

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6192017号

(P6192017)

(45) 発行日 平成29年9月6日(2017.9.6)

(24) 登録日 平成29年8月18日(2017.8.18)

(51) Int.Cl.	F I	
GO3H 1/00 (2006.01)	GO3H 1/00	
GO3H 1/22 (2006.01)	GO3H 1/22	
GO2B 5/30 (2006.01)	GO2B 5/30	
GO1B 9/021 (2006.01)	GO1B 9/021	
GO1B 11/24 (2006.01)	GO1B 11/24	D
請求項の数 14 (全 25 頁)		

(21) 出願番号	特願2014-539666 (P2014-539666)	(73) 特許権者	504255685
(86) (22) 出願日	平成25年9月20日(2013.9.20)		国立大学法人京都工芸繊維大学
(86) 国際出願番号	PCT/JP2013/075556		京都府京都市左京区松ヶ崎橋上町1番地
(87) 国際公開番号	W02014/054446	(74) 代理人	110000338
(87) 国際公開日	平成26年4月10日(2014.4.10)		特許業務法人HARAKENZO WORLD PATENT & TRADEMARK
審査請求日	平成28年6月29日(2016.6.29)	(72) 発明者	栗辻 安浩
(31) 優先権主張番号	特願2012-223657 (P2012-223657)		京都府京都市左京区松ヶ崎橋上町1番地
(32) 優先日	平成24年10月5日(2012.10.5)		国立大学法人京都工芸繊維大学内
(33) 優先権主張国	日本国(JP)	(72) 発明者	田原 樹
特許権者において、権利譲渡・実施許諾の用意がある。			京都府京都市左京区松ヶ崎橋上町1番地
			国立大学法人京都工芸繊維大学内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 デジタルホログラフィ装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

参照光および被写体を照明する物体照明光を供給する光源と、撮像装置とを備え、物体照明光が上記被写体を介して到達する光である物体光と参照光とが作る干渉縞を上記撮像装置が撮像するデジタルホログラフィ装置であって、

上記撮像装置は、互いに通過させる光の偏光方向が異なる4つの偏光領域を有する偏光子アレイと、各偏光領域に対応して配列している画素を有する撮像素子とを備え、

上記デジタルホログラフィ装置は、円偏光または楕円偏光である物体光と、物体光とは反対方向に回転する円偏光または楕円偏光である参照光とを上記偏光子アレイに入射させ、

上記4つの偏光領域に応じて生じる4種類の位相シフト量の差を補正する 位相補正部と、

上記撮像装置が撮像した干渉縞に並列2段階位相シフト法を適用して再生像を生成する再生部とを備えることを特徴とするデジタルホログラフィ装置。

【請求項2】

上記位相補正部は、上記撮像素子に入射する物体光の光軸と上記撮像素子に入射する参照光の光軸との少なくとも一方を前記撮像素子の撮像面の法線から所定の角度傾ける位相調整機構を有することを特徴とする請求項1に記載のデジタルホログラフィ装置。

【請求項3】

上記所定の角度を θ とし、物体光および参照光の波長を λ とし、物体光の上記光軸と参

照光の上記光軸とを含む平面における上記画素のピッチを d とし、 n を自然数とすると、
 $\sin \theta = n \lambda / (2 d)$ 、または、
 $\sin \theta = n \lambda / (2 d \times \sqrt{2})$

であることを特徴とする請求項 2 に記載のデジタルホログラフィ装置。

【請求項 4】

上記位相補正部は、上記 4 つの偏光領域に応じて生じる 4 種類の位相シフト量を、2 種類の位相シフト量に変換し、

上記撮像装置は、互いに位相シフト量が異なる 2 種類の干渉縞を一度に撮像することを特徴とする請求項 2 に記載のデジタルホログラフィ装置。

【請求項 5】

上記 2 種類の干渉縞のうち、一方の干渉縞の位相シフト量を 0 とすると、他方の干渉縞の位相シフト量は $\pi / 2$ であることを特徴とする請求項 4 に記載のデジタルホログラフィ装置。

【請求項 6】

上記位相補正部は、参照光または物体光を反射、屈折または回折することによって上記角度を調整することが可能な光学部材を含むことを特徴とする請求項 2 に記載のデジタルホログラフィ装置。

【請求項 7】

上記光学部材は、参照光の光路に配置されていることを特徴とする請求項 6 に記載のデジタルホログラフィ装置。

【請求項 8】

上記光学部材は、物体光の光路に配置されていることを特徴とする請求項 6 に記載のデジタルホログラフィ装置。

【請求項 9】

上記撮像装置は、互いに位相シフト量が異なる 4 種類の干渉縞を一度に撮像し、

上記再生部は、並列 2 段階位相シフト法を用いて上記撮像装置が撮像した上記 4 種類の干渉縞から、上記撮像素子の上記画素に対応する物体光の複素振幅分布を生成する位相シフト処理部を含み、

上記位相補正部は、上記位相シフト処理部が生成した物体光の複素振幅分布に対して、上記画素に応じた位相値を加えることによって位相が補正された物体光の複素振幅分布を得る位相調整部を有することを特徴とする請求項 1 に記載のデジタルホログラフィ装置。

【請求項 10】

上記位相補正部は、上記位相シフト処理部が生成した物体光の複素振幅分布に対して、上記画素毎に、上記撮像された干渉縞の位相シフト量に応じた位相値を加えることによって位相が補正された物体光の複素振幅分布を得ることを特徴とする請求項 9 に記載のデジタルホログラフィ装置。

【請求項 11】

上記撮像装置が撮像した上記 4 種類の干渉縞は、位相シフト量が 0 の第 1 画素と、位相シフト量が $\pi / 2$ の第 2 画素と、位相シフト量が π の第 3 画素と、位相シフト量が $3 \pi / 2$ の第 4 画素とを含み、

上記位相補正部は、上記位相シフト処理部が生成した物体光の複素振幅分布に対して、上記第 1 画素において位相値 0 を加え、上記第 2 画素において位相値 $\pi / 2$ を加え、上記第 3 画素において位相値 π を加え、上記第 4 画素において位相値 $3 \pi / 2$ を加えることを特徴とする請求項 10 に記載のデジタルホログラフィ装置。

【請求項 12】

上記位相シフト処理部は、上記撮像装置が撮像した上記 4 種類の干渉縞から、第 1 位相シフト量の画素と第 2 位相シフト量の画素とを抽出して第 1 干渉縞を生成し、第 3 位相シフト量の画素と第 4 位相シフト量の画素とを抽出して第 2 干渉縞を生成し、

上記第 1 位相シフト量と上記第 3 位相シフト量とは $\pi / 2$ 異なっており、上記第 2 位相シフト量と上記第 4 位相シフト量とは $\pi / 2$ 異なっており、

上記位相シフト処理部は、上記第1干渉縞および上記第2干渉縞に並列2段階位相シフト法を適用して物体光の複素振幅分布を生成し、

上記位相補正部は、上記位相シフト処理部が生成した物体光の複素振幅分布に対して、上記画素毎に、上記第1干渉縞と上記第2干渉縞との間の位相シフト量の差に応じた位相値を加えることによって位相が補正された物体光の複素振幅分布を得ることを特徴とする請求項9に記載のデジタルホログラフィ装置。

【請求項13】

上記第1位相シフト量と上記第2位相シフト量とは π 異っており、上記第3位相シフト量と上記第4位相シフト量とは π 異っており、

上記位相補正部は、上記位相シフト処理部が生成した物体光の複素振幅分布に対して、第1画素において基準位相値を加え、上記第1画素に隣接する第2画素において上記基準位相値に π を加減算した位相値を加えることを特徴とする請求項12に記載のデジタルホログラフィ装置。

【請求項14】

上記位相補正部は、上記撮像素子に入射する物体光の光軸と上記撮像素子に入射する参照光の光軸との少なくとも一方を前記撮像素子の撮像面の法線から所定の角度傾ける位相調整機構を有し、

上記再生部は、並列2段階位相シフト法を用いて上記撮像装置が撮像した上記4種類の干渉縞から、上記撮像素子の上記画素に対応する物体光の複素振幅分布を生成する位相シフト処理部を含み、

上記位相補正部は、上記位相シフト処理部が生成した物体光の複素振幅分布に対して、上記画素に応じた位相値を加えることによって位相が補正された物体光の複素振幅分布を得る位相調整部をさらに有することを特徴とする請求項1に記載のデジタルホログラフィ装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、デジタルホログラフィ装置に関する。

【背景技術】

【0002】

以後の文章中で位相の単位はラジアンで表す。加工技術の精密化や多様化に伴い、物体の3次元形状等の高度な計測や解析が求められ、様々な測定法が開発されている。該測定法のうち、光の干渉を利用した干渉計測技術、特にデジタルホログラフィは、非接触かつ非破壊で、物体の3次元情報を得ることができるため、近年、注目を集めている測定法の一つとなっている。

【0003】

デジタルホログラフィは、3次元物体への光照射によって得られる干渉縞から、コンピュータを用いて3次元物体の像を再生する技術である。具体的には例えば、3次元物体への光照射によって得られる物体光と、該物体光に対して可干渉（コヒーレント）である参照光とが作る干渉縞を、CCD（charge coupled device）等の撮像素子を用いて記録する。記録された干渉縞に基づいて、コンピュータで3次元物体の像を再生する。

【0004】

非特許文献1には、干渉縞から像を再生する基本的なデジタルホログラフィ技術が記載されている。

【0005】

非特許文献2には、干渉縞から像を再生する際に、不要な像成分（0次回折光および共役像（-1次回折光））を除去する技術（位相シフト法）が記載されている。しかしながら、非特許文献2に記載の構成では、条件を変えて複数回撮像を行うことにより複数の干渉縞を得る。そのため、動的な被写体に適用することができない。

【0006】

動的な被写体にデジタルホログラフィを適用可能にするために、本発明者らは以下の技術を開発した。

【0007】

特許文献1には、画素を分割して、物体光と参照光との位相シフト量が異なる4種類の干渉縞を同時に撮像し、4段階位相シフト法によって像を再生する技術が記載されている。

【0008】

特許文献2には、画素を分割して、物体光と参照光との位相シフト量が異なる2種類の干渉縞を同時に撮像し、2段階位相シフト法によって像を再生する技術が記載されている。2段階位相シフト法では、位相シフト量が異なる2種類の干渉縞が必要になる。一方の干渉縞の位相シフト量を0とすると、2段階位相シフト法の計算に必要な他方の干渉縞の位相シフト量は0、 π 以外の位相シフト量（好適には例えば $\pi/2$ ）である。

【0009】

非特許文献3には、画素を分割して、物体光と参照光との位相シフト量が異なる4種類の干渉縞を同時に撮像し、2段階位相シフト法によって像を再生する技術が記載されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0010】

【特許文献1】日本国特許第4294526号公報（2009年4月17日登録）

【特許文献2】国際公開第2009/066771号（2009年5月28日公開）

【非特許文献】

【0011】

【非特許文献1】J. W. Goodman and R. W. Lawrence、「DIGITAL IMAGE FORMATION FROM ELECTRONICALLY DETECTED HOLOGRAMS」、APPLIED PHYSICS LETTERS、(1967)、Vol. 11、No. 3、p.77

【非特許文献2】I. Yamaguchi and T. Zhang、「Phase-shifting digital holography」、OPTICS LETTERS、(1997)、Vol. 22、No. 16、p.1268

【非特許文献3】Takashi Kakue et. al.、「Image quality improvement of parallel four-step phase-shifting digital holography by using the algorithm of parallel two-step phase-shifting digital holography」、OPTICS EXPRESS、(2010)、Vol. 18、No. 8、p.9555

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0012】

しかしながら、上記従来の構成では、以下の問題を生じる。

【0013】

特許文献1のように、撮像素子の局所的な4つの画素において参照光が4つの異なる位相量となるように記録された1枚の干渉縞画像から位相シフト干渉計測を行う方法（以下、この方法を並列4段階位相シフト法と呼ぶ）を用いる技術では、撮影可能範囲が狭く、またこの技術に基づく装置の分解能を高くすることができない。

【0014】

特許文献2の技術では、特許文献1の技術に比べて、撮影可能範囲も広く、また装置の分解能も高くすることができる。しかしながら、2段階位相シフト法に必要な2種類の干渉縞を1回の撮像で得る方法（以下、この方法を並列2段階位相シフト法と呼ぶ）を行うためには、ホログラフィの撮像光学系の中に市販されていない光学素子が必要になる。例えば、2種類の偏光子がアレイ状に交互に配列した偏光子アレイが貼り付けられた撮像素子が必要になるが、そのような撮像素子は現時点では一般に市販されていない。そのため、撮像光学系を構成することが容易ではなく、また撮像光学系が高価なものになってしまう。

【0015】

非特許文献3で使用する撮像光学系は、市販の偏光イメージングカメラおよび一般的な光学素子を用いて構成可能である。しかしながら、非特許文献3の技術では、4種類の位相シフト量を2種類の位相シフト量とみなして何の補正または補償もなしに2段階位相シフト法を適用するので、適切な再生像が得られないことがある。

【0016】

本発明は、上記の問題点に鑑みてなされたものであり、その目的は、簡単な光学素子によって撮像光学系を構成でき、かつ画質を向上できるデジタルホログラフィ装置を実現することにある。

【課題を解決するための手段】

10

【0017】

本発明に係るデジタルホログラフィ装置は、参照光および被写体を照明する物体照明光を供給する光源と、撮像装置とを備え、物体照明光が上記被写体を介して到達する光である物体光と参照光とが作る干渉縞を上記撮像装置が撮像するデジタルホログラフィ装置であって、上記撮像装置は、互いに通過させる光の偏光方向が異なる4つの偏光領域を有する偏光子アレイと、各偏光領域に対応して配列している画素を有する撮像素子とを備え、上記デジタルホログラフィ装置は、円偏光または楕円偏光である物体光と、物体光とは反対方向に回転する円偏光または楕円偏光である参照光とを上記偏光子アレイに入射させ、上記4つの偏光領域に応じて生じる4種類の位相シフト量の差を補正する位相補正部と、上記撮像装置が撮像した干渉縞に並列2段階位相シフト法を適用して再生像を生成する再生部とを備えることを特徴としている。

20

【発明の効果】

【0018】

本発明によれば、市販されている4画素ごとに異なる偏光を検出する偏光イメージングカメラを利用して簡単に撮像装置を含むデジタルホログラフィ装置を構成することができる。そして、位相補正部によって上記4つの偏光領域に応じて生じる4種類の位相シフト量の差を補正することができるので、適切に並列2段階位相シフト法を適用することができる。それゆえ、デジタルホログラフィ装置は、画質のよい再生像を得ることができる。

【図面の簡単な説明】

【0019】

30

【図1】本発明の一実施形態に係るデジタルホログラフィ装置の構成を示す模式図である。

【図2】上記デジタルホログラフィ装置における偏光子アレイおよび撮像素子の構成を示す図である。

【図3】上記偏光子アレイの作用による、各画素上の位相シフト量を示す図である。

【図4】入射する物体光および参照光の位相シフト量を説明する図である。

【図5】角度 θ の作用による、各画素上の位相シフト量を示す図である。

【図6】角度 θ の作用による、斜めストライプの位相シフト量の例を示す図である。

【図7】上記デジタルホログラフィ装置の撮像光学系における各画素上の位相シフト量を示す図である。

40

【図8】上記デジタルホログラフィ装置の位相シフト処理部における像再生アルゴリズムを説明するための図である。

【図9】被写体の再生像に関して、シミュレーションの結果を示す画像である。

【図10】本発明の他の実施形態に係るデジタルホログラフィ装置の構成を示す模式図である。

【図11】本発明のさらに他の実施形態に係るデジタルホログラフィ装置の構成を示す模式図である。

【図12】上記デジタルホログラフィ装置の再生装置における像再生アルゴリズムを説明するための図である。

【図13】本発明のさらに他の実施形態に係る再生装置における像再生アルゴリズムを説

50

明するための図である。

【図14】本発明のさらに他の実施形態に係るデジタルホログラフィ装置の構成を示す模式図である。

【発明を実施するための形態】

【0020】

以下、本発明の実施形態について、図面を参照して詳細に説明する。

【0021】

[実施形態1]

(デジタルホログラフィ装置1の構成)

図1は、本実施形態のデジタルホログラフィ装置1の構成を示す模式図である。デジタルホログラフィ装置1は、撮像光学系11と、再生装置12（再生部）とを備える。再生装置12は、コンピュータ等の計算機によって構成することができる。

【0022】

撮像光学系11は、レーザ光源（光源）13と、偏光イメージング撮像装置14（撮像装置）とを備える。また、撮像光学系11は、光学素子（光学部材）として、ビームスプリッタBS1、ミラーM1、ビームエキスパンダBE1、偏光子LP1、1/2波長板HWP1、ビームエキスパンダBE2、ミラーM2、ビームスプリッタBS2、および1/4波長板QWP1を備える。ビームエキスパンダBE1・BE2はそれぞれ、対物レンズBEa、ピンホールBEb、およびコリメータレンズBEcを備える。ビームスプリッタBS1・BS2は、ハーフミラーからなる。

【0023】

偏光イメージング撮像装置14は再生装置12に接続されており、偏光イメージング撮像装置14の出力は再生装置12に入力される。偏光イメージング撮像装置14は、偏光子アレイ16と、CCDからなる撮像素子15とを備える。偏光子アレイ16のマトリクス状に配置された複数の偏光子は、撮像素子15の各画素に対応するように位置合わせがされている。偏光子アレイ16は、撮像素子15の前面に貼り付けられており、撮像素子15は、偏光子アレイ16を通過した光の強度を検出する。

【0024】

物体光および参照光の経路について説明する。

【0025】

レーザ光源13は、コヒーレントな光、すなわちレーザ光を発生する。ここで、レーザ光の伝播方向に垂直な1つの方向を第1方向と定義し、レーザ光の伝播方向および第1方向に垂直な方向を第2方向と定義する。本実施形態では第1方向は図（紙面）に対して水平方向に一致し、第2方向は垂直方向に一致する。ここではレーザ光源13のレーザ光は、図（紙面）に対して垂直偏光した直線偏光の光である。なお、波長板または偏光子を用いてレーザ光源13から出射されたレーザ光の偏光方向を調整することもできる。レーザ光源13から出射されたレーザ光は、ビームスプリッタBS1によって参照光と物体照明光とに分割される。ビームスプリッタBS1で分割された参照光および物体照明光は、それぞれ垂直偏光した直線偏光の光である。

【0026】

分割された光の一方である物体照明光は、ミラーM1によって反射された後、ビームエキスパンダBE1によって、拡大された平行光にされる。その後、物体照明光は被写体（物体）17に照射される。被写体17に入射した物体照明光は被写体17によって回折または散乱されて、物体光として被写体17から出射する。その後、物体光は、偏光子LP1、ビームスプリッタBS2、1/4波長板QWP1をこの順に通過し、偏光イメージング撮像装置14に入射する。偏光子LP1は、被写体17によって乱れた物体光の偏光を垂直偏光に整えることによって、ノイズとなる成分を除去する役割を果たす。偏光子LP1は、省略することもできる。ビームスプリッタBS2を通過した後の物体光は、図（紙面）に対して垂直偏光である。物体光は、撮像素子15の撮像面に対してほぼ垂直に入射する。

【0027】

分割された光の他方である参照光は、1/2波長板HWP1によって水平偏光に変換される。1/2波長板HWP1の遅相軸は、垂直方向に対して45°傾いている。その後、参照光は、ビームエキスパンダBE2によって、拡大された平行光にされる。その後、参照光はミラーM2によって反射された後、ビームスプリッタBS2によって反射され、1/4波長板QWP1を通過し、偏光イメージング撮像装置14に入射する。

【0028】

1/4波長板QWP1には、垂直偏光の物体光と、水平偏光の参照光とが入射する。すなわち、1/4波長板QWP1に入射する前において、物体光の偏光方向と参照光の偏光方向とは直交する。そして、1/4波長板QWP1の遅相軸は、水平方向から45°傾いている。すなわち、1/4波長板QWP1の遅相軸は、参照光の偏光方向（水平方向）に対して45°傾いており、物体光の偏光方向（垂直方向）に対しても45°傾いている。それゆえ、1/4波長板QWP1を通過した参照光は、円偏光に変換される。また、1/4波長板QWP1を通過した物体光は、円偏光に変換される。ただし、遅相軸に対する参照光の偏光方向が45°であるとする、遅相軸に対する物体光の偏光方向は-45°である。そのため、1/4波長板QWP1を通過した後、参照光の円偏光と物体光の円偏光とは互いに反対方向に回転している。なお、参照光および物体光は楕円偏光であってもよい。

10

【0029】

撮像光学系11は、インライン型の光学系で構成されている。すなわち、参照光は撮像素子15の撮像面のほぼ正面から入射し、被写体17は撮像素子15の撮像面の光学的な正面（光学的に撮像面の法線方向）に位置している。ただし、本実施形態では、物体光の光軸（被写体17と撮像素子15とを光学的に結ぶ軸）と、参照光の光軸とは角度θ異なっている。例えば物体光は撮像素子15の撮像面に対して垂直に入射する。これに対して、参照光は撮像面の法線方向に対して角度θ傾いて入射する。

20

【0030】

ミラーM2またはビームスプリッタBS2の角度を調整することによって、参照光の入射角θを調整することが可能である。本実施形態では、ミラーM2は、角度を調整可能のように微動回転ステージ上に配置され、回転可能に構成されている。

【0031】

30

図2は、偏光イメージング撮像装置14の偏光子アレイ16および撮像素子15の構成を示す図である。図2では、偏光子アレイ16および撮像素子15の一部だけを拡大して示す。偏光子アレイ16は、マトリクス状に配列している4種類の偏光領域16a・16b・16c・16dを含む。偏光領域16aは右上がり方向（45°方向）の偏光成分のみを通過させる。偏光領域16bは水平方向（0°方向）の偏光成分のみを通過させる。偏光領域16cは左上がり方向（-45°方向）の偏光成分のみを通過させる。偏光領域16dは垂直方向（90°方向）の偏光成分のみを通過させる。2行×2列の4つの偏光領域16a～16dを単位として、各偏光領域16a～16dが周期的に配置されている。各偏光領域16a～16dがそれぞれ撮像素子15の画素15a～15dに対応するように、偏光子アレイ16は撮像素子15上に配置されている。すなわち1つの偏光領域16aを通過した光は、1つの画素15aに入射する。

40

【0032】

なお、4種類の偏光領域が配列した偏光子アレイを備えた偏光イメージングカメラは、既に市販されている。例えば、株式会社フォトリテックスから偏光イメージングカメラ（型番PI-110）が市販されている。一般に偏光イメージングカメラは、デジタルホログラフィに利用するためではなく、被写体の偏光状態を観察するためのカメラ（それゆえ4種類の偏光領域を有する）として市販されている。そのため、本実施形態の偏光イメージング撮像装置14は、市販の偏光イメージングカメラから結像用のレンズ等を除いたもので構成することができる。それゆえ、市販の製品を用いて偏光イメージング撮像装置14を簡単に、低コストで製作することができる。また、本実施形態の撮像光学系11

50

は、ハーフミラー、レンズ、 $1/2$ 波長板、 $1/4$ 波長板、および偏光子等の一般的な光学素子によって構成することができる。撮像光学系11を構成するために位相シフトアレイ等の特殊な光学素子を用いる必要がない。また、撮像光学系11には結像光学系も不要であるので、光学素子の位置合わせが簡単である。そのため、撮像光学系11を簡単に、かつ低コストで構成することができる。

【0033】

上記の例では物体光が被写体を透過する構成を例に挙げて説明したが、物体光を被写体に照射し、反射・散乱された物体光を撮像するように撮像光学系を構成することもできる。

【0034】

(偏光子アレイ16の作用)

偏光子アレイ16の作用を説明するための参考例として、上記のデジタルホログラフィ装置1において、参照光の入射角 θ が 0° のときを考える。すなわち、参考例では物体光の光軸と参照光の光軸とが一致している。

【0035】

物体光および参照光が偏光子アレイ16に入射するとき、物体光の円偏光と参照光の円偏光とは、互いに逆向きに回転している。偏光領域16aに入射した物体光および参照光は、それらの水平方向より 45° 方向の偏光成分のみが通過する。例えば、水平方向より 45° の偏光を基準にして、偏光領域16aを通過した物体光と参照光との位相シフト量を0とする。

【0036】

これに対して、偏光領域16bに入射した物体光および参照光は、水平方向偏光成分(0° 方向の偏光成分)のみが通過する。各偏光領域に入射する物体光と参照光とは互いに逆方向に回転する円偏光である。そのため、偏光領域16aを通過した物体光および参照光に比べて、例えば、偏光領域16bを通過した物体光の成分は位相が $\pi/4$ 進み、偏光領域16bを通過した参照光の成分は位相が $\pi/4$ 遅れる。すなわち、偏光領域16bを通過すると物体光の位相に対して参照光の位相が $\pi/2$ 遅れる。偏光領域16bを通過した物体光と参照光との位相シフト量は $\pi/2$ となる。

【0037】

同様に、偏光領域16cに入射した物体光および参照光は、 -45° 方向の偏光成分のみが通過する。偏光領域16aを通過した物体光および参照光に比べて、偏光領域16cを通過した物体光の成分は位相が $\pi/2$ 進み、偏光領域16cを通過した参照光の成分は位相が $\pi/2$ 遅れる。すなわち、偏光領域16cを通過すると物体光の位相に対して参照光の位相が π 遅れる。偏光領域16cを通過した物体光と参照光との位相シフト量は π となる。

【0038】

同様に、偏光領域16dを通過した物体光と参照光との位相シフト量は $3\pi/2$ となる。ここでは、水平方向より $+45^\circ$ 方向の偏光を透過する偏光領域16aを通過した物体光および参照光の位相の関係を基準にし、物体光の位相に対する参照光の位相の遅れまたは進みを位相シフト量と定義している。

【0039】

各偏光領域16a~16dを通過した物体光および参照光における位相シフト量の違いは、入射する物体光と参照光とが互いに逆方向に回転する円偏光であるために生じる。また、偏光領域16aに比べて偏光領域16bを通過した物体光と参照光との位相シフト量が $\pi/2$ となるか $-\pi/2$ となるかは、入射する物体光および参照光の円偏光の回転方向に依存している。いずれにせよ、4種類の偏光領域16a~16dに対応して、 $\pi/2$ 刻みの4種類の位相シフト量の物体光および参照光が得られる。なお、4種類の偏光領域16a~16dは、任意の並びに配置することができる。

【0040】

各偏光領域16a~16dを通過した物体光および参照光は、対応する画素15a~1

10

20

30

40

50

5 dに入射する。物体光および参照光は、撮像面で干渉して干渉縞を形成する。撮像素子 15 は、物体光と参照光とが干渉することによって形成される干渉縞を撮像する。

【0041】

図3は、偏光子アレイ16の作用による、各画素上の位相シフト量を示す図である。参考例の場合、位相シフト量0の干渉縞と、位相シフト量 $\pi/2$ の干渉縞と、位相シフト量 π の干渉縞と、位相シフト量 $3\pi/2$ の干渉縞とが得られる。例えば位相シフト量0の干渉縞を扱う場合、位相シフト量0に対応する画素のデータを抜き出せばよい。参考例では位相シフト量の異なる4種類の干渉縞が得られるが、並列4段階位相シフト法(parallel four-step Phase-shifting digital holography)を適用して再生像を得ると撮像範囲が狭くなり、画質も高いものが得られない。また、4種類の位相シフト量を2種類の位相シフト量とみなして何の補正または補償もなく単に並列2段階位相シフト法を適用するだけでは、十分な画質の向上は期待できない。

10

【0042】

並列2段階位相シフト法(parallel two-step Phase-shifting digital holography)によって画質のよい再生像を得るためには、2種類の位相シフト量(例えば0および $\pi/2$)の干渉縞を得る必要がある。なお、位相シフト量0の干渉縞と位相シフト量 π の干渉縞とでは、2段階位相シフト法で画質のよい再生像を得ることはできない。2段階位相シフト法で画質のよい再生像を得るためには、位相シフト量0の干渉縞と位相シフト量 $\pi/2$ の干渉縞とを得ることが好ましい。

【0043】

20

(角度 θ の作用)

本実施形態では、ミラーM2の角度を調整して、物体光の光軸と参照光の光軸と間の角度 θ が、

$$\sin \theta = \lambda / (2d) \quad \cdots (1)$$

となるようにする。ここで、 λ はレーザ光の波長、 d は撮像素子15の画素のピッチである。なお、

$$\sin \theta = n \lambda / (2d) \quad (n \text{ は自然数}) \quad \cdots (1')$$

であってもよい。

【0044】

図4は、入射する物体光および参照光の位相シフト量を説明する図である。ここでは説明を簡単にするために、偏光子アレイを通過した場合ではなく、物体光および参照光が単一方向に偏光して各画素に入射する場合について説明する。図4では、撮像素子15の画素を点で示し、各画素に入射する物体光および参照光の進行方向を矢印で示す。物体光の光軸および参照光の光軸とを含む平面における各画素のピッチは d である。参照光は平面波である。また、物体光も、数個の画素の範囲ではほぼ平面波と見なせる。物体光の光軸は撮像面の法線に一致し、参照光の光軸は撮像面の法線から角度 θ 傾いている。

30

【0045】

図4に示すように、参照光の入射方向は角度 θ 傾いているので、上から1番目の画素に入射する参照光と、2番目の画素に入射する参照光とは光路が $d \times \sin \theta$ 異なる。すなわち、光路が $\lambda/2$ 異なる。2番目の画素への光路が半波長長いので、1番目の画素に入射する参照光の位相に対して、2番目の画素に入射する参照光の位相は π 遅れる。すなわち、隣接する画素の間で、参照光の位相が π 異なる。同様に、1番目の画素に入射する参照光と3番目の画素に入射する参照光との位相差は $2\pi (=0)$ である。

40

【0046】

1番目の画素に入射する物体光および参照光の位相シフト量を基準(0)とすると、2番目の画素上での物体光および参照光の位相シフト量は π となり、3番目の画素上での物体光および参照光の位相シフト量は0となる。実際には画素は点ではなく面なので、各画素上における位相シフト量の平均が、0または π になる。すなわち、物体光に対する参照光の角度 θ を所定の角度にすることにより、ある方向に隣接する画素同士の位相シフト量を π 異ならせることができる。角度 θ を調整することにより隣接する画素同士の位相シフ

50

ト量を調整することができるので、ミラーM2またはビームスプリッタBS2は位相調整機構（位相補正部）とも言える。なお、ミラーM2およびビームスプリッタBS2は、参照光の入射角を所定の角度 θ にするような配置・角度で固定されていてもよい。

【0047】

図5は、角度 θ の作用による各画素上の位相シフト量を示す図である。ここでは、横方向に並ぶ画素の位相シフト量は同じである。縦方向に沿って、各画素の位相シフト量は0または π が交互に並ぶ。例えば参照光が縦方向に傾いていれば図5に示すように縦方向において位相シフト量が増加する。もし参照光が横方向に傾いていれば横方向において位相シフト量が増加する。もし参照光が画素の行方向（横方向）および列方向（縦方向）に対して斜め方向に傾いていれば、図6に示すような斜めストライプの位相シフト量を得ることもできる。この場合、参照光の角度 θ は、

$$\sin \theta = n \lambda / (2 d \times \sqrt{2}) \quad (n \text{ は自然数}) \quad \cdots (2)$$

とする。

【0048】

（撮像光学系11で得られるホログラム）

図7は、撮像光学系11における各画素上の位相シフト量を示す図である。本実施形態の撮像光学系11では、偏光子アレイ16の作用と角度 θ の作用との両方が働くので、偏光子アレイ16の作用による位相シフト量（図3）と、角度 θ の作用による位相シフト量（図5）とが合成された干渉縞（ホログラム）が得られる。このように、偏光子アレイ16の作用による4種類の位相シフト量に、角度 θ の作用による位相シフト量を加えることで、撮像される干渉縞の位相シフト量を4種類から2種類、3種類、または5種類以上に変換することができる。ここでは、撮像される干渉縞の位相シフト量を4種類から2種類に変換する。

【0049】

撮像素子15が撮像する干渉縞には、位相シフト量が0の画素と、位相シフト量が $\pi/2$ の画素とが含まれる。そのため、偏光イメージング撮像装置14は、位相シフト量が $\pi/2$ だけ異なる2種類の干渉縞を一度に撮像することができる。また、位相シフト量が0の画素と、位相シフト量が $\pi/2$ の画素とは市松模様に並んでいる。

【0050】

偏光イメージング撮像装置14は、撮像した干渉縞の画像データを、再生装置12に出力する。位相シフト量が0、 $\pi/2$ の2種類であるので、並列2段階位相シフト法を用いて画質のよい再生像を得ることができる。

【0051】

なお、位相シフト量が0、 $\pi/2$ である2つの干渉縞を得るためには、偏光子アレイ16によって生じた4つの位相シフト量のうち、位相シフト量0、 π のいずれか一方に π の位相シフト量を加え、位相シフト量 $\pi/2$ 、 $3\pi/2$ のいずれか一方に π の位相シフト量 π を加えればよい。よって、偏光子アレイ16の偏光領域の配置が図2に示す配置とは異なる場合であっても、参照光が傾く方向を調整することにより、位相シフト量が0、 $\pi/2$ である2つの干渉縞を撮像することができる。

【0052】

（像再生処理）

再生装置12は、位相シフト処理部18、および回折処理部19を備える。再生装置12は、偏光イメージング撮像装置14から撮像された干渉縞を示す画像データを取得し、位相シフト処理部18に入力する。

【0053】

図8は、位相シフト処理部18における像再生アルゴリズムを説明するための図である。図8には干渉縞の一部だけを示す。撮像された干渉縞21は、位相シフト量が0の画素21aと、位相シフト量が $\pi/2$ の画素21bとの2種類の画素を含む。

【0054】

位相シフト処理部18は、これら2種類の画素21a・21bをそれぞれ抽出すること

10

20

30

40

50

により、位相シフト量が0の干渉縞22aと、位相シフト量が $\pi/2$ の干渉縞22bとを得る。

【0055】

次に、位相シフト処理部18は、位相シフト量が0の干渉縞22aの欠落している画素の画素値を内挿または外挿によって補間し、補間された位相シフト量が0の干渉縞23aを得る。同様に、位相シフト処理部18は、位相シフト量が $\pi/2$ の干渉縞22bの欠落している画素の画素値を補間し、補間された位相シフト量が $\pi/2$ の干渉縞23bを得る。

【0056】

これら位相シフト量の異なる2種類の干渉縞23a・23bから並列2段階位相シフト法によって物体光の複素振幅分布を得るためには、撮像素子15上での参照光の強度分布の情報が必要になる。参照光の強度分布は定常的で変化しないため、被写体17の干渉縞を撮像する前または後に、物体光を遮る等して参照光だけを撮像することができる。なお、参照光の強度分布を得る際に被写体17は不要である。再生装置12は、干渉縞と同様に、偏光イメージング撮像装置14から参照光の強度分布を取得する。なお、参照光の強度は物体光の強度より十分に強くなるようにする。参照光の強度が物体光の強度より十分に強い場合に、並列2段階位相シフト法を好適に適用することができる。

【0057】

また、参照光の強度分布が一様だと仮定できる場合あるいは推定できる場合は、参照光の強度分布の記録を省略し、物体光の複素振幅分布を得る位相シフト処理時に位相シフト処理部18によって参照光の強度分布を生成して用いてもよい。参照光の強度を変化させて得られた干渉縞を繰り返し処理することで、適切な参照光の強度分布を推定することができる。

【0058】

位相シフト処理部18は、補間された位相シフト量が0の干渉縞23aおよび補間された位相シフト量が $\pi/2$ の干渉縞23bに、並列2段階位相シフト法を適用することにより、撮像面上における物体光の複素振幅分布24を求めることができる。ここで得られる複素振幅分布24は、撮像面上の各画素の位置における物体光の振幅分布と位相分布とを表す。位相シフト処理部18は、物体光の複素振幅分布24を、回折処理部19に出力する。

【0059】

回折処理部19は、物体光の複素振幅分布24に回折積分を適用して被写体17の再生像を得る。撮像素子15の撮像面上における物体光の複素振幅分布24が得られれば、回折積分によって物体光の伝播を遡ることにより、任意の奥行き位置での合焦像（振幅分布を示す再生像）を得ることができる。また、合焦像について被写体17の3次元形状の情報を含む位相分布を得ることができる。

【0060】

本実施形態では、4種類の偏光領域を有する偏光イメージング撮像装置14を用いた撮像光学系11において、位相シフト量が2種類になるよう位相調整機構（ミラーM2、ビームスプリッタBS2）によって参照光の角度 θ を調整する。これにより、2種類の位相シフト量の干渉縞が空間分割多重された干渉縞を得ることができる。それゆえ、好適に並列2段階位相シフト法を適用することができ、画質のよい再生像を得ることができる。本実施形態では、空間分割多重数が2つ、すなわち見かけの画素数が $1/2$ になる。そのため、見かけの画素数が $1/4$ になる並列4段階位相シフト法を用いる場合よりも、干渉縞に記録される有効な情報が多い。それゆえ、デジタルホログラフィ装置の分解能および撮像範囲を向上することができる。

【0061】

また、本実施形態では、撮像光学系11を構成するために位相シフトアレイ等の特殊な光学素子を用いる必要がない。また、撮像光学系11には結像光学系も不要であるので、光学素子の位置合わせが簡単である。そのため、市販の製品を利用して撮像光学系11を

10

20

30

40

50

簡単に、かつ低コストで構成することができる。

【0062】

(シミュレーション結果)

本願発明者は、計算機による本実施の形態に基づく再生像の生成のシミュレーションを行った。以下に、そのシミュレーション結果について説明する。

【0063】

シミュレーションの条件は以下の通りである。被写体の撮像を行う光学系は、図1に示す撮像光学系11である。用いるレーザ光源は連続波(Continuous Wave: CW)レーザであり、その波長は $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ (赤色)である。撮像素子はCCDであり、画素数は 2448×1000 (横×縦)、画素ピッチは横方向 $3.45 \mu\text{m}$ 、縦方向 $3.45 \mu\text{m}$ である。被写体は向かって左からアヒル、柵、およびヒナのミニチュア模型である。アヒル、柵、およびヒナの撮像素子からの距離は、それぞれ、 300 mm 、 350 mm 、 380 mm である。上記の条件の下、計算機によって、参照光と被写体の物体光とが撮像面に作る干渉縞を取得し、再生像を計算するシミュレーションを行った。なお、干渉縞の取得も計算機によるシミュレーションによって行っている。

【0064】

図9は、被写体の再生像に関して、シミュレーションの結果を示す画像である。なお、比較のために、従来の方で行ったシミュレーションの結果も示す。なお、図9に示す再生像は撮像素子から 300 mm の位置に合焦したときの再生像である。

【0065】

図9の(a)は、特許文献1のように、4種類の位相シフト量の干渉縞から並列4段階位相シフト法を用いて再生した再生像を示す画像である。この方法では、有効な撮像範囲が狭く、かつ再生像が全体的に暗くなる。また、精細な再生像が得られない。

【0066】

図9の(b)は、特許文献2のように、特殊な光学素子(位相シフトアレイ)を用いて2種類の位相シフト量の干渉縞を取得し、2種類の位相シフト量の干渉縞から並列2段階位相シフト法を用いて再生した再生像を示す画像である。この方法では、有効な撮像範囲が広く、図9の(a)を像再生した方法に比べて分解能が1.4倍になる。しかしながら、この方法では、撮像光学系を構成するために2画素ごとに異なる偏光を検出する等の特殊な光学素子が必要になる。そのため、装置化する際に専用の素子を開発し、専用の素子を独自に量産する必要がある、コストが高くなる。位相シフトアレイを参照光の光路に配置する場合、結像光学系が必要になり、結像光学系の調整が必要になる。

【0067】

図9の(c)は、非特許文献3のように、干渉縞における4種類の位相シフト量を2種類の位相シフト量とみなして、並列2段階位相シフト法を用いて再生した再生像を示す画像である。この方法では、本来4種類である位相シフト量を2種類とみなして計算するために、得られる物体光の複素振幅分布は誤差を含む。そのため、誤差を含む物体光を回折積分で伝播させたときに、物体光が本来とは異なる方向に伝播することがある。結果的に、図9の(c)に示すように、得られた再生像において被写体の左右の位置が入れ替わってしまうことがある。これは、3次元的な位置を正確に計測できていないことを示す。すなわち、補正なしには3次元計測精度が出ないことを表す。それゆえ、この方法では、正確な再生像が得られない場合がある。

【0068】

図9の(d)は、本実施形態の構成(図1)により、2種類の位相シフト量の干渉縞から並列2段階位相シフト法を用いて再生した再生像を示す画像である。本実施形態の方法では、図9の(a)に比べて、有効な撮像範囲が2倍以上広くなり、分解能が1.4倍以上になる。そのため、精細な再生像を得ることができる。このように、本実施形態によれば、簡単に構成することができる撮像光学系を用いて、画質のよい再生像が得られるデジタルホログラフィ装置を実現することができる。そのためデジタルホログラフィの実用化を促進することができる。本実施形態のデジタルホログラフィ装置は、例えば、生細胞等

の微小物体の3次元動態の可視化、製造物の高速3次元構造計測・解析、および、ガソリン噴霧等の気体・液体流体現象の可視化・計測に利用することができる。

【0069】

(位相調整機構の調整方法)

位相調整機構(ミラーM2)の角度の調整方法について説明する。例えば $\theta = 0^\circ$ のとき、撮像素子15によって撮像される干渉縞の位相シフト量は4種類である。このとき、位相シフト量に応じたそれぞれの干渉縞の平均輝度値も4種類となる。すなわち、 2×2 の4画素毎に1画素を抽出して得られる4つの画像(干渉縞)について、各画像の平均輝度値は互いに異なる(4つの)値になると考えられる。位相調整機構によって参照光の角度 θ を 0° から変化させていくと、4つの画像の平均輝度値はやがて2つの値になる。このとき、位相シフト量が2種類になっている。すなわち、4画素毎に1画素を抽出して得られる4つの画像の平均輝度値を観察することにより、角度 θ が所定の条件(上式(1))を満たし、かつ位相シフト量が0と $\pi/2$ の2つの干渉縞が得られているかを判定することができる。この判定は偏光イメージング撮像装置の出力を受ける計算機によって行うことができる。よって、適切に位相調整機構の調整を行うことができる。

10

【0070】

また、上記判定は、撮像された干渉縞をフーリエ変換して空間周波数分布を観察することによっても行うことができる。位相調整機構が適切に調整されている場合、撮像された干渉縞は2種類の位相シフト量の干渉縞を含む。撮像された干渉縞が2種類の位相シフト量の干渉縞を含む場合と、撮像された干渉縞が4種類の位相シフト量の干渉縞を含む場合とでは、撮像された干渉縞をフーリエ変換して得られる空間周波数分布が異なる。よって、撮像された干渉縞が2種類の位相シフト量の干渉縞を含む場合の空間周波数分布をあらかじめ計算機に記憶しておき、該空間周波数分布と比較することにより、2つの干渉縞が得られているかを判定することができる。

20

【0071】

なお、ここまでは、参照光の光軸を撮像面の法線から角度 θ 傾ける構成を例に挙げて説明したが、本発明はこれに限定されない。撮像面の法線から角度 θ 傾けるのは物体光の光軸であってもよい。また、参照光の光軸と物体光の光軸との双方を傾けても良い。即ち、参照光の光軸と物体光の光軸との少なくとも一方を、上記式(1)、上記式(1')、または上記式(2)を満足するように、撮像面の法線から角度 θ 傾ければ良い。後述する実施の形態においても同様である。

30

【0072】

[実施形態2]

本実施形態では、位相調整機構の構成が異なる形態について説明する。なお、説明の便宜上、実施形態1にて説明した部材・構成と同じ機能を有する部材・構成については、同じ符号を付記し、以下では実施形態1と異なる部分についてのみ説明する。

【0073】

図10は、本実施形態のデジタルホログラフィ装置2の構成を示す模式図である。デジタルホログラフィ装置2は、参照光の光路にプリズム31(位相補正部、位相調整機構)を備える。実施形態1とは異なり、本実施形態では、ミラーM2およびビームスプリッタBS2は固定されている。プリズム31の屈折によって参照光の進行方向が変化される。プリズム31は、撮像素子15に対する入射角が所定の角度 θ になるように、配置角度を調整することができる。これにより、物体光の光軸と参照光の光軸とを角度 θ 異ならせることができる。それゆえ、偏光子アレイ16による4種類の位相シフト量の干渉縞を、2種類の位相シフト量の干渉縞に変換することができる。

40

【0074】

なお、参照光の光路に配置する位相調整機構となる光学素子(光学部材)は、プリズム31に限らない。プリズム31の代わりに、回折格子、空間光変調器、光路長を異ならせる光学素子アレイ等を配置して回折によって参照光の光軸を調整することもできる。また、ウェッジ型(くさび形)の光学素子を用いることもできる。また、再回折光学系を参照

50

光の光路に配置し、光学的に生成された空間周波数分布面において位相を変調させることも可能である。

【0075】

また、物体光と参照光との間の相対的な位相シフト量を調整できればよいので、参照光の光軸が撮像面に対して垂直になるようにし、物体光の光軸が撮像面に対して所定の角度 θ で入射するように構成してもよい。そのため、上記プリズム等の光学素子を参照光の光路に配置して、物体光の光軸と参照光の光軸との間の角度を調整することもできる。もちろん、参照光の光路と物体光の光路との双方に光学素子を配置して、物体光の光軸と参照光の光軸との間の角度を調整しても良い。

【0076】

10

〔実施形態3〕

本実施形態では、像再生の処理時に位相調整を行う形態について説明する。なお、説明の便宜上、実施形態1にて説明した部材・構成と同じ機能を有する部材・構成については、同じ符号を付記し、以下では実施形態1と異なる部分についてのみ説明する。

【0077】

（デジタルホログラフィ装置3の構成）

図11は、本実施形態のデジタルホログラフィ装置3の構成を示す模式図である。デジタルホログラフィ装置3は、撮像光学系32と、再生装置33とを備える。

【0078】

撮像光学系32は、実施形態1と同様の光学素子を有するが、撮像素子15に入射する物体光の光軸と参照光の光軸とが一致する点が実施形態1とは異なる。すなわち、物体光の光軸と参照光の光軸とのなす角度 θ が 0° である。そのため、撮像素子15によって撮像される干渉縞の位相シフト量は、図3に示すように、 0 、 $\pi/2$ 、 π 、 $3\pi/2$ の4種類となる。

20

【0079】

（像再生処理）

再生装置33は、位相シフト処理部18、位相調整部34（位相補正部）、および回折処理部19を備える。再生装置33は、偏光イメージング撮像装置14から撮像された干渉縞を示す画像データを取得し、位相シフト処理部18に入力する。

【0080】

30

図12は、再生装置33における像再生アルゴリズムを説明するための図である。図12には干渉縞の一部だけを示す。撮像された干渉縞41は、位相シフト量が 0 の画素(1,1)と、位相シフト量が $\pi/2$ の画素(2,1)と、位相シフト量が $3\pi/2$ の画素(1,2)と、位相シフト量が π の画素(2,2)との4種類の画素を含む。

【0081】

位相シフト処理部18は、並列2段階位相シフト法を用いて、物体光の複素振幅分布を求める。ここでは、実施形態1とは異なり、隣接画素の情報を位相シフト法の計算に直接用いる場合を例に挙げて説明する。

【0082】

撮像素子15によって撮像された干渉縞41の強度（撮像された光の強度）を $I(x,y)$ とする。参照光の強度を $I_r(x,y)$ とする。 x は画素の横方向の座標、 y は画素の縦方向の座標を表す。ここでは左上端の画素を $(x,y) = (1,1)$ とする。撮像された干渉縞41において、例えば、画素(1,1)の位相シフト量は 0 であり、画素(2,1)の位相シフト量は $\pi/2$ であり、画素(1,2)の位相シフト量は $3\pi/2$ であり、画素(2,2)の位相シフト量は π である。互いに隣接する画素 (x,y) および画素 $(x,y+1)$ の間の位相シフト量の差を α として、並列2段階位相シフト法を用いて、撮像面上の物体光の複素振幅分布 $U(x,y) = A_o(x,y)\exp\{j\phi(x,y)\}$ を以下のように求める。ここで、 $A_o(x,y)$ は座標 (x,y) における物体光の振幅分布を表し、 $\phi(x,y)$ は座標 (x,y) における物体光の位相分布を表す。また、 j は虚数単位である。

40

【0083】

50

【数 1】

$$I'(x,y) = I(x,y) - Ir(x,y) \quad \dots(3)$$

$$|Ao(x,y)|^2 = \frac{v' - \sqrt{v'^2 - 4uw'}}{2u}, \quad \dots(4)$$

$$u = 2(1 - \cos\alpha), \quad \dots(5)$$

$$v' = 2 \left[(1 - \cos\alpha) \{ I'(x,y) + I'(x,y+1) \} + 2Ir(x,y) \sin^2\alpha \right], \quad \dots(6)$$

10

$$w' = I'(x,y)^2 + I'(x,y+1)^2 - 2I'(x,y) I'(x,y+1) \cos\alpha. \quad \dots(7)$$

【0084】

上式(3) - (7)によって、座標(x,y)における振幅分布の絶対値の2乗である $|Ao(x,y)|$ が求められる。この値を用いて、座標(x,y)における複素振幅分布 $U(x,y)$ を求める。

【0085】

【数 2】

20

$$U(x,y) = \begin{cases} \frac{1}{2\sqrt{Ir(x,y)}} \left[\left\{ I'(x,y) - |Ao(x,y)|^2 \right\} + j \left\{ I'(x,y+1) - I'(x,y) \cos\alpha - (1 - \cos\alpha) |Ao(x,y)|^2 \right\} \right], & (x-y \text{ が奇数のとき}) \\ \frac{1}{2\sqrt{Ir(x,y)}} \left[\left\{ I'(x,y) - |Ao(x,y)|^2 \right\} - j \left\{ I'(x,y+1) - I'(x,y) \cos\alpha - (1 - \cos\alpha) |Ao(x,y)|^2 \right\} \right], & (x-y \text{ が偶数のとき}) \end{cases} \quad \dots(8)$$

【0086】

なお、水平方向に互いに隣接する画素(x,y)および画素(x+1,y)から座標(x,y)における複素振幅分布 $U(x,y)$ を求める場合は、以下の式を用いることができる。

【0087】

【数 3】

30

$$U(x,y) = \begin{cases} \frac{1}{2\sqrt{Ir(x,y)}} \left[\left\{ I'(x,y) - |Ao(x,y)|^2 \right\} + j \left\{ I'(x+1,y) - I'(x,y) \cos\alpha - (1 - \cos\alpha) |Ao(x,y)|^2 \right\} \right], & (x-y \text{ が偶数のとき}) \\ \frac{1}{2\sqrt{Ir(x,y)}} \left[\left\{ I'(x,y) - |Ao(x,y)|^2 \right\} - j \left\{ I'(x+1,y) - I'(x,y) \cos\alpha - (1 - \cos\alpha) |Ao(x,y)|^2 \right\} \right], & (x-y \text{ が奇数のとき}) \end{cases} \quad \dots(9)$$

$$v' = 2 \left[(1 - \cos\alpha) \{ I'(x,y) + I'(x+1,y) \} + 2Ir(x,y) \sin^2\alpha \right], \quad \dots(10)$$

$$w' = I'(x,y)^2 + I'(x+1,y)^2 - 2I'(x,y) I'(x+1,y) \cos\alpha. \quad \dots(11)$$

【0088】

40

位相シフト処理部18は、得られた物体光の複素振幅分布 $U(x,y)$ を位相調整部34に出力する。

【0089】

このようにして得られた物体光の複素振幅分布 $U(x,y)$ は、4種類の位相シフト量を含む干渉縞に並列2段階位相シフト法を適用して得られたものである。位相の誤差を含む。

【0090】

そこで、位相調整部34は、物体光の複素振幅分布 $U(x,y)$ に対して各画素(x,y)に応じた位相調整量を加える。これにより、位相が補正された正確な物体光の複素振幅分布 $U'(x,y)$ を得ることができる。具体的には、位相調整部34は、撮像された干渉縞に

50

おける位相シフト量と同じ位相値を、対応する画素の位置 (x,y) における物体光の位相 ϕ に加える。位相調整部 34 は、補正された物体光の複素振幅分布 $U'(x,y)$ を回折処理部 19 に出力する。

【0091】

回折処理部 19 は、補正された物体光の複素振幅分布 $U'(x,y)$ に基づいて、回折積分を行うことにより、被写体の再生像を求める。

【0092】

本実施形態では、位相調整機構を有しない撮像光学系 32 で位相シフト量が異なる 4 種類の干渉縞を撮像する。この位相シフト量が異なる 4 種類の干渉縞に対して並列 2 段階位相シフト法を適用し、像再生の計算過程において、物体光の位相を補正することにより、正確な物体光の複素振幅分布を得る。本実施形態では、像再生の計算過程において位相を補正することができるので、位相調整機構の角度 θ の調整を必要としない。

【0093】

なお、位相シフト法の計算後に得られる物体光の複素振幅分布 $U(x,y)$ に 2 次元フーリエ変換を施し、空間スペクトル分布においてスペクトルのずれを補正することでも、物体光の位相を補正することができる。位相を補正した空間スペクトル分布に逆フーリエ変換を施すことにより、補正された物体光の複素振幅分布 $U'(x,y)$ を得ることができる。

【0094】

なお、位相調整部 34 が位相値を加える位相調整の処理を、位相シフト法を適用する前に、撮像された干渉縞 41 に対して行うこともできる。その後、位相調整された干渉縞に対して上記並列 2 段階位相シフト法を適用することで、位相が補正された正確な物体光の複素振幅分布 U' が得られる。

【0095】

〔実施形態 4〕

本実施形態では、像再生の処理時に位相調整を行う別の形態について説明する。なお、説明の便宜上、実施形態 3 にて説明した部材・構成と同じ機能を有する部材・構成については、同じ符号を付記し、以下では実施形態 3 と異なる部分についてのみ説明する。

【0096】

本実施形態では、デジタルホログラフィ装置 3 の構成は実施形態 3 と同じである。本実施形態では、並列 2 段階位相シフト法を適用する際に、画素を分割して補間処理を行う点が実施形態 3 とは異なる。

【0097】

図 13 は、再生装置 33 における像再生アルゴリズムを説明するための図である。図 13 には干渉縞の一部だけを示す。撮像された干渉縞は、位相シフト量が 0 の画素 (1,1) と、位相シフト量が $\pi/2$ の画素 (2,1) と、位相シフト量が $3\pi/2$ の画素 (1,2) と、位相シフト量が π の画素 (2,2) との 4 種類の画素を含む。

【0098】

位相シフト処理部 18 は、並列 2 段階位相シフト法を用いて、物体光の複素振幅分布を求める。位相シフト処理部 18 は、撮像された干渉縞 41 から、位相シフト量が 0 の画素および位相シフト量が π の画素を抽出した干渉縞 42a を生成する。また、位相シフト処理部 18 は、撮像された干渉縞 41 から、位相シフト量が $\pi/2$ の画素および位相シフト量が $3\pi/2$ の画素を抽出した干渉縞 42b を生成する。

【0099】

次に、位相シフト処理部 18 は、位相シフト量が 0 および π の干渉縞 42a の欠落している画素の画素値を、縦方向に隣接する画素を用いて内挿または外挿によって補間し、補間された位相シフト量が 0 および π の干渉縞 43a を得る。そのため、奇数列に位置する画素は位相シフト量が 0 であり、偶数列に位置する画素は位相シフト量が π である。同様に、位相シフト処理部 18 は、位相シフト量が $\pi/2$ および $3\pi/2$ の干渉縞 42b の欠落している画素の画素値を縦方向に隣接する画素を用いて補間し、補間された位相シフト

量が $\pi/2$ および $3\pi/2$ の干渉縞43bを得る。そのため、奇数列に位置する画素は位相シフト量が $3\pi/2$ であり、偶数列に位置する画素は位相シフト量が $\pi/2$ である。

【0100】

2つの干渉縞43a・43bの間では、対応する画素の位相シフト量の差が $\pi/2$ である。そのため、干渉縞43aに対して干渉縞43bは位相シフト量が $-\pi/2$ であると言える。それゆえ、干渉縞43a・43bおよび参照光の強度分布 $I_r(x,y)$ を用いて並列2段階位相シフト法を適用することができる。

【0101】

位相シフト処理部18は、補間された干渉縞43aおよび補間された干渉縞43bに、並列2段階位相シフト法を適用することにより、撮像面上における物体光の複素振幅分布 $U(x,y)$ を求めることができる。位相シフト処理部18は、物体光の複素振幅分布 $U(x,y)$ を位相調整部34に出力する。ただし、補間された干渉縞43a・43bは、元々隣接する列の間で位相シフト量が π 異なっていた。そのため、ここで得られた物体光の複素振幅分布 $U(x,y)$ にも、隣接する列の間で位相 π のずれが含まれている。

【0102】

そこで、位相調整部34は、物体光の複素振幅分布 $U(x,y)$ に対して各画素 (x,y) に応じた位相調整量を加える。これにより、位相が補正された正確な物体光の複素振幅分布 $U'(x,y)$ を得ることができる。具体的には、位相調整部34は、位相シフト法を適用する前の補間された干渉縞43a・43bにおける位相シフト量を均一(0)にするような位相値を、対応する画素の位置 (x,y) における物体光の位相 ϕ に加える。具体的には、偶数列の画素(第1画素)の物体光の位相に対して基準位相値(例えば位相値 $\pi/2$)を加え、奇数列の画素(上記第1画素に隣接する第2画素)の物体光の位相に対して上記基準位相値に π を加減算した位相値(例えば $(3\pi/2)$)を加えることにより、位相が補正された正確な物体光の複素振幅分布 $U'(x,y)$ を得る。位相調整部34は、補正された物体光の複素振幅分布 $U'(x,y)$ を回折処理部19に出力する。

【0103】

回折処理部19は、補正された物体光の複素振幅分布 $U'(x,y)$ に基づいて、回折積分を行うことにより、被写体の再生像を求める。

【0104】

本実施形態および実施形態3では、位相シフト量が異なる4種類の干渉縞に対して並列2段階位相シフト法を適用し、得られた物体光の複素振幅分布 U に残留する位相のずれを補正するために、物体光の位相にずれに応じた位相値を加える。これにより、正確な物体光の複素振幅分布を得ることができる。本実施形態では、像再生の計算過程において位相を補正することができるので、位相調整機構の角度 θ の調整を必要としない。

【0105】

[実施形態5]

本実施形態では、参照光の入射角を傾け、さらに像再生の処理時に位相調整を行う形態について説明する。本実施形態は実施形態1と実施形態3とを組み合わせたような形態である。なお、説明の便宜上、実施形態1、3にて説明した部材・構成と同じ機能を有する部材・構成については、同じ符号を付記し、以下では実施形態1、3と異なる部分についてのみ説明する。

【0106】

図14は、本実施形態のデジタルホログラフィ装置5の構成を示す模式図である。デジタルホログラフィ装置5は、撮像光学系11と、再生装置33とを備える。撮像光学系11は、実施形態1と同様の構成である。再生装置33は、実施形態3と同様の構成である。

【0107】

本実施形態では、参照光の光軸を物体光の光軸に対して傾けて参照光を入射する。しかしながら、角度 θ が所定の値からずれており $\sin\theta \neq \lambda/(2d)$ である場合、撮像された干渉縞の位相シフト量が正確に0と $\pi/2$ の2種類とはならないことがある。

【0108】

そこで、本実施形態では、撮像された干渉縞に残留する位相シフト量の誤差を、位相調整部34の位相調整処理によって補正する。具体的には、位相シフト処理部18が撮像された干渉縞に並列2段階位相シフト法を適用して物体光の複素振幅分布を求める。その後、位相調整部34が物体光の複素振幅分布に対して画素に応じた位相値の加算を行うことにより、位相シフト量の誤差を補正する。これにより、正確な物体光の複素振幅分布を得ることができる。

【0109】

加算する位相値については、誤差がある場合、撮像された画像をフーリエ変換して得られる空間周波数分布のピーク位置が本来と異なることから算出する。例えば、物体光が撮像素子へ垂直入射する平行光である場合、本来フーリエ変換面では画像の中央にピーク値が現れる。位相調整機構による調整量が上記式(1)の値でない場合、空間周波数分布のピーク位置が調整量の誤差に応じてずれる。このことから、本来得られるべき調整量に対する実際の調整量の差を、フーリエ変換を駆使することにより知ることができる。そして、調整処理により補正すべき位相値を加えることができる。また、位相調整機構の調整精度が低い場合等においては調整処理が必須であり、被写体の撮像前に物体光を平行光にするなどして事前に誤差量を調べることによっても調整可能である。

10

【0110】

本実施形態によれば、撮像光学系の各光学素子のアライメントに誤差が存在する場合であっても、干渉縞を撮像した後で、再生装置33の位相調整処理によって光学系のアライメントの誤差を補正することができる。

20

【0111】

本発明は上述した各実施形態に限定されるものではなく、請求項に示した範囲で種々の変更が可能であり、異なる実施形態にそれぞれ開示された技術的手段を適宜組み合わせて得られる実施形態についても本発明の技術的範囲に含まれる。

【0112】

[ソフトウェアによる実現例]

最後に、再生装置12・33の各ブロック、特に位相シフト処理部18、回折処理部19および位相調整部34は、集積回路(ICチップ)上に形成された論理回路によってハードウェア的に実現してもよいし、CPU(Central Processing Unit)を用いてソフトウェア的に実現してもよい。

30

【0113】

後者の場合、再生装置12・33は、各機能を実現するプログラムの命令を実行するCPU、上記プログラムを格納したROM(Read Only Memory)、上記プログラムを展開するRAM(Random Access Memory)、上記プログラムおよび各種データを格納するメモリ等の記憶装置(記録媒体)などを備えている。そして、本発明の目的は、上述した機能を実現するソフトウェアである再生装置12・33の制御プログラムのプログラムコード(実行形式プログラム、中間コードプログラム、ソースプログラム)をコンピュータで読み取り可能に記録した記録媒体を、上記再生装置12・33に供給し、そのコンピュータ(またはCPUやMPU)が記録媒体に記録されているプログラムコードを読み出し実行することによっても、達成可能である。

40

【0114】

上記記録媒体としては、一時的でない有形の媒体(non-transitory tangible medium)、例えば、磁気テープやカセットテープ等のテープ類、フロッピー(登録商標)ディスク/ハードディスク等の磁気ディスクやCD-ROM/MO/MD/DVD/CD-R等の光ディスクを含むディスク類、ICカード(メモリカードを含む)/光カード等のカード類、マスクROM/EPROM/EEPROM(登録商標)/フラッシュROM等の半導体メモリ類、あるいはPLD(Programmable logic device)やFPGA(Field Programmable Gate Array)等の論理回路類などを用いることができる。

【0115】

50

また、再生装置 12・33 を通信ネットワークと接続可能に構成し、上記プログラムコードを通信ネットワークを介して供給してもよい。この通信ネットワークは、プログラムコードを伝送可能であればよく、特に限定されない。例えば、インターネット、イントラネット、エキストラネット、LAN、ISDN、VAN、CATV 通信網、仮想専用網 (Virtual Private Network)、電話回線網、移動体通信網、衛星通信網等が利用可能である。また、この通信ネットワークを構成する伝送媒体も、プログラムコードを伝送可能な媒体であればよく、特定の構成または種類のものに限定されない。例えば、IEEE 1394、USB、電力線搬送、ケーブル TV 回線、電話線、ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) 回線等の有線でも、IrDA やリモコンのような赤外線、Bluetooth (登録商標)、IEEE 802.11 無線、HDR (High Data Rate)、NFC (Near Field Communication)、DLNA (Digital Living Network Alliance) (登録商標)、携帯電話網、衛星回線、地上波デジタル網等の無線でも利用可能である。なお、本発明は、上記プログラムコードが電子的な伝送で具現化された、搬送波に埋め込まれたコンピュータデータ信号の形態でも実現され得る。

【0116】

[まとめ]

本発明に係るデジタルホログラフィ装置は、参照光および被写体を照明する物体照明光を供給する光源と、撮像装置とを備え、物体照明光が上記被写体を介して到達する光である物体光と参照光とが作る干渉縞を上記撮像装置が撮像するデジタルホログラフィ装置であって、上記撮像装置は、互いに通過させる光の偏光方向が異なる 4 つの偏光領域を有する偏光子アレイと、各偏光領域に対応して配列している画素を有する撮像素子とを備え、上記デジタルホログラフィ装置は、円偏光または楕円偏光である物体光と、物体光とは反対方向に回転する円偏光または楕円偏光である参照光とを上記偏光子アレイに入射させ、上記 4 つの偏光領域に応じて生じる 4 種類の位相シフト量の差を補正する位相補正部と、上記撮像装置が撮像した干渉縞に並列 2 段階位相シフト法を適用して再生像を生成する再生部とを備えることを特徴としている。

【0117】

上記の構成によれば、市販されている偏光イメージングカメラを利用して簡単に撮像装置を含むデジタルホログラフィ装置を構成することができる。そして、位相補正部によって上記 4 つの偏光領域に応じて生じる 4 種類の位相シフト量の差を補正することができるので、適切に並列 2 段階位相シフト法を適用することができる。それゆえ、デジタルホログラフィ装置は、画質のよい再生像を得ることができる。

【0118】

上記位相補正部は、上記撮像素子に入射する物体光の光軸に対して上記撮像素子に入射する参照光の光軸を所定の角度傾ける機構を有する構成とすることもできる。

【0119】

上記の構成によれば、撮像素子上において光軸が傾いた方向に沿って、物体光の位相に対する参照光の位相が変化する。そのため、画素の位置に応じて物体光と参照光との位相シフト量を変化させることができる。これにより、上記 4 つの偏光領域に応じて生じる 4 種類の位相シフト量の差を補正することができる。

【0120】

上記所定の角度を θ とし、物体光および参照光の波長を λ とし、物体光の上記光軸と参照光の上記光軸とを含む平面における上記画素のピッチを d とし、 n を自然数とすると、 $\sin \theta = n \lambda / (2 d)$ である構成とすることもできる。

【0121】

上記の構成によれば、例えばある方向に並ぶ画素列と隣接する画素列との間で、物体光の位相に対する参照光の位相を π シフトさせることができる。これにより、上記 4 つの偏光領域に応じて生じる 4 種類の位相シフト量の差を補正することができる。

【0122】

上記位相補正部は、上記 4 つの偏光領域に応じて生じる 4 種類の位相シフト量を、2 種

類の位相シフト量に変換し、上記撮像装置は、互いに位相シフト量が異なる2種類の干渉縞を一度に撮像する構成とすることもできる。

【0123】

上記の構成によれば、並列2段階位相シフト法に適した2種類の干渉縞を得ることができるので、再生像の画質を向上することができる。

【0124】

上記2種類の干渉縞のうち、一方の干渉縞の位相シフト量を0とすると、他方の干渉縞の位相シフト量は $\pi/2$ である構成とすることもできる。

【0125】

上記位相補正部は、参照光または物体光を反射、屈折または回折することによって上記角度を調整することが可能な光学部材を含む構成とすることもできる。

10

【0126】

上記光学部材は、参照光の光路に配置されている構成とすることもできる。

【0127】

上記光学部材は、物体光の光路に配置されている構成とすることもできる。

【0128】

上記撮像装置は、互いに位相シフト量が異なる4種類の干渉縞を一度に撮像し、上記再生部は、並列2段階位相シフト法を用いて上記撮像装置が撮像した上記4種類の干渉縞から物体光の複素振幅分布を生成する位相シフト処理部を含み、上記位相補正部は、上記位相シフト処理部が生成した物体光の複素振幅分布に対して、上記画素に応じた位相値を加えることによって位相が補正された物体光の複素振幅分布を得る構成とすることもできる。

20

【0129】

上記の構成によれば、位相シフト処理部が生成した物体光の複素振幅分布に含まれる、4種類の位相シフト量の差に起因する位相の誤差を、位相補正部が補正することができる。それゆえ、上記4つの偏光領域に応じて生じる4種類の位相シフト量の差を補正することができる。

【0130】

上記位相補正部は、上記位相シフト処理部が生成した物体光の複素振幅分布に対して、上記画素毎に、上記撮像された干渉縞の位相シフト量に応じた位相値を加えることによって位相が補正された物体光の複素振幅分布を得る構成とすることもできる。

30

【0131】

上記撮像装置が撮像した上記4種類の干渉縞は、位相シフト量が0の第1画素と、位相シフト量が $\pi/2$ の第2画素と、位相シフト量が π の第3画素と、位相シフト量が $3\pi/2$ の第4画素とを含み、上記位相補正部は、上記位相シフト処理部が生成した物体光の複素振幅分布に対して、上記第1画素において位相値0を加え、上記第2画素において位相値 $\pi/2$ を加え、上記第3画素において位相値 π を加え、上記第4画素において位相値 $3\pi/2$ を加える構成とすることもできる。

【0132】

上記位相シフト処理部は、上記撮像装置が撮像した上記4種類の干渉縞から、第1位相シフト量の画素と第2位相シフト量の画素とを抽出して第1干渉縞を生成し、第3位相シフト量の画素と第4位相シフト量の画素とを抽出して第2干渉縞を生成し、上記第1位相シフト量と上記第3位相シフト量とは $\pi/2$ 異なっており、上記第2位相シフト量と上記第4位相シフト量とは $\pi/2$ 異なっており、上記位相シフト処理部は、上記第1干渉縞および上記第2干渉縞に並列2段階位相シフト法を適用して物体光の複素振幅分布を生成し、上記位相補正部は、上記位相シフト処理部が生成した物体光の複素振幅分布に対して、上記画素毎に、上記第1干渉縞と上記第2干渉縞との間の位相シフト量の差に応じた位相値を加えることによって位相が補正された物体光の複素振幅分布を得る構成とすることもできる。

40

【0133】

50

上記第1位相シフト量と上記第2位相シフト量とは π 異っており、上記第3位相シフト量と上記第4位相シフト量とは π 異っており、上記位相補正部は、上記位相シフト処理部が生成した物体光の複素振幅分布に対して、第1画素において位相値0を加え、上記第1画素に隣接する第2画素において位相値 π を加える構成とすることもできる。

【産業上の利用可能性】

【0134】

本発明は、デジタルホログラフィ装置に利用することができる。また、本発明は、例えば、生細胞等の微小物体の3次元動態の可視化、製造物の高速3次元構造計測・解析、および、ガソリン噴霧等の気体・液体流体现象の可視化・計測に利用することができる。

【符号の説明】

10

【0135】

1・2・3・5 デジタルホログラフィ装置

11・32 撮像光学系

12・33 再生装置（再生部）

13 レーザ光源（光源）

14 偏光イメージング撮像装置（撮像装置）

15 撮像素子

15a～15d 画素

16 偏光子アレイ

16a～16d 偏光領域

20

17 被写体

18 位相シフト処理部

19 回折処理部

21 干渉縞

21a・21b 画素

22a・22b 干渉縞

23a・23b 干渉縞

24 複素振幅分布

31 プリズム（位相補正部、光学部材）

34 位相調整部（位相補正部）

30

41 干渉縞

42a・42b 干渉縞

43a・43b 干渉縞

BE1・BE2 ビームエキスパンダ

BEa 対物レンズ

BEb ピンホール

BEc コリメータレンズ

BS1・BS2 ビームスプリッタ（位相補正部、光学部材）

LP1 偏光子

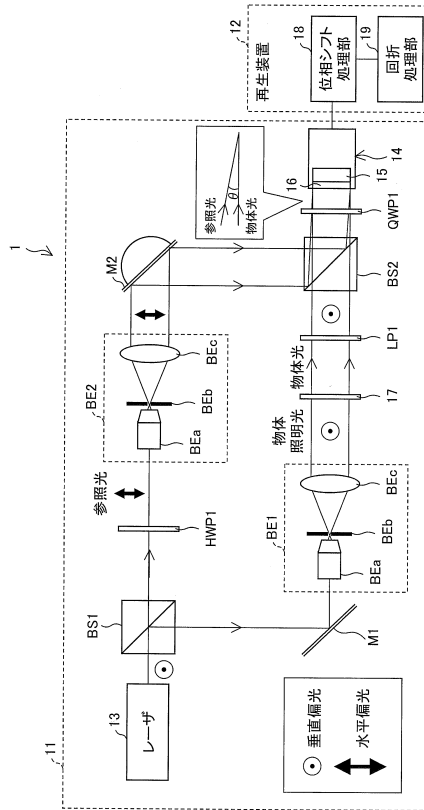
M1・M2 ミラー（位相補正部、光学部材）

40

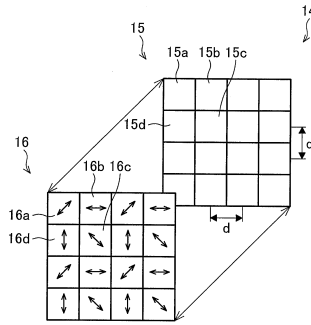
HWP1 1／2波長板

QWP1 1／4波長板

【図 1】



【図 2】

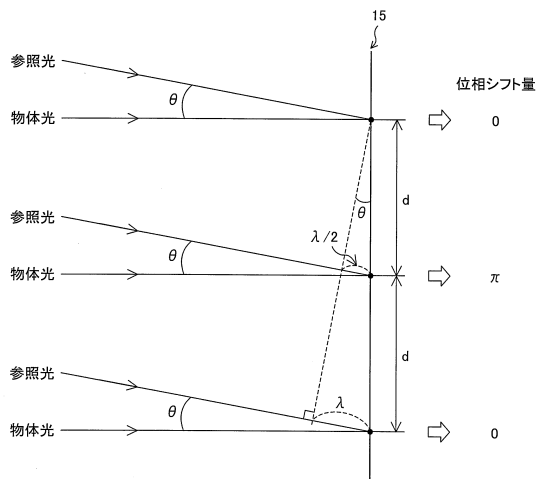


【図 3】

位相シフト量

0	$\pi/2$	0	$\pi/2$
$3\pi/2$	π	$3\pi/2$	π
0	$\pi/2$	0	$\pi/2$
$3\pi/2$	π	$3\pi/2$	π

【図 4】



【図 6】

位相シフト量

0	π	0	π
π	0	π	0
0	π	0	π
π	0	π	0

【図 7】

1pixel

0	$\pi/2$	0	$\pi/2$
$3\pi/2$	π	$3\pi/2$	π
0	$\pi/2$	0	$\pi/2$
$3\pi/2$	π	$3\pi/2$	π

偏光子アレイによる
位相シフト量

+

1pixel

0	0	0	0
π	π	π	π
0	0	0	0
π	π	π	π

位相調整機構による
位相シフト量

=

1pixel

0	$\pi/2$	0	$\pi/2$
$\pi/2$	0	$\pi/2$	0
0	$\pi/2$	0	$\pi/2$
$\pi/2$	0	$\pi/2$	0

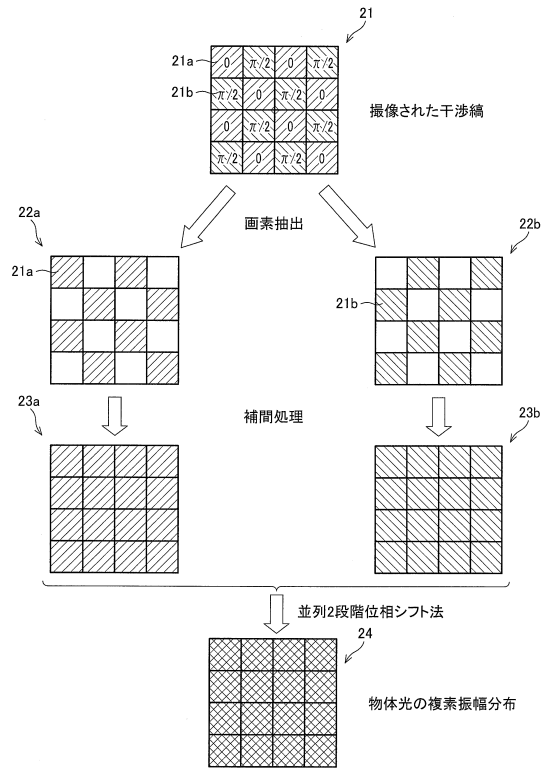
撮像される干渉縞の
位相シフト量

【図 5】

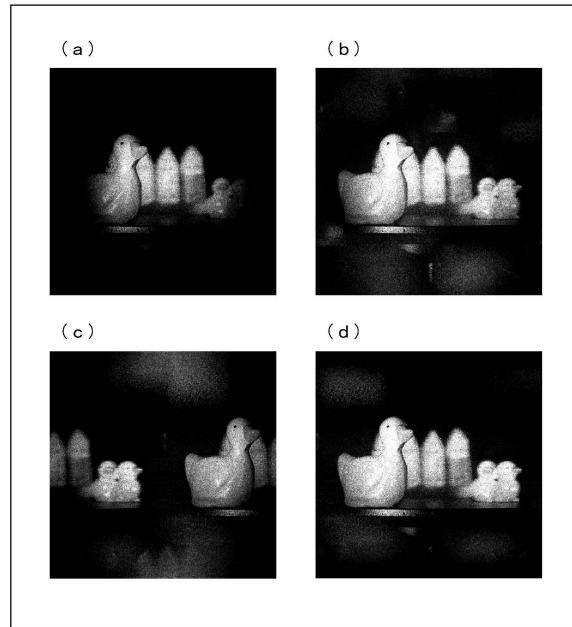
位相シフト量

0	0	0	0
π	π	π	π
0	0	0	0
π	π	π	π

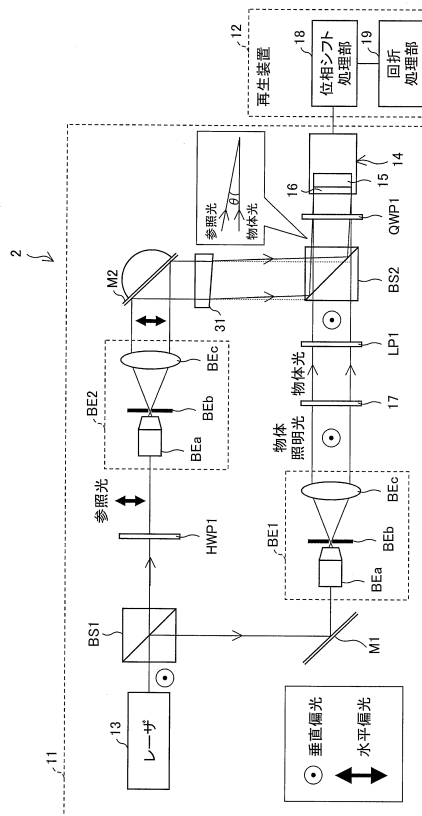
【図 8】



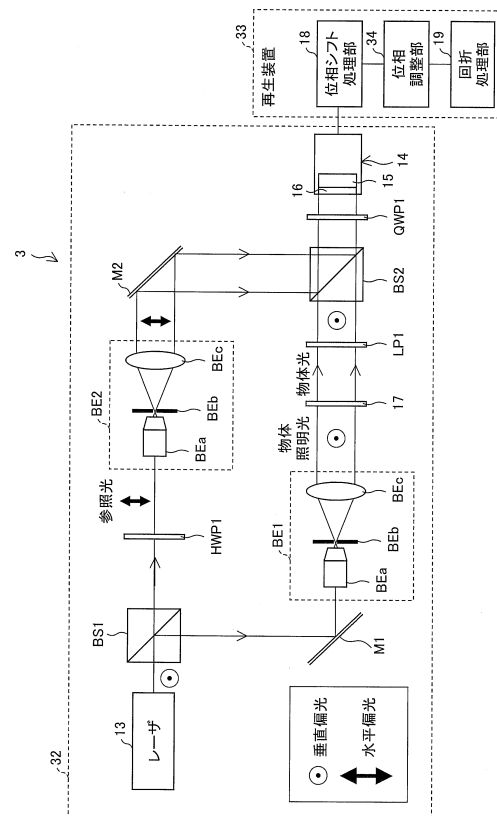
【図 9】



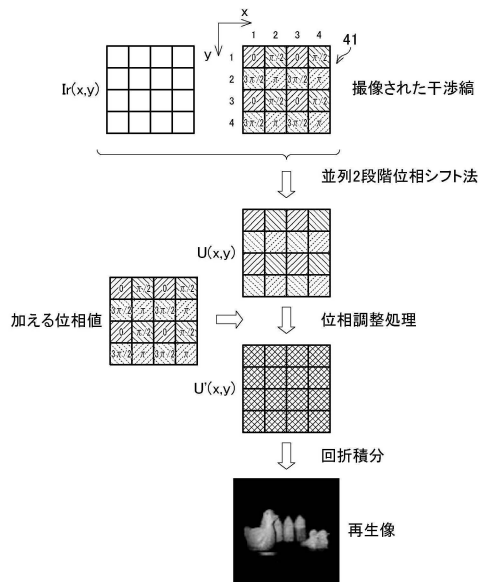
【図 10】



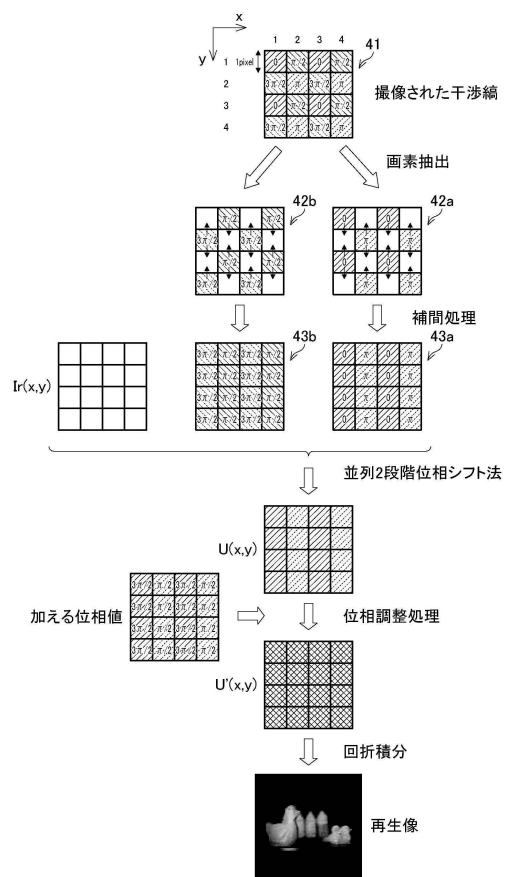
【図 11】



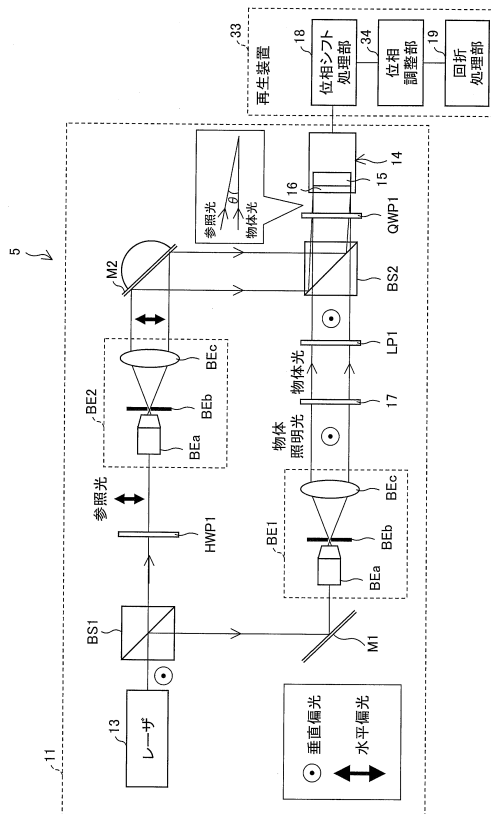
【図 1 2】



【図 1 3】



【図 1 4】



フロントページの続き

(72)発明者 伊藤 安軌

京都府京都市左京区松ヶ崎橋上町1番地 国立大学法人京都工芸繊維大学内

審査官 廣田 健介

(56)参考文献 国際公開第2012/002207 (WO, A1)

国際公開第2009/066771 (WO, A1)

特開2008-122565 (JP, A)

特開2005-283683 (JP, A)

角江 崇 Takashi KAKUE, 高速度カメラを用いた並列位相シフトデジタルホログラフィ Parallel phase-sifting digital holography using high-speed camera, 映像情報メディア学会 技術報告 Vol. 34 No. 36 ITE Technical Report, 日本, (社)映像情報メディア学会 The Institute of Image Information and Television Engineers, 第34巻

角江崇 外8名, 高速度並列位相シフトデジタルホログラフィの実証, 3次元コンファレンス 2010, 日本, 2010年 7月, 1-4頁

田原樹 外8名, 同時位相シフト干渉計測法に基づくシングルショット偏光分布イメージング可能なデジタルホログラフィ, Optics & Photonics Japan講演予稿集, 日本, 2011年11月 28日, 29pF2

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G03H 1/00-5/00

G02B 5/30

G01B 9/00-11/30

JSTPlus/JST7580 (JDreamII)