

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5339535号  
(P5339535)

(45) 発行日 平成25年11月13日(2013.11.13)

(24) 登録日 平成25年8月16日(2013.8.16)

(51) Int.Cl. F I  
**GO3H 1/10 (2006.01)** GO3H 1/10  
**GO3H 1/08 (2006.01)** GO3H 1/08  
**GO2B 5/30 (2006.01)** GO2B 5/30

請求項の数 10 (全 52 頁)

(21) 出願番号	特願2009-542605 (P2009-542605)	(73) 特許権者	504255685
(86) (22) 出願日	平成20年11月21日(2008.11.21)		国立大学法人京都工芸繊維大学
(86) 国際出願番号	PCT/JP2008/071246		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	W02009/066771	(74) 代理人	110000338
(87) 国際公開日	平成21年5月28日(2009.5.28)		特許業務法人原謙三国際特許事務所
審査請求日	平成23年9月29日(2011.9.29)	(72) 発明者	粟辻 安浩
(31) 優先権主張番号	特願2007-303127 (P2007-303127)		日本国京都府京都市左京区松ヶ崎橋上町1番地
(32) 優先日	平成19年11月22日(2007.11.22)		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	金子 篤志
(31) 優先権主張番号	特願2008-31965 (P2008-31965)		日本国京都府京都市左京区松ヶ崎橋上町1番地
(32) 優先日	平成20年2月13日(2008.2.13)		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	小山 貴正
特許権者において、権利譲渡・実施許諾の用意がある。			日本国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及び位相板アレイ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

光を出射し、前記出射した光に基づいて被写体から放射または透過または散乱または反射または回折される物体光を供給するために設けられた光源と、

前記光源から出射された光を、その進行方向に垂直な平面上において互いに位相が異なる2種類の参照光に分割する位相シフト素子と、

前記位相シフト素子によって分割された2種類の参照光と前記被写体から放射または透過または散乱または反射または回折された物体光とがそれぞれ干渉した2種類の干渉縞が記録される撮像面を有する撮像手段と、

前記撮像面に記録された2種類の干渉縞と前記参照光の強度分布とに基づいて前記被写体の再生像を生成する再生像生成器とを備えたことを特徴とするデジタルホログラフィ装置。

【請求項2】

前記位相シフト素子は、前記光源から出射された光の進行方向に垂直な平面上において格子状に配置された2種類の領域を有するアレイデバイスである請求項1記載のデジタルホログラフィ装置。

【請求項3】

前記撮像手段は、CCDカメラまたはCMOSイメージセンサーカメラであり、

前記2種類の領域は、前記撮像手段の各画素に対応して配置されている請求項2記載のデジタルホログラフィ装置。

10

20

## 【請求項 4】

前記位相シフト素子は、位相シフト計測手段の基準となる位相を有する参照光と、その参照光と 0 から ラジアンの間のある値分位相が異なる参照光とに前記光を分割する請求項 1 記載のデジタルホログラフィ装置。

## 【請求項 5】

前記光源は、第 1 方向に偏光した光を出射し、

前記位相シフト素子によって分割された 2 種類の参照光の一方は第 2 方向に偏光し、前記参照光の他方は第 3 方向に偏光し、

前記物体光と前記 2 種類の参照光とを透過させる偏光子アレイデバイスをさらに備え、

前記偏光子アレイデバイスは、前記第 2 方向に偏光した参照光の一方と前記物体光の前記第 2 方向への正射影成分とを透過させる第 1 領域と、前記第 3 方向に偏光した参照光の他方と前記物体光の前記第 3 方向への正射影成分とを透過させる第 2 領域とを有している請求項 1 記載のデジタルホログラフィ装置。

10

## 【請求項 6】

前記偏光子アレイデバイスは、前記撮像手段と一体に構成されている請求項 5 記載のデジタルホログラフィ装置。

## 【請求項 7】

前記位相シフト素子は、1 / 4 波長板である請求項 5 記載のデジタルホログラフィ装置

。

## 【請求項 8】

前記光源は、第 1 方向偏光成分と第 2 方向偏光成分とを有する直線偏光を出射し、

前記物体光を第 1 方向偏光成分の光に変換し、前記光源から出射された光を第 2 方向偏光成分の光に変換する偏光ビームスプリッタをさらに備え、

前記位相シフト素子は、前記第 2 方向偏光成分の光を、その進行方向に垂直な平面上において互いに位相が異なる 2 種類の参照光に分割する波長板光学媒質アレイデバイスと、前記物体光の第 3 方向偏光成分と前記 2 種類の参照光の第 3 方向偏光成分とを透過させる偏光子とを有している請求項 1 記載のデジタルホログラフィ装置。

20

## 【請求項 9】

前記位相シフト素子は、前記撮像手段と一体に構成されている請求項 8 記載のデジタルホログラフィ装置。

30

## 【請求項 10】

前記波長板光学媒質アレイデバイスは、前記第 2 方向偏光成分の光を透過させる光学媒質と、前記第 2 方向偏光成分の光を位相をシフトさせて透過させる 1 / 4 波長板とを有している請求項 8 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、物体光と参照光とが干渉した干渉縞に基づいて被写体の再生像を生成するデジタルホログラフィ装置及びこれに用いる位相板アレイに関するものである。

## 【背景技術】

40

## 【0002】

以後の文章中で位相および角度の単位はラジアンで表す。入射した光を互いに位相が異なる 4 種類の参照光に分割して出射する位相シフトアレイ素子を備えたデジタルホログラフィ装置を本発明者らは提案している（特許文献 1）。図 2 3 は、従来のデジタルホログラフィ装置 101 の構成を説明するための模式図である。デジタルホログラフィ装置 101 は、レーザ光を出射する光源 104 を備えている。光源 104 から出射されたレーザ光は、ビームスプリッタ BS により分割される。分割されたレーザ光の一方は、ミラー M によって反射され、ビームエキスパンダ BE を通ってコリメータレンズ CL により平行光となり、被写体 106 に照射され、被写体 106 によって反射されて物体光となり、他のビームスプリッタ BS を通って CCD カメラ 103 に設けられた撮像面 100 に入射する。

50

## 【0003】

ビームスプリッタBSにより分割されたレーザ光の他方は、他のミラーMによって反射され、他のビームエキスパンダBEを通過して他のコリメータレンズCLにより平行光となり、アレイデバイス102に入射する。

## 【0004】

アレイデバイス102は、レーザ光の入射方向に垂直な平面上において格子状に配置された4種類の領域107a・107b・107c・107dを有している。4種類の領域107a・107b・107c・107dは、CCDカメラ103の各画素に対応して配置されている。アレイデバイス102の領域107aを通過したレーザ光は位相シフト計測手段の基準となる位相を有する参照光となる。領域107bを通過したレーザ光は、領域107aを通過した参照光の位相よりも $-\pi/2$ 位相がシフトした参照光に変換される。領域107cを通過したレーザ光は、領域107aを通過した参照光の位相よりも $(-\pi/2)$ 位相がシフトした参照光に変換される。領域107dを通過したレーザ光は、領域107aを通過した参照光の位相よりも $(-3\pi/2)$ 位相がシフトした参照光に変換される。

10

## 【0005】

アレイデバイス102により生成された4種類の参照光は、さらに他のミラーMにより反射され、結像光学系を通過して他のビームスプリッタBSにより反射されてCCDカメラ103に設けられた撮像面100に入射する。

## 【0006】

撮像面100には、4種類の参照光と物体光とがそれぞれ干渉した4種類の干渉縞が記録される。再生像生成器105は、撮像面100に記録された4種類の干渉縞に基づいて被写体106の再生像を生成する。

20

## 【0007】

また、偏光波面分割法による単一ショット位相シフトデジタルホログラフィの構成が知られている(非特許文献2)。この構成では、偏光イメージングカメラを用いて物体光と位相の異なる2枚の干渉縞を、偏光イメージングカメラの撮像面に同時に記録するため、1回の記録により、静止した被写体の複素振幅分布を取得できる。しかしながら、被写体が動くたびに物体光の強度分布の取得が必要となるので動く被写体の複素振幅分布を取得できない。また、図23に示す構成に比較して、結像光学系が不要であり、 $\mu\text{m}$ 単位で光学系をセッティングする必要がない。また、アレイデバイス102を用いないので、波長依存性が無い。

30

## 【0008】

デジタルホログラフィで得られる位相分布は、 $-\pi < \phi < \pi$  の範囲に折り畳まれている。これをもとの位相分布に戻すために位相接続をする必要がある。その1つの方法として以下に示す方法が提案されている。

## 【0009】

まず、2波長を用いた位相接続法(非特許文献5)が知られている。この方法によれば、2波長の組み合わせにより、合成波長の長さを自由に変更することができる。また、1波長を用いた位相接続法に比べ、非常に長い合成波長で記録したのと同程度の位相分布を得ることができ、位相の折り畳みが少ない。

40

## 【0010】

また、並列位相シフトデジタルホログラフィの構成が知られている。この構成では、通常複数回の撮影が必要であるが、空間分割多重することで1回の記録でよい。また、瞬時の被写体の再生像を得られるため被写体は動く物体でも良い。

【特許文献1】特開2005-283683号公報(平成17年10月13日公開)

【非特許文献1】Yasuhiro Awatsuji,他著、「Parallel three-step phase-shifting digital holography」、1 Mat 2006/Vol.45, No.13/APPLIED OPTICS, 2995-3002頁

【非特許文献2】Takanori Nomura,他著、「Phase-shifting digital holography with a phase difference between orthogonal polarizations」、10 July 2006/Vol.45, No.20/

50

APPLIED OPTICS, 4873-4877頁

【非特許文献3】X.F.Meng, 他著、「Two-step phase-shifting interferometry and its application in image encryption」、OPTICS LETTERS/Vol.31, No.10/May 15, 2006、1414-1416頁

【非特許文献4】Yan Zhang, 他著、「Reconstruction of in-line digital holograms from two intensity measurements」、August 1, 2004/Vol.29, No.15/OPTICS LETTERS、1787-1789頁

【非特許文献5】Daniel Parshall, 他著、「Digital holographic microscopy with dual-wavelength phase unwrapping」、20 January 2006/Vol.45, No.3/ APPLIED OPTICS、451-459頁

10

【発明の開示】

【0011】

しかしながら、図23に示す構成に対しては、被写体の再生像の画質の向上に対する要望が強いという問題がある。

【0012】

また、結像光学系が必要であり、収差による問題が生じる。位相をシフトさせるアレイデバイスによる回折が生じるため、 $\mu\text{m}$ 単位で光学系をセッティングする必要があり、アレイデバイスの位置合わせが困難であるという問題がある。また、位相をシフトさせるアレイデバイスは、波長依存性があるので、特定の波長においてしか使用することができないという問題がある。

20

【0013】

前記した偏光波面分割法による単一ショット位相シフトデジタルホログラフィの構成では、特殊なカメラを用いる必要があるという問題があり、また、偏光特性や波長に依存するという問題がある。

【0014】

前記した2波長を用いた位相接続法では、2波長を使用するため、2回以上の撮影が必要であるという問題がある。

【0015】

本発明の目的は、画質が向上したデジタルホログラフィ装置を提供することにある。

【0016】

本発明に係るデジタルホログラフィ装置は、光を出射し、前記出射した光に基づいて被写体から放射または透過または散乱または反射または回折される物体光を供給するために設けられた光源と、前記光源から出射された光を、その進行方向に垂直な平面上において互いに位相が異なる2種類の参照光に分割する位相シフト素子と、前記位相シフト素子によって分割された2種類の参照光と前記被写体から放射または透過または散乱または反射または回折された物体光とがそれぞれ干渉した2種類の干渉縞が記録される撮像面を有する撮像手段と、前記撮像面に記録された2種類の干渉縞に基づいて前記被写体の再生像を生成する再生像生成器とを備えたことを特徴とする。

30

【0017】

この特徴によれば、位相シフト素子は、前記光源から出射された光を、その進行方向に垂直な平面上において互いに位相が異なる2種類の参照光に分割する。このため、位相シフトの段階数を従来の構成の4段階から2段階に減らすことができる。従って、被写体の再生像の画質を、従来構成のデジタルホログラフィ装置よりも向上させることができ、また、位相シフト素子の作製が、従来のデジタルホログラフィ装置よりも容易になる。

40

【0018】

本発明に係るデジタルホログラフィ装置では、前記位相シフト素子は、前記光源から出射された光の進行方向に垂直な平面上において格子状に配置された2種類の領域を有するアレイデバイスであることが好ましい。

【0019】

上記構成によれば、光源から出射された光を、その進行方向に垂直な平面上において互

50

いに位相が異なる2種類の参照光に分割する位相シフト素子を、簡単な構成によって実現することができる。

【0020】

本発明に係るデジタルホログラフィ装置では、前記撮像手段は、CCDカメラまたはCMOSイメージセンサーカメラであり、前記2種類の領域は、前記撮像手段の各画素に対応して配置されていることが好ましい。

【0021】

上記構成によれば、位相シフト素子によって分割された2種類の参照光と被写体から放射または透過または散乱または反射または回折された物体光とがそれぞれ干渉した2種類の干渉縞を、簡単な構成によって記録することができる。

10

【0022】

本発明に係るデジタルホログラフィ装置では、前記位相シフト素子は、位相シフト計測手段の基準となる位相を有する参照光と、その参照光と0からラジアンの間いずれかの値分位相が異なる参照光とに前記光を分割することが好ましい。

【0023】

上記構成によれば、簡単な構成によって、並列2段階位相シフトデジタルホログラフィ装置を実現することができる。

【0024】

本発明に係るデジタルホログラフィ装置では、前記光源は、第1方向に偏光した光を出射し、前記位相シフト素子によって分割された2種類の参照光の一方は第2方向に偏光し、前記参照光の他方は第3方向に偏光し、前記物体光と前記2種類の参照光とを透過させる偏光子アレイデバイスをさらに備え、前記偏光子アレイデバイスは、前記第2方向に偏光した参照光の一方と前記物体光の前記第2方向への正射影成分とを透過させる第1領域と、前記第3方向に偏光した参照光の他方と前記物体光の前記第3方向への正射影成分とを透過させる第2領域とを有していることが好ましい。前記偏光子アレイデバイスは偏光子をアレイ状に配置したデバイスである。

20

【0025】

本発明に係るデジタルホログラフィ装置では、前記偏光子アレイデバイスは、前記撮像手段と一体に構成されていることが好ましい。

【0026】

本発明に係るデジタルホログラフィ装置では、前記位相シフト素子は、1/4波長板であることが好ましい。

30

【0027】

本発明に係るデジタルホログラフィ装置では、前記光源は、第1方向偏光成分と第2方向偏光成分とを有する直線偏光を出射し、前記物体光を第1方向偏光成分の光に変換し、前記光源から出射された光を第2方向偏光成分の光に変換する偏光ビームスプリッタをさらに備え、前記位相シフト素子は、前記第2方向偏光成分の光を、その進行方向に垂直な平面上において互いに位相が異なる2種類の参照光に分割する波長板光学媒質アレイデバイスと、前記物体光の第3方向偏光成分と前記2種類の参照光の第3方向偏光成分と透過させる偏光子とを有していることが好ましい。前記波長板光学媒質アレイデバイスは波長板と光学媒質を交互に配置したデバイスである。

40

【0028】

本発明に係るデジタルホログラフィ装置では、前記位相シフト素子は、前記撮像手段と一体に構成されていることが好ましい。

【0029】

本発明に係るデジタルホログラフィ装置では、前記波長板光学媒質アレイデバイスは、前記第2方向偏光成分の光を透過させる光学媒質と、前記第2方向偏光成分の光を位相をシフトさせて透過させる1/4波長板とを有していることが好ましい。

【0030】

本発明に係る他のデジタルホログラフィ装置は、光を出射し、前記出射した光に基づい

50

て被写体から放射または透過または散乱または反射または回折される物体光を供給するために設けられた光源と、前記物体光に基づいて、互いに光路差が異なる第1光路物体光及び第2光路物体光を生成し、前記光源から出射された光に基づいて、互いに光路差が異なる第1光路参照光及び第2光路参照光を生成する光路差生成素子と、前記光路差生成素子によって生成された第1光路物体光及び第1光路参照光が干渉した第1干渉縞と、前記光路差生成素子によって生成された第2光路物体光及び第2光路参照光が干渉した第2干渉縞とが記録される撮像面を有する撮像手段と、前記撮像面に記録された第1干渉縞と第2干渉縞とに基づいて前記被写体の再生像を生成する再生像生成器とを備えたことを特徴とする。

【0031】

この特徴によれば、光路差生成素子が、前記物体光に基づいて、互いに光路差が異なる第1光路物体光及び第2光路物体光を生成し、前記光源から出射された光に基づいて、互いに光路差が異なる第1光路参照光及び第2光路参照光を生成する。このため、異なる光路差で形成される第1干渉縞と第2干渉縞とを1つの撮像手段によって同時に取得することができる。従って、3次元像を瞬時に記録することができるデジタルホログラフィ装置を提供することができる。

【0032】

本発明に係る他のデジタルホログラフィ装置では、前記光路差生成素子は、前記物体光及び前記光源から出射された光の進行方向に垂直な平面上において格子状に配置された2種類の領域を有することが好ましい。

【0033】

上記構成によれば、2種類の領域によって、物体光及び光源から出射された光に光路差を与えることができる。

【0034】

本発明に係る他のデジタルホログラフィ装置では、前記撮像手段は、CCDカメラまたはCMOSイメージセンサーカメラであり、前記2種類の領域の一方は、前記物体光及び前記光源から出射された光に基づいて、前記第1光路物体光及び前記第1光路参照光をそれぞれ生成し、前記2種類の領域の他方は、前記物体光及び前記光源から出射された光に基づいて、前記第2光路物体光及び前記第2光路参照光をそれぞれ生成することが好ましい。

【0035】

上記構成によれば、2種類の領域によって、光路差が異なる干渉縞を得ることができる。

【0036】

本発明に係る他のデジタルホログラフィ装置では、前記アレイデバイスは、物体光と参照光とに対して屈折率が等しい光学媒質によって形成されており、前記2種類の領域の一方の厚みと前記2種類の領域の他方の厚みとは、互いに異なっていることが好ましい。

【0037】

上記構成によれば、光路差が異なる干渉縞を得るための2種類の領域を有するアレイデバイスを容易に構成することができる。

【0038】

本発明に係る他のデジタルホログラフィ装置では、前記アレイデバイスは、入射する物体光および参照光に対して第1屈折率を有する第1光学媒質と、前記物体光および参照光に対して第2屈折率を有する第2光学媒質とによって形成されており、前記第1屈折率と前記第2屈折率とは、互いに異なっており、前記第1および第2光学媒質は、同じ厚みを有していることが好ましい。

【0039】

上記構成によれば、光路差が異なる干渉縞を得るための2種類の領域を有するアレイデバイスを容易に構成することができる。

【0040】

10

20

30

40

50

本発明に係るさらに他のデジタルホログラフィ装置は、第1方向偏光成分の光を出射し、前記出射した光に基づいて被写体から放射または透過または散乱または反射または回折される物体光を供給するために設けられた光源ユニットと、前記物体光と前記光源ユニットから出射された第1方向偏光成分の光とを位相をシフトさせて透過させる第1領域と、前記物体光と前記光源ユニットから出射された第1方向偏光成分の光とを透過させる第2領域とを有する位相シフト素子と、前記第1領域を位相をシフトさせて透過した前記物体光と前記光とが干渉した第1干渉縞と、前記第2領域を透過した前記物体光と前記光とが干渉した第2干渉縞とが記録される撮像面を有する撮像手段と、前記撮像面に記録された第1及び第2干渉縞に基づいて前記被写体の再生像を生成する再生像生成器とを備えたことを特徴とする。

10

## 【0041】

本発明に係るさらに他のデジタルホログラフィ装置では、前記位相シフト素子の第1領域は1/2波長板によって構成されており、第2領域はガラスによって構成されており、前記位相シフト素子は、前記第1領域と前記第2領域とを格子状に配置して構成されていることが好ましい。

## 【0042】

本発明に係るさらに他のデジタルホログラフィ装置では、前記位相シフト素子は、前記撮像手段と一体に構成されていることが好ましい。

## 【0043】

本発明に係るさらに他のデジタルホログラフィ装置は、第1方向偏光成分の光を出射し、前記出射した光に基づいて被写体から放射または透過または散乱または反射または回折される物体光を供給するために設けられた光源ユニットと、前記出射した第1方向偏光成分の光から参照光を分離する分離手段と、前記第1方向に対して+45度傾いた第1偏光子と、-45度傾いた第2偏光子とを交互に配置した偏光子アレイデバイスと、前記第1方向に対して+45度傾いた高速軸と、-45度傾いた低速軸とを有する位相シフト素子と、前記第1偏光子を透過した前記物体光及び前記参照光とが干渉した第1干渉縞と、前記第2偏光子を透過した前記物体光及び前記参照光とが干渉した第2干渉縞とが記録される撮像面を有する撮像手段と、前記撮像面に記録された第1及び第2干渉縞に基づいて前記被写体の再生像を生成する再生像生成器とを備えたことを特徴とする。

20

## 【0044】

本発明に係るさらに他のデジタルホログラフィ装置では、前記位相シフト素子は、1/2波長板であることが好ましい。

30

## 【0045】

本発明に係るさらに他のデジタルホログラフィ装置では、前記偏光子アレイデバイスと前記位相シフト素子とは、前記撮像手段と一体に構成されていることが好ましい。

## 【0046】

本発明に係るさらにもう一つの他のデジタルホログラフィ装置は、互いに異なる第1波長及び第2波長をそれぞれ有する第1波長光及び第2波長光をそれぞれ出射し、前記出射した第1波長光及び第2波長光に基づいて被写体から放射または透過または散乱または反射または回折される物体光を供給するためにそれぞれ設けられた第1光源及び第2光源と、前記第1光源及び第2光源からそれぞれ出射された第1波長光及び第2波長光を、第1位相及び前記第1波長に対応する第1位相第1波長参照光と、前記第1位相と異なる第2位相及び前記第1波長に対応する第2位相第1波長参照光と、前記第1位相及び前記第2波長に対応する第1位相第2波長参照光と、前記第2位相及び前記第2波長に対応する第2位相第2波長参照光とに、前記第1波長光及び第2波長光の入射方向に垂直な平面上において分割する位相シフト波長選択素子と、前記位相シフト波長選択素子によって分割された第1位相第1波長参照光、第2位相第1波長参照光、第1位相第2波長参照光、及び第2位相第2波長参照光と、前記被写体から放射または透過または散乱または反射または回折された物体光とがそれぞれ干渉した第1位相第1波長干渉縞、第2位相第1波長干渉縞、第1位相第2波長干渉縞、及び第2位相第2波長干渉縞が記録される撮像面を有する

40

50

撮像手段と、前記撮像面に記録された第1位相第1波長干渉縞、第2位相第1波長干渉縞、第1位相第2波長干渉縞、及び第2位相第2波長干渉縞に基づいて前記被写体の再生像を生成する再生像生成器とを備えたことを特徴とする。

【0047】

この特徴によれば、互いに異なる第1波長及び第2波長に対応する第1位相第1波長干渉縞、第2位相第1波長干渉縞、第1位相第2波長干渉縞、及び第2位相第2波長干渉縞を同時に撮像面に記録することができる。このため、1回の撮影で正確な位相分布を計算することができ、動いている被写体についても2波長位相接続を実施することができる。

【0048】

本発明に係るさらにもう一つの他のデジタルホログラフィ装置では、前記位相シフト波長選択素子は、前記第1波長光及び第2波長光の入射方向に垂直な第1方向に沿ってストライプ状にそれぞれ配置されて、前記第1位相に対応する第1位相領域と前記第2位相に対応する第2位相領域とを有する位相シフトアレイデバイスと、前記第1波長光及び第2波長光の入射方向に垂直な方向であって前記第1方向に交差する方向に沿ってストライプ状にそれぞれ配置されて、前記第1波長を有する光を透過する第1波長領域と前記第2波長を有する光を透過する第2波長領域とを有する波長選択アレイデバイスとを有することが好ましい。前記波長選択アレイデバイスは波長フィルタをアレイ状に配置したデバイスである。

【0049】

上記構成によれば、位相シフトアレイデバイスと波長選択アレイデバイスとによって、前記第1光源及び第2光源からそれぞれ出射された第1波長光及び第2波長光を、第1位相及び前記第1波長に対応する第1位相第1波長参照光と、前記第1位相と異なる第2位相及び前記第1波長に対応する第2位相第1波長参照光と、前記第1位相及び前記第2波長に対応する第1位相第2波長参照光と、前記第2位相及び前記第2波長に対応する第2位相第2波長参照光とに、前記第1波長光及び第2波長光の入射方向に垂直な平面上において分割する位相シフト波長選択素子を容易に構成することができる。

【0050】

本発明に係るさらにもう一つの他のデジタルホログラフィ装置では、前記撮像手段は、CCDカメラまたはCMOSイメージセンサーカメラであり、前記第1及び第2位相領域、並びに前記第1及び第2波長領域は、前記撮像手段の各画素に対応して配置されていることが好ましい。

【0051】

上記構成によれば、位相シフト波長選択素子によって分割された第1位相第1波長参照光、第2位相第1波長参照光、第1位相第2波長参照光、及び第2位相第2波長参照光と、前記被写体から放射または透過または散乱または反射または回折された物体光とがそれぞれ干渉した第1位相第1波長干渉縞、第2位相第1波長干渉縞、第1位相第2波長干渉縞、及び第2位相第2波長干渉縞を、簡単な構成によって記録することができる。

【0052】

本発明に係るさらにもう一つの他のデジタルホログラフィ装置では、前記位相シフトアレイデバイスは、前記第1及び第2位相と異なる第3位相に対応する第3位相領域と、前記第1及び第2及び第3位相と異なる第4位相に対応する第4位相領域とをさらに有していることが好ましい。

【0053】

上記構成によれば、4つの異なる位相に基づいた干渉縞を得ることができる。

【0054】

本発明に係るさらにもう一つの他のデジタルホログラフィ装置では、前記第1及び第2波長と異なる第3波長を有する第3波長光を出射し、前記第1、第2、及び第3波長光に基づいて被写体から放射または透過または散乱または反射または回折される物体光を供給するために設けられた第3光源をさらに備えることが好ましい。

【0055】

10

20

30

40

50



本発明に係るさらにもう一つの他のデジタルホログラフィ装置では、前記第1及び第2および第3波長と異なる第4波長を有する第4波長光を出射し、前記第1、第2、第3及び前記4波長に基づいて被写体から放射または透過または散乱または反射または回折される物体光を供給するために設けられた第4光源をさらに備えることが好ましい。

【0056】

本発明に係るさらにもう一つの他のデジタルホログラフィ装置では、前記第1光源及び第2光源からそれぞれ出射される第1波長光及び第2波長光は、第1方向偏光であり、前記位相シフト波長選択素子は、前記第1波長光が入射されて前記第1位相に対応する高速軸と前記第2位相に対応する低速軸とを有する第1(1/4)波長板と、前記第2波長光が入射されて前記高速軸と前記低速軸とを有する第2(1/4)波長板と、前記第1波長光を透過させる第1波長領域と前記第2波長光を透過させる第2波長領域とを配置した波長選択アレイデバイスとを有しており、前記高速軸に平行な偏光を透過させる高速軸透過領域と、前記低速軸に平行な偏光を透過させる低速軸透過領域とを有する偏光子アレイをさらに備えることが好ましい。

10

【0057】

本発明に係るさらにもう一つの他のデジタルホログラフィ装置では、前記波長選択アレイデバイスと前記偏光子アレイとは、前記撮像手段と一体に構成されることが好ましい。

【0058】

本発明に係るさらにもう一つの他のデジタルホログラフィ装置では、前記第1光源及び第2光源からそれぞれ出射される第1波長光及び第2波長光は、第1方向偏光であり、前記位相シフト波長選択素子は、前記第1波長光を透過させる第1波長領域と、前記第2波長光を透過させる第2波長領域とを配置した波長選択アレイデバイスと、前記第1位相に対応する高速軸と前記第2位相に対応する低速軸とを有して前記第1波長光に対応する第1(1/4)波長板と、前記第1位相に対応する高速軸と前記第2位相に対応する低速軸とを有して前記第2波長光に対応する第2(1/4)波長板とを配置した位相シフトアレイデバイスと、前記第1方向偏光成分を透過させる偏光子とを有していることが好ましい。

20

【0059】

本発明に係るさらにもう一つの他のデジタルホログラフィ装置では、前記位相シフト波長選択素子は、前記撮像手段と一体に構成されていることが好ましい。

30

【0060】

本発明に係る位相板アレイは、入射した光を透過させ、その入射した光の位相をシフトさせるために1/2波長板によって構成された第1領域と、入射した光を透過させるためにガラスによって構成された第2領域とを備え、前記第1領域と前記第2領域とを格子状に配置したことを特徴とする。

【0061】

本発明に係るさらにもう一つの他のデジタルホログラフィ装置は、第1方向偏光成分の光を出射し、前記出射した光に基づいて被写体から放射または透過または散乱または反射または回折される物体光を供給するために設けられた光源ユニットと、前記出射した第1方向偏光成分の光から参照光を分離する分離手段と、1/4波長板と1/2波長板とを交互に配置した波長板アレイデバイスと、前記第1方向に対して傾斜する偏光子と、前記1/4波長板を透過した前記物体光及び前記参照光とが干渉した第1干渉縞と、前記1/2波長板を透過した前記物体光及び前記参照光とが干渉した第2干渉縞とが記録される撮像面を有する撮像手段と、前記撮像面に記録された第1及び第2干渉縞に基づいて前記被写体の再生像を生成する再生像生成器とを備えたことを特徴とする。前記波長板アレイデバイスは波長板をアレイ状に配置したデバイスである。

40

【0062】

本発明に係るさらにもう一つの他のデジタルホログラフィ装置は、第1方向偏光成分の光を出射し、前記出射した光に基づいて被写体から放射または透過または散乱または反射または回折される物体光を供給するために設けられた光源ユニットと、前記出射した第1方向偏光成

50

分の光から参照光を分離する分離手段と、互いに直交する第1高速軸および第1低速軸を有する第1波長板素子と、前記第1高速軸に平行な第2低速軸および前記第1低速軸に平行な第2高速軸を有する第2波長板素子とを交互に配置した波長板アレイデバイスと、前記第1波長板素子を透過した前記物体光及び前記参照光とが干渉した第1干渉縞と、前記第2波長板素子を透過した前記物体光及び前記参照光とが干渉した第2干渉縞とが記録される撮像面を有する撮像手段と、前記撮像面に記録された第1及び第2干渉縞に基づいて前記被写体の再生像を生成する再生像生成器とを備えたことを特徴とする。

【0063】

本発明に係るさらに他のデジタルホログラフィ装置は、第1方向偏光成分の光を出射し、前記出射した光に基づいて被写体から放射または透過または散乱または反射または回折される物体光を供給するために設けられた光源ユニットと、前記出射した第1方向偏光成分の光から参照光を分離する分離手段と、第1偏光方向と異なる方向に高速軸と低速軸を持つ4分の1波長板と、4分の1波長板の高速軸または低速軸に平行な第2偏光方向を有する第1偏光子と、前記第2偏光方向に直交する第3偏光方向を有する第2偏光子とを交互に配置した偏光子アレイデバイスと、前記第1偏光子を透過した前記物体光及び前記参照光とが干渉した第1干渉縞と、前記第2偏光子を透過した前記物体光及び前記参照光とが干渉した第2干渉縞とが記録される撮像面を有する撮像手段と、前記撮像面に記録された第1及び第2干渉縞に基づいて前記被写体の再生像を生成する再生像生成器とを備えたことを特徴とする。

【0064】

本発明に係るデジタルホログラフィ装置は、以上のように、前記光源から出射された光を、その進行方向に垂直な平面上において互いに位相が異なる2種類の参照光に分割する位相シフト素子を備えているので、被写体の再生像の画質を、従来構成のデジタルホログラフィ装置よりも向上させることができ、また、位相シフト素子の作製が、従来のデジタルホログラフィ装置よりも容易になるという効果を奏する。

【0065】

本発明に係る他のデジタルホログラフィ装置は、以上のように、前記物体光に基づいて、互いに光路差が異なる第1光路物体光及び第2光路物体光を生成し、前記光源から出射された光に基づいて、互いに光路差が異なる第1光路参照光及び第2光路参照光を生成する光路差生成素子を備えているので、異なる光路差で形成される第1干渉縞と第2干渉縞とを1つの撮像手段によって同時に取得することができ、従って、3次元像を瞬時に記録することができるデジタルホログラフィ装置を提供することができるという効果を奏する。

【0066】

本発明に係るさらに他のデジタルホログラフィ装置は、以上のように、前記第1光源及び第2光源からそれぞれ出射された第1波長光及び第2波長光を、第1位相及び前記第1波長に対応する第1位相第1波長参照光と、前記第1位相と異なる第2位相及び前記第1波長に対応する第2位相第1波長参照光と、前記第1位相及び前記第2波長に対応する第1位相第2波長参照光と、前記第2位相及び前記第2波長に対応する第2位相第2波長参照光とに、前記第1波長光及び第2波長光の入射方向に垂直な平面上において分割する位相シフト波長選択素子を備えているので、1回の撮影で正確な位相分布を計算することができ、動いている被写体についても2波長位相接続を実施することができるという効果を奏する。

【図面の簡単な説明】

【0067】

【図1】実施の形態1に係るデジタルホログラフィ装置の構成を説明するための模式図である。

【図2】上記デジタルホログラフィ装置における被写体のホログラフィ像再生手順を説明するための図である。

【図3】(a)は物体光の振幅分布を示す図であり、(b)は物体光の位相分布を示す図

10

20

30

40

50

であり、(c)は従来法による再生像の振幅分布を示す図であり、(d)は従来法による再生像の位相分布を示す図であり、(e)は本発明による再生像の振幅分布を示す図であり、(f)は本発明による再生像の位相分布を示す図である。

【図4】本発明及び従来法の相関係数値を示す図である。

【図5】本発明及び従来法の相関係数値を示すグラフである。

【図6】実施の形態2に係るデジタルホログラフィ装置の構成を説明するための模式図である。

【図7】上記デジタルホログラフィ装置に設けられたアレイデバイスの構成を説明するための模式的な斜視図である。

【図8】上記デジタルホログラフィ装置に設けられたアレイデバイスの構成を説明するための模式的な断面図である。

10

【図9】上記デジタルホログラフィ装置における像再構成アルゴリズムを説明するための図である。

【図10】(a)は上記デジタルホログラフィ装置による被写体の再生像を示す図であり、(b)は従来のフレネル変換法による被写体の再生像を示す図であり、(c)は従来の逐次位相シフトデジタルホログラフィによる被写体の再生像を示す図である。(d)は従来法である特許文献1によるデジタルホログラフィ装置による被写体の再生像を示す図である。

【図11】実施の形態3に係るデジタルホログラフィ装置の構成を説明するための模式図である。

20

【図12】上記デジタルホログラフィ装置に設けられたアレイデバイスの構成を説明するための図である。

【図13】上記デジタルホログラフィ装置における像再構成アルゴリズムを説明するための図である。

【図14】(a)~(e)は、上記デジタルホログラフィ装置における画素の補間方法を説明するための図である。

【図15】上記デジタルホログラフィ装置における複素振幅を求める方法を説明するための図である。

【図16】(a)はデジタルホログラフィ装置の被写体の高さ分布を示す図であり、(b)は被写体の振幅分布を示す図であり、(c)は波長633nm、532nmのレーザを用いた場合の計算機シミュレーションの結果を示し、(d)は波長633nm、635nmのレーザを用いた場合の計算機シミュレーションの結果を示し、(e)は従来法である特許文献1によるデジタルホログラフィ装置(波長:633nm)による計算機シミュレーションの結果を示す。

30

【図17】実施の形態3に係る他のデジタルホログラフィ装置の構成を説明するための模式図である。

【図18】上記デジタルホログラフィ装置に設けられたアレイデバイスの構成を説明するための図である。

【図19】上記デジタルホログラフィ装置における像再構成アルゴリズムを説明するための図である。

40

【図20】上記デジタルホログラフィ装置における画素の補間方法を説明するための図である。

【図21】上記デジタルホログラフィ装置における複素振幅を求める方法を説明するための図である。

【図22】(a)は波長633nm、532nmのレーザを用いた場合の計算機シミュレーションの結果を示し、(b)は波長633nm、532nm、475nmのレーザを用いた場合の計算機シミュレーションの結果を示す。

【図23】従来法である特許文献1によるデジタルホログラフィ装置の構成を説明するための模式図である。

【図24】実施の形態4に係るデジタルホログラフィ装置の構成を説明するための模式図

50

である。

【図 2 5】( a ) は上記デジタルホログラフィ装置の偏光子アレイデバイスの構成を説明するための模式図であり、( b ) は偏光方向を示す図である。

【図 2 6】上記デジタルホログラフィ装置における偏光方向の変化を説明するための図である。

【図 2 7】デジタルホログラフィ装置に設けられた CCD カメラの撮像面における参照光の偏光方向と位相分布とを示す図である。

【図 2 8】実施の形態 4 に係る他のデジタルホログラフィ装置の構成を説明するための模式図である。

【図 2 9】上記他のデジタルホログラフィ装置に設けられた位相シフトアレイデバイスの構成を説明するための図である。

10

【図 3 0】上記位相シフトアレイデバイスにおける参照光の位相シフトと偏光方向の変化を説明するための図である。

【図 3 1】上記他のデジタルホログラフィ装置における物体光と参照光との各素子での位相と偏光方向との変化を説明するための図である。

【図 3 2】実施の形態 5 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 3 3】実施の形態 5 に係る他の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 3 4】実施の形態 6 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 3 5】上記デジタルホログラフィ装置に設けられた波長選択アレイデバイスと偏光子アレイとの構成を説明するための模式的斜視図である。

20

【図 3 6】上記デジタルホログラフィ装置における偏光状態の変化を説明するための図である。

【図 3 7】実施の形態 6 に係る他の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 3 8】上記他のデジタルホログラフィ装置に設けられた波長選択アレイデバイスと偏光子アレイとの構成を説明するための模式的斜視図である。

【図 3 9】上記他のデジタルホログラフィ装置における偏光状態の変化を説明するための図である。

【図 4 0】実施の形態 6 に係るさらに他のデジタルホログラフィ装置の構成を示す模式図である。

30

【図 4 1】上記さらに他のデジタルホログラフィ装置に設けられた位相シフト波長選択素子の構成を説明するための模式的斜視図である。

【図 4 2】上記さらに他のデジタルホログラフィ装置における偏光状態の変化を説明するための図である。

【図 4 3】実施の形態 6 に係るさらにもう 1 つの他の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 4 4】上記さらにもう 1 つの他のデジタルホログラフィ装置に設けられた位相シフト波長選択素子の構成を説明するための模式的斜視図である。

【図 4 5】上記さらにもう 1 つの他のデジタルホログラフィ装置における偏光状態の変化を説明するための図である。

40

【図 4 6】実施の形態 7 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 4 7】上記デジタルホログラフィ装置に設けられた波長板アレイデバイスと偏光子と CCD カメラとの構成を示す模式図である。

【図 4 8】上記波長板アレイデバイスと偏光子との構成を示す模式図である。

【図 4 9】実施の形態 7 に係る他の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 5 0】実施の形態 8 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 5 1】上記デジタルホログラフィ装置に設けられた 1 / 4 波長板アレイと CCD カメラとの構成を示す模式図である。

50

【図 5 2】上記 1 / 4 波長板アレイの構成を示す模式図である。

【図 5 3】実施の形態 9 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 5 4】上記デジタルホログラフィ装置に設けられた偏光子アレイデバイスと CCD カメラとの構成を示す模式図である。

【図 5 5】上記偏光子アレイデバイスの構成を示す模式図である。

【符号の説明】

【 0 0 6 8 】

- |                     |                           |    |
|---------------------|---------------------------|----|
| 1、1 c ~ 1 m         | デジタルホログラフィ装置              |    |
| 2                   | アレイデバイス (位相シフト素子)         |    |
| 3                   | CCD カメラ (撮像手段)            | 10 |
| 4                   | 光源                        |    |
| 5                   | 再生像生成器                    |    |
| 6                   | 被写体                       |    |
| 7 a、7 b             | 領域                        |    |
| 8                   | 干渉縞                       |    |
| 9 a、9 b             | 領域                        |    |
| 10 a、10 b、11 a、11 b | 干渉縞データ                    |    |
| 12                  | 結像光学系                     |    |
| 13                  | 撮像面                       |    |
| 14                  | アレイデバイス (光路差生成素子)         | 20 |
| 15 a、15 b           | 領域                        |    |
| 16                  | 干渉縞                       |    |
| 17 a、17 b           | 領域                        |    |
| 18 a、18 b、19 a、19 b | 干渉縞データ                    |    |
| 20                  | アレイデバイス (位相シフト波長選択素子)     |    |
| 21                  | 位相シフトアレイデバイス              |    |
| 22                  | 波長選択アレイデバイス               |    |
| 23 a ~ 23 d         | 位相領域                      |    |
| 24 a、24 b           | 波長領域                      |    |
| 25 a ~ 25 h         | 干渉縞                       | 30 |
| 26 a ~ 26 c         | 波長領域                      |    |
| 27 a ~ 27 l         | 干渉縞                       |    |
| 28 a、28 b、28 c      | 光源 (第 1 光源、第 2 光源、第 3 光源) |    |
| 31、31 a             | 光源                        |    |
| 32                  | 1 / 4 波長板 (位相シフト素子)       |    |
| 33                  | 偏光子アレイデバイス                |    |
| 34 a、34 b           | 領域 (第 1 領域、第 2 領域)        |    |
| 35                  | 位相シフトアレイデバイス (位相シフト素子)    |    |
| 36                  | 波長板光学媒質アレイデバイス            |    |
| 37                  | 偏光子                       | 40 |
| 38                  | 光学媒質                      |    |
| 39                  | 1 / 4 波長板                 |    |
| 40                  | 高速軸                       |    |
| 41                  | 低速軸                       |    |
| 31 b                | 光源ユニット                    |    |
| 42                  | 位相板アレイ (位相シフト素子)          |    |
| 43、44               | 領域 (第 1 領域、第 2 領域)        |    |
| 45                  | 1 / 4 波長板                 |    |
| 46                  | 高速軸                       |    |
| 47                  | 低速軸                       | 50 |

4 8	光源	
4 9	偏光板	
5 0	偏光子アレイデバイス	
5 1 a、5 1 b	偏光子	
5 2	1 / 4 波長板 ( 位相シフト素子 )	
5 3	高速軸	
5 4	低速軸	
5 5 a、5 5 b、5 5 c	光源	
5 6	位相シフト波長選択素子	
Q W P 1	1 / 4 波長板 ( 第 1 ( 1 / 4 ) 波長板 )	10
Q W P 2	1 / 4 波長板 ( 第 2 ( 1 / 4 ) 波長板 )	
Q W P 3	1 / 4 波長板 ( 第 3 ( 1 / 4 ) 波長板 )	
5 7、6 1	波長選択アレイデバイス	
5 8 a、6 2 a	波長領域 ( 第 1 波長領域 )	
5 8 b、6 2 b	波長領域 ( 第 2 波長領域 )	
5 9	偏光子アレイ	
6 2 c	波長領域 ( 第 3 波長領域 )	
6 0 a	高速軸透過領域	
6 0 b	低速軸透過領域	
6 3、7 2	高速軸	20
6 4、7 3	低速軸	
6 5 a、6 5 b、6 5 c	光源	
6 6、7 4	位相シフト波長選択素子	
6 7、7 5	波長選択アレイデバイス	
6 8 a、7 6 a	波長領域 ( 第 1 波長領域 )	
6 8 b、7 6 b	波長領域 ( 第 2 波長領域 )	
7 6 c	波長領域 ( 第 3 波長領域 )	
6 9、7 7	位相シフトアレイデバイス	
7 1	偏光子	
7 0 a、7 8 a	1 / 4 波長板 ( 第 1 ( 1 / 4 ) 波長板 )	30
7 0 b、7 8 b	1 / 4 波長板 ( 第 2 ( 1 / 4 ) 波長板 )	
7 8 c	1 / 4 波長板 ( 第 3 ( 1 / 4 ) 波長板 )	
8 0	波長板アレイデバイス	
8 1 a	1 / 4 波長板	
8 1 b	1 / 2 波長板	
8 2	偏光板	
8 3	偏光子	
8 4	波長板アレイデバイス	
8 5	第 1 波長板素子	
8 6 a	第 1 高速軸	40
8 6 b	第 1 低速軸	
8 7	第 2 波長板素子	
8 8 a	第 2 高速軸	
8 8 b	第 2 低速軸	
8 9	偏光子アレイデバイス	
9 0 a	第 1 偏光子	
9 0 b	第 2 偏光子	
9 1	1 / 4 波長板	
B S 1 , B S 2	ビームスプリッタ	
P B S 1 , P B S 2	偏光ビームスプリッタ	50

## 【発明を実施するための最良の形態】

【0069】

本発明の一実施形態について図1ないし図55に基づいて説明すると以下の通りである。

【0070】

(実施の形態1)

図1は、実施の形態1に係るデジタルホログラフィ装置1の構成を説明するための模式図である。デジタルホログラフィ装置1は、レーザ光を出射する光源4を備えている。光源4から出射されたレーザ光は、ビームスプリッタBSにより分割される。分割されたレーザ光の一方は、ミラーMによって反射され、ビームエキスパンダBEを通過してコリメータレンズCLにより平行光となり、被写体6に照射され、被写体6によって散乱されて物体光となり、他のビームスプリッタBSを通過してCCDカメラ3に設けられた撮像面13に入射する。

10

【0071】

ビームスプリッタBSにより分割されたレーザ光の他方は、他のミラーMによって反射され、他のビームエキスパンダBEを通過して他のコリメータレンズCLにより平行光となり、アレイデバイス2に入射する。

【0072】

アレイデバイス2は、レーザ光の入射方向に垂直な平面上において格子状に配置された2種類の領域7a・7bを有している。2種類の領域7a・7bは、CCDカメラ3の各画素に対応して配置されている。アレイデバイス2の領域7aを通過したレーザ光は、位相シフト計測手段の基準となる参照光となる。領域7bを通過したレーザ光は、領域7aを通過したレーザ光の位相よりも( $\pi/2$ )位相がシフトした参照光に変換される。

20

【0073】

アレイデバイス2により生成された2種類の参照光は、さらに他のミラーMにより反射され、結像光学系12を通過して他のビームスプリッタBSにより反射されてCCDカメラ3に設けられた撮像面13に入射する。

【0074】

図2は、上記デジタルホログラフィ装置1における被写体6のホログラフィ像再生手順を説明するための図である。CCDカメラ3の撮像面13には、2種類の参照光と物体光とがそれぞれ干渉した干渉縞8が記録される。干渉縞8は、格子状に交互に配置された領域9a・9bを有している。領域9aは、物体光と、アレイデバイス2の領域7aを通過して位相シフト計測手段の基準となる位相を有する参照光とが干渉した干渉縞が記録される領域である。領域9bは、物体光と、アレイデバイス2の領域7bを通過して、領域7aを通過した参照光の位相よりも( $\pi/2$ )位相がシフトした参照光とが干渉した干渉縞が記録される領域である。

30

【0075】

再生像生成器5は、領域9aからなる干渉縞データ10aと、領域9bからなる干渉縞データ10bとを干渉縞8からそれぞれ抜き出す。そして、再生像生成器5は、干渉縞データ10aを補間して干渉縞データ11aを生成し、干渉縞データ10bを補間して干渉縞データ11bを生成する。次に、再生像生成器5は、干渉縞データ11a・11bをフレネル変換して被写体6の再生像を生成する。

40

【0076】

参照光の強度は、十分強いことが好ましく、物体光強度の2倍以上であることが好ましい。その理由は、再生像生成器5において行われるホログラフィ像再生手順で用いられる(3)式~(5)式が成立するための必要条件だからである。

【0077】

次に、被写体6の再生像を生成する原理を説明する。CCDカメラ3の撮像面13での物体光の複素振幅分布を求めることにより、物体の3次元情報を計算する。物体の複素振幅分布を求めるためには、次の情報が必要である。

50

- ・ 参照光の強度分布
  - ・ 物体光と参照光とによる干渉縞
  - ・ 物体光と ( - / 2 ) 位相がシフトした参照光とによる干渉縞
- これらの情報から CCDカメラ 3 の撮像面 1 3 での物体光の複素振幅分布を求める理論を次に示す。

【 0 0 7 8 】

【 数 1 】

$$\text{物体光} : U_{(x,y)} = A_{o(x,y)} e^{j\theta_{(x,y)}}$$

( $A_{o(x,y)}$ : 物体光の振幅分布,  $\theta_{(x,y)}$ : 物体光の位相分布)

10

$$\text{参照光} : U_{\gamma(x,y)} = A_{\gamma(x,y)} e^{j\{\phi_{(x,y)} + \delta\}}$$

( $A_{\gamma(x,y)}$ : 参照光の振幅分布,  $\phi_{(x,y)}$ : 参照光の位相分布,  $\delta$ : 参照光の位相シフト量)

$$\text{参照光の強度} : I_{\gamma(x,y)} = A_{\gamma(x,y)}^2 \quad (A_{\gamma(x,y)} = \sqrt{I_{\gamma(x,y)}})$$

【 0 0 7 9 】

物体光と参照光とで生成される干渉縞は、次式 ( 1 ) により表わされる。

【 0 0 8 0 】

20

【 数 2 】

$$I_{(x,y;\delta)} = |U_{(x,y)} + U_{\gamma(x,y)}|^2 = A_{o(x,y)}^2 + A_{\gamma(x,y)}^2 + 2A_{o(x,y)}A_{\gamma(x,y)} \cos[\theta_{(x,y)} - \{\phi_{(x,y)} + \delta\}] \quad (1)$$

【 0 0 8 1 】

位相シフト量  $\delta$  が、0、( - / 2 ) のときの干渉縞はそれぞれ次の通りである。

【 0 0 8 2 】

【 数 3 】

30

$$\delta = 0 \quad : \quad I_{(x,y;0)} = A_{o(x,y)}^2 + A_{\gamma(x,y)}^2 + 2A_{o(x,y)}A_{\gamma(x,y)} \cos[\theta_{(x,y)} - \phi_{(x,y)}]$$

$$\delta = -\frac{\pi}{2} \quad : \quad I_{(x,y;-\frac{\pi}{2})} = A_{o(x,y)}^2 + A_{\gamma(x,y)}^2 - 2A_{o(x,y)}A_{\gamma(x,y)} \sin[\theta_{(x,y)} - \phi_{(x,y)}]$$

【 0 0 8 3 】

ここで、干渉縞の 0 次回折光成分を、

【 0 0 8 4 】

【 数 4 】

40

$$a_{(x,y)} = A_{o(x,y)}^2 + A_{\gamma(x,y)}^2$$

【 0 0 8 5 】

と定義し、参照光の初期位相  $(x, y) = 0$  とする。  
上の 2 つの式を書き換えると、

【 0 0 8 6 】



【数5】

$$A_{o(x,y)} \cos \theta_{(x,y)} = \frac{I_{(x,y;0)} - a_{(x,y)}}{2\sqrt{I_{\gamma(x,y)}}}$$

$$A_{o(x,y)} \sin \theta_{(x,y)} = -\frac{I_{(x,y;-\frac{\pi}{2})} - a_{(x,y)}}{2\sqrt{I_{\gamma(x,y)}}} \quad (2)$$

10

【0087】

となる。干渉縞の0次回折光成分  $a_{(x,y)}$  を求める手順を述べる。三角関数の公式  $\sin^2 + \cos^2 = 1$  に(2)式を代入すると、

【0088】

【数6】

$$A_{o(x,y)}^2 \{ \cos^2 \theta_{(x,y)} + \sin^2 \theta_{(x,y)} \} = \left\{ \frac{I_{(x,y;0)} - a_{(x,y)}}{2\sqrt{I_{\gamma(x,y)}}} \right\}^2 + \left\{ \frac{-I_{(x,y;-\frac{\pi}{2})} + a_{(x,y)}}{2\sqrt{I_{\gamma(x,y)}}} \right\}^2$$

20

【0089】

となる。これを整理すると次式(3)に示す  $a_{(x,y)}$  の2次方程式となる。

【0090】

【数7】

$$a_{(x,y)}^2 + va_{(x,y)} + w = 0$$

$$v = -\left( I_{(x,y;0)} + I_{(x,y;-\frac{\pi}{2})} + 2I_{\gamma(x,y)} \right)$$

$$w = \frac{1}{2} \left( I_{(x,y;0)}^2 + I_{(x,y;-\frac{\pi}{2})}^2 \right) + 2I_{\gamma(x,y)}^2 \quad (3)$$

30

$a_{(x,y)}$  について解くと

$$a_{(x,y)} = \frac{-v \pm \sqrt{v^2 - 4w}}{2} \quad (4)$$

$a_{(x,y)} = A_{o(x,y)}^2 + A_{\gamma(x,y)}^2$  であるので、根号は負となり

40

$$a_{(x,y)} = \frac{-v - \sqrt{v^2 - 4w}}{2} \quad (5)$$

【0091】

これより、2枚の干渉縞、参照光の強度の情報からCCD面での物体光の複素振幅分布を求められる。その順序は以下の通りである。

【0092】

50

まず、2枚の干渉縞、参照光の強度分布を撮像素子に記録する。そして、2枚の干渉縞、参照光の強度分布の情報を(5)式に代入して干渉縞の0次回折光成分を求める。次に、2枚の干渉縞、参照光の強度分布の情報、求めた干渉縞の0次回折光成分を(2)式に代入して物体光の実部、虚部を求める。

【0093】

実施の形態1に係るデジタルホログラフィの有効性を示すために、計算機を用いてシミュレーションを行なった。図3(a)は物体光の振幅分布を示す図であり、図3(b)は物体光の位相分布を示す図であり、図3(c)は従来法である特許文献1によるデジタルホログラフィ装置による再生像の振幅分布を示す図であり、図3(d)は従来法である特許文献1によるデジタルホログラフィ装置による再生像の位相分布を示す図であり、図3(e)は本発明による再生像の振幅分布を示す図であり、図3(f)は本発明による再生像の位相分布を示す図である。図4は、本発明及び従来法の相関係数値を示す図である。図5は、本発明及び従来法の相関係数値を示すグラフである。

10

【0094】

シミュレーション条件は以下の通りである。

- ・記録・再生光の波長：632.8[nm]
- ・CCD面からの再生距離：7[cm]
- ・CCDの画素数：512×512[pixels]
- ・CCDの画素間隔：10[μm]
- ・像再生手法：コンボリューション法
- ・Ar(x,y)：2

20

Ar(x,y)=2としているのは、物体光の強度分布を規格化しており、物体光の強度と参照光の強度との比を1：4と仮定したためである。比較対象として従来法である特許文献1のデジタルホログラフィで同様の条件でシミュレーションを行なった。補間処理方法として、共に、CCD面上で欠落した各位相シフト量の画素値を補間した。比較の方法として、図3に示す物体光の振幅分布、位相分布と、それぞれの方法で得られた再生像の振幅分布、位相分布とで相関をとった。その得られた相関係数の値から有効性を調べた。相関係数rを求める式を次に示す。

【0095】

【数8】

30

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} (P_{(i,j)} - \bar{P})(Q_{(i,j)} - \bar{Q})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} (P_{(i,j)} - \bar{P})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} (Q_{(i,j)} - \bar{Q})^2}} \quad (6)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} P_{(i,j)}$$

$$\bar{Q} = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} Q_{(i,j)}$$

40

【0096】

上式(6)において、P(i,j)を被写体のデータの各画素値とし、Q(i,j)を再生像のデータの各画素値とし、Nx、Nyをそれぞれx、y軸方向の画素数とする。P(i,j)に被写体の振幅分布、位相分布のデータを与え、Q(i,j)に再生像の振幅分布、位相分布を与えた。図4に相関値を、図5にグラフを示す。このシミュレーション結果より、画質の向上を確認することができた。

【0097】

なお、実施の形態1では、光源4がレーザ光を出射する例を示したが、しかしながら、

50

本発明はこれに限定されない。レーザ光の代わりに、超音波、X線、LEDからの光、スーパーミネセントダイオードからの光、ハロゲンランプからの光、キセノンランプからの光、水銀ランプからの光、ナトリウムランプからの光、マイクロ波、テラヘルツ光、電子線、またはラジオ波を使用するように構成してもよい。後述する実施の形態も同様である。

【0098】

また、アレイデバイス2の領域7a・7bは、アレイデバイス2を構成する材料のガラスの厚みを変えることによって構成してもよいし、アレイデバイス2に液晶素子を設け、液晶分子の向きを変えることによって構成してもよい。

【0099】

また、CCDカメラを撮像手段として使用する例を示したが、本発明はこれに限定されない。撮像手段として撮像素子一般を用いることができ、CCDカメラの代わりにCMOSイメージセンサーカメラを使用してもよい。後述する実施の形態も同様である。

【0100】

また、アレイデバイスをガラスによって構成する例を示したが、本発明はこれに限定されない。

【0101】

また、光源から出射されたレーザ光が被写体によって散乱されて物体光となる例を示したが、本発明はこれに限定されない。被写体から放射または透過または反射または回折されて物体光となってもよい。後述する実施の形態においても同様である。

【0102】

(実施の形態2)

図6は、実施の形態2に係るデジタルホログラフィ装置1cの構成を説明するための模式図である。前述した構成要素と同一の構成要素には同一の参照符号を付している。従って、これらの構成要素の詳細な説明は省略する。

【0103】

デジタルホログラフィ装置1cは、レーザ光を出射する光源4を備えている。光源4から出射されたレーザ光は、ビームスプリッタBSにより分割される。分割されたレーザ光の一方は、ミラーMによって反射され、ビームエキスパンダBEを通過してコリメータレンズCLにより平行光となり、被写体6に照射され、被写体6によって散乱されて物体光となり、他のビームスプリッタBSを通過してアレイデバイス14に入射する。

【0104】

ビームスプリッタBSにより分割されたレーザ光の他方は、他のミラーMによって反射され、他のビームエキスパンダBEを通過して他のコリメータレンズCLにより平行光となり、さらに他のミラーM及び他のビームスプリッタBSによって反射されてアレイデバイス14に入射する。

【0105】

図7はアレイデバイス14の構成を説明するための模式的な斜視図であり、図8はその断面図である。アレイデバイス14は、レーザ光の入射方向に垂直な平面上において交互に格子状に配置された2種類の領域15a・15bを有している。2種類の領域15a・15bは、CCDカメラ3の各画素に対応して配置されている。アレイデバイス14は、物体光と参照光とに対して屈折率が等しいガラスによって構成されており、図8に示すように、領域15aは、領域15bよりも薄く構成されている。

【0106】

領域15aは、被写体6からの物体光及び他のビームスプリッタBSにより反射されたレーザ光に基づいて、第1光路物体光及び第1光路参照光をそれぞれ生成して撮像面13に入射する。領域15bは、被写体6からの物体光及び他のビームスプリッタBSにより反射されたレーザ光に基づいて、第2光路物体光及び第2光路参照光をそれぞれ生成して撮像面13に入射する。アレイデバイス14は、CCDカメラ3の撮像面13に貼り付けてもよい。このようなアレイデバイス14の構成によって、CCDカメラ3の画素ごとに

10

20

30

40

50

光路差が生じるので、光路長の異なる2枚の干渉縞を一回で同時記録することができる。この光路差は満たすべき特定の条件を持たないので、ガラスの厚さは均一であれば自由に定めても良い。

【0107】

アレイデバイスは、同じ厚みを有する第1光学媒質および第2光学媒質によって形成してもよい。この場合は、第1光学媒質は、入射する物体光および参照光に対して第1屈折率を有し、第2光学媒質は、物体光および参照光に対して第1屈折率と異なる第2屈折率を有するように構成する。

【0108】

図9は、デジタルホログラフィ装置1cにおける像再構成アルゴリズムを説明するための図である。CCDカメラ3の撮像面13には、干渉縞16が記録される。干渉縞16は、格子状に交互に配置された2種類の領域17a・17bに記録される。領域17aは、アレイデバイス14の領域15aに対応する。領域17bは、アレイデバイス14の領域15bに対応する。

10

【0109】

再生像生成器5は、領域17aからなる干渉縞データ18aと、領域17bからなる干渉縞データ18bとを干渉縞16から抜き出す。そして、再生像生成器5は、干渉縞データ18aを補間して干渉縞データ19aを生成し、干渉縞データ18bを補間して干渉縞データ19bを生成する。次に、再生像生成器5は、干渉縞データ19a・19bをフレネル変換して被写体6の再生像を生成する。

20

【0110】

このように、光路長の異なる2枚の干渉縞情報を本実施の形態の撮像素子で記録し、各成分を抜き出しそれぞれ欠落した画素を補間する。そして、以上のプロセスで得た2枚の干渉縞から、計算機で像再生計算を行うことで物体光を求め、三次元情報を再生する。

【0111】

以上のように、インライン上に配置された撮像素子(CCDカメラ3)と被写体6の間の距離が異なる2つの位置で記録した2枚のインラインホログラムから、任意の位置での被写体の振幅情報を再生することが可能である。この手法の原理を以下で述べる。

【0112】

被写体6に光を照射することで被写体6から散乱される物体光と、参照光となる平面波とをインラインで重ね合わせることで撮像素子上に干渉縞が形成される。この撮像素子で記録される干渉縞は、撮像素子と被写体の間の距離をzとすると、

30

【0113】

【数9】

$$I(x, y, z) = \left| A_0 \exp\left(-i \frac{2\pi d}{\lambda}\right) [1 + u(x, y, z)] \right|^2 \quad (7)$$

$A_0$  : 参照光の振幅 (実数の定数)

$u(x, y, z)$  : 物体光の振幅・位相分布

40

【0114】

の式(7)で与えられる。

【0115】

ここで、物体光が参照光に対して十分に小さいとき、(7)式は近似を用いて、

【0116】

【数10】

$$I(x, y, z) = \left| A_0 \exp\left(-i \frac{2\pi d}{\lambda}\right) \exp[u(x, y, z)] \right|^2 \quad (8)$$

$$= A_0^2 \exp[u(x, y, z) + u^*(x, y, z)]$$

【0117】

の式(8)のように表される。

10

ここで、関数を式(9)のように定義する。

【0118】

【数11】

$$l(x, y, z) = \log[I(x, y, z)/A_0^2] = u(x, y, z) + u^*(x, y, z) \quad (9)$$

【0119】

このとき、 $l(x, y, z)$  のフーリエ変換は、

【0120】

20

【数12】

$$L(x, y, z) = \iint l(x, y, z) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy \quad (10)$$

$$= U(f_x, f_y, 0)H(f_x, f_y, z) + U^*(-f_x, -f_y, 0)H^*(f_x, f_y, z)$$

【0121】

の式(10)となる。

ここで、 $H(f_x, f_y, z)$  はレイリー・ゾンマーフェルトの積分を用いた伝達関数であり、

30

【0122】

【数13】

$$H(f_x, f_y, \Delta z) = \exp\left[-i \frac{2\pi z}{\lambda} (1 - \lambda^2 f_x^2 - \lambda^2 f_y^2)^{\frac{1}{2}}\right] \quad (11)$$

【0123】

の式(11)で与えられる。(10)式より、関数 $L(x, y, z)$ は物体の複素振幅分布とその共役像の両方のフーリエ変換像を含んでいる。

40

【0124】

そこで物体の複素振幅分布を再生し、共役像を除去するために撮像素子と被写体の距離が $z + \Delta z$ の干渉縞を記録する。この干渉縞より $L(x, y, z + \Delta z)$ を求める。

【0125】

求めた $L(x, y, z)$ 、 $L(x, y, z + \Delta z)$ より以下の式(12)が成立する。

【0126】

## 【数 1 4】

$$\begin{aligned} \Delta L(x, y, z) &= L(x, y, z) - L(x, y, z + \Delta z)H(f_x, f_y, \Delta z) \\ &= U(f_x, f_y, 0)H(f_x, f_y, z) \times [1 - H(f_x, f_y, 2\Delta z)] \end{aligned} \quad (12)$$

## 【0 1 2 7】

この式(12)から物体光をフーリエ変換した関数 $U(f_x, f_y, 0)$ を求めることができるので、逆フーリエ変換により求める物体の振幅・位相情報となる $u(x, y, 0)$ を求めることができる。

10

## 【0 1 2 8】

図10(a)は上記デジタルホログラフィ装置1cによる被写体の再生像を示す図であり、図10(b)は従来のフレネル変換法による被写体の再生像を示す図であり、図10(c)は従来の逐次位相シフトデジタルホログラフィによる被写体の再生像を示す図である。図10(d)は従来法である(特許文献1)によるデジタルホログラフィ装置による被写体の再生像を示す図である。

## 【0 1 2 9】

実施の形態2に係るデジタルホログラフィ装置1cによれば、従来の逐次位相シフトデジタルホログラフィ及び従来法である(特許文献1)によるデジタルホログラフィ装置による再生像と同等の画質を得られることが分かる。

20

## 【0 1 3 0】

(実施の形態3)

図11は、実施の形態3に係るデジタルホログラフィ装置1dの構成を説明するための模式図である。前述した構成要素と同一の構成要素には同一の参照符号を付している。従って、これらの構成要素の詳細な説明は省略する。

## 【0 1 3 1】

デジタルホログラフィ装置1dは、緑色に対応する波長を有する緑色レーザー光を出射する光源28aと、赤色に対応する波長を有する赤色レーザー光を出射する光源28bとを備えている。光源28aから出射した緑色レーザー光は、ミラーMにより反射されてハーフミラーHMを透過して他のハーフミラーHMに入射する。光源28bから出射した赤色レーザー光は、ハーフミラーHMにより反射されて他のハーフミラーHMに入射する。

30

## 【0 1 3 2】

他のハーフミラーHMによって反射された緑色レーザー光及び赤色レーザー光は、ビームエキスパンダBEを通して被写体6に照射され、被写体6により透過される物体光は、他のミラーMにより反射されビームスプリッタBSにより反射されてCCDカメラ3の撮像面13に入射する。

## 【0 1 3 3】

他のハーフミラーHMを通り抜けた緑色レーザー光及び赤色レーザー光は、さらに他のミラーMによって反射され他のビームエキスパンダBEを通してアレイデバイス20に入射する。

40

## 【0 1 3 4】

図12は、アレイデバイス20の構成を説明するための図である。アレイデバイス20は、緑色レーザー光及び赤色レーザー光の入射方向に垂直な第1方向に沿ってストライプ状にそれぞれ配置されて、位相0に対応する位相領域23aと、位相 $(\pi/2)$ に対応する位相領域23bと、位相 $(\pi)$ に対応する位相領域23cと、位相 $(3\pi/2)$ に対応する位相領域23dとを有する位相シフトアレイデバイス21と、緑色レーザー光及び赤色レーザー光の入射方向に垂直な方向であって前記第1方向に垂直に交差する方向に沿ってストライプ状にそれぞれ配置されて、緑色に対応する波長を有する緑色レーザー光を透過する波長領域24aと、赤色に対応する波長を有する赤色レーザー光を透過する波長領域24bとを有する波長選択アレイデバイス22とを有している。

50

## 【 0 1 3 5 】

位相領域  $2\ 3\ a \cdot 2\ 3\ b \cdot 2\ 3\ c \cdot 2\ 3\ d$ 、並びに波長領域  $2\ 4\ a \cdot 2\ 4\ b$  は、C C D カメラ 3 の各画素に対応して配置されている。

## 【 0 1 3 6 】

瞬時に正確な位相分布を取得するためには、2つの波長に対応する干渉縞を同時に記録するシステムがあればよい。また、参照光の位相をシフトさせたものを波長ごとに取得できれば、0次回折光などの影響を軽減できる。上記のように構成されたアレイデバイス 2 0 及び C C D カメラ 3 を設けた。

## 【 0 1 3 7 】

即ち、C C D カメラ 3 の画素ごとに位相シフト量が  $0$ 、 $(\quad / 2)$ 、 $(3 / 2)$  のいずれかとなる位相シフトアレイデバイス 2 1 と、さらにその前面に特定の波長のみを通す波長選択アレイデバイス 2 2 とを取り付けたものである。

10

## 【 0 1 3 8 】

このように、アレイデバイス 2 0 は、光源 2 8 a 及び光源 2 8 b からそれぞれ出射された緑色レーザ光及び赤色レーザ光を、位相 0 及び緑色波長に対応する第 1 位相緑色参照光と、位相  $(\quad / 2)$  及び緑色波長に対応する第 2 位相緑色参照光と、位相  $(3 / 2)$  及び緑色波長に対応する第 3 位相緑色参照光と、位相  $(\quad / 2)$  及び赤色波長に対応する第 1 位相赤色参照光と、位相  $(3 / 2)$  及び赤色波長に対応する第 2 位相赤色参照光と、位相  $(\quad / 2)$  及び赤色波長に対応する第 3 位相赤色参照光と、位相  $(3 / 2)$  及び赤色波長に対応する第 4 位相赤色参照光との 8 種類の参照光に、緑色レーザ光及び赤色レーザ光の入射方向に垂直な平面上において分割する。

20

## 【 0 1 3 9 】

図 1 3 は、デジタルホログラフィ装置 1 d における像再構成アルゴリズムを説明するための図である。前述した第 1 位相緑色参照光、第 2 位相緑色参照光、第 3 位相緑色参照光、第 4 位相緑色参照光、第 1 位相赤色参照光、第 2 位相赤色参照光、第 3 位相赤色参照光、及び第 4 位相赤色参照光と、物体光とがそれぞれ干渉して撮像面 1 3 に記録された干渉縞から、同じ波長かつ同じ位相シフト量で記録された画素を抜き出し、干渉縞  $2\ 5\ a \cdot 2\ 5\ b \cdot 2\ 5\ c \cdot 2\ 5\ d \cdot 2\ 5\ e \cdot 2\ 5\ f \cdot 2\ 5\ g \cdot 2\ 5\ h$  の 8 枚の干渉縞を得る。

## 【 0 1 4 0 】

図 1 4 ( a ) ~ 図 1 4 ( e ) は、デジタルホログラフィ装置 1 d における画素の補間方法を説明するための図である。8枚の干渉縞  $2\ 5\ a \sim 2\ 5\ h$  のそれぞれにおいて欠落した画素を図 1 4 ( a ) ~ 図 1 4 ( e ) に示すように補間する。端の画素では近接する画素の値を複製する。8画素を 1 グループとし、図 1 4 ( a ) ~ 図 1 4 ( e ) に示す丸印の 1 番から丸印の 7 番の順番に補間を行う。

30

## 【 0 1 4 1 】

図 1 5 は、デジタルホログラフィ装置 1 d における複素振幅を求める方法を説明するための図である。補間を行った 8 枚の干渉縞  $2\ 5\ a \sim 2\ 5\ h$  を用いて、波長ごとに位相シフト計算を再生像生成器 5 により行い、それぞれの波長に対応する複素振幅分布を求める。そして、2つの波長に対する複素振幅分布に基づいて、それぞれの位相分布を計算する。次に、2つの波長に対する位相分布の画像中の同じ位置に配置された画素同士で差を取る。その結果、負となった画素に対して  $2$  を加える。

40

## 【 0 1 4 2 】

次に、実施の形態 3 に係るデジタルホログラフィの原理を説明する。物体の複素振幅分布  $U$  とすると、物体の位相分布  $\phi$  は以下のように複素振幅  $U$  より求められる。

## 【 0 1 4 3 】

【数 1 5】

$$\varphi = \arctan \frac{\Im[U]}{\Re[U]}$$

【0 1 4 4】

観測される位相分布は $\arctan$ で求められるため、 $-\pi < \varphi < \pi$  の範囲に折り畳まれ、正確な位相分布を得ることができない。そこで、正確な位相分布を得るために位相接続を行う。

10

【0 1 4 5】

2 波長を用いて位相接続を行う方法を 2 波長位相接続法と呼ぶ。その理論を次に示す。

【0 1 4 6】

波長  $\lambda_m$  に対する位相分布  $\varphi_m$  とすると、それに対応する物体の表面形状  $z_m$  は次のように表せる。

【0 1 4 7】

【数 1 6】

$$z_m = \frac{\varphi_m}{2\pi} \lambda_m$$

20

【0 1 4 8】

以下、2つの波長  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  ( $\lambda_1 < \lambda_2$ ) とし、波長  $\lambda_1$  に対する位相分布  $\varphi_1$ 、波長  $\lambda_2$  に対する位相分布  $\varphi_2$  とする。2つの位相分布  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  の差  $\varphi_{12}$  を次のように求める。

【0 1 4 9】

【数 1 7】

$$\varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$$

30

【0 1 5 0】

この  $\varphi_{12}$  は、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  の折り返し点に対応する点において位相差が  $2\pi$  となり、このような点が多数存在する。この位相差が  $2\pi$  となる点の数を減らすために、 $\varphi_{12} < 0$  となる部分に  $2\pi$  を加える。その結果、求まる位相分布  $\varphi'_{12}$  は、以下のように表される。

【0 1 5 1】

【数 1 8】

$$\varphi'_{12} = \varphi_{12} + \begin{cases} 2\pi (\varphi_{12} < 0 \text{ のとき}) \\ 0 (\varphi_{12} \geq 0 \text{ のとき}) \end{cases}$$

40

【0 1 5 2】

$\varphi'_{12}$  は、次式で表される合成波長  $\Lambda_{12}$  により得られる位相分布に相当する。

【0 1 5 3】

【数 1 9】

$$\Lambda_{12} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$$

50



## 【 0 1 5 4 】

図 1 6 ( a ) はデジタルホログラフィ装置 1 d の被写体 6 の高さ分布を示す図であり、図 1 6 ( b ) は被写体 6 の振幅分布を示す図であり、図 1 6 ( c ) は波長 6 3 3 n m、5 3 2 n m のレーザを用いた場合の計算機シミュレーションの結果を示し、図 1 6 ( d ) は波長 6 3 3 n m、6 3 5 n m のレーザを用いた場合の計算機シミュレーションの結果を示し、図 1 6 ( e ) は従来法である ( 特許文献 1 ) によるデジタルホログラフィ装置 ( 波長 : 6 3 3 n m ) による計算機シミュレーションの結果を示す。

## 【 0 1 5 5 】

シミュレーション条件は、以下に示すとおりである。

- ・物体とホログラム面の距離 ( 再生距離 ) : 1 0 c m
- ・物体光・参照光の波長 : 6 3 3 n m と 5 3 2 n m、または 6 3 3 n m と 6 3 5 n m
- ・ホログラム、再生像の画素間隔 : 1 0 μ m
- ・ホログラム、再生像の画素数 : 5 1 2 × 5 1 2 p i x e l s
- ・像再生の方法 : コンポリューション法

また、被写体 6 の高さは最大 3 μ m とした。図 1 6 に示す画像は、2 5 6 階調に値を規格化しており、最小値を黒 ( 0 )、最大値を白 ( 2 5 5 ) としている。

## 【 0 1 5 6 】

図 1 6 ( c ) ~ 図 1 6 ( e ) は、計算機シミュレーションの結果を示す。波長 6 3 3 n m と 5 3 2 n m のレーザを用いた場合の合成波長は約 3 . 3 μ m となる。また、波長 6 3 3 n m と 6 3 5 n m のレーザを用いた場合の合成波長は約 2 0 0 μ m となる。

## 【 0 1 5 7 】

図 1 7 は、実施の形態 3 に係る他のデジタルホログラフィ装置 1 e の構成を説明するための模式図である。前述した図 1 1 で示した構成要素と同一の構成要素には同一の参照符号を付している。従って、これらの構成要素の詳細な説明は省略する。

## 【 0 1 5 8 】

デジタルホログラフィ装置 1 e が前述した図 1 1 で示したデジタルホログラフィ装置 1 d と異なる点は、光源 2 8 c を追加した点、及びアレイデバイス 2 0 に代えてアレイデバイス 2 0 e を設けた点である。光源 2 8 c は、青色に対応する波長を有する青色レーザ光を出射する。

## 【 0 1 5 9 】

図 1 8 は、アレイデバイス 2 0 e の構成を説明するための図である。アレイデバイス 2 0 e は、位相シフトアレイデバイス 2 1 と波長選択アレイデバイス 2 2 e とを有している。

## 【 0 1 6 0 】

位相シフトアレイデバイス 2 1 は、緑色レーザ光、赤色レーザ光及び青色レーザ光の入射方向に垂直な第 1 方向に沿ってストライプ状にそれぞれ配置されて、位相 0 に対応する位相領域 2 3 a と、位相 ( π / 2 ) に対応する位相領域 2 3 b と、位相 π に対応する位相領域 2 3 c と、位相 ( 3 π / 2 ) に対応する位相領域 2 3 d とを有している。

## 【 0 1 6 1 】

波長選択アレイデバイス 2 2 e は、緑色レーザ光、赤色レーザ光及び青色レーザ光の入射方向に垂直な方向であって前記第 1 方向に垂直に交差する方向に沿ってストライプ状にそれぞれ配置されて、緑色に対応する波長を有する緑色レーザ光を透過する波長領域 2 6 a と、赤色に対応する波長を有する赤色レーザ光を透過する波長領域 2 6 b と、青色に対応する波長を有する青色レーザ光を透過する波長領域 2 6 c とを有している。位相領域 2 3 a ・ 2 3 b ・ 2 3 c ・ 2 3 d、並びに波長領域 2 6 a ・ 2 6 b ・ 2 6 c は、CCD カメラ 3 の各画素に対応して配置されている。

## 【 0 1 6 2 】

図 1 9 は、デジタルホログラフィ装置 1 e における像再構成アルゴリズムを説明するための図である。アレイデバイス 2 0 e によって生成した 1 2 種類の参照光と物体光とが干

10

20

30

40

50

渉して撮像面 1 3 に記録された干渉縞から、同じ波長かつ同じ位相シフト量で記録された画素を抜き出して、1 2 枚の干渉縞 2 7 a ~ 2 7 l を得る。

【 0 1 6 3 】

図 2 0 は、デジタルホログラフィ装置 1 e における画素の補間方法を説明するための図である。1 2 枚の干渉縞 2 7 a ~ 2 7 l のそれぞれにおいて欠落した画素の補間を以下のように行う。端の画素では近接する画素の値を複製する。補間は以下に示すように重み付けをし、補間する。

【 0 1 6 4 】

例) 有効な 4 画素から欠落した画素を記録する場合

有効な 4 画素 A、B、C、D とし、画素 A、B、C、D から欠落した画素までの距離をそれぞれ a、b、c、d とする。欠落した画素を画素 F とすると、画素 F の値は、下記の式に従って求める。

【 0 1 6 5 】

【 数 2 0 】

$$F = \frac{\frac{1}{a}A + \frac{1}{b}B + \frac{1}{c}C + \frac{1}{d}D}{\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} + \frac{1}{d}}$$

10

20

【 0 1 6 6 】

図 2 1 は、デジタルホログラフィ装置 1 e における複素振幅を求める方法を説明するための図である。補間を行った 1 2 枚の干渉縞 2 7 a ~ 2 7 l を用いて、波長ごとに位相シフト計測法における複素振幅分布を求める計算を行い、それぞれの波長に対応する複素振幅分布を求める。そして、3 つの波長に対する複素振幅分布より、それぞれの位相分布を計算する。次に、3 つの波長 1、2、3 ( 2 < 3 < 1 ) のうち、1 と 3、2 と 3 の 2 組に 2 波長位相接続法を適用する。その後、上記 2 波長位相接続法を適用して得られた 2 つの位相分布に、さらに、2 波長位相接続法を適用する。

【 0 1 6 7 】

図 2 2 ( a ) は波長 6 3 3 nm、5 3 2 nm のレーザを用いた場合の計算機シミュレーションの結果を示し、図 2 2 ( b ) は波長 6 3 3 nm、5 3 2 nm、4 7 5 nm のレーザを用いた場合の計算機シミュレーションの結果を示す。

【 0 1 6 8 】

シミュレーション条件、被写体等は、図 1 6 を参照して前述した並列 2 波長位相接続法と同じである。また、前述した並列 2 波長位相接続法 ( 波長 : 6 3 3 nm、5 3 2 nm ) の合成波長は約 3 . 3 μm であり、並列 3 波長位相接続法 ( 波長 : 6 3 3 nm、5 3 2 nm、4 7 5 nm ) の合成波長は約 1 3 . 5 μm である。

【 0 1 6 9 】

次に、3 波長を用いて位相接続する方法の原理を説明する。3 つの波長を 1、2、3 ( 2 < 3 < 1 ) とする。まず、波長 1 と 3 に対応する位相分布に 2 波長位相接続法を適用し、合成波長 1 3 に対応する位相分布を得る。次に、波長 2 と 3 に対応する位相分布に 2 波長位相接続法を適用し、合成波長 2 3 に対応する位相分布を得る。その後、合成波長 1 3 と 2 3 に対応する位相分布に 2 波長位相接続法を適用し、合成波長 1 3 - 2 3 に対応する位相分布を得る。

以下に、合成波長 1 3 - 2 3 を導く。

【 0 1 7 0 】

各合成波長は、

【 0 1 7 1 】

30

40

50

【数 2 1】

$$\Lambda_{13} = \frac{\lambda_1 \lambda_3}{|\lambda_1 - \lambda_3|}, \quad \Lambda_{23} = \frac{\lambda_2 \lambda_3}{|\lambda_2 - \lambda_3|}$$

【0 1 7 2】

となる。

【0 1 7 3】

$\Lambda_{13}$  と  $\Lambda_{23}$  の合成波長  $\Lambda_{13-23}$  は以下のように計算される。

10

【0 1 7 4】

【数 2 2】

$$\begin{aligned} \Lambda_{13-23} &= \frac{\frac{\lambda_1 \lambda_3}{|\lambda_1 - \lambda_3|} \frac{\lambda_2 \lambda_3}{|\lambda_2 - \lambda_3|}}{\frac{\lambda_1 \lambda_3}{|\lambda_1 - \lambda_3|} \frac{\lambda_2 \lambda_3}{|\lambda_2 - \lambda_3|}} = \frac{\frac{\lambda_1 \lambda_3 \lambda_2 \lambda_3}{|\lambda_1 - \lambda_3| |\lambda_2 - \lambda_3|}}{\frac{|\lambda_2 - \lambda_3| \lambda_1 \lambda_3 - |\lambda_1 - \lambda_3| \lambda_2 \lambda_3}{|\lambda_1 - \lambda_3| |\lambda_2 - \lambda_3|}} = \frac{\frac{\lambda_1 \lambda_3 \lambda_2 \lambda_3}{|\lambda_1 - \lambda_3| |\lambda_2 - \lambda_3|}}{\frac{|\lambda_2 - \lambda_3| \lambda_1 \lambda_3 - |\lambda_1 - \lambda_3| \lambda_2 \lambda_3}{|\lambda_1 - \lambda_3| |\lambda_2 - \lambda_3|}} \\ &= \frac{\lambda_1 \lambda_3 \lambda_2 \lambda_3}{|\lambda_2 - \lambda_3| \lambda_1 \lambda_3 - |\lambda_1 - \lambda_3| \lambda_2 \lambda_3} = \frac{\lambda_1 \lambda_3 \lambda_2 \lambda_3}{\lambda_3 (|\lambda_2 - \lambda_3| \lambda_1 - |\lambda_1 - \lambda_3| \lambda_2)} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}{|\lambda_2 - \lambda_3| \lambda_1 - |\lambda_1 - \lambda_3| \lambda_2} \quad (\because \lambda_3 > 0) \end{aligned}$$

20

ここで、 $\lambda_2 < \lambda_3 < \lambda_1$ であるから、

$$\begin{aligned} \Lambda_{13-23} &= \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}{(|\lambda_3 - \lambda_2| \lambda_1 - (\lambda_1 - \lambda_3) \lambda_2)} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}{|\lambda_1 \lambda_3 - \lambda_1 \lambda_2 - (\lambda_1 \lambda_2 - \lambda_2 \lambda_3)|} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}{|\lambda_1 \lambda_3 - \lambda_1 \lambda_2 - \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2 \lambda_3|} \\ &= \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}{|\lambda_1 \lambda_3 + \lambda_2 \lambda_3 - 2\lambda_1 \lambda_2|} \end{aligned}$$

【0 1 7 5】

(実施の形態 4)

図 2 4 は、実施の形態 4 に係るデジタルホログラフィ装置 1 f の構成を説明するための模式図である。前述した構成要素と同一の構成要素には同一の参照符号を付している。従って、これらの構成要素の詳細な説明は省略する。

30

【0 1 7 6】

図 2 4 は、CCDカメラ 3 の撮像面 1 3 に偏光子アレイデバイス 3 3 を貼り付ける場合の光学系の一例を示している。図 2 4 に示す光学系の説明を行なう。まず、光源 3 1 から出射されるレーザは垂直偏光成分のみを有するものとする。光源 3 1 から出射された光は、ビームエキスパンダ B E を通り、対物レンズと平行光を形成するレンズ (コリメートレンズ C L) によって、拡大された平行光となり、ビームスプリッタ B S 1 によって物体光と参照光とに分けられる。物体光は物体 (被写体 6) の散乱光が偏光子とビームスプリッタ B S 2 とを通過して偏光子アレイデバイス 3 3 と一体に構成された CCDカメラ 3 (撮像素子) へ到達する。一方、参照光は 1 / 4 波長板 3 2 を通過するとき垂直偏光と水平偏光との成分を持った偏光になる。このとき、参照光は位相シフトのない成分と - / 2 位相シフトした成分を持つ。そしてビームスプリッタ B S 2 を通して偏光子アレイデバイス 3 3 と一体に構成された CCDカメラ 3 へ到達する。

40

【0 1 7 7】

図 2 5 ( a ) はデジタルホログラフィ装置 1 f の偏光子アレイデバイス 3 3 の構成を説明するための模式図であり、図 2 5 ( b ) は偏光方向を示す図である。CCDカメラ 3 の撮像面 1 3 に偏光子アレイデバイス 3 3 を貼り付ける場合についての位相シフトアレイデバイスの概要図を図 2 5 に示す。この場合、位相シフトアレイデバイスは図 2 5 のような偏光子アレイデバイス 3 3 となる。図中の矢印は、図中の矢印方向の偏光のみが通過でき

50

ることを示す。この偏光子アレイデバイス 33 の 1 区間の大きさは CCD カメラ 3 の撮像素子の 1 画素の大きさに対応しており、偏光子アレイデバイス 33 は撮像素子の撮像面 13 上に貼り付けられる。偏光子アレイデバイス 33 は、光源 31 から出射された光を、その進行方向に垂直な平面上において互いに位相が異なる 2 種類の参照光に分割する。

【0178】

図 26 は、デジタルホログラフィ装置 1 f における偏光方向の変化を説明するための図である。図 24 の光学系における、物体光と参照光の偏光方向の変化を図 26 に示す。物体光は、位相シフトせずに CCD カメラ 3 の撮像面 13 (撮像素子) の各画素に記録される。1/4 波長板 32 を通過した後の参照光の偏光は図 26 のように 2 つの直線偏光で表せる。片側の偏光は位相がシフトせず、もう片側は 1/4 波長板 32 によって位相が - $\pi/2$  シフトする。そして、撮像面 13 に貼り付けられた偏光子アレイデバイス 33 によって、位相がシフトしていない成分のみ又は位相が - $\pi/2$  シフトした成分のみの参照光が各画素に記録される。

10

【0179】

図 27 は、デジタルホログラフィ装置 1 f に設けられた CCD カメラ 3 の撮像面 13 における参照光の偏光方向と位相分布とを示す図である。図 26 の撮像面 13 での参照光の偏光方向と位相分布とを図 27 に示す。CCD カメラ 3 (撮像素子) には偏光子アレイデバイス 33 が貼り付けられており、偏光子アレイデバイス 33 によって決められた偏光しか通らない。そのために、位相がシフトしていない成分のみ又は位相が - $\pi/2$  シフトした成分のみの参照光が各画素に記録される。よって、図 27 の通りの位相シフト量を持った参照光が各画素に記録される。物体光は位相が変化しないので、干渉縞は、参照光が位相シフトしていないものと - $\pi/2$  位相シフトしたものの 2 種類になる。このようにして 2 枚分の干渉縞の情報をシングルショットで記録する。

20

【0180】

このように、光源 31 は、垂直方向に偏光した光を出射し、1/4 波長板 32 によって分割された 2 種類の参照光の一方は垂直方向に対して 45 度傾斜する第 2 方向に偏光し、参照光の他方は垂直方向に対して -45 度傾斜する第 3 方向に偏光する。

【0181】

物体光と 2 種類の参照光とを透過させる偏光子アレイデバイス 33 は、第 2 方向に偏光した参照光の一方と物体光の第 2 方向への正射影成分とを透過させる領域 34 a と、第 3 方向に偏光した参照光の他方と物体光の第 3 方向への正射影成分とを透過させる領域 34 b とを有している。

30

【0182】

図 28 は、実施の形態 4 に係る他のデジタルホログラフィ装置 1 g の構成を説明するための模式図である。前述した構成要素と同一の構成要素には同一の参照符号を付している。従って、これらの構成要素の詳細な説明は省略する。

【0183】

CCD カメラ 3 の撮像面 13 に波長板光学媒質アレイデバイス 36 と偏光子 37 と有する位相シフトアレイデバイス 35 を貼り付ける場合の光学系の一例を図 28 に示す。図 28 に示す光学系の説明を行なう。まず、光源 31 a から出射されるレーザは、垂直偏光と水平偏光の成分を持つ直線偏光とする。光源 31 a から出射された光は対物レンズと平行光を形成するレンズによって拡大された平行光となり、ビームスプリッタ BS1 によって物体光と参照光に分けられる。物体光は、物体の散乱光が偏光ビームスプリッタ PBS で反射するときに垂直偏光成分のみとなり、そして位相シフトアレイデバイス 35 と一体に構成された CCD カメラ 3 へ到達する。ただし、位相シフトアレイデバイス 35 を通過するときに物体光の位相はシフトしない。一方、参照光は、偏光ビームスプリッタ PBS を通過して水平偏光成分のみとなり、そして位相シフトアレイデバイス 35 と一体に構成された CCD カメラ 3 へ到達する。

40

【0184】

図 29 は、デジタルホログラフィ装置 1 g に設けられた位相シフトアレイデバイス 35

50

の構成を説明するための図である。CCDカメラ3の撮像面13に波長板光学媒質アレイデバイス36と偏光子37とを有する位相シフトアレイデバイス35を貼り付ける場合の位相シフトアレイデバイス35の概要図を図29に示す。この場合、位相シフトアレイデバイス35は図29のような波長板光学媒質アレイデバイス36と偏光子37とから構成される。光学媒質38は、等方性で、屈折率が波長板の高速軸40の屈折率と等しく、厚みが波長板と等しく、光の吸収のない材料で設計される。本方法で必要とされる波長板は1/4波長板39以外のものでも良いが、今回、参照光の位相シフト量が0と $-\pi/2$ として説明しているため、一例として1/4波長板39を用いる。また、図中の偏光子37の矢印は、図中の矢印方向の偏光のみが通過できることを示す。この波長板光学媒質アレイデバイス36の1区画の大きさはCCDカメラ3の撮像素子の1画素の大きさに対応しており、波長板光学媒質アレイデバイス36と偏光子37とはCCDカメラ3の撮像面13上に貼り付けられる。

10

## 【0185】

図30は、位相シフトアレイデバイス1gにおける参照光の位相シフトと偏光方向の変化を説明するための図であり、偏光ビームスプリッタPBSからCCDカメラ3の撮像面13へ向かう参照光が位相シフトする様子を示す。水平偏光成分のみを持つ参照光は、波長板光学媒質アレイデバイス36に設けられて高速軸40と低速軸41とを有する波長板(1/4波長板39)の部分を通過するとき位相が $-\pi/2$ シフトする。その後偏光子37を通り、偏光方向が一定で2段階の位相を持った参照光が撮像面13に記録される。

20

## 【0186】

図31は、デジタルホログラフィ装置1gにおける物体光と参照光との各素子での位相と偏光方向との変化を説明するための図である。光源31a(レーザ)から射出された垂直偏光と水平偏光との成分を持った直線偏光は、偏光ビームスプリッタBS1によって物体光が垂直または水平偏光成分のみ、参照光が物体光と垂直な偏光成分のみに変えられ、位相シフトアレイデバイス35と一体に構成されたCCDカメラ3に向かう。波長板の高速軸40と低速軸41とが図29に示すようなものであるとき、物体光は垂直偏光、参照光は水平偏光である。物体光は波長板光学媒質アレイデバイス36を通過したときに、波長板光学媒質アレイデバイス36のあらゆる区画で位相がシフトしない。そして偏光子37を通過して、撮像面13の各画素に図31に示す偏光方向の物体光が記録される。波長板光学媒質アレイデバイス36の波長板(1/4波長板39)の部分を通った参照光は位相が $-\pi/2$ シフトし、偏光子37を通過して図31に示す偏光方向の参照光が記録される。撮像面13で物体光と参照光との偏光方向が揃うため干渉し、また2枚分の干渉縞の情報をシングルショットで記録する。

30

## 【0187】

このように、光源31aは、垂直方向偏光成分と水平方向偏光成分とを有する直線偏光を出射する。そして、物体光を垂直方向偏光成分の光に変換し、参照光を水平方向偏光成分の光に変換する偏光ビームスプリッタPBSが設けられる。位相シフトアレイデバイス35は、水平偏光成分の光を、その進行方向に垂直な平面上において互いに位相が異なる2種類の参照光に分割する波長板光学媒質アレイデバイス36と、物体光の垂直方向に対して $-45$ 度傾斜した第3方向偏光成分と2種類の参照光の第3方向偏光成分と透過させる偏光子37とを有している。波長板光学媒質アレイデバイス36は、水平方向偏光成分の光を透過させる光学媒質38と、水平方向偏光成分の光を位相をシフトさせて透過させる1/4波長板39とを有している。

40

## 【0188】

(実施の形態5)

異なる距離での2枚の干渉縞による像再生デジタルホログラフィの実現方法を説明する。

## 【0189】

図32は、実施の形態5に係るデジタルホログラフィ装置1hの構成を示す模式図であ

50

る。位相板をアレイ状に配列したデバイスを用いて2枚の干渉縞を記録する方法を以下に示す。まず、光学系を図32に示す。光源48から出た光は、直後の偏光板49により垂直な偏光の成分のみが取り出される。この垂直偏光方向と1/4波長板45の高速軸46とが一致するように、1/4波長板45を、CCDカメラ3の撮像面13の直前に貼り付けられた位相板アレイ42の領域43に配置する。位相板アレイ42は前述の1/4波長板45と、位相を変化させないガラスを設けた領域44とが1画素ごとに格子状に交互に配置されており、位相の異なる2枚の干渉縞情報を一度に記録することができる。

【0190】

位相板アレイ42の実現方法として2例を挙げて、その作製方法をのべる。

【0191】

[デバイスの実現方法1：1/4波長板をフォトニック結晶で実現する方法]

(1) ガラスなどの等方性媒質に対して、フォトレジストを塗布する。  
 (2) フォトマスクを用いて露光をおこなう。フォトマスクとしては、田パターンのうち右上と左下の部分が光を通し他の部分が光を通さない、あるいは右上と左下の部分が光を通さず他の部分を通すものが周期的に並んだものを用いる。田の各口部分は撮像素子と同じ大きさを持つ。

(3) エッチングを行い、凹凸分布を作製する。

(4) 凹の部分には、フォトニック結晶を作製して1/4波長板の機能を形成する。

【0192】

[デバイスの実現方法2：1/4波長板を微細周期構造で実現する方法]

上記(1)～(3)を行う。

(4) 凹の部分には、光源として使用する光の波長程度以下の微細周期構造を構造的複屈折により1/4波長板の機能を形成する。

【0193】

図33は、実施の形態5に係る他のデジタルホログラフィ装置1iの構成を示す模式図である。前述した構成要素と同一の構成要素には同一の参照符号を付している。従って、これらの構成要素の詳細な説明は省略する。

【0194】

偏光子をアレイ状に配列したデバイスを用いて2枚の干渉縞を記録する方法を以下に示す。まず、光学系を図33に示す。光源ユニット31bは、光源48と偏光板49とを備えている。光源48から出た光は、直後の偏光板49により垂直な偏光の成分のみが取り出される。この偏光方向に対して-45度傾いた偏光子51aと、+45度傾いた偏光子51bが交互に配置された偏光子アレイデバイス50を撮像面13の直前に貼り付ける。偏光子アレイデバイス50の直後には、撮像面13と同等の大きさを持つ1/4波長板52を配置する。1/4波長板52の高速軸53は偏光子51aが+45度傾いた方向に一致しており、低速軸54は-45度傾いた方向に一致している。このため、干渉縞の位相が遅れた情報と、位相遅れの無い情報とを同時に記録することができる。

【0195】

(実施の形態6)

図34は、実施の形態6に係るデジタルホログラフィ装置1jの構成を示す模式図である。図35は、デジタルホログラフィ装置1jに設けられた波長選択アレイデバイス57と偏光子アレイ59との構成を説明するための模式的斜視図である。図36は、デジタルホログラフィ装置1jにおける偏光状態の変化を説明するための図である。前述した構成要素と同一の構成要素には同一の参照符号を付している。従って、これらの構成要素の詳細な説明は省略する。

【0196】

図34は、2波長を用いて並列位相シフトデジタルホログラフィを実現する光学系を示しており、図35は、偏光子アレイ59・波長選択アレイデバイス57と一体に構成した位相シフト波長選択素子56を設けたCCDカメラ3の撮像面13の構造を示しており、図36は、各時点での偏光状態を示している。

10

20

30

40

50

## 【 0 1 9 7 】

光源 5 5 a ( L A S E R 1 ) から出る波長 1 の光及び光源 5 5 b ( L A S E R 2 ) から出る波長 2 の光の偏光状態は垂直偏光である。光源 5 5 a から出た光は 1 / 4 波長板 Q W P 1 を通りハーフミラー H M で反射され、次のハーフミラー H M で参照光と物体光とに分けられる。光源 5 5 b から出た光は 1 / 4 波長板 Q W P 2 を通りミラー M で反射され、ハーフミラー H M を透過した後、次のハーフミラー H M で参照光と物体光に分けられる。光は 1 / 4 波長板の低速軸 6 4 を透過するとその低速軸 6 4 と平行な偏光の位相が  $\pi/2$  遅れ、高速軸 6 3 を透過した偏光の位相は変化しない。参照光はコリメートされ、ミラー M、ビームスプリッタ B S で反射し、一体型 C C D カメラ 3 に入る。

## 【 0 1 9 8 】

物体光は偏光板 P 1 で波長板の高速軸 6 3 を透過する偏光方向と同じ偏光のみが透過し、コリメートされ被写体 6 を透過する。その後、偏光板 P 2 で垂直偏光のみが透過し、ビームスプリッタ B S を透過し、一体型 C C D カメラ 3 に入る。

## 【 0 1 9 9 】

一体型 C C D カメラ 3 の撮像面 1 3 には、波長選択アレイデバイス 5 7 と、偏光子アレイ 5 9 とが貼り付けられる。物体光及び参照光は、波長選択アレイデバイス 5 7 で各波長に応じたフィルタを透過し、その後、物体光は偏光子アレイ 5 9 を波長板の低速軸 6 4 に平行な偏光と高速軸 6 3 に平行な偏光として透過し、それぞれの偏光方向と同じ偏光方向を持つ参照光と干渉する。そして、その干渉縞が撮像面 1 3 に記録され、その干渉強度を撮像素子 ( C C D カメラ 3 ) で取り込む。

## 【 0 2 0 0 】

波長選択アレイデバイス 5 7 は、光源 5 5 a からの第 1 波長光を透過させる波長領域 5 8 a と光源 5 5 b からの第 2 波長光を透過させる波長領域 5 8 b とを配置している。偏光子アレイ 5 9 は、高速軸 6 3 に平行な偏光を透過させる高速軸透過領域 6 0 a と、低速軸 6 4 に平行な偏光を透過させる低速軸透過領域 6 0 b とを有している。

## 【 0 2 0 1 】

図 3 7 は、実施の形態 6 に係る他のデジタルホログラフィ装置 1 k の構成を示す模式図である。図 3 8 は、デジタルホログラフィ装置 1 k に設けられた波長選択アレイデバイス 6 1 と偏光子アレイ 5 9 との構成を説明するための模式的斜視図である。図 3 9 は、デジタルホログラフィ装置 1 k における偏光状態の変化を説明するための図である。前述した構成要素と同一の構成要素には同一の参照符号を付している。従って、これらの構成要素の詳細な説明は省略する。

## 【 0 2 0 2 】

図 3 7 は 3 波長を用いて並列位相シフトデジタルホログラフィを実現する光学系を示している。図 3 8 は、偏光子アレイ 5 9 ・波長選択アレイデバイス 6 1 と一体に構成された C C D カメラ 3 の撮像面 1 3 の構造を示している。また、各時点での偏光状態を図 3 9 に示している。2 波長の場合と異なる点は、光源 5 5 c ( L A S E R 3 ) 及び 1 / 4 波長板 Q W P 3 の追加、波長選択アレイデバイスの変更 ( 波長 3 に対応するフィルタの追加 ) である。

## 【 0 2 0 3 】

光源 5 5 a ( L A S E R 1 ) から出る波長 1 の光及び光源 5 5 b ( L A S E R 2 ) から出る波長 2 の光及び光源 5 5 c ( L A S E R 3 ) から出る波長 3 の光の偏光状態は垂直偏光である。光源 5 5 a から出た光は 1 / 4 波長板 Q W P 1 を通りハーフミラー H M で反射され、次のハーフミラー H M で参照光と物体光に分けられる。光源 5 5 b から出た光は 1 / 4 波長板 Q W P 2 を通りハーフミラー H M で反射され、ハーフミラー H M を透過した後、次のハーフミラーで参照光と物体光に分けられる。光源 5 5 c から出た光は 1 / 4 波長板 Q W P 3 を通りミラー M で反射され、ハーフミラー H M を透過し、さらにもう一つハーフミラー H M を透過した後、次のハーフミラー H M で参照光と物体光に分けられる。これらの光は波長板の低速軸 6 4 を透過するとその軸と平行な偏光の位相が  $\pi/2$  遅れ、高速軸 6 3 を透過した偏光の位相は変化しない。参照光はコリメートされ、ミラー M、

10

20

30

40

50

ビームスプリッタBSで反射し、一体型CCDカメラ3に入る。

【0204】

物体光は偏光板P1で波長板の高速軸63を透過する偏光方向と同じ偏光のみが透過し、コリメートされ被写体6を透過する。その後、偏光板P2で垂直偏光のみが透過し、ビームスプリッタBSを透過し、一体型CCDカメラ3に入る。

【0205】

一体型CCDカメラ3には、波長選択アレイデバイス61、偏光子アレイ59が貼り付けられる。物体光及び参照光は、波長選択アレイデバイス61で各波長に応じたフィルタを透過し、その後、物体光は偏光子アレイ59で波長板の低速軸64に平行な偏光と高速軸63に平行な偏光として透過し、それぞれの偏光方向と同じ偏光方向を持つ参照光と干渉する。そして、その干渉強度を撮像素子(CCDカメラ3)で取り込む。

10

【0206】

図40は、実施の形態6に係るさらに他のデジタルホログラフィ装置11の構成を示す模式図である。図41は、デジタルホログラフィ装置11に設けられた位相シフト波長選択素子66の構成を説明するための模式的斜視図である。図42は、デジタルホログラフィ装置11における偏光状態の変化を説明するための図である。前述した構成要素と同一の構成要素には同一の参照符号を付している。従って、これらの構成要素の詳細な説明は省略する。

【0207】

図40は、2波長を用いて並列位相シフトデジタルホログラフィを実現する光学系を示している。図41は、位相シフトアレイデバイス69・波長選択アレイデバイス67・偏光子71が一体になったCCDカメラ3の構造を示している。また、図42は、各時点での偏光状態を示している。

20

【0208】

偏光ビームスプリッタPBSで反射する光は垂直偏光となり、透過する光は水平偏光となる。光源65aから出る波長1の光及び光源65bから出る波長2の光は垂直方向から-45度傾いている偏光である。光源65aから出た光はハーフミラーHMで反射され、次のハーフミラーHMで参照光と物体光に分けられる。光源65bから出た光はミラーMで反射され、ハーフミラーHMを透過した後、次のハーフミラーHMで参照光と物体光に分けられる。参照光はコリメートされ、ミラーM、偏光ビームスプリッタPBSで反

30

【0209】

一体型CCDカメラ3は、波長選択フィルタアレイ、偏光子アレイ、撮像素子で構成される。物体光及び参照光は、波長選択アレイデバイス67で各波長に応じたフィルタを透過し、位相シフトアレイデバイス69で物体光は水平偏光のため位相遅れなしに透過し、参照光は垂直偏光のため1に対する1/4波長板70a、2に対する1/4波長板70bの配置された画素を透過する際、位相が/2遅れる。その後、偏光子71を透過するとき物体光と参照光が干渉する。そして、その干渉強度を撮像素子(CCDカメラ3)で取り込む。

40

【0210】

図43は、実施の形態6に係るさらにもう1つの他のデジタルホログラフィ装置1mの構成を示す模式図である。図44は、デジタルホログラフィ装置1mに設けられた位相シフト波長選択素子74の構成を説明するための模式的斜視図である。図45は、デジタルホログラフィ装置1mにおける偏光状態の変化を説明するための図である。

【0211】

3波長を用いて並列位相シフトデジタルホログラフィを実現する光学系を図43に示す。位相シフトアレイデバイス77・波長選択アレイデバイス75・偏光子71の一体型CCDカメラ3の構造を図44に示す。また、各時点での偏光状態を図45に示す。2波長

50



の場合と異なる点は、光源 65c (LASER 3) の追加、波長選択アレイデバイス 75 の変更 (波長 3 に対応するフィルタの追加)、位相シフトアレイデバイス 77 の変更 (3 に対する 1/4 波長板 QWP 3 の追加) である。

【0212】

偏光ビームスプリッタ PBS で反射する光は垂直偏光となり、透過する光は水平偏光となる。光源 65a (LASER 1) から出る波長 1 の光及び光源 65b (LASER 2) から出る波長 2 の光及び光源 65c (LASER 3) から出る波長 3 の光は垂直方向から -45 度傾いている偏光である。光源 65a (LASER 1) から出た光はハーフミラー HM で反射され、次のハーフミラー HM で参照光と物体光に分けられる。光源 65b (LASER 2) から出た光はハーフミラー HM で反射され、ハーフミラー HM を透過した後、次のハーフミラー HM で参照光と物体光に分けられる。光源 65c (LASER 3) から出た光はミラー M で反射され、ハーフミラー HM を透過し、さらにもう一つハーフミラー HM を透過した後、次のハーフミラー HM で参照光と物体光に分けられる。参照光はコリメートされ、ミラー M、偏光ビームスプリッタ PBS で反射し、垂直偏光となり一体型 CCD カメラ 3 に入る。物体光はコリメートされ物体を透過し、さらに偏光ビームスプリッタ PBS を透過し、水平偏光となり一体型 CCD カメラ 3 に入る。

10

【0213】

一体型 CCD カメラ 3 には、波長選択アレイデバイス 75、偏光子 71、位相シフトアレイデバイス 77 が貼り付けられる。物体光及び参照光は、波長選択アレイデバイス 75 で各波長に応じたフィルタを透過し、位相シフトアレイデバイス 77 で物体光は水平偏光のため位相遅れなしに透過し、参照光は垂直偏光のため 1 に対する 1/4 波長板、2 に対する 1/4 波長板、3 に対する 1/4 波長板の配置された画素を透過する際、位相が /2 遅れる。その後、偏光子 71 を透過するとき物体光と参照光が干渉する。そして、その干渉強度を CCD カメラ 3 で取り込む。

20

【0214】

なお、本実施の形態は、分光計測に適用することもできる。複数波長を同時に使用することにより、瞬時 3 次元構造かつ分光画像計測、および 3 次元動画像かつ分光画像計測が可能になる。波長の選び方は任意である。

【0215】

例えば 3 波長 1、2、3 を同時に使用すると、被写体の 1、2、3 のそれぞれの波長に対する 3 次元形状とその波長の反射率あるいは吸収率の分布が同時に計測できる。X 線、ガンマ線、紫外光、可視光、赤外光、テラヘルツ光、マイクロ波、ミリ波、電波など種々の波動を利用することが可能である。この方法では、被写体の 3 次元構造と機能の分布の瞬時計測が可能となる。

30

【0216】

(実施の形態 7)

実施の形態 7 では、波長板アレイデバイス 80 と偏光子 83 とを備えたデジタルホログラフィ装置を説明する。

図 46 は、実施の形態 7 に係るデジタルホログラフィ装置 1n の構成を示す模式図である。前述した構成要素と同一の構成要素には、同一の参照符号を付している。従って、これらの構成要素の詳細な説明は省略する。デジタルホログラフィ装置 1n は、光源ユニット 48 を備えている。光源ユニット 48 は、垂直偏光成分と水平偏光成分とを有するレーザー光をレンズを介して偏光ビームスプリッタ PBS 1 に向かって照射する。垂直偏光成分は、偏光ビームスプリッタ PBS 1 によって反射され、ミラー M および他のミラー M により反射されて被写体 6 に照射され、被写体 6 によって反射されて物体光 (散乱光) になり、偏光ビームスプリッタ PBS 2 により反射されて垂直偏光で CCD カメラ 3 に入射する。水平偏光成分は、偏光ビームスプリッタ PBS 1 を透過し、さらに他のミラー M によって反射されて参照光として偏光ビームスプリッタ PBS 2 を透過して水平偏光で CCD カメラ 3 に入射する。

40

【0217】

50

図47は、デジタルホログラフィ装置1nに設けられた波長板アレイデバイス80と偏光子83とCCDカメラ3との構成を示す模式図である。CCDカメラ3の撮像面13には、偏光子83と波長板アレイデバイス80とがこの順番に貼り付けられている。

【0218】

図48は、波長板アレイデバイス80と偏光子83との構成を示す模式図である。波長板アレイデバイス80は、4分の1波長板81aと2分の1波長板81bとを交互に市松模様配置して構成されている。各波長板の1個が、撮像素子の1画素に対応するように、各波長板の寸法が設定されている。4分の1波長板81aの高速軸の方向と、2分の1波長板81bの高速軸の方向とは同一であり、4分の1波長板81aの低速軸の方向と、2分の1波長板81bの低速軸の方向とは同一である。図48に示す例では、高速軸が垂直方向に向いており、低速軸が水平方向に向いている例を示している。偏光子83の偏光方向は、垂直方向から角度傾いている。角度は、0度、90度、180度、および270度以外であればよい。

【0219】

CCDカメラ3の撮像面には、1/4波長板81aを透過した物体光及び参照光とが干渉した第1干渉縞と、1/2波長板81bを透過した物体光及び参照光とが干渉した第2干渉縞とが記録される。

図49は、実施の形態7に係る他のデジタルホログラフィ装置1oの構成を示す模式図である。前述した構成要素と同一の構成要素には、同一の参照符号を付している。従って、これらの構成要素の詳細な説明は省略する。デジタルホログラフィ装置1oは、被写体から異なる2つの距離における2枚の干渉縞画像を単一露光で記録するデジタルホログラフィの計測アルゴリズムを用いるときの光学系の実現例であり、光源ユニット48を備えている。光源ユニット48は、水平偏光成分を有するレーザ光をレンズを介してビームスプリッタBS1に向かって照射する。

ビームスプリッタBS1を透過したレーザ光は、ミラーMにより反射されて被写体6を透過し、物体光(散乱光)となって、ビームスプリッタBS2により反射される。

ビームスプリッタBS1により反射されたレーザ光は、他のミラーMによって反射され、参照光としてビームスプリッタBS2を透過する。

物体光と参照光との干渉光は、偏光板82を透過する。偏光板82は、水平偏光のみを通すように設定する。干渉光は、波長板アレイデバイス80および偏光子83を透過してCCDカメラ3に到達する。波長板アレイデバイス80および偏光子83を透過することによって2種類のホログラムを同時に記録できる。

【0220】

実施の形態7に示す構成によれば、並列位相シフトデジタルホログラフィと、被写体から異なる2つの距離における2枚の干渉縞画像を単一露光で記録するデジタルホログラフィとの双方の計測アルゴリズムを適用できるカメラができるので、計測対象に応じてより適したシステムにより計測することができる。

【0221】

また、光エネルギーを有効に利用したコンパクトなデジタルホログラフィ装置を得ることができ、顕微鏡等の広い用途に適用することができる。

【0222】

(実施の形態8)

図50は、実施の形態8に係るデジタルホログラフィ装置1pの構成を示す模式図である。前述した構成要素と同一の構成要素には、同一の参照符号を付している。従って、これらの構成要素の詳細な説明は省略する。デジタルホログラフィ装置1pは、被写体から異なる2つの距離における2枚の干渉縞画像を単一露光で記録するデジタルホログラフィの計測アルゴリズムを用いるときの光学系の実現例であり、光源ユニット48を備えている。光源ユニット48は、垂直偏光成分を有するレーザ光をレンズを介してビームスプリッタBS1に向かって照射する。

ビームスプリッタBS1を透過したレーザ光は、ミラーMにより反射されて被写体6を透

10

20

30

40

50

過し、物体光（散乱光）となって、ビームスプリッタBS2により反射される。

ビームスプリッタBS1により反射されたレーザー光は、他のミラーMによって反射され、参照光としてビームスプリッタBS2を透過する。

物体光と参照光との干渉光は、偏光板82を透過する。偏光板82は、垂直偏光のみを通すように設定する。干渉光は、1/4波長板アレイ84を透過してCCDカメラ3に到達する。1/4波長板アレイ84を透過することによって2種類のホログラムを同時に記録できる。

#### 【0223】

図51は、デジタルホログラフィ装置1pに設けられた1/4波長板アレイ84とCCDカメラ3との構成を示す模式図である。CCDカメラ3の撮像面には、1/4波長板アレイ84が貼り付けられている。

10

#### 【0224】

図52は、1/4波長板アレイ84の構成を示す模式図である。1/4波長板アレイ84は、互いに直交する第1高速軸86aおよび第1低速軸86bを有する第1波長板素子85と、第1高速軸86aに平行な第2低速軸88bおよび第1低速軸86bに平行な第2高速軸88aを有する第2波長板素子87とを交互に配置している。このように、1/4波長板アレイ84では、隣り合う画素で高速軸と低速軸とが直交する。第1波長板素子85と第2波長板素子87とは、同一の波長板の向きを90度異ならせて配列することにより構成することができる。第1波長板素子85の寸法は、撮像素子の1画素に対応するように設定することができる。

20

#### 【0225】

ここで、高速軸とは、波長板において、入射光が位相遅延せず、透過する軸をいう。低速軸とは、高速軸に直交し、その入射光が位相遅延し、透過する軸をいう。具体例として、1/4波長板の場合、低速軸を透過した光の位相は、高速軸を透過した光の位相に対して $\pi/2$ ラジアン（90度）遅延する。

#### 【0226】

CCDカメラ3の撮像面には、第1波長板素子85を透過した物体光及び参照光とが干渉した第1干渉縞と、第2波長板素子87を透過した物体光及び参照光とが干渉した第2干渉縞とが記録される。

#### 【0227】

実施の形態8に用いられるアレイデバイスは、製作がより容易である。そのため、アレイデバイスの作製精度がより高く、計測精度の向上が期待できる。

30

#### 【0228】

図50の実施形態において偏光板82は、水平偏光のみを通すように設定し、さらに水平偏光成分を有するレーザー光を用い、他の構成は同一の構成の装置でも実施可能である。

#### 【0229】

実施の形態8では、垂直偏光成分を有するレーザー光を使用する例を示したが、本発明はこれに限定されず、水平偏光を有するレーザー光を使用しても本発明を実現することができる。

#### 【0230】

（実施の形態9）

図53は、実施の形態9に係るデジタルホログラフィ装置1qの構成を示す模式図である。前述した構成要素と同一の構成要素には、同一の参照符号を付している。従って、これらの構成要素の詳細な説明は省略する。デジタルホログラフィ装置1qは、光源ユニット48を備えている。光源ユニット48は、垂直偏光成分を有するレーザー光をレンズを介してビームスプリッタBS1に向かって照射する。ビームスプリッタBS1を透過したレーザー光は、2枚のミラーMにより反射されて、被写体6に照射され、被写体6によって反射されて物体光（散乱光）になる。物体からの散乱光は、偏光板82を通過して垂直偏光となった後、ビームスプリッタBS2により反射される。ビームスプリッタBS1により反射された光は、参照光として他のミラーMで反射され、そのままビームスプリッタBS2を

40

50

透過する。その後、物体光と参照光との干渉光は、1/4波長板91を通る。1/4波長板91の高速軸と低速軸とは、偏光子アレイデバイス89の偏光を通す方向と同じになるように設定する。干渉光は、偏光子アレイデバイス89を通過してCCDカメラ3に到達し、1/4波長板91と偏光子アレイデバイス89とにより2種類のホログラムを同時に記録できる。

図54はデジタルホログラフィ装置1qに設けられた偏光子アレイデバイス89とCCDカメラ3との構成を示す模式図であり、図55は偏光子アレイデバイス89の構成を示す模式図である。

CCDカメラ3の撮像面には、偏光子アレイデバイス89とが貼り付けられている。偏光子アレイデバイス89には、第1偏光方向を有する第1偏光子90aと、第1偏光方向に直交する第2偏光方向を有する第2偏光子90bとが交互に配置されている。図55に示す例では、第1偏光子90aの第1偏光方向は、垂直方向に対して45度傾いた方向であり、第2偏光子90bの第2偏光方向は、垂直方向に対して-45度傾いた方向である。このように、偏光子アレイデバイス89では、隣り合う画素で透過する偏光が直交する。第1偏光子90aの寸法は、第1偏光子90aが撮像素子の1画素に対応するように設定されている。第2偏光子90bの寸法も、同様である。

CCDカメラ3の撮像面では、第1偏光子90aを透過した物体光及び参照光とが干渉した第1干渉縞と、第2偏光子90bを透過した物体光及び参照光とが干渉した第2干渉縞とが記録される。

実施の形態9によれば、偏光子アレイデバイス89の1枚構成であるので、実施の形態7の波長板アレイデバイス80および偏光子83の構成のように位置あわせが不要である。また、並列位相シフトデジタルホログラフィと被写体から異なる2つの距離における2枚の干渉縞画像を単一露光で記録するデジタルホログラフィの双方の計測アルゴリズムを適用できるカメラができるので、計測対象に応じてより適したシステムで計測できる。

#### 【0231】

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。

#### 【0232】

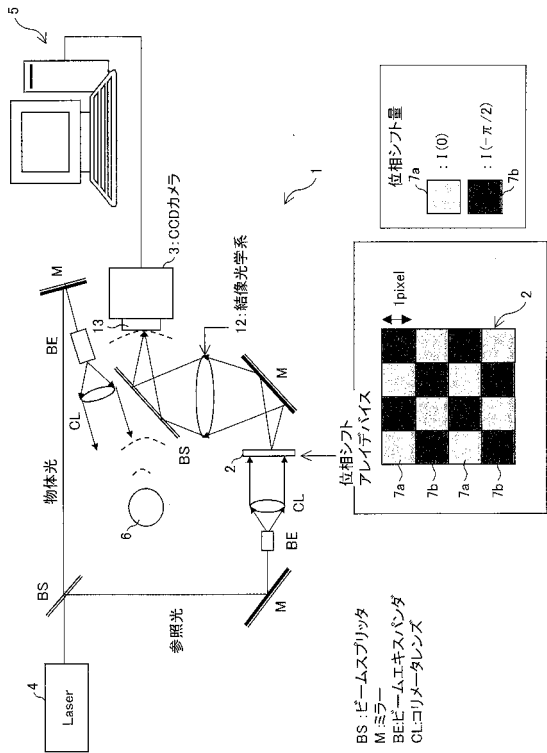
図53の実施形態において偏光板82を、水平偏光のみを通すように設定し、さらに水平偏光成分を有するレーザ光を用い、他の構成は同一の構成の装置でも実施可能である。実施の形態9では、垂直偏光成分を有するレーザ光を使用する例を示したが、本発明はこれに限定されず、水平偏光を有するレーザ光を使用しても本発明を実現することができる。

#### 【産業上の利用可能性】

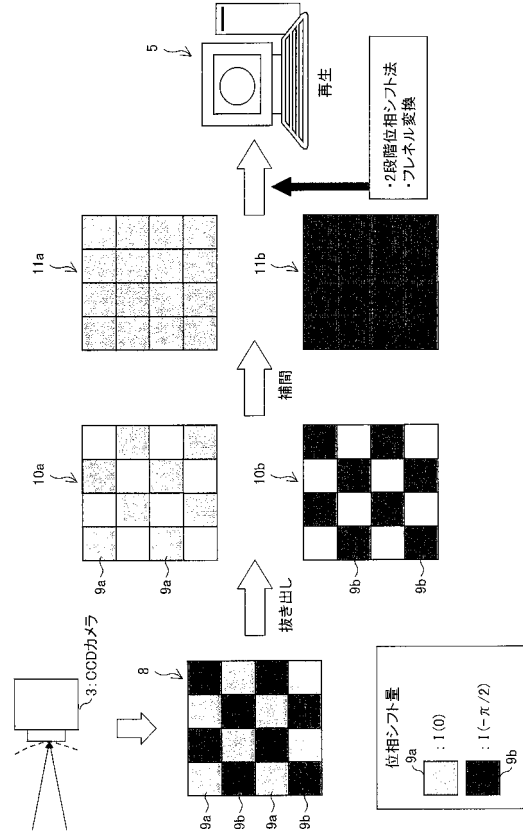
#### 【0233】

本発明は、物体光と参照光とが干渉した干渉縞に基づいて被写体の再生像を生成するデジタルホログラフィ装置に適用することができる。

【図1】



【図2】

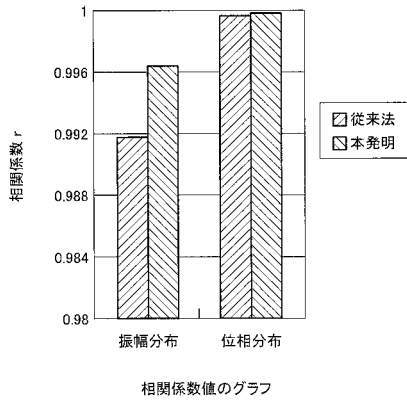


【図4】

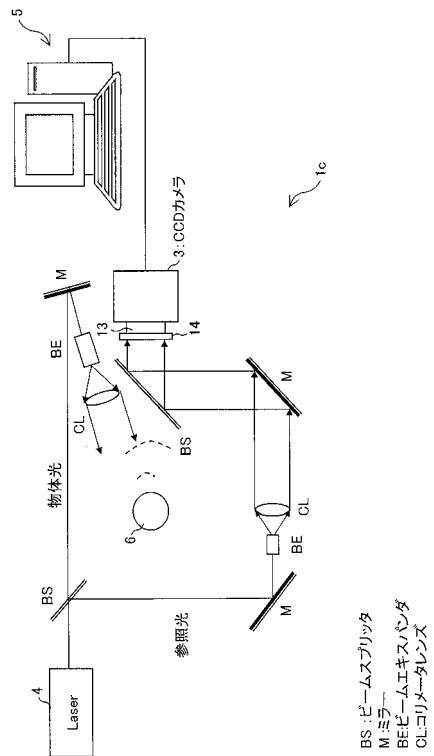
相関係数値

	振幅分布	位相分布
従来法	0.991722	0.999676
本発明	0.996347	0.999800

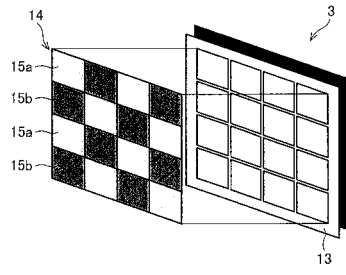
【図5】



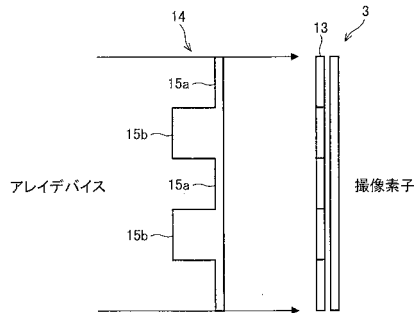
【図6】



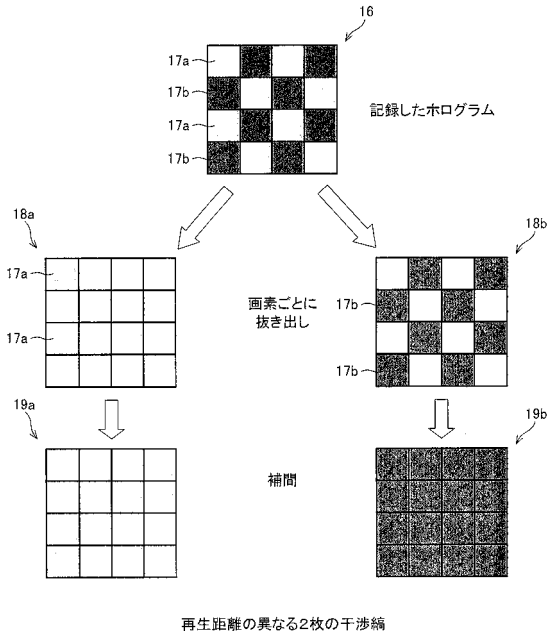
【図7】



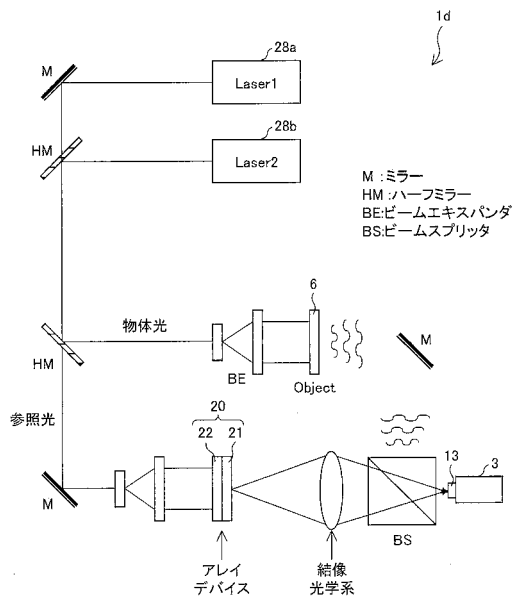
【図8】



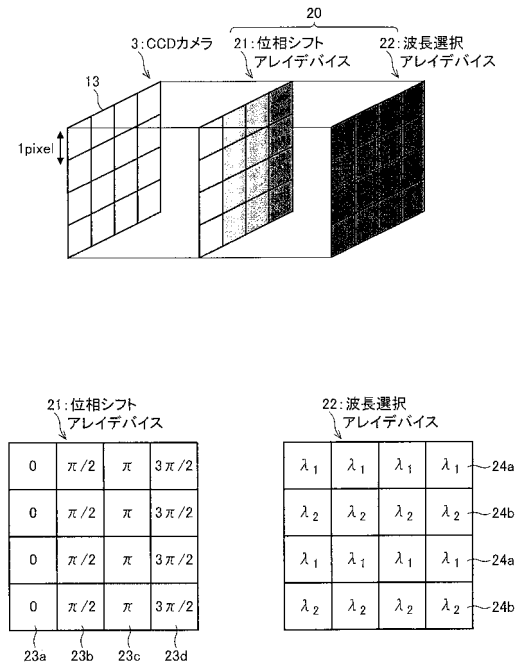
【図9】



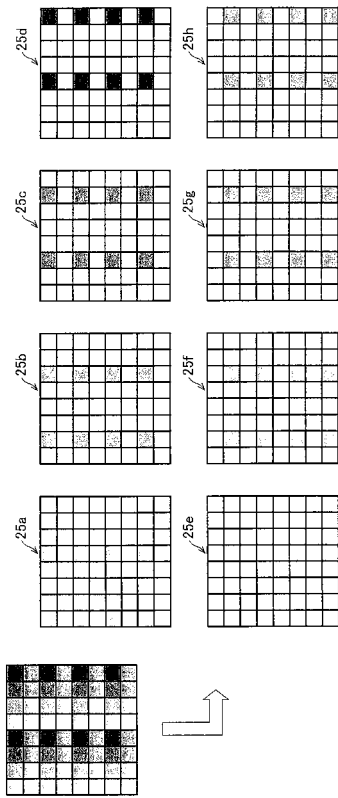
【図11】



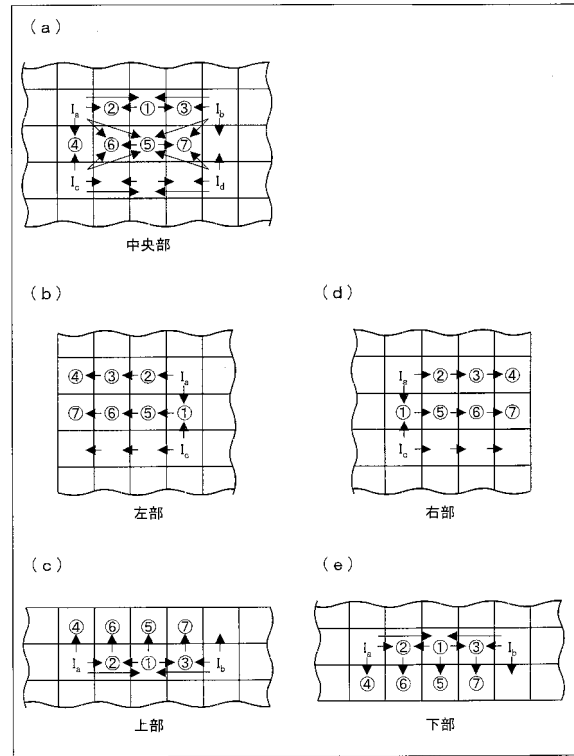
【図12】



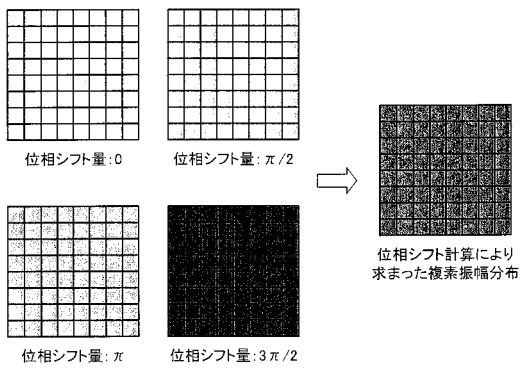
【図13】



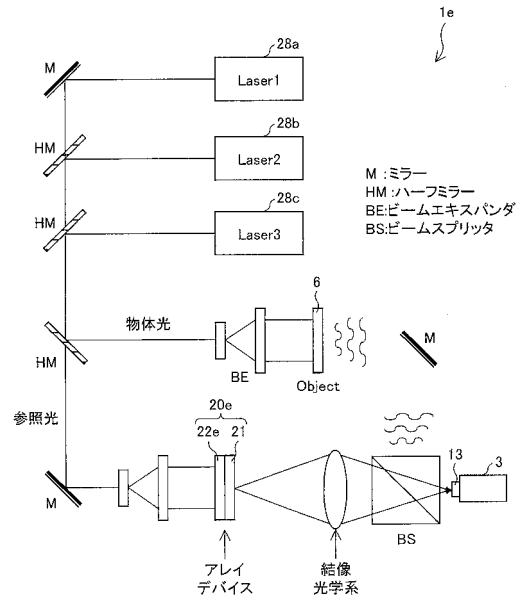
【図14】



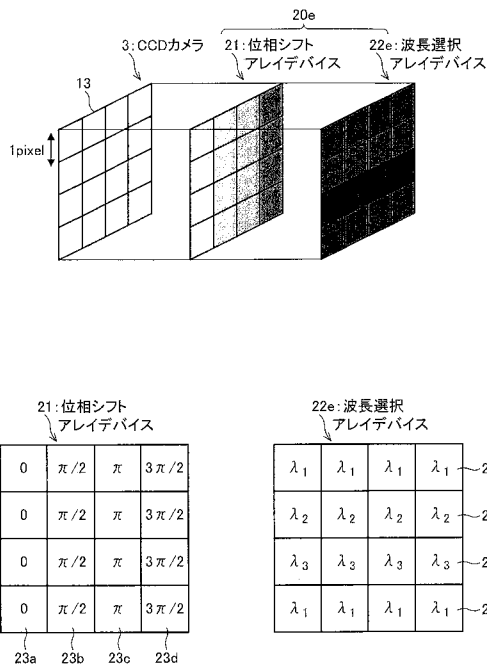
【図15】



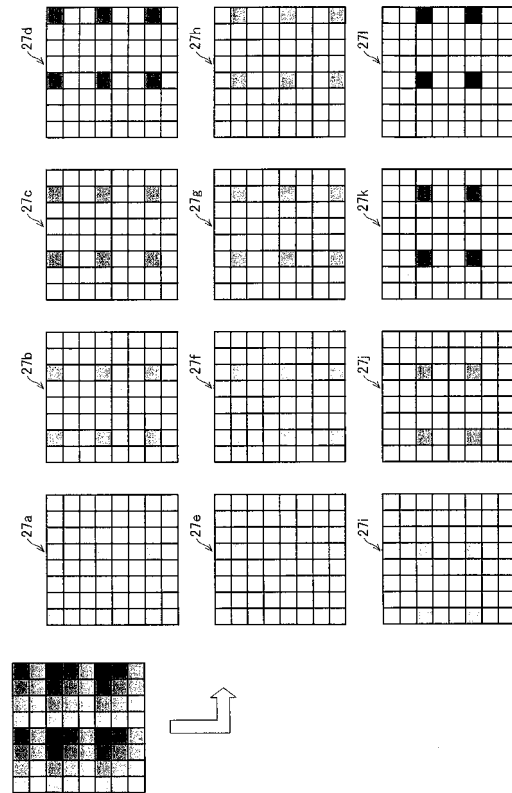
【図17】



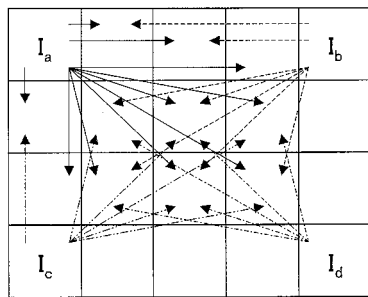
【図18】



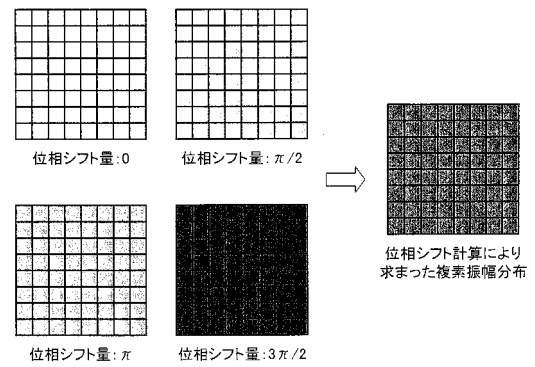
【図19】



【図20】

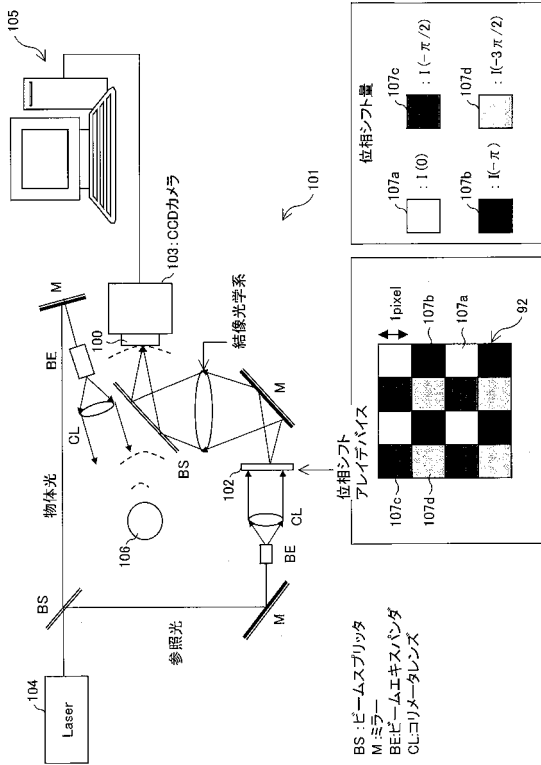


【図21】

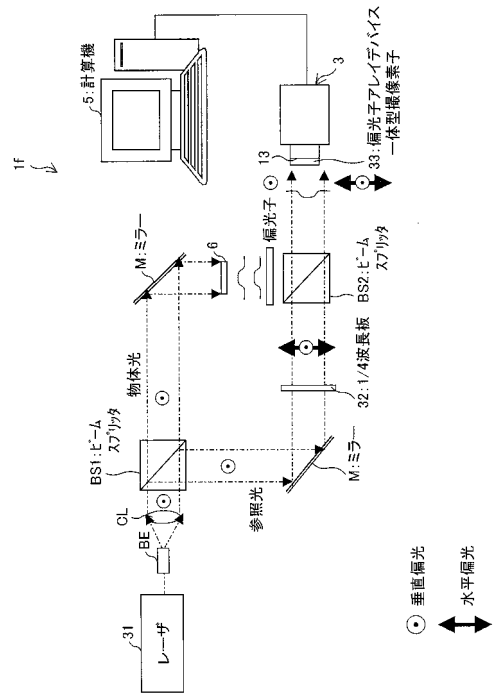




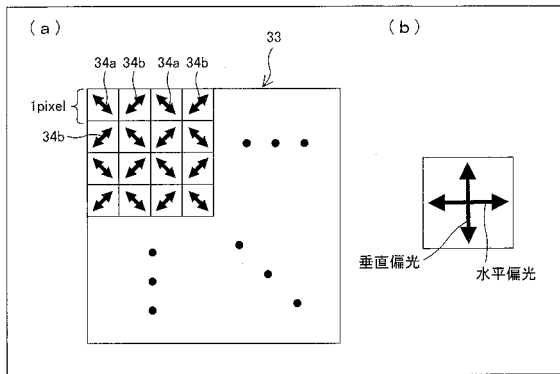
【図23】



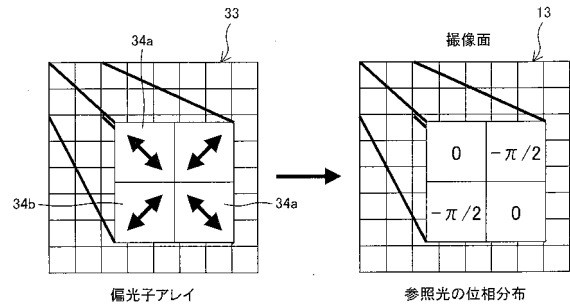
【図24】



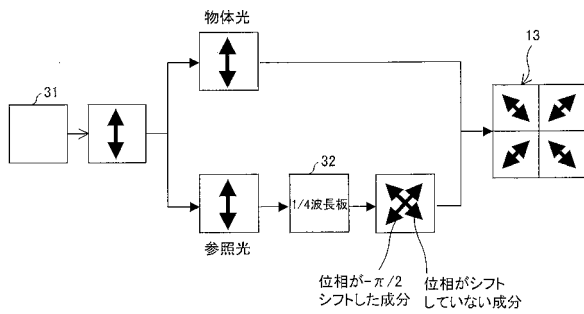
【図25】



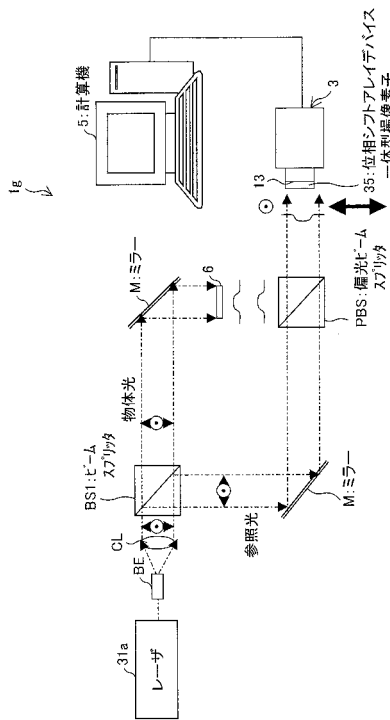
【図27】



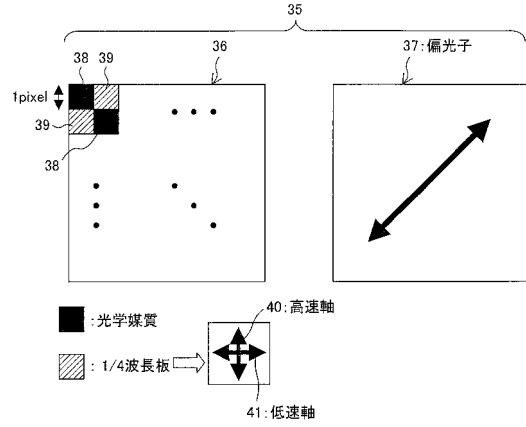
【図26】



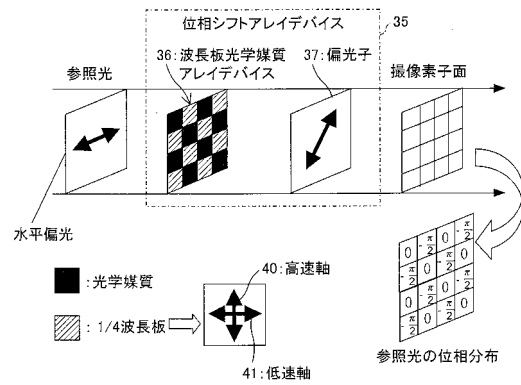
【図28】



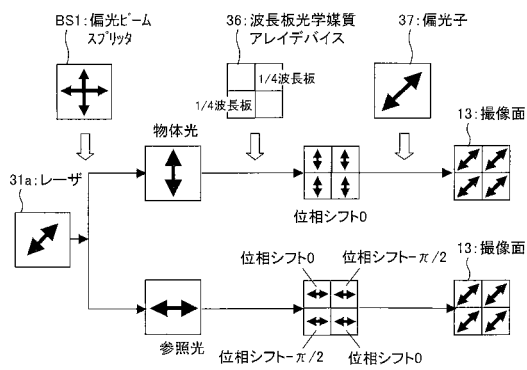
【図29】



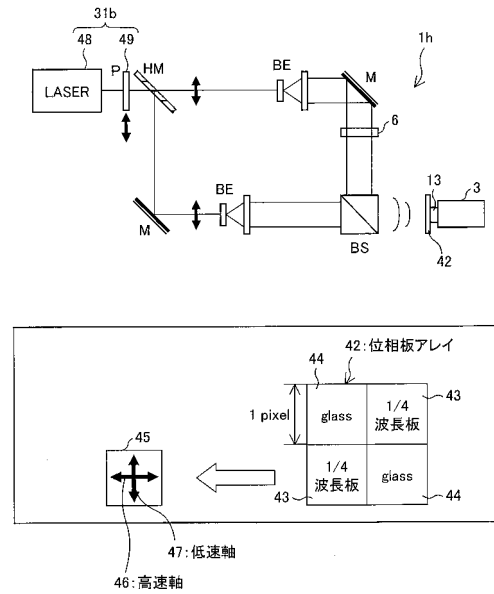
【図30】



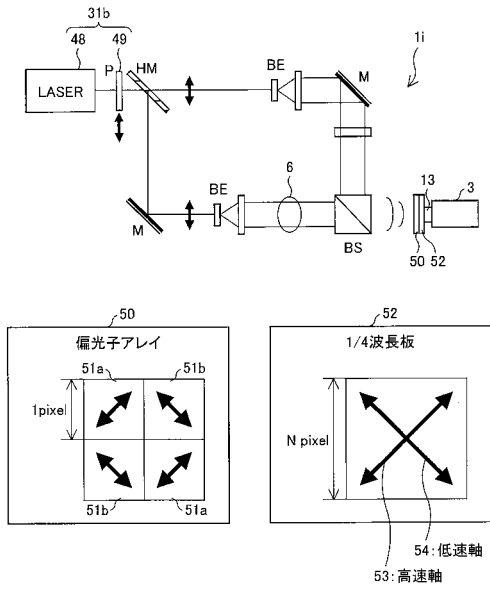
【図31】



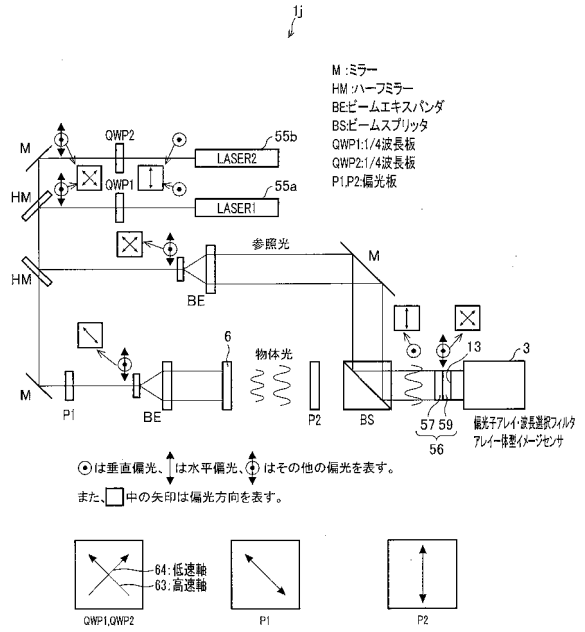
【図32】



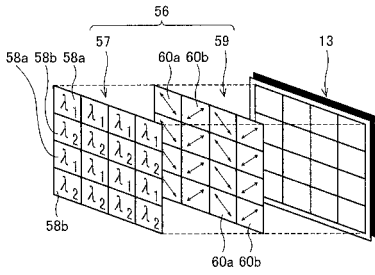
【図33】



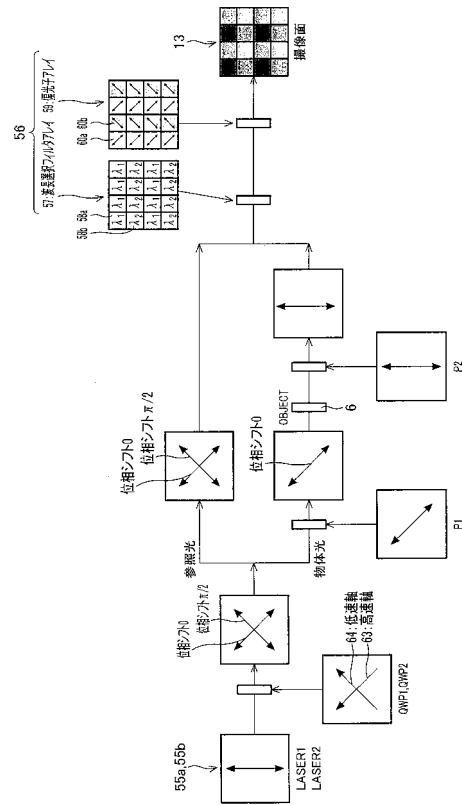
【図34】



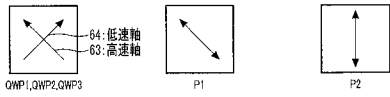
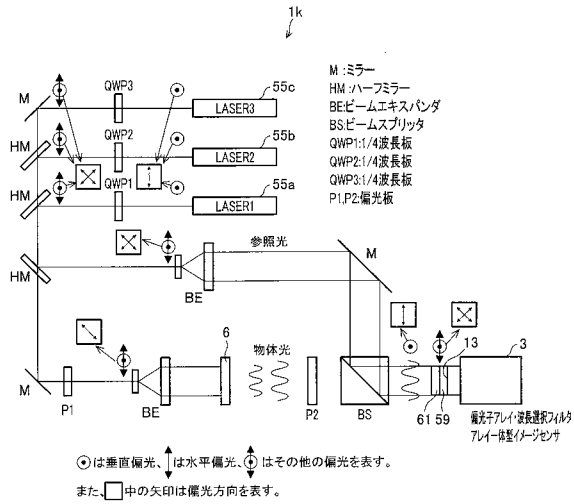
【図35】



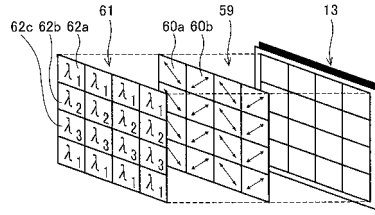
【図36】



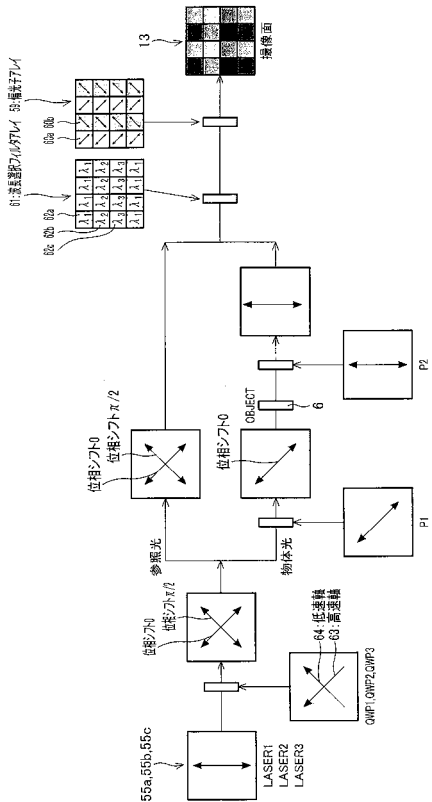
【図37】



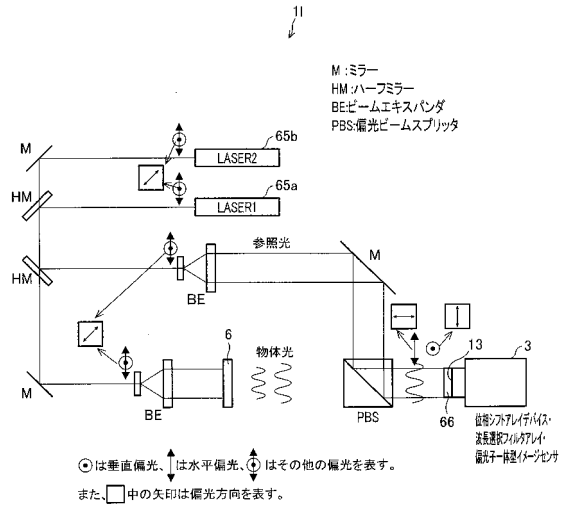
【図38】



【図39】

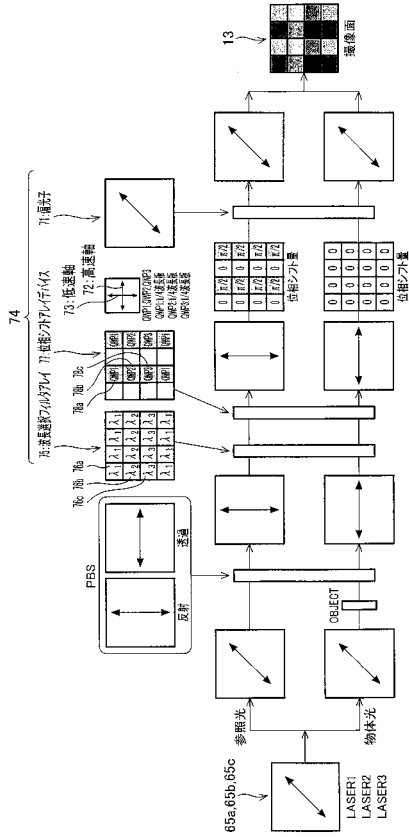


【図40】

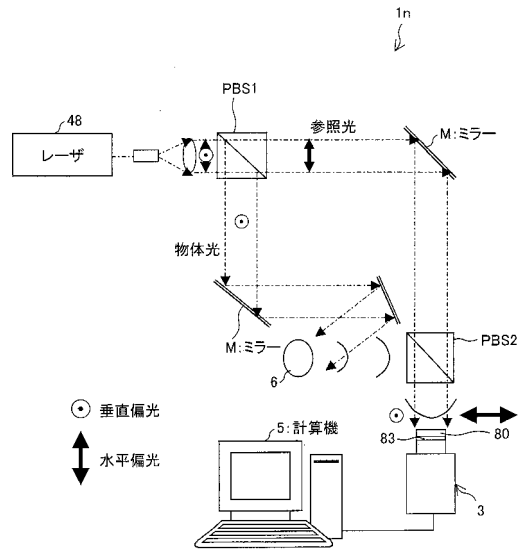




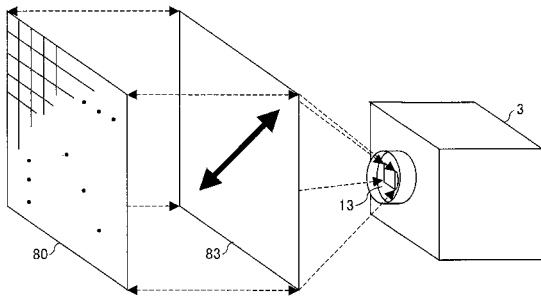
【図45】



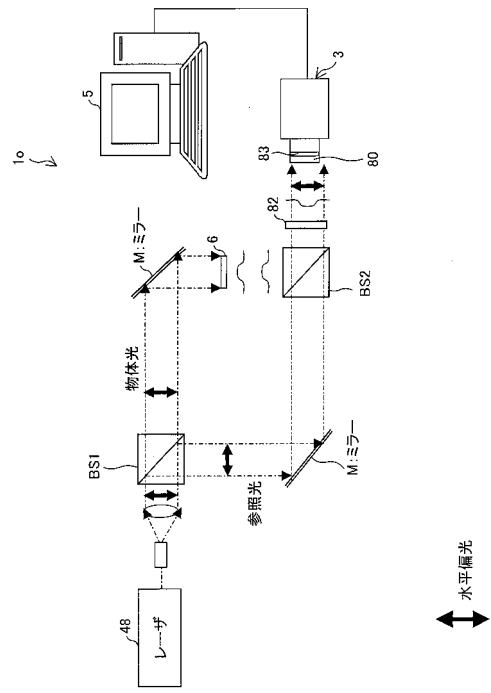
【図46】



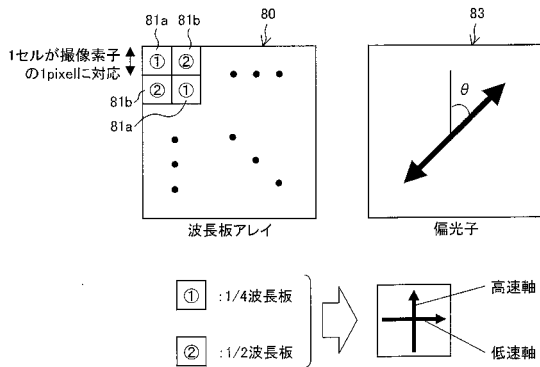
【図47】



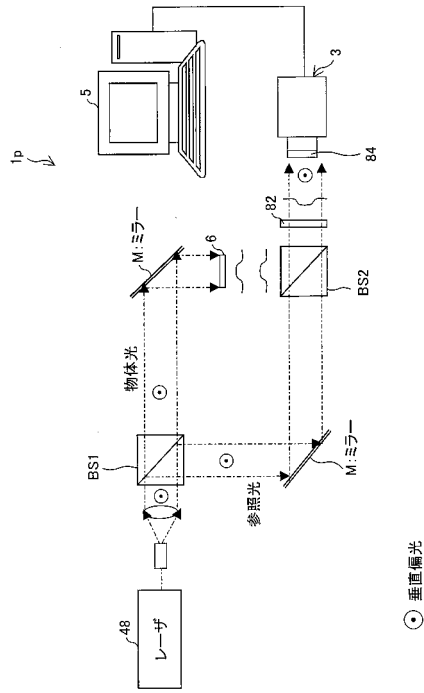
【図49】



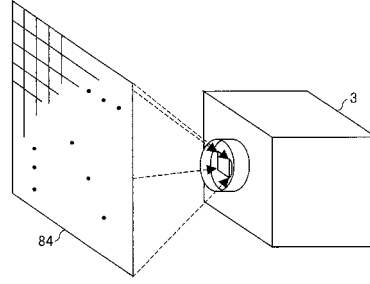
【図48】



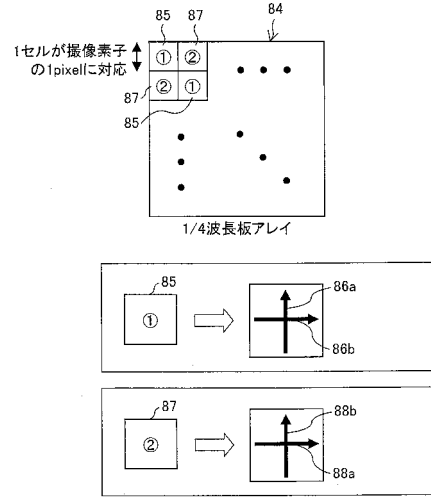
【図50】



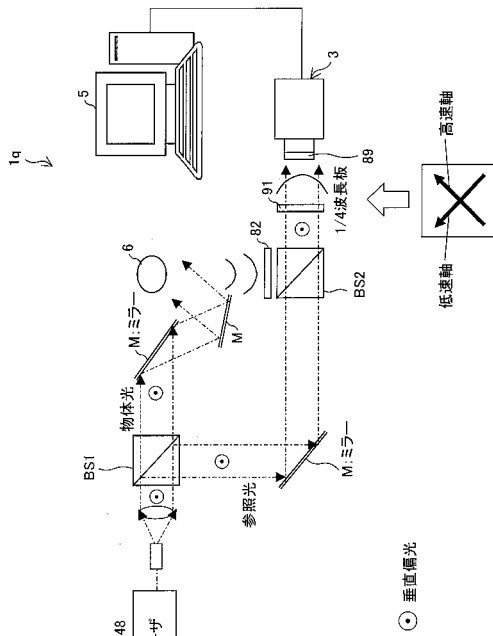
【図51】



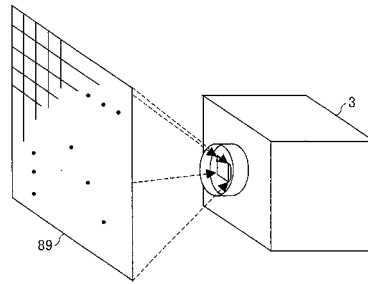
【図52】



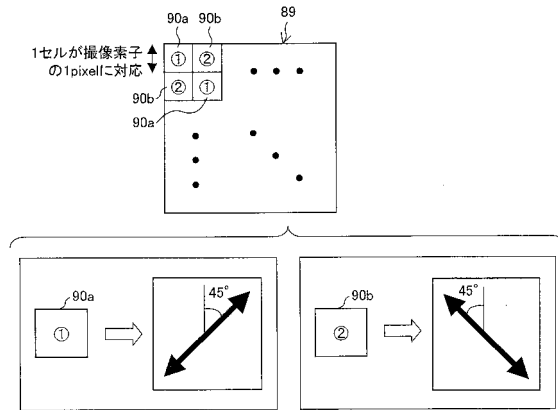
【図53】



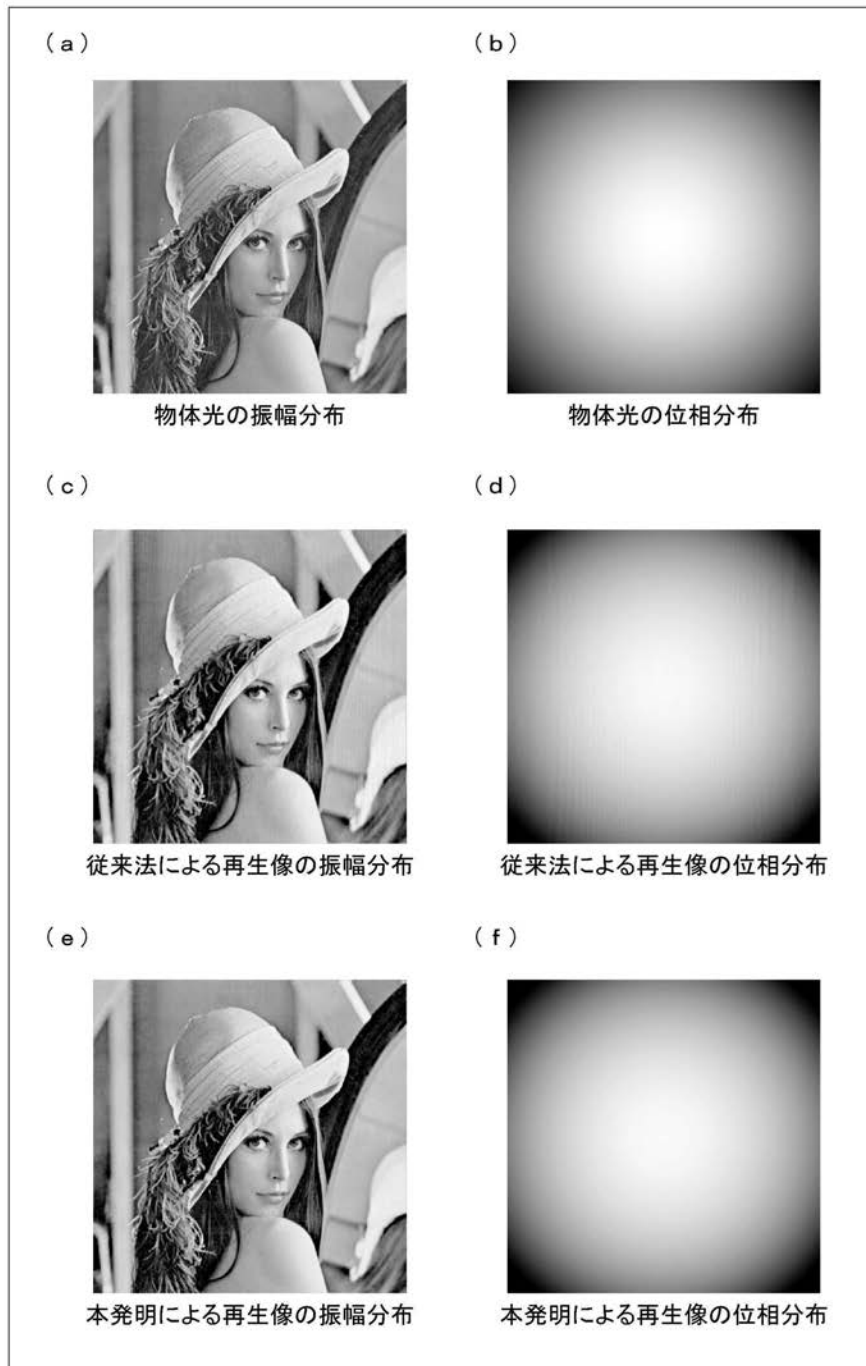
【図54】



【図55】

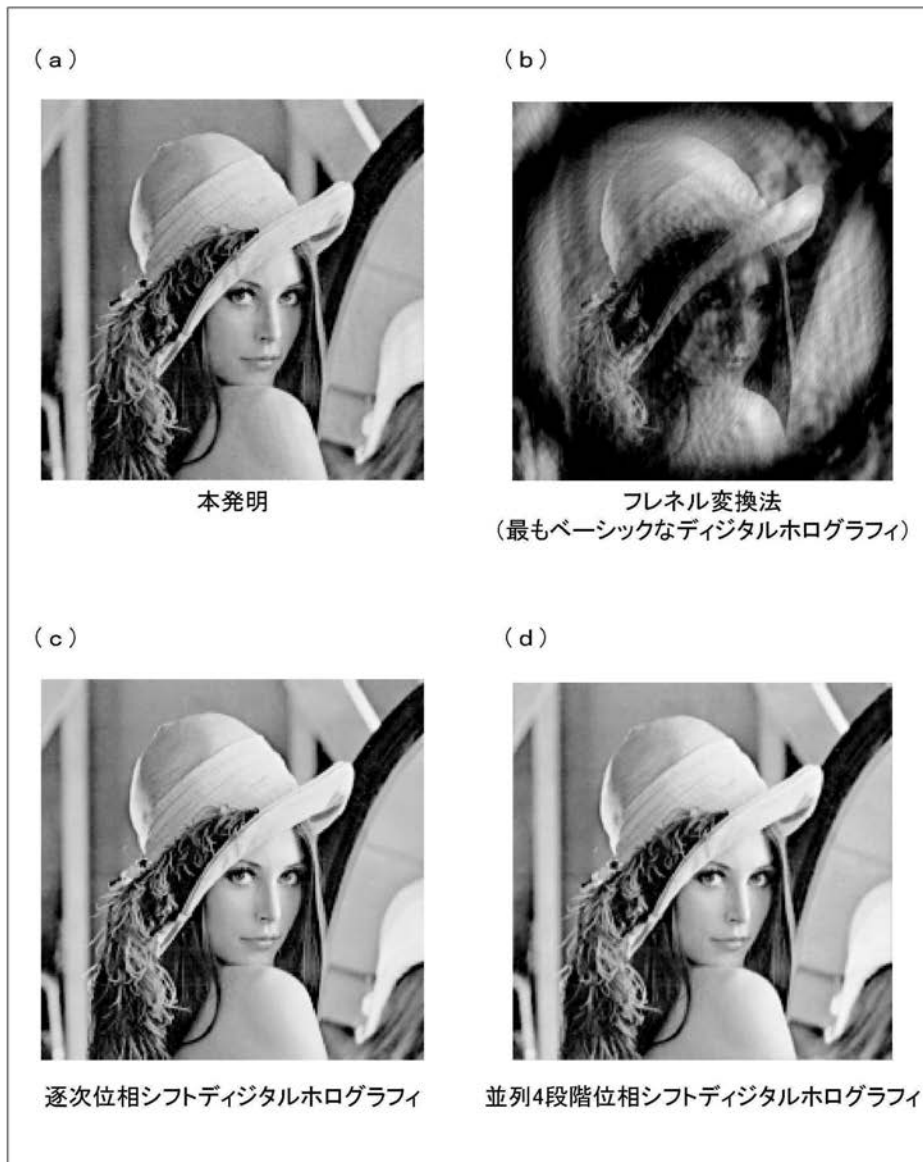


【図3】

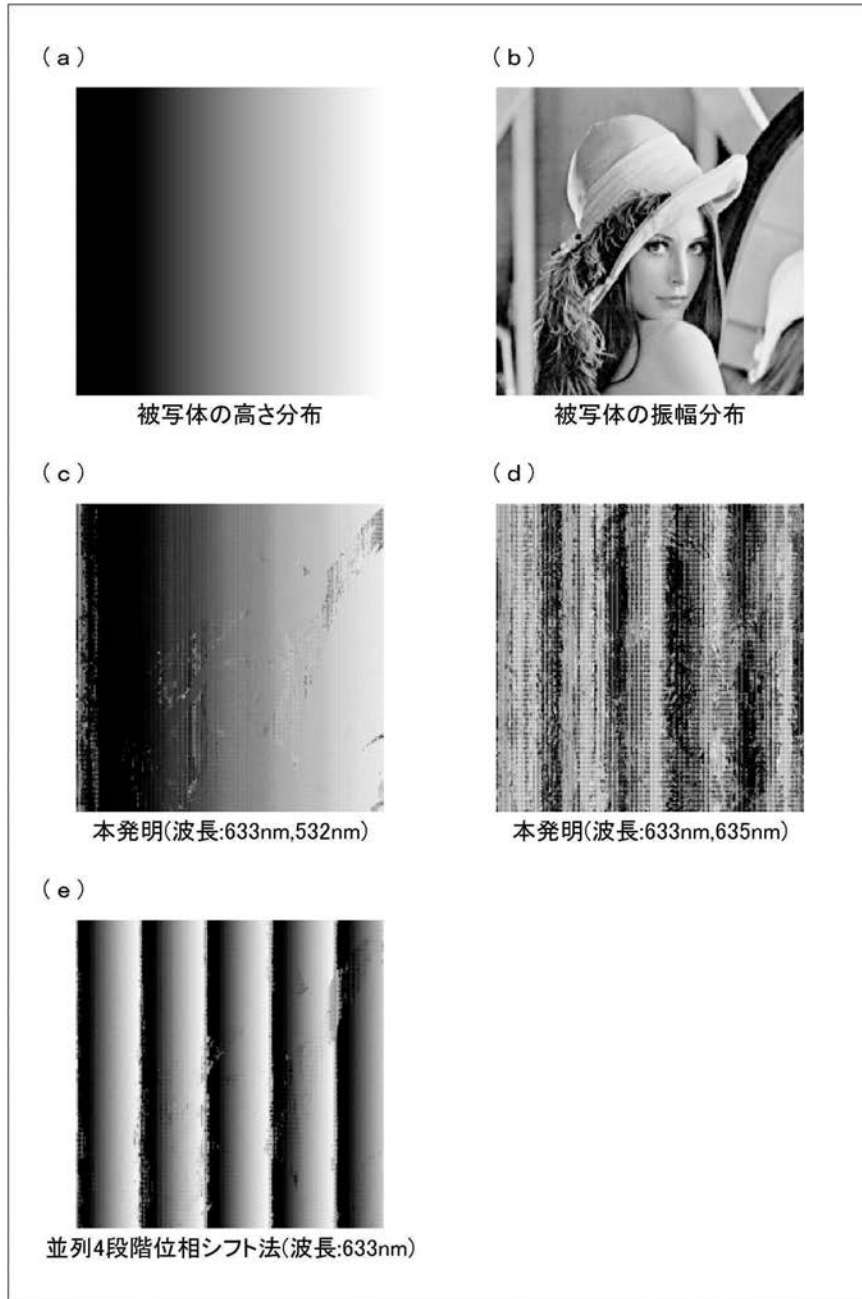




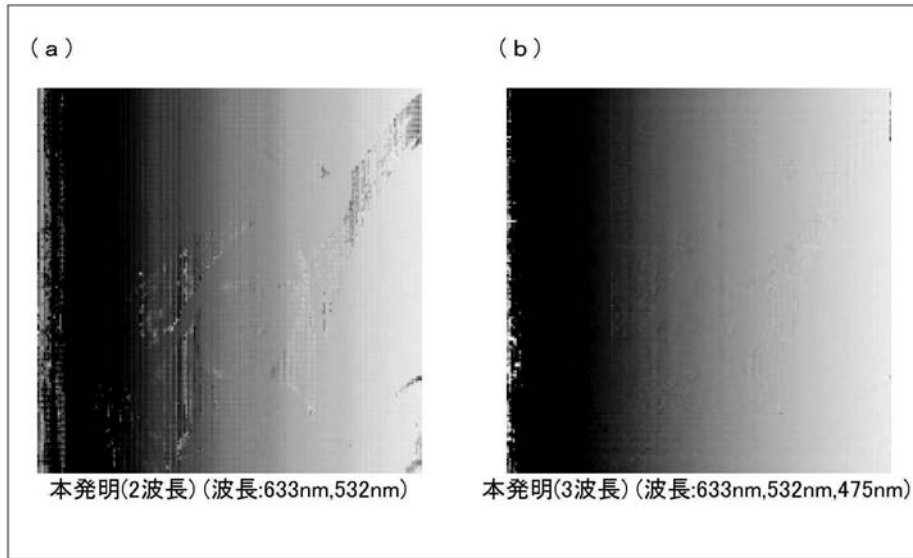
【図10】



【 図 16 】



【 図 2 2 】



---

フロントページの続き

- (72)発明者 田原 樹  
日本国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
- (72)発明者 若松 健  
日本国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 堀井 康司

- (56)参考文献 特許第3471556(JP, B2)  
特開2005-283683(JP, A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
- |      |        |
|------|--------|
| G03H | 1 / 10 |
| G03H | 1 / 08 |
| G02B | 5 / 30 |