0051】

一方、図 4 (b) に示すように、*off-axis* の場合は、干涉縞のピッチが 1 画素のサイズより小さくなるために、1 画素の中に複数個の干涉縞が現れる。その結果、各画素の輝度の出力値は空間的には元の干涉縞の変化を表していない。ただし、1 画素の中で見ると、CCD センサ出力の振幅は 4 回の位相シフトに応じて干涉縞の 1 周期分の強度の変化を示す。即ち、前述の通り、各画素の受光面上での干涉縞の強度の積分値がその画素の輝度値として出力されるため、図 4 (b) のように各画素に複数周期の振動が現れる場合には計測物体 23 の変形による変位の検出精度は低下するものの、各画素の境界に注目すると、図 4 (a) の *on-axis* の場合と同様に、4 回の位相シフトにより干涉縞の振動強度が 1 周期分だけ変化していることが分かる。従って、*off-axis* の場合にも位相シフト法によって位相分布を得ることが可能である。

30

【0052】

また、式 (5) で示す離散フーリエ変換による再生計算では、物体光が再生範囲の大きさと同じだけ光軸からずれた位置から来た場合にも、各 CCD センサ 15, 16 の正面にあるかのように再生される。これは、離散フーリエ変換は空間的に繰り返しが起こる演算だからである。そのため、図 5 に示すように、2 個の CCD センサ 15, 16 を再生範囲の大きさだけ左右にずらして配置し、その間に物体光を通して正面から物体を照射するように構成すれば、物体の再生像はそれぞれの CCD センサ 15, 16 の正面にあるかのように再生されることになる。

40

【0053】

ここで、通常の再生面に面内方向に隣接する空間の物体光によるホログラムの複素振幅分布にフレネル回折積分を用いて、再生面上での複素振幅分布（再生像）を CCD センサ面の正面の再生像として算出する手法について述べる。図 6 に概念図を示す。CCD センサ面上での物体光の複素振幅分布を $g(X, Y)$ 、再生面上での実際の物体光の複素振幅

50

分布を $u_h(x, y)$ 、CCD センサ面上のホログラムと中心軸を共有する正面の空間に再生される再生複素振幅分布を $u(x', y)$ とする。再生面上の両分布の座標系は $x = x' + h$ の関係にある。CCD センサ面上の点 Q から再生面上の点 P' までの光の伝播式は、

【数 6】

$$u(x', y) = \frac{1}{i\lambda} \int_{-H_Y}^{H_Y} \int_{-H_X}^{H_X} g(X, Y) \frac{1}{r'} \exp(ikr') dXdY \quad (6)$$

と表せる。ここで k は波数で $k = 2\pi/\lambda$ 、 r' は点 (x', y) 、 (X, Y) 間の距離である。 X の積分範囲を $-H_Y$ 以上、 H_Y 以下、 Y の積分範囲を $-H_X$ 以上、 H_X 以下とする。

10

【0054】

位相シフトデジタルホログラフィの再生では、フレネル回折を用いるために距離の近似を行う。CCD センサ面と再生面の距離を R とすると、

【数 7】

$$r' = \sqrt{R^2 + (x' - X)^2 + (y - Y)^2} = R \sqrt{1 + \left(\frac{x' - X}{R}\right)^2 + \left(\frac{y - Y}{R}\right)^2} \quad (7)$$

と表せる。 R は $(x' - X)$ と $(y - Y)$ に比べて十分大きいことから、

【数 8】

$$r' \approx R + \frac{1}{2R} \{(x' - X)^2 + (y - Y)^2\} \quad (8)$$

20

と近似できる。式(6)に式(8)を代入すると、

【数 9】

$$u(x', y) = \exp\left\{ik \frac{x'^2 + y^2}{2R}\right\} \int_{-H_Y}^{H_Y} \int_{-H_X}^{H_X} g(X, Y) \exp\left\{ik \frac{X^2 + Y^2}{2R}\right\} \exp\left\{-ik \frac{x'X + yY}{R}\right\} dXdY \quad (9)$$

【0055】

30

また、再生面上の点 P から CCD センサ面上の点 Q までの光の伝播式は、

【数 10】

$$g(X, Y) = u_h(x, y) \frac{1}{r} \exp(-ikr) \quad (10)$$

と表せる。この r も同様に、

【数 11】

$$r \approx R + \frac{1}{2R} \{(x - X)^2 + (y - Y)^2\} \quad (11)$$

40

と近似できる。

【0056】

式(9)に式(10)、(11)を代入すると、

【数 1 2】

$$\begin{aligned}
u(x', y) &= \exp\left\{ik \frac{x^2 + y^2}{2R}\right\} \exp\left\{-ik \frac{x'^2 + y^2}{2R}\right\} \exp\{-ikR\} \\
&\quad \times \int_{-H_y}^{H_y} \int_{-H_x}^{H_x} u_h(x, y) \exp\left\{-ik \frac{X^2 + Y^2}{2R}\right\} \exp\left\{ik \frac{xX + yY}{R}\right\} \\
&\quad \times \exp\left\{ik \frac{X^2 + Y^2}{2R}\right\} \exp\left\{-ik \frac{x'X + y'Y}{R}\right\} dXdY \quad (12)
\end{aligned}$$

と表せる。ここで式(12)に $x = x' + h$ を代入し整理すると、

10

【数 1 3】

$$u(x', y) = u_h(x'+h, y) \exp\left\{-ik \frac{(x'+h)h}{2R}\right\} \exp\{-ikR\} \int_{-H_y}^{H_y} \int_{-H_x}^{H_x} \exp\left\{ik \frac{hX}{R}\right\} dXdY \quad (13)$$

となる。

【0057】

更に、積分部分について CCD センサ面上のサンプリング間隔、再生面上の画素数、及び CCD センサ面上の座標 X に対応する離散座標 p 及び Y に対応する離散座標 q を用いて離散的に表現すると、再生面上の再生範囲が $h = R / X$ となることから、

【数 1 4】

20

$$\begin{aligned}
\int_{-H_y}^{H_y} \int_{-H_x}^{H_x} \exp\left\{ik \frac{hX}{R}\right\} dXdY &= \sum_{q=0}^{N_y-1} \sum_{p=0}^{N_x-1} \exp\left\{ik \frac{hp\Delta X}{R}\right\} \\
&= \sum_{q=0}^{N_y-1} \sum_{p=0}^{N_x-1} \exp\{2\pi ip\} \\
&= N_y \left\{ \exp\{0\} + \exp\{2\pi i\} + \exp\{4\pi i\} + \dots + \exp\{2\pi i(N_x - 1)\} \right\} \\
&= N_y \sum_{p=0}^{N_x-1} \exp\{0\} = N_x N_y \quad (14)
\end{aligned}$$

30

と求められる。従って、(13)、(14)より、再生像複素振幅分布 $u(x', y)$ の離散表現を $u(p', q)$ 、実際の複素振幅分布 $u_h(x, y) = u_h(x' + h, y)$ の離散表現を $u(p, q) = u(p' + N_x, q)$ として離散的に表現すると、

【数 1 5】

$$u(p', q) = u_h(p' + N_x, q) \exp\left\{-ik \left(\frac{(p'\Delta X + N_x \Delta X) N_x \Delta X}{2R} + R \right)\right\} N_x N_y \quad (15)$$

となり、ホログラムの正面の空間に再生される複素振幅分布の位相が、隣接する空間の物体光の複素振幅分布の位相に $-k \left((p' + N_x) \Delta X / 2R + R \right)$ を加えたものとして現れることが導かれた。この位相項は再生像のサンプリング点ごとに一定の位相である。

40

【0058】

図5において、2個の CCD センサ 15, 16 を厳密に配置決めしないと、それぞれの CCD センサ 15, 16 で得られたホログラムの再生像の位置が再生像内で同じ位置とならない。実際にはそれを物理的に微調整することは困難である。そこで、本発明においては、後述する光軸調整法によりソフトウェアにより再生像の位置を調整する。本発明のように1つの光源と複数の撮像素子 (CCD センサ 15, 16) で変位計測を行う場合、物体光の中心を CCD センサ 15, 16 の中心軸上からずらすため、折り返しの高次の再生像が再生される場合があり、また、それぞれのカメラで再生される再生面上の座標を合わ

50

せる必要がある。次に、これらのためにホログラム上での光軸を移動させて再生することにより、再生面を $x - y$ 平面上で移動させる光軸調整技法について説明する。

【 0 0 5 9 】

上述のように、位相シフトデジタルホログラフィの再生は、式(5)に示すようにフレネル回折積分にフーリエ変換を用いる。実際の再生においては、CCDセンサ面上では複素振幅分布がCCDセンサの画素ごとの離散データであるため、フーリエ変換に高速離散フーリエ変換(FFT)を用いる。そこで、CCDセンサ面上におけるサンプリング間隔と再生面上におけるサンプリング間隔の関係について調べる。式(5)を離散的に表すと、

【数16】

$$u(m,n) = \exp\left\{ik \frac{(m\Delta x)^2 + (n\Delta y)^2}{2R}\right\} F \left[\exp\left\{ik \frac{(p\Delta X)^2 + (q\Delta Y)^2}{2R}\right\} g(p,q) \right] \quad (16)$$

10

と表せる。ここでFは高速離散フーリエ変換の演算子である。また、 (m, n) と (p, q) は、それぞれCCDセンサ面と再生面の離散的な座標を表している。 X, Y はCCDセンサでのサンプリング間隔、 x, y は再生面でのサンプリング間隔である。通常、 N_x 画素 $\times N_y$ 画素の画像 $g(p, q)$ を $u(m, n)$ に高速離散フーリエ変換したとき、空間周波数のサンプリング間隔 μ_x, μ_y はそれぞれ、

【数17】

$$\Delta\mu_x = \frac{1}{N_x \Delta X}, \quad \Delta\mu_y = \frac{1}{N_y \Delta Y} \quad (17)$$

20

と表せる。フレネル変換ではフーリエ変換するときの空間周波数 μ_x, μ_y を式(17)のように置いているため、離散的な空間周波数は、

【数18】

$$\Delta\mu_x = \frac{\Delta x}{\lambda R}, \quad \Delta\mu_y = \frac{\Delta y}{\lambda R} \quad (18)$$

と表せる。従って、式(17)と式(18)からフレネル変換のサンプリング間隔は、

【数19】

$$\Delta x = \frac{\lambda R}{N_x \Delta X}, \quad \Delta y = \frac{\lambda R}{N_y \Delta Y} \quad (19)$$

30

と表せる。式(19)からフレネル回折積分における再生面のサンプリング間隔 $\Delta x, \Delta y$ は波長 λ と再生距離Rに比例し、CCDセンサ15, 16のサンプリング間隔 $\Delta X, \Delta Y$ に反比例することが分かる。

【 0 0 6 0 】

CCDセンサ面でz軸を一定量移動させた場合、その移動量は再生面での移動量と等しくなる。従って、光軸の移動により、再生画像を任意の移動量だけ移動させることができる。一方、図7に示すように、光軸をCCDセンサ15, 16面上でX軸方向に D_x 画素、Y軸方向に D_y 画素平行移動した場合の再生面の位置を考える。このとき再生面上でX軸方向に D_x 画素、Y軸方向に D_y 画素移動すると式(20)が成立する。

【数20】

$$D_x \Delta X = D_x \Delta x, \quad D_y \Delta Y = D_y \Delta y \quad (20)$$

40

ここで $\Delta X, \Delta Y$ はCCDセンサのサンプリング間隔、 $\Delta x, \Delta y$ は再生面のサンプリング間隔を表す。式(20)を書き換えると、

【数 2 1】

$$D_x = \frac{\Delta X}{\Delta x} D_x, \quad D_y = \frac{\Delta Y}{\Delta y} D_y \quad (21)$$

となる。ここで X と Y はそれぞれ X 方向と Y 方向の CCD センサの画素ピッチ、 x と y はそれぞれ x 方向と y 方向の再生面の画素間隔を表す。 X/x 及び Y/y は、ホログラム面のサイズと再生面のサイズの比であるため、一般に数分の 1 から数十分の 1 の値となる。従って、ホログラム面で 1 画素の分解能でホログラムのシフトを行えば、再生面では数分の 1 画素から数十分の 1 画素の分解能で再生像のシフトが行えることになる。

10

【0061】

また、式 (19) を式 (20) に代入すると、式 (22) が得られる。

【数 2 2】

$$D_x = \frac{\lambda R}{N_x \Delta X^2} D_x, \quad D_y = \frac{\lambda R}{N_y \Delta Y^2} D_y \quad (22)$$

このように、式 (21) を用いて再生面を (D_x 画素, D_y 画素) 移動させたいときの CCD センサ 15, 16 面の移動量 (D_x 画素, D_y 画素) を算出することができる。また、再生面を移動させたときの再生像を考える。再生面上での再生像の空間周波数は有限である。ここでの最大空間周波数は CCD センサの画素数の 2 分の 1 ($N_x/2$ 画素, $N_y/2$ 画素) である。従って、図 7 の点 O_r に物体が存在する場合の再生面は図 8 のようになる。再生面の光軸を移動させない場合、領域 A の範囲の再生像が得られる。図 8 の点 O_r から点 O_r' に光軸を移動させると領域 B の範囲の再生像が得られる。

20

【0062】

このように、ホログラム面において画素単位の光軸調整を行うことによって、再生面では画素の数分の 1 の単位で光軸調整を行うことができる。これを利用して、本発明では、複数の撮像素子で得られた再生像の画素合わせを精度よく行うことができる。

【0063】

次に、図 5 に示すように、計測物体 23 の中央から CCD センサ 15, 16 の中央までの角度をそれぞれ θ_1 及び θ_2 とする。それぞれの CCD センサ 15, 16 の各画素で得られた変形前後の位相差をそれぞれ $\Delta\phi_1$ 及び $\Delta\phi_2$ とすると、 x 方向と z 方向の変位 d_x 及び d_z は、それぞれ式 (23) 及び式 (24) に示すように表せる。

30

【数 2 3】

$$d_x = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{(\cos\theta_2 + 1) \Delta\phi_1 - (\cos\theta_1 + 1) \Delta\phi_2}{(\cos\theta_2 + 1) \sin\theta_1 + (\cos\theta_1 + 1) \sin\theta_2} \quad (23)$$

【数 2 4】

$$d_z = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{\sin\theta_2 \Delta\phi_1 - \sin\theta_1 \Delta\phi_2}{(\cos\theta_1 + 1) \sin\theta_2 + (\cos\theta_2 + 1) \sin\theta_1} \quad (24)$$

40

ここで、 λ は光源の波長である。

【0064】

このように、計測物体 23 の変形前後の位相差から、計測物体 23 の面内方向の変位を求めることができる。

【0065】

ここで、本発明の実施例 1 における変位分布計測装置による面内変位計測実験の結果について説明する。

50

【 0 0 6 6 】

図 1 における 2 台の C C D センサ 1 5 , 1 6 には、画素ピッチは $4.65 \mu\text{m}$ 、画素数 1280×960 画素、階調数 256 の素子を用いた。撮影された画像から 960×960 画素を切り出して利用した。

【 0 0 6 7 】

光源には波長 632.8 nm 、出力 5 mW の He - Ne レーザを用い、スペイシャルフィルタと凸レンズによって平行光とした。ビームスプリッタで分離された参照光は、ミラー付き P Z T ステージ 2 0 のミラーにより位相シフトされ、ペリクルビームスプリッタによって各 C C D センサ 1 5 , 1 6 に正面から入射した。

【 0 0 6 8 】

一方、物体光は 2 台の C C D センサ 1 5 , 1 6 の間を通り計測物体 2 3 に正面から照射される。計測物体 2 3 の表面で反射した散乱光は、それぞれの C C D センサ 1 5 , 1 6 に入射し、参照光との干渉縞がホログラムとして記録される。ミラー付き P Z T ステージ 2 0 によって位相シフトを $\pi/2$ ごとに 4 回行いながらそれぞれの C C D センサ 1 5 , 1 6 において位相シフトデジタルホログラムを撮影する。

【 0 0 6 9 】

図 1 の配置では、再生距離 $R = 300 \text{ mm}$ で C C D センサ 1 5 , 1 6 の光軸と物体光の光軸との間隔はそれぞれ 40.0 mm と 36.5 mm であった。これより $\theta_1 = 7.6 \text{ deg}$, $\theta_2 = 6.9 \text{ deg}$ だけの角度を有する off - axis 光学系となっている。この場合、再生距離 $R = 300 \text{ mm}$ の位置での再生範囲は 40.8 mm となる。

【 0 0 7 0 】

計測物体 2 3 の試料として、図 9 に示すように 5 mm 角で長さ 25 mm のアルミ製片持ち梁を用いた。この片持ち梁に対して、固定端から 20 mm の位置にて y 方向に $12 \mu\text{m}$ の変位を加えた。

【 0 0 7 1 】

図 1 0 に各 C C D センサで撮影された位相シフトデジタルホログラムから得られた変形前の再生像を示す。このように、off - axis 構成であっても再生像が得られることが確認できる。

【 0 0 7 2 】

前述のようにフーリエ変換による再生計算では、実際の物体が再生範囲の大きさだけ離れた位置、即ち各 C C D センサの正面にあるかのように再生される。ただし、実際の各 C C D センサが厳密に配置されていることはないために、C C D センサ 1 5 と C C D センサ 1 6 との間はずれが生じる。そのため C C D センサ 1 5 と C C D センサ 1 6 のそれぞれの再生像が画像内で同じ位置に再生されるように、C C D センサ 1 5 のホログラムに対して、i 方向に -280 画素、j 方向に $+170$ 画素の移動を行うことにより、再生像を x 方向に $+1.30 \text{ mm}$ 、y 方向に -0.91 mm だけ移動させた。

【 0 0 7 3 】

次に、変形前後の位相差を図 1 1 に示す。この位相差は、256 個の窓関数を用いた位相差平均化手法（例えば、特開 2007 - 071589 号公報参照）によりノイズ除去が行われている。

【 0 0 7 4 】

図 1 2 に計測結果として得られた x 方向の変位分布を示す。また、図 1 3 に計測結果として得られた x 方向のひずみ分布を示す。これは図 1 2 の変位分布に対して、x 方向に空間的な微分を行うことにより求めている。片持ち梁の上側は圧縮されるため負のひずみが発生し、下側は伸張されるため正のひずみが発生している様子が分布として計測されていることが分かる。

【 0 0 7 5 】

このように、複数の撮像素子を備える本実施例による変位分布計測装置 1 により、off - axis 光学系であっても計測物体の再生像が得られ、面内方向の変位及びひずみ分布を計測できることが分かる。

10

20

30

40

50

【実施例 2】

【0076】

図 1 に示す変位分布計測装置 1 においては、ミラー付き P Z T ステージ 20 による位相シフトは「参照光」に対して施されるが、参照光の代わりに「物体光」に対してもできる。この場合の変位分布計測装置を実施例 2 として図 14 に示す。本発明による実施例 2 の変位分布計測装置 2 は、構成要素及び各構成要素の機能については図 1 の変位分布計測装置 1 と同一であるが、上述のように参照光の代わりに物体光を位相シフトする点で相違している。即ち、ビームスプリッタ 14 により分離された物体光は、ハーフミラー 19 により反射され、ミラー付き P Z T ステージ 20 により位相シフトされ、ハーフミラー 19 を透過して計測物体 23 に照射される。一方、分離された参照光は、ND フィルタ 21 を通過した後ミラー 22 により反射され、ペリクルビームスプリッタ 17 及び 18 により CCD センサ 15 及び CCD センサ 16 に正面から入射する。これ以外の処理は、変位分布計測装置 1 と同一である。

10

【0077】

このように構成することにより、実施例 1 の変位分布計測装置 1 と同様に、光源が 1 つになるため光学系が簡素化でき、計測装置を小型化できるとともに、位相シフト回数が低減されるため計測物体 23 の変位分布及びひずみ分布を高速に計測できる。

【0078】

尚、実施例 1 及び 2 において、変位分布計測装置 1 及び 2 は 2 個の撮像装置 15, 16 を有しているが、撮像装置を更に追加して構成することもできる。計測物体 23 から眺めた撮像素子 (CCD センサ) の構成例を図 15 に示す。(a) は 4 個の CCD センサ (3a-1 ~ 3a-4) を x, y 方向に 2 個ずつ配置した例であり、このような構成により、計測物体 23 の x, y 方向の変位の検出感度が均一になるとともに検出精度が向上する効果を有している。また、装置の配置都合に応じて、(a) の構成を (b) のように構成してもよい (3b-1 ~ 3b-4)。(c) は 3 個の CCD センサ (3c-1 ~ 3c-3) を有する場合であり、装置全体の小型化を図ることが可能になる。(d) は CCD センサを更に追加して 8 個 (3d-1 ~ 3d-8) とした例であり、計測物体 23 の変位の検出感度が向上するため低ノイズ化が可能となる。

20

【0079】

上記の実施例 1 及び 2 においては、図 1 及び 14 に示す各構成要素全体を一体化して可搬型の変位分布計測装置とし、例えば屋外に搬送して計測することができる。

30

【0080】

また、CCD センサ 15, 16 と変位解析装置 24 を別々に構成しているが、これらを 1 つの装置として一体化することもできる。

【0081】

更に、本発明の一態様として、変位分布計測装置 1 を、各装置として機能するコンピュータとしてそれぞれ構成させることができる。コンピュータに、前述した各構成要素を実現させるためのプログラムは、各コンピュータの内部又は外部に備えられる記憶部に記憶される。そのような記憶部は、外付けハードディスクなどの外部記憶装置、或いは ROM 又は RAM などの内部記憶装置で実現することができる。各コンピュータに備えられる制御部は、中央演算処理装置 (CPU) などの制御で実現することができる。即ち、CPU が、各構成要素の機能を実現するための処理内容が記述されたプログラムを、適宜、記憶部から読み込んで、各構成要素の機能をコンピュータ上で実現させることができる。ここで、各構成要素の機能をハードウェアの全部又は一部で実現しても良い。

40

【0082】

以上、具体例を挙げて本発明を詳細に説明してきたが、本発明の特許請求の範囲から逸脱しない限りにおいて、あらゆる変形や変更が可能であることは当業者に明らかである。例えば、撮像素子の数を増加して、3 方向の変位を測定することも可能である。従って、本発明は上記の実施形態に限定されるものではない。

【産業上の利用可能性】

50

【 0 0 8 3 】

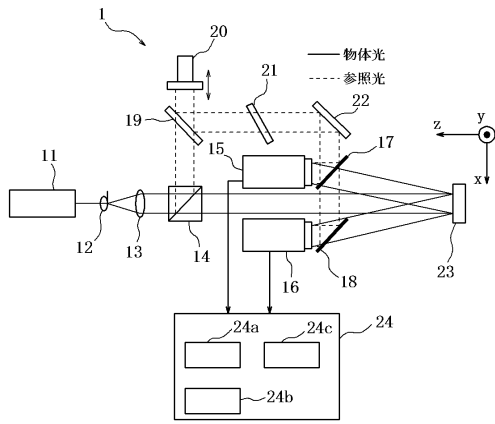
本発明によれば、複数の撮像素子を使用することにより光学系を簡素化して装置を小型化できるとともに、計測物体の変位分布やひずみ分布を高速に計測できるので、1) 構造物の変位分布・ひずみ分布計測試験、2) 鋼構造物、コンクリート構造物、樹脂・セラミック構造物等の構造物の欠陥検査、3) 材料試験、4) マイクロマシンの材料試験・特性評価試験、等に有用である。

【 符号の説明 】

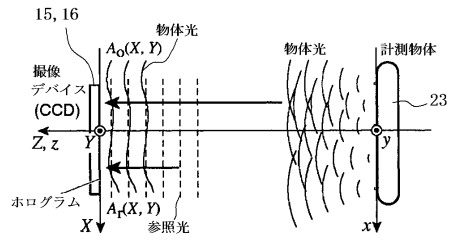
【 0 0 8 4 】

- | | | |
|---|------------------|----|
| 1 | 変位分布計測装置 | |
| 2 | 変位分布計測装置 | 10 |
| 3 a - 1 ~ 3 a - 4 , 3 b - 1 ~ 3 b - 4 , 3 c - 1 ~ 3 c - 3 , 3 d - 1 ~ 3 d - 8 | | |
| C C D センサ | | |
| 1 1 | レーザ光源 | |
| 1 2 | スペイシャルフィルタ | |
| 1 3 | 凸レンズ | |
| 1 4 | ビームスプリッタ | |
| 1 5 , 1 6 | C C D センサ | |
| 1 7 , 1 8 | ペリクルビームスプリッタ | |
| 1 9 | ハーフミラー | |
| 2 0 | ミラー付き P Z T ステージ | 20 |
| 2 1 | N D フィルタ | |
| 2 2 | ミラー | |
| 2 3 | 計測物体 | |
| 2 4 | 変位分布算出装置 | |
| 2 4 a | 位相差解析機能 | |
| 2 4 b | 変位解析機能 | |
| 2 4 c | ひずみ解析機能 | |

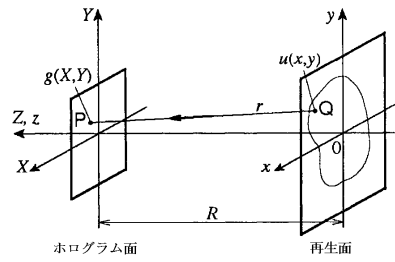
【図1】



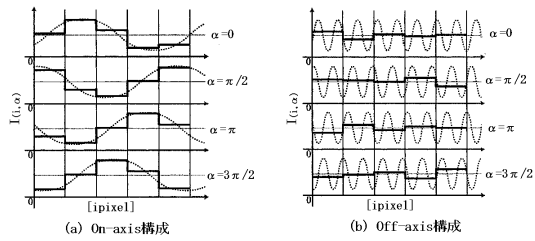
【図2】



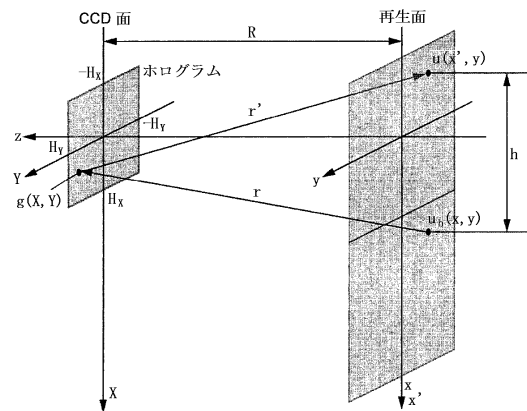
【図3】



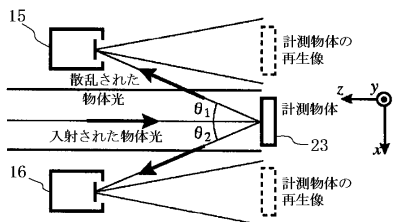
【図4】



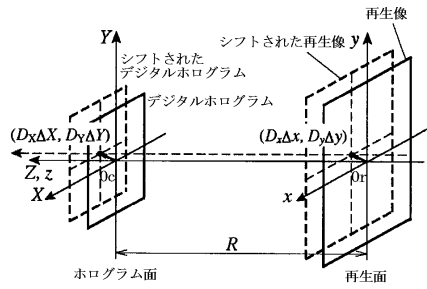
【図6】



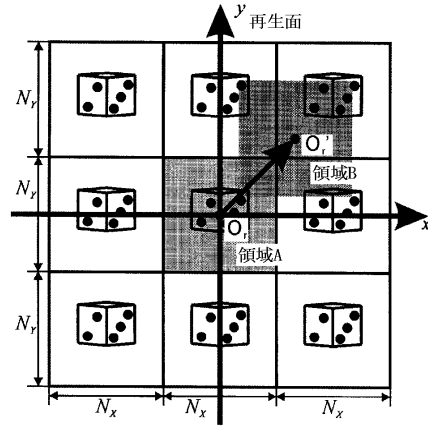
【図5】



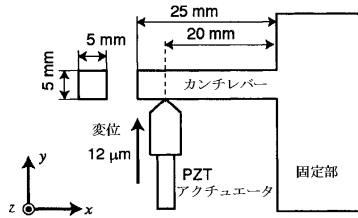
【図7】



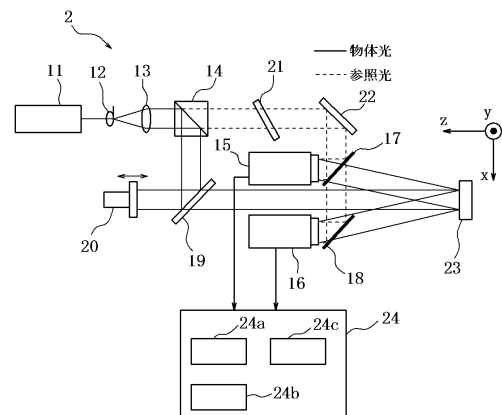
【図8】



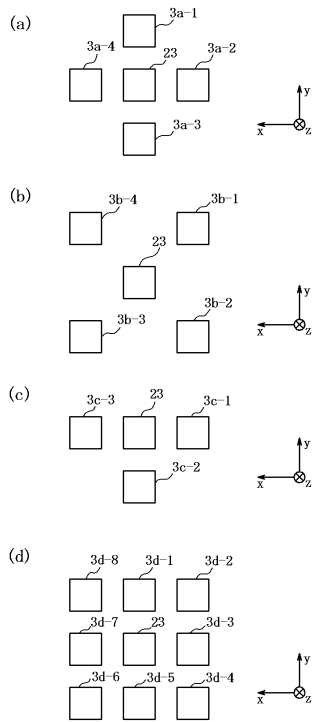
【図9】



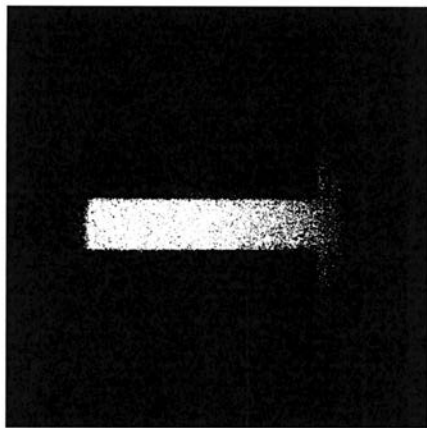
【図14】



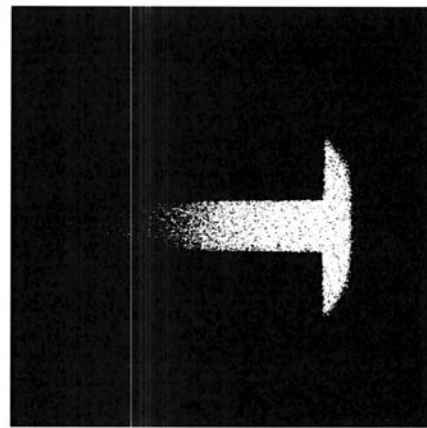
【 図 1 5 】



【 図 1 0 】

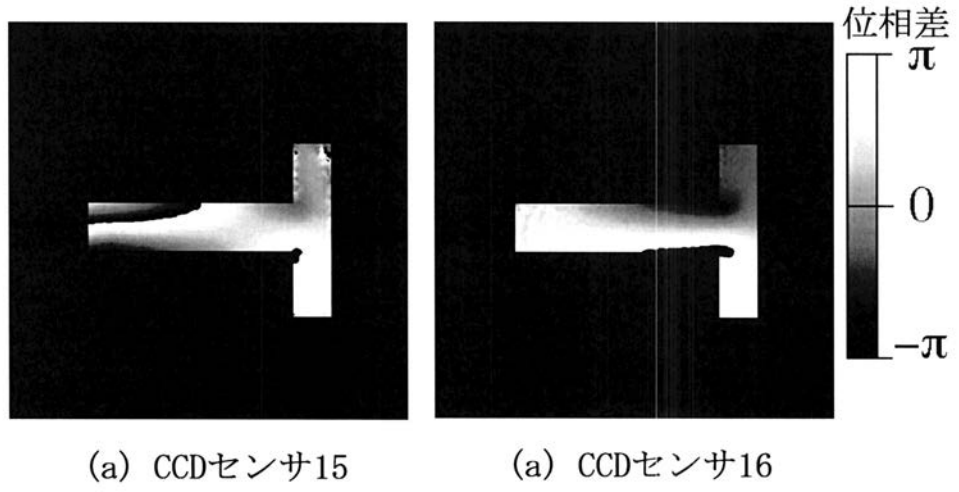


(a) CCDセンサ15

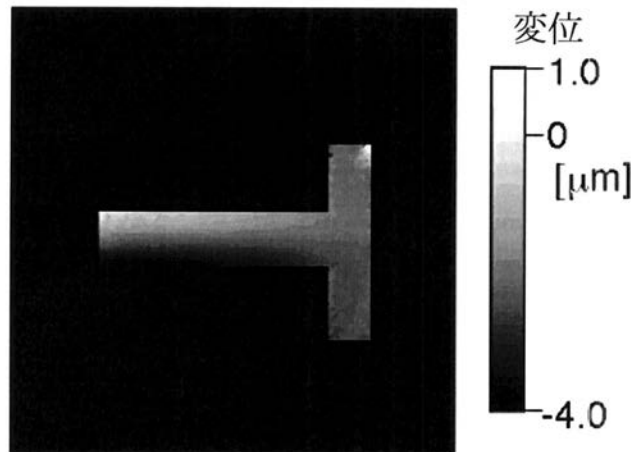


(a) CCDセンサ16

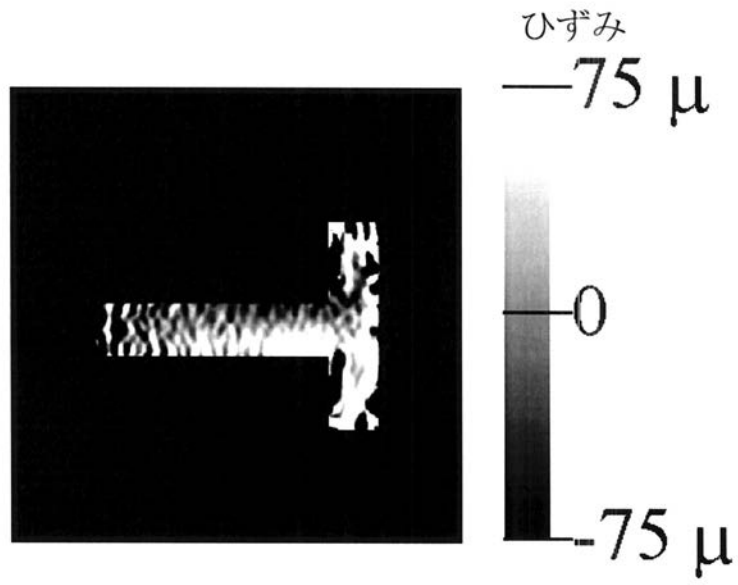
【図 1 1】



【図 1 2】



【図13】



フロントページの続き

- (72)発明者 塩谷 航平
大阪府泉佐野市笠松2丁目4番36号
- (72)発明者 西谷 陸
鳥取県米子市錦海町1-8-3

審査官 岸 智史

- (56)参考文献 特開2005-265441(JP,A)
特開平04-223208(JP,A)
特開2007-071584(JP,A)
特開2000-205822(JP,A)
特開平09-113233(JP,A)
特開2003-294412(JP,A)
特開2008-122565(JP,A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
- | | |
|------|--------------|
| G01B | 9/00 - 11/30 |
| G01L | 1/00 |
| G03H | 1/00 - 5/00 |