

(19) 日本国特許庁(JP)

再公表特許(A1)

(11) 国際公開番号

W02015/064088

発行日 平成29年3月9日 (2017.3.9)

(43) 国際公開日 平成27年5月7日 (2015.5.7)

(51) Int.Cl.			F I	テーマコード (参考)
G03H	1/00	(2006.01)	G03H 1/00	2H052
G02B	21/36	(2006.01)	G02B 21/36	2K008
G03H	1/22	(2006.01)	G03H 1/22	
G02B	21/06	(2006.01)	G02B 21/06	

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全 38 頁)

出願番号	特願2015-544801 (P2015-544801)	(71) 出願人	513099603 公立大学法人兵庫県立大学 兵庫県神戸市西区学園西町8-2-1
(21) 国際出願番号	PCT/JP2014/005448	(74) 代理人	100084375 弁理士 板谷 康夫
(22) 国際出願日	平成26年10月28日 (2014.10.28)	(72) 発明者	佐藤 邦弘 兵庫県姫路市書写2167 兵庫県立大学 姫路書写キャンパス内
(31) 優先権主張番号	特願2013-223761 (P2013-223761)	Fターム(参考)	2H052 AA00 AC05 AC18 AC27 AC34 AF14 AF25 2K008 AA06 CC01 CC03 FF21 FF27 HH06 HH18 HH28
(32) 優先日	平成25年10月28日 (2013.10.28)		
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)		

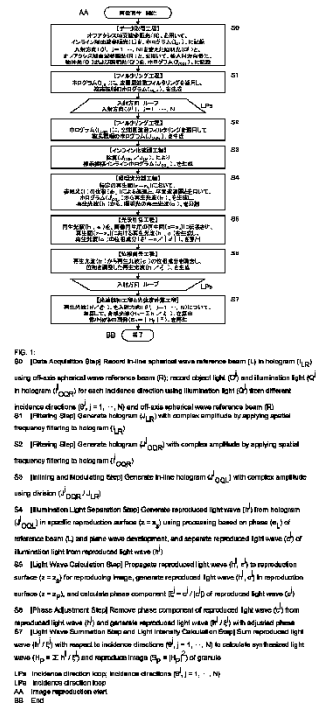
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ホログラフィック顕微鏡および高分解能ホログラム画像用のデータ処理方法

(57) 【要約】

本発明は、透過型と反射型のいずれも実現でき、従来の光学顕微鏡の分解能を超えることができるホログラフィック顕微鏡、高分解能画像用のホログラムデータ取得方法、および高分解能ホログラム画像再生方法を提供する。球面波参照光 (R) を用いてインライン球面波参照光 (L) をホログラム (I_LR) に記録し、入射方向を変えた照明光 (Q^j, j = 1, ..., N) で物体を照明し、物体光 (O^j) と照明光 (Q^j) を球面波参照光 (R) を用いてホログラム (I^j_OQ_R) に記録する。これらのホログラムから参照光 (R) 成分を除去したホログラム (J^j_OQ_L) を生成し、そのホログラムから光波 (h^j) を生成する。光波 (h^j) から照明光 (Q^j) の光波 (c^j) を分離し、その位相成分 (φ^j = arg(h^j / |c^j|)) によって位相調整再生光波を求めて加算し (H_p = Σ h^j / |c^j|)、物体の画像 (S_p = |H_p|²) を再生する。

【選択図】 図 1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

ホログラフィック顕微鏡であって、

物体のホログラムを取得するデータ取得部と、

前記データ取得部によって取得されたホログラムから物体の画像を再生する画像再生部と、を備え、

前記データ取得部は、

光源が放射するコヒーレント光からインライン球面波参照光 (L)、照明光 (Q)、およびオフアクシス球面波参照光 (R) を生成し、かつ、これらの光と、前記照明光 (Q) によって照明される物体から放たれる物体光 (O) とを伝播させる光学系と、

10

物体に対する前記照明光 (Q) の入射方向を変える角度変更部と、

光強度を電気信号に変換して出力する受光素子と、

前記インライン球面波参照光 (L) と前記オフアクシス球面波参照光 (R) との干渉縞のホログラムである参照光オフアクシスホログラム (I_{LR})、前記光学系および前記角度変更部によって前記コヒーレント光から構成される入射方向 (θ^j , $j = 1, \dots, N$) の異なる照明光 (Q^j , $j = 1, \dots, N$) を照射された物体から放たれる物体光 (O^j , $j = 1, \dots, N$) と前記オフアクシス球面波参照光 (R) との干渉縞のホログラムである物体光オフアクシスホログラム (I_{OR}^j , $j = 1, \dots, N$)、および前記照明光 (Q^j , $j = 1, \dots, N$) と前記オフアクシス球面波参照光 (R) との干渉縞のホログラムである照明光オフアクシスホログラム (I_{QR}^j , $j = 1, \dots, N$) を前記受光素子を用いてメモリに記録する記録部と、を備え、

20

前記画像再生部は、

前記各入射方向 (θ^j , $j = 1, \dots, N$) 毎に、前記参照光オフアクシスホログラム (I_{LR})、前記物体光オフアクシスホログラム (I_{OR}^j)、および前記照明光オフアクシスホログラム (I_{QR}^j) から、前記オフアクシス球面波参照光 (R) の成分を除去した物体光複素振幅インラインホログラム (J_{OL}^j) および照明光複素振幅インラインホログラム (J_{QL}^j) を生成するインライン化変調部と、

前記各入射方向 (θ^j , $j = 1, \dots, N$) 毎に、任意の再生面 ($z = z_p$) において、前記物体光複素振幅インラインホログラム (J_{OL}^j) および前記照明光複素振幅インラインホログラム (J_{QL}^j) の各々から、前記物体光 (O^j) の再生光である物体光再生光波 (h^j) と、前記照明光 (Q^j) の再生光である照明光再生光波 (c^j) と、前記照明光再生光波 (c^j) に含まれる位相成分 ($\phi^j = c^j / |c^j|$) と、前記物体光再生光波 (h^j) から前記位相成分 (ϕ^j) を除去した位相調整再生光波 (h^j / ϕ^j) と、を求める光波計算部と、

30

前記位相調整再生光波 (h^j / ϕ^j) を前記各入射方向 (θ^j , $j = 1, \dots, N$) について加算して前記任意の再生面 ($z = z_p$) における光波である合成光波 ($H_p = \sum h^j / \phi^j$) を求めて、前記合成光波 (H_p) を用いて、物体の画像 ($S_p = |H_p|^2$) を再生する画像計算部と、を備えることを特徴とするホログラフィック顕微鏡。

【請求項 2】

前記画像再生部は、前記物体光複素振幅インラインホログラム (J_{OL}^j) および前記照明光複素振幅インラインホログラム (J_{QL}^j) の空間サンプリング間隔を細分化し、細分化によって生じた新たなサンプリング点に対してデータ補間を行って実質的に画素数を増やした物体光複素振幅インラインホログラム (K_{OL}^j) および照明光複素振幅インラインホログラム (K_{QL}^j) を生成する画素数増大部を備え、

40

前記光波計算部は、前記画素数を増やした物体光複素振幅インラインホログラム (K_{OL}^j) および前記画素数を増やした照明光複素振幅インラインホログラム (K_{QL}^j) を用いて前記位相調整再生光波 (h^j / ϕ^j) を求めることを特徴とする請求項 1 に記載のホログラフィック顕微鏡。

【請求項 3】

前記画像再生部は、前記物体光 (O^j) と前記照明光 (Q^j) とが互いに分離されずに

50

記録されたホログラムから前記照明光 (Q^j) の再生光波を分離して生成する照明光分離部を備え、

前記記録部は、前記物体光 (O^j) と前記照明光 (Q^j) とが互いに分離されない場合に、前記物体光 (O^j) と前記照明光 (Q^j) と前記オフアクシス球面波参照光 (R) との干渉縞のホログラムを物体光照明光オフアクシスホログラム (I^j_{OQR}) としてメモリに記録し、

前記インライン化変調部は、前記参照光オフアクシスホログラム (I_{LR}) および前記物体光照明光オフアクシスホログラム (I^j_{OQR}) から、前記オフアクシス球面波参照光 (R) の成分を除去した物体光照明光複素振幅インラインホログラム (J^j_{OQL}) を生成し、

前記照明光分離部は、特定の再生面 ($z = z_s$) において、前記物体光照明光複素振幅インラインホログラム (J^j_{OQL}) から前記照明光 (Q^j) を含んでいる前記物体光 (O^j) の再生光波である物体光再生光波 (h^j) を生成し、前記物体光再生光波 (h^j) から前記照明光 (Q^j) の再生光波である照明光再生光波 (c^j) を分離して生成し、

前記光波計算部は、前記照明光分離部が生成した前記物体光再生光波 (h^j) および前記照明光再生光波 (c^j) の各々を前記特定の再生面 ($z = z_s$) とは異なる任意の再生面 ($z = z_p$) に伝搬させた新たな物体光再生光波 (h^j) および照明光再生光波 (c^j) を生成し、これらの新たな再生光波を用いて前記位相調整再生光波 (h^j / c^j) を求めることを特徴とする請求項 1 に記載のホログラフィック顕微鏡。

【請求項 4】

前記画像再生部は、前記物体光照明光複素振幅インラインホログラム (J^j_{OQL}) の空間サンプリング間隔を細分化し、細分化によって生じた新たなサンプリング点に対してデータ補間を行って実質的に画素数を増やした物体光照明光複素振幅インラインホログラム (K^j_{OQL}) を生成する画素数増大部を備え、

前記照明光分離部は、前記画素数を増やした物体光照明光複素振幅インラインホログラム (K^j_{OQL}) を用いて前記物体光再生光波 (h^j) を求めることを特徴とする請求項 3 に記載のホログラフィック顕微鏡。

【請求項 5】

前記角度変更部は、集光レンズと、前記集光レンズに、その入り口側の開口径よりも大きな径を有する平行光を、該集光レンズの光軸に対して傾いた任意の方向から入射させる反射鏡と、を備えることを特徴とする請求項 1 乃至請求項 4 のいずれか一項に記載のホログラフィック顕微鏡。

【請求項 6】

高分解能ホログラム画像用のデータ処理方法であって、

インライン球面波参照光 (L) とオフアクシス球面波参照光 (R) との干渉縞のホログラムである参照光オフアクシスホログラム (I_{LR}) を記録し、

物体に対する入射方向 ($\theta^j, j = 1, \dots, N$) を変えた照明光 ($Q^j, j = 1, \dots, N$) によって前記物体を照明し、前記各入射方向毎に、前記物体から放たれる物体光 ($O^j, j = 1, \dots, N$) と前記オフアクシス球面波参照光 (R) との干渉縞のホログラムである物体光オフアクシスホログラム ($I^j_{OR}, j = 1, \dots, N$)、および前記照明光 ($Q^j, j = 1, \dots, N$) と前記オフアクシス球面波参照光 (R) との干渉縞のホログラムである照明光オフアクシスホログラム ($I^j_{QR}, j = 1, \dots, N$) を記録し、

前記各物体光 ($O^j, j = 1, \dots, N$) が局在領域から放射され、前記局在領域と前記インライン球面波参照光 (L) および前記オフアクシス球面波参照光 (R) の各仮想点光源とが互いに近接した条件で、前記各オフアクシスホログラム ($I_{LR}, I^j_{OR}, I^j_{QR}, j = 1, \dots, N$) が記録されることを特徴とする高分解能ホログラム画像用のデータ処理方法。

【請求項 7】

前記オフアクシス球面波参照光 (R) は、微小球面からの反射光であることを特徴とす

10

20

30

40

50

る請求項 6 に記載の高分解能ホログラム画像用のデータ処理方法。

【請求項 8】

前記物体光が放射される局在領域を望むように複数の受光素子を配置し、前記複数の受光素子によって前記各ホログラムを記録することを特徴とする請求項 6 または請求項 7 に記載の高分解能ホログラム画像用のデータ処理方法。

【請求項 9】

前記ホログラムに記録された物体光 (O^j) は前記物体における前記局在領域の各点で前記照明光 (Q^j) が反射して生じる反射光が重なり合った光であり、該物体光 (O^j) を構成する前記反射光が発生する位置における該反射光の位相とその位置における該反射光を生成する前記照明光 (Q^j) の位相とが同じであることに基づいて、任意の再生面 ($z = z_p$) において物体光 ($O^j, j = 1, \dots, N$) の位相を調整した光波を加算して構成した合成光波 (H_p) を求め、その合成光波 (H_p) を用いて、物体の画像 ($S_p = |H_p|^2$) を再生することを特徴とする請求項 6 乃至請求項 8 のいずれか一項に記載の高分解能ホログラム画像用のデータ処理方法。

10

【請求項 10】

前記各入射方向 ($\theta^j, j = 1, \dots, N$) 毎に、前記参照光オフアクシスホログラム (I_{LR})、物体光オフアクシスホログラム (I_{OR}^j) および照明光オフアクシスホログラム (I_{QR}^j) から、前記オフアクシス球面波参照光 (R) の成分を除去した物体光複素振幅インラインホログラム (J_{OL}^j) および照明光複素振幅インラインホログラム (J_{QL}^j) を生成し、

20

前記各入射方向 ($\theta^j, j = 1, \dots, N$) 毎に、任意の再生面 ($z = z_p$) において、前記物体光複素振幅インラインホログラム (J_{OL}^j) および前記照明光複素振幅インラインホログラム (J_{QL}^j) の各々から、前記物体光 (O^j) の物体光再生光波 (h^j) と、前記照明光 (Q^j) の照明光再生光波 (c^j) と、前記照明光再生光波 (c^j) に含まれる位相成分 ($\phi^j = c^j / |c^j|$) と、前記物体光再生光波 (h^j) から前記位相成分 (θ^j) を除去した位相調整再生光波 (h^j / ϕ^j) と、を求め、

前記位相調整再生光波 (h^j / ϕ^j) を前記各入射方向 ($\theta^j, j = 1, \dots, N$) について加算して前記任意の再生面 ($z = z_p$) における光波である合成光波 ($H_p = h^j / \phi^j$) を求め、前記合成光波 (H_p) を用いて、物体の画像 ($S_p = |H_p|^2$) を再生することを特徴とする請求項 6 乃至請求項 8 のいずれか一項に記載の高分解能ホログラム画像用のデータ処理方法。

30

【請求項 11】

前記物体光複素振幅インラインホログラム (J_{OL}^j) および前記照明光複素振幅インラインホログラム (J_{QL}^j) の空間サンプリング間隔を細分化し、細分化によって生じた新たなサンプリング点に対してデータ補間を行って実質的に画素数を増やした物体光複素振幅インラインホログラム (K_{OL}^j) および照明光複素振幅インラインホログラム (K_{QL}^j) を生成し、前記画素数を増やした物体光複素振幅インラインホログラム (K_{OL}^j) および前記画素数を増やした照明光複素振幅インラインホログラム (K_{QL}^j) を用いて前記位相調整再生光波 (h^j / ϕ^j) を求めることを特徴とする請求項 10 に記載の高分解能ホログラム画像用のデータ処理方法。

40

【請求項 12】

前記各入射方向 ($\theta^j, j = 1, \dots, N$) における前記物体光 (O^j) と前記照明光 (Q^j) とが互いに分離して記録されない場合に、前記物体光 (O^j) と前記照明光 (Q^j) と前記オフアクシス球面波参照光 (R) との干渉縞のホログラムである物体光照明光オフアクシスホログラム (I_{OQR}^j) を各入射方向毎に記録し、

前記各オフアクシスホログラム ($I_{LR}, I_{OQR}^j, j = 1, \dots, N$) は、前記局在領域と前記インライン球面波参照光 (L) および前記オフアクシス球面波参照光 (R) の各仮想点光源とが互いに近接した条件で記録されることを特徴とする請求項 6 乃至請求項 8 のいずれか一項に記載の高分解能ホログラム画像用のデータ処理方法。

【請求項 13】

50

前記照明光 (Q^j , $j = 1, \dots, N$) は、集光点を有し、その集光点を経過して広がった状態で前記各物体光照明光オフアクシスホログラム (I^j_{OQR} , $j = 1, \dots, N$) に記録されることを特徴とする請求項 1 2 に記載の高分解能ホログラム画像用のデータ処理方法。

【請求項 1 4】

前記各入射方向 (θ^j , $j = 1, \dots, N$) 毎に、前記参照光オフアクシスホログラム (I_{LR}) および前記物体光照明光オフアクシスホログラム (I^j_{OQR}) から前記参照光 (R) の成分を除去した物体光照明光複素振幅インラインホログラム (J^j_{OQL}) を生成し、

前記各入射方向 (θ^j , $j = 1, \dots, N$) 毎に、特定の再生面 ($z = z_s$) において、前記物体光照明光複素振幅インラインホログラム (J^j_{OQL}) から前記照明光 (Q^j) を含んでいる前記物体光 (O^j) の再生光波である物体光再生光波 (h^j) を生成し、前記物体光再生光波 (h^j) から前記照明光 (Q^j) の再生光波である照明光再生光波 (c^j) を分離し、

前記各入射方向 (θ^j , $j = 1, \dots, N$) 毎に、前記物体光再生光波 (h^j) および前記照明光再生光波 (c^j) の各々を前記特定の再生面 ($z = z_s$) とは異なる任意の再生面 ($z = z_p$) に伝搬させた新たな物体光再生光波 (h^j) および照明光再生光波 (c^j) を生成し、前記任意の再生面 ($z = z_p$) において、前記照明光再生光波 (c^j) に含まれる位相成分 ($\phi^j = c^j / |c^j|$) と、前記物体光照明光再生光波 (h^j) から前記位相成分 (ϕ^j) を除去した位相調整再生光波 (h^j / ϕ^j) と、を求め、

前記位相調整再生光波 (h^j / ϕ^j) を前記各入射方向 (θ^j , $j = 1, \dots, N$) について加算して前記任意の再生面 ($z = z_p$) における光波である合成光波 ($H_p = h^j / \phi^j$) を求め、前記合成光波 (H_p) を用いて、物体の画像 ($S_p = |H_p|^2$) を再生することを特徴とする請求項 1 2 または請求項 1 3 に記載の高分解能ホログラム画像用のデータ処理方法。

【請求項 1 5】

前記物体光照明光複素振幅インラインホログラム (J^j_{OQL}) の空間サンプリング間隔を細分化し、細分化によって生じた新たなサンプリング点に対してデータ補間を行って実質的に画素数を増やした物体光照明光複素振幅インラインホログラム (K^j_{OQL}) を生成し、前記画素数を増やした物体光照明光複素振幅インラインホログラム (K^j_{OQL}) を用いて前記位相調整再生光波 (h^j / ϕ^j) を求めることを特徴とする請求項 1 4 に記載の高分解能ホログラム画像用のデータ処理方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、球面波参照光を用いたオフアクシスホログラフィに基づくホログラフィック顕微鏡および高分解能ホログラム画像用のデータ処理方法に関する。

【背景技術】

【0002】

従来、開口数の大きい複素振幅インラインホログラムをワンショットでかつ結像レンズを用いることなく記録して微小物体の画像を再生する透過型および反射型のホログラフィック顕微鏡が知られている (例えば、特許文献 1 参照)。この顕微鏡は、結像レンズを用いないので、従来の光学顕微鏡における媒質や結像レンズの影響を受けるといった問題を解決できる。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献 1】国際公開第 2012/005315 号

【発明の開示】

【0004】

10

20

30

40

50

しかしながら、上述した特許文献 1 に示されるようなホログラフィック顕微鏡においては、従来の光学顕微鏡と同様に、分解能が光の半波長を超えることはできない、という原理的な限界がある。このような分解能限界を超える顕微鏡として、モアレ効果を利用する SIM (Structured Illumination Microscopy) が開発されている。SIM は、分解能が上記の限界を超えるようにすることができる。しかしながら、SIM は結像レンズを使用するものであり、他の光学顕微鏡と同様に結像レンズの使用に伴う多くの問題を有している。また、SIM は、構造が複雑で非常に高価であり、取扱いが容易ではない。さらに、モアレ効果を透過型の顕微鏡に適用することは困難であることから、SIM は、反射型のもののみ実用化されており、透過型のものは実用化されていない。

【0005】

本発明は、上記課題を解消するものであって、簡単な構成により、透過型と反射型のいずれも実現でき、従来の光学顕微鏡の分解能を超えることができるホログラフィック顕微鏡および高分解能ホログラム画像用のデータ処理方法を提供することを目的とする。

【0006】

上記課題を達成するために、本発明のホログラフィック顕微鏡は、物体のホログラムを取得するデータ取得部と、データ取得部によって取得されたホログラムから物体の画像を再生する画像再生部と、を備え、データ取得部は、光源が放射するコヒーレント光からインライン球面波参照光 (L)、照明光 (Q)、およびオフアクシス球面波参照光 (R) を生成し、かつ、これらの光と、照明光 (Q) によって照明される物体から放たれる物体光 (O) とを伝播させる光学系と、物体に対する照明光 (Q) の入射方向を変える角度変更部と、光強度を電気信号に変換して出力する受光素子と、インライン球面波参照光 (L) とオフアクシス球面波参照光 (R) との干渉縞のホログラムである参照光オフアクシスホログラム (I_{LR})、光学系および角度変更部によってコヒーレント光から構成される入射方向 (θ^j , $j = 1, \dots, N$) の異なる照明光 (Q^j , $j = 1, \dots, N$) を照射された物体から放たれる物体光 (O^j , $j = 1, \dots, N$) とオフアクシス球面波参照光 (R) との干渉縞のホログラムである物体光オフアクシスホログラム (I_{OR}^j , $j = 1, \dots, N$)、および照明光 (Q^j , $j = 1, \dots, N$) とオフアクシス球面波参照光 (R) との干渉縞のホログラムである照明光オフアクシスホログラム (I_{QR}^j , $j = 1, \dots, N$) を受光素子を用いてメモリに記録する記録部と、を備え、画像再生部は、各入射方向 (θ^j , $j = 1, \dots, N$) 毎に、参照光オフアクシスホログラム (I_{LR})、物体光オフアクシスホログラム (I_{OR}^j)、および照明光オフアクシスホログラム (I_{QR}^j) から、オフアクシス球面波参照光 (R) の成分を除去した物体光複素振幅インラインホログラム (J_{OL}^j) および照明光複素振幅インラインホログラム (J_{QL}^j) を生成するインライン化変調部と、各入射方向 (θ^j , $j = 1, \dots, N$) 毎に、任意の再生面 ($z = z_p$) において、物体光複素振幅インラインホログラム (J_{OL}^j) および照明光複素振幅インラインホログラム (J_{QL}^j) の各々から、物体光 (O^j) の再生光である物体光再生光波 (h^j) と、照明光 (Q^j) の再生光である照明光再生光波 (c^j) と、照明光再生光波 (c^j) に含まれる位相成分 ($\phi^j = c^j / |c^j|$) と、物体光再生光波 (h^j) から位相成分 (ϕ^j) を除去した位相調整再生光波 (h^j / ϕ^j) と、を求める光波計算部と、位相調整再生光波 (h^j / ϕ^j) を各入射方向 (θ^j , $j = 1, \dots, N$) について加算して任意の再生面 ($z = z_p$) における光波である合成光波 ($H_p = h^j / \phi^j$) を求めて、合成光波 (H_p) を用いて、物体の画像 ($S_p = |H_p|^2$) を再生する画像計算部と、を備えることを特徴とする。

【0007】

このホログラフィック顕微鏡において、画像再生部は、物体光複素振幅インラインホログラム (J_{OL}^j) および照明光複素振幅インラインホログラム (J_{QL}^j) の空間サンプリング間隔を細分化し、細分化によって生じた新たなサンプリング点に対してデータ補間を行って実質的に画素数を増やした物体光複素振幅インラインホログラム (K_{OL}^j) および照明光複素振幅インラインホログラム (K_{QL}^j) を生成する画素数増大部を備え、光波計算部は、画素数を増やした物体光複素振幅インラインホログラム (K_{OL}^j) お

10

20

30

40

50

よび画素数を増やした照明光複素振幅インラインホログラム ($K^j_{Q_L}$) を用いて位相調整再生光波 (h^j / λ^j) を求めてもよい。

【0008】

このホログラフィック顕微鏡において、画像再生部は、物体光 (O^j) と照明光 (Q^j) とが互いに分離されずに記録されたホログラムから照明光 (Q^j) の再生光波を分離して生成する照明光分離部を備え、記録部は、物体光 (O^j) と照明光 (Q^j) とが互いに分離されない場合に、物体光 (O^j) と照明光 (Q^j) とオフアクシス球面波参照光 (R) との干渉縞のホログラムを物体光照明光オフアクシスホログラム (I^j_{OQR}) としてメモリに記録し、インライン化変調部は、参照光オフアクシスホログラム (I_{LR}) および物体光照明光オフアクシスホログラム (I^j_{OQR}) から、オフアクシス球面波参照光 (R) の成分を除去した物体光照明光複素振幅インラインホログラム (J^j_{OQL}) を生成し、照明光分離部は、特定の再生面 ($z = z_s$) において、物体光照明光複素振幅インラインホログラム (J^j_{OQL}) から照明光 (Q^j) を含んでいる物体光 (O^j) の再生光波である物体光再生光波 (h^j) を生成し、物体光再生光波 (h^j) から照明光 (Q^j) の再生光波である照明光再生光波 (c^j) を分離して生成し、光波計算部は、照明光分離部が生成した物体光再生光波 (h^j) および照明光再生光波 (c^j) の各々を特定の再生面 ($z = z_s$) とは異なる任意の再生面 ($z = z_p$) に伝搬させた新たな物体光再生光波 (h^j) および照明光再生光波 (c^j) を生成し、これらの新たな再生光波を用いて位相調整再生光波 (h^j / λ^j) を求めてもよい。

10

【0009】

このホログラフィック顕微鏡において、画像再生部は、物体光照明光複素振幅インラインホログラム (J^j_{OQL}) の空間サンプリング間隔を細分化し、細分化によって生じた新たなサンプリング点に対してデータ補間を行って実質的に画素数を増やした物体光照明光複素振幅インラインホログラム (K^j_{OQL}) を生成する画素数増大部を備え、照明光分離部は、画素数を増やした物体光照明光複素振幅インラインホログラム (K^j_{OQL}) を用いて物体光再生光波 (h^j) を求めてもよい。

20

【0010】

このホログラフィック顕微鏡において、角度変更部は、集光レンズと、集光レンズにその入り口側の開口径よりも大きな径を有する平行光を該集光レンズの光軸に対して傾いた任意の方向から入射させる反射鏡と、を備えて構成されてもよい。

30

【0011】

本発明の高分解能ホログラム画像用のデータ処理方法は、インライン球面波参照光 (L) とオフアクシス球面波参照光 (R) との干渉縞のホログラムである参照光オフアクシスホログラム (I_{LR}) を記録し、物体に対する入射方向 ($\theta^j, j = 1, \dots, N$) を変えた照明光 ($Q^j, j = 1, \dots, N$) によって物体を照明し、各入射方向毎に、物体から放たれる物体光 ($O^j, j = 1, \dots, N$) とオフアクシス球面波参照光 (R) との干渉縞のホログラムである物体光オフアクシスホログラム ($I^j_{OR}, j = 1, \dots, N$)、および照明光 ($Q^j, j = 1, \dots, N$) とオフアクシス球面波参照光 (R) との干渉縞のホログラムである照明光オフアクシスホログラム ($I^j_{QR}, j = 1, \dots, N$) を記録し、各物体光 ($O^j, j = 1, \dots, N$) が局在領域から放射され、局在領域とインライン球面波参照光 (L) およびオフアクシス球面波参照光 (R) の各仮想点光源とが互いに近接した条件で、各オフアクシスホログラム ($I_{LR}, I^j_{OR}, I^j_{QR}, j = 1, \dots, N$) が記録されることを特徴とする。

40

【0012】

この高分解能ホログラム画像用のデータ処理方法において、オフアクシス球面波参照光 (R) は、微小球面からの反射光であってもよい。

【0013】

この高分解能ホログラム画像用のデータ処理方法において、物体光が放射される局在領域を望むように複数の受光素子を配置し、複数の受光素子によって各ホログラムを記録してもよい。

50

【0014】

この高分解能ホログラム画像用のデータ処理方法において、ホログラムに記録された物体光 (O^j) は物体における局在領域の各点で照明光 (Q^j) が反射して生じる反射光が重なり合った光であり、該物体光 (O^j) を構成する反射光が発生する位置における該反射光の位相とその位置における該反射光を生成する照明光 (Q^j) の位相とが同じであることに基づいて、任意の再生面 ($z = z_p$) において物体光 (O^j , $j = 1, \dots, N$) の位相を調整した光波を加算して構成した合成光波 (H_p) を求め、その合成光波 (H_p) を用いて、物体の画像 ($S_p = |H_p|^2$) を再生してもよい。

【0015】

この高分解能ホログラム画像用のデータ処理方法において、各入射方向 (θ^j , $j = 1, \dots, N$) 毎に、参照光オフアクシスホログラム (I_{LR})、物体光オフアクシスホログラム (I_{OR}^j) および照明光オフアクシスホログラム (I_{QR}^j) から、オフアクシス球面波参照光 (R) の成分を除去した物体光複素振幅インラインホログラム (J_{OL}^j) および照明光複素振幅インラインホログラム (J_{QL}^j) を生成し、各入射方向 (θ^j , $j = 1, \dots, N$) 毎に、任意の再生面 ($z = z_p$) において、物体光複素振幅インラインホログラム (J_{OL}^j) および照明光複素振幅インラインホログラム (J_{QL}^j) の各々から、物体光 (O^j) の物体光再生光波 (h^j) と、照明光 (Q^j) の照明光再生光波 (c^j) と、照明光再生光波 (c^j) に含まれる位相成分 ($\phi^j = c^j / |c^j|$) と、物体光再生光波 (h^j) から位相成分 (ϕ^j) を除去した位相調整再生光波 (h^j / ϕ^j) と、を求め、位相調整再生光波 (h^j / ϕ^j) を各入射方向 (θ^j , $j = 1, \dots, N$) について加算して任意の再生面 ($z = z_p$) における光波である合成光波 ($H_p = h^j / \phi^j$) を求め、合成光波 (H_p) を用いて、物体の画像 ($S_p = |H_p|^2$) を再生してもよい。

【0016】

この高分解能ホログラム画像用のデータ処理方法において、物体光複素振幅インラインホログラム (J_{OL}^j) および照明光複素振幅インラインホログラム (J_{QL}^j) の空間サンプリング間隔を細分化し、細分化によって生じた新たなサンプリング点に対してデータ補間を行って実質的に画素数を増やした物体光複素振幅インラインホログラム (K_{OL}^j) および照明光複素振幅インラインホログラム (K_{QL}^j) を生成し、画素数を増やした物体光複素振幅インラインホログラム (K_{OL}^j) および画素数を増やした照明光複素振幅インラインホログラム (K_{QL}^j) を用いて位相調整再生光波 (h^j / ϕ^j) を求め

【0017】

この高分解能ホログラム画像用のデータ処理方法において、各入射方向 (θ^j , $j = 1, \dots, N$) における物体光 (O^j) と照明光 (Q^j) とが互いに分離して記録されない場合に、物体光 (O^j) と照明光 (Q^j) とオフアクシス球面波参照光 (R) との干渉縞のホログラムである物体光照明光オフアクシスホログラム (I_{OQR}^j) を各入射方向毎に記録し、各オフアクシスホログラム (I_{LR}, I_{OQR}^j , $j = 1, \dots, N$) は、局在領域とインライン球面波参照光 (L) およびオフアクシス球面波参照光 (R) の各仮想点光源とが互いに近接した条件で記録されてもよい。

【0018】

この高分解能ホログラム画像用のデータ処理方法において、照明光 (Q^j , $j = 1, \dots, N$) は、集光点を有し、その集光点を経過して広がった状態で各物体光照明光オフアクシスホログラム (I_{OQR}^j , $j = 1, \dots, N$) に記録されてもよい。

【0019】

この高分解能ホログラム画像用のデータ処理方法において、各入射方向 (θ^j , $j = 1, \dots, N$) 毎に、参照光オフアクシスホログラム (I_{LR}) および物体光照明光オフアクシスホログラム (I_{OQR}^j) から参照光 (R) の成分を除去した物体光照明光複素振幅インラインホログラム (J_{OQL}^j) を生成し、各入射方向 (θ^j , $j = 1, \dots, N$) 毎に、特定の再生面 ($z = z_s$) において、物体光照明光複素振幅インラインホログラ

$\Delta (J^j_{oql})$ から照明光 (Q^j) を含んでいる物体光 (O^j) の再生光波である物体光再生光波 (h^j) を生成し、物体光再生光波 (h^j) から照明光 (Q^j) の再生光波である照明光再生光波 (c^j) を分離し、各入射方向 ($\theta^j, j = 1, \dots, N$) 毎に、物体光再生光波 (h^j) および照明光再生光波 (c^j) の各々を特定の再生面 ($z = z_s$) とは異なる任意の再生面 ($z = z_p$) に伝搬させた新たな物体光再生光波 (h^j) および照明光再生光波 (c^j) を生成し、任意の再生面 ($z = z_p$) において、照明光再生光波 (c^j) に含まれる位相成分 ($\theta^j = c^j / |c^j|$) と、物体光照明光再生光波 (h^j) から位相成分 (θ^j) を除去した位相調整再生光波 (h^j / θ^j) と、を求め、位相調整再生光波 (h^j / θ^j) を各入射方向 ($\theta^j, j = 1, \dots, N$) について加算して任意の再生面 ($z = z_p$) における光波である合成光波 ($H_p = \sum h^j / \theta^j$) を求め、合成光波 (H_p) を用いて、物体の画像 ($S_p = |H_p|^2$) を再生してもよい。

10

【0020】

この高分解能ホログラム画像用のデータ処理方法において、物体光照明光複素振幅インラインホログラム (J^j_{oql}) の空間サンプリング間隔を細分化し、細分化によって生じた新たなサンプリング点に対してデータ補間を行って実質的に画素数を増やした物体光照明光複素振幅インラインホログラム (K^j_{oql}) を生成し、画素数を増やした物体光照明光複素振幅インラインホログラム (K^j_{oql}) を用いて位相調整再生光波 (h^j / θ^j) を求めてもよい。

【0021】

本発明のホログラフィック顕微鏡および高分解能ホログラム画像用のデータ処理方法によれば、球面波参照光と多方向照明光とで記録した複数の物体光を各照明光の位相情報によって調整して加算するので、物体光の開口数に照明光の開口数を加算した大開口数条件で画像を再生できる。大開口数条件での画像再生により、従来の光学顕微鏡の分解能を超えることができる。また、物体光と照明光とは、透過型と反射型のいずれでもホログラムに記録できるので、透過型と反射型のいずれの顕微鏡も実現できる。

20

【図面の簡単な説明】

【0022】

【図1】本発明の一実施形態に係る高分解能ホログラム画像再生方法を示すフローチャート。

【図2】同画像生成方法に用いるインライン球面波参照光のデータを取得する透過型の装置の側面図。

30

【図3】同画像生成方法に用いる物体光のデータを取得する同装置の側面図。

【図4】(a)(b)は図3の要部断面図。

【図5】同画像再生方法に用いる多方向照明の他の例を示す斜視図。

【図6】(a)は同画像生成方法に用いるインライン球面波参照光のデータを取得する透過型の装置の他の例の側面図、(b)は同装置の平面図。

【図7】(a)は同画像生成方法に用いる物体光のデータを取得する同装置の側面図、(b)は同装置の平面図。

【図8】(a)は同画像生成方法に用いるインライン球面波参照光のデータを取得する反射型の装置の側面図、(b)は物体光のデータを取得する同装置の側面図。

40

【図9】(a)は同画像生成方法に用いる物体光のデータを取得する反射型の装置の他の例を示す側面図、(b)は同装置の平面図。

【図10】(a)は4方向からの照明光の空間周波数分布を示す図、(b)は同照明光によって取得した物体光の空間周波数分布を示す図。

【図11】(a)は図10(a)の照明光に周波数変調を施した後の空間周波数分布を示す図、(b)は図10(b)の物体光に周波数変調を施した後の空間周波数分布を示す図。

【図12】同画像生成方法の処理の流れを示すブロック図。

【図13】同画像生成方法に用いるインライン球面波参照光のデータを取得する透過型の装置の他の例の側面図。

50

- 【図 1 4】同画像生成方法に用いる物体光のデータを取得する同装置の側面図。
- 【図 1 5】同画像生成方法における複数の受光素子間のデータの較正処理のフローチャート。
- 【図 1 6】同画像生成方法における高分解能化処理のフローチャート。
- 【図 1 7】(a)はホログラムの部分図、(b)は同ホログラムにおける空間サンプリング間隔を増やす様子を示すホログラムの部分図。
- 【図 1 8】同画像再生方法における高速化処理のフローチャート。
- 【図 1 9】(a)は単一の再生用ホログラムと再生像の概念図、(b)は複数の再生用ホログラムと再生された複数の像とを示す概念図。
- 【図 2 0】(a)はホログラムの概念図、(b)は同ホログラムを分割して重ね合わせた概念図、(c)は(b)のホログラムを合成したホログラムの概念図。
- 【図 2 1】同画像生成方法に用いる物体光 O のデータを取得する反射型の装置の他の例を示す側面図。
- 【図 2 2】他の実施形態に係る高分解能ホログラム画像再生方法を示すフローチャート。
- 【図 2 3】同画像生成方法の処理の流れを示すブロック図。
- 【図 2 4】本発明の一実施形態に係るホログラフィック顕微鏡のブロック構成図。
- 【図 2 5】(a)は同顕微鏡を用いて入射方向を傾けた照明光で取得した U S A F テストターゲットのホログラムにおける物体光と照明光の再生光波の空間周波数分布の図、(b)は(a)の説明図。
- 【図 2 6】(a)は図 2 5 (a)の物体光と照明光を周波数変調した後の再生光波の空間周波数分布の図、(b)は(a)の説明図。
- 【図 2 7】4方向からの照明光でホログラムを取得し、図 2 6 (a)の場合と同様に周波数変調して得た4つの再生光波を、互いに加算する様子を概念的に示す図。
- 【図 2 8】図 2 7の処理で合成された再生光波の空間周波数分布の図。
- 【図 2 9】同顕微鏡を用いて照明光の入射方向を変えて取得した U S A F テストターゲットの複数のホログラムのうちの1つの像を示す図。
- 【図 3 0】(a)は入射方向の異なる同ホログラムの複数枚を用いて再生した U S A F テストターゲットの再生画像を示す図、(b)は同ホログラムのうちの1枚を用いて再生した U S A F テストターゲットの再生画像を示す図。
- 【発明を実施するための形態】
- 【0023】
- (微小物体の画像再生方法)
- 以下、本発明の一実施形態に係る高分解能ホログラム画像用のデータ処理方法(高分解能ホログラム画像再生方法、高分解能画像用のホログラムデータ取得方法)、およびホログラフィック顕微鏡について、図面を参照して説明する。図 1 乃至図 1 2 は、高分解能ホログラム画像再生方法と高分解能画像用のホログラムデータ取得方法を示す。本画像再生方法は、図 1 に示すように、データ取得工程(S 0)と、その後のデータ処理によって画像を再生する画像再生の工程(S 1 乃至 S 7)とを備える。本画像再生方法では、多方向の照明光によって発生する物体光を記録した複数の大開口数のデジタルホログラムから光波を再生し、その再生光波を各照明光の位相情報を加味して計算機合成することにより、開口数が 1 を超える条件で画像を再生する。本画像再生方法は、ホログラフィック顕微鏡における画像再生に用いることができる。
- 【0024】
- 光学における開口数 NA は、光の媒質の屈折率を 1 と仮定した場合、ある点 P から平面に立てた垂線と、その点 P からその平面上に設定された境界領域の境界に至る線分との成す角度 θ の正弦値 $\sin \theta$ である。言い換えれば、開口数 NA は、ある点 P から平面に立てた垂線の足と境界領域の境界とを結ぶ平面上の線分を、その点 P から望む角度 θ の正弦値である。開口数 NA は、点 P と境界領域とを設定することによって、レンズ、受光素子、照明光等に、それぞれ定義することができ、その値は 1 以下 ($NA = \sin \theta \leq 1$) である。開口数 NA を定義する点 P は、レンズでは焦点、受光素子では受

光素子の中心線上のある任意の点（任意に設定した点光源の位置）、照明光では光源中の1点である。開口数 NA を定義する境界領域は、レンズではレンズの開口、受光素子では受光素子の受光面（実効的に受光可能面）、照明光では点光源から広がる光で照明される面である。

【0025】

（概要説明）

データ取得工程（S0）では、インライン球面波参照光 L 、オフアクシス球面波参照光 R 、および物体に対する照明光 Q の入射方向 j 、 $j = 1, \dots, N$ を変えた照明光 Q^j 、 $j = 1, \dots, N$ を用いて、これらの光の成す干渉縞を複数のオフアクシスホログラム I_{LR} 、 I^j_{OQR} 、 $j = 1, \dots, N$ として取得する。以下において、入射方向に依存する光や数式は、入射方向を区別する添え字 j 等が適宜省略される。ホログラム I_{LR} は、インライン球面波参照光 L をオフアクシス球面波参照光 R を用いて記録したオフアクシスホログラムである。ホログラム I_{LR} は、参照光 R のホログラムであり、参照光ホログラム I_{LR} 、参照光オフアクシスホログラム I_{LR} 、またはオフアクシスホログラム I_{LR} などと適宜別名で表記される。これらのインライン球面波参照光 L とホログラム I_{LR} の情報は、ホログラムデータを処理する際に基準となる情報である。

10

【0026】

ホログラム I^j_{OQR} は、照明光 Q^j により物体を照明し、その物体から放たれる物体光 O^j と照明光 Q^j とをオフアクシス球面波参照光 R を用いて記録したオフアクシスホログラムである。ホログラム I^j_{OQR} は、物体光 O^j と照明光 Q^j のホログラムであり、物体光照明光ホログラム I^j_{OQR} 、物体光照明光オフアクシスホログラム I^j_{OQR} 、またはオフアクシスホログラム I^j_{OQR} などと適宜別名で表記される。これらのホログラム I_{LR} 、 I^j_{OQR} は、インライン球面波参照光 L およびオフアクシス球面波参照光 R という球面波光を用いて取得したものである。従って、これらのホログラムは大開口数（大きな NA 数、ただし、 $NA < 1$ である）のホログラムとなり得る。

20

【0027】

画像再生の工程（S1乃至S7）は、単独で行われるフィルタリング工程（S1）と、入射方向ループ $LP_s - LP_e$ において各入射方向 j について一連の処理を行う工程（S2乃至S6）と、得られた結果を統合して画像を再生する工程（S7）とを備える。フィルタリング工程（S1）では、ホログラム I_{LR} に空間周波数フィルタリングを適用して、インライン球面波参照光 L の情報を保持した複素振幅オフアクシスホログラム J_{LR} を生成する。入射方向ループ $LP_s - LP_e$ は、フィルタリング工程（S2）、インライン化変調工程（S3）、照明光分離工程（S4）、光波計算工程（S5）、位相調整工程（S6）を実行する。

30

【0028】

フィルタリング工程（S2）では、ホログラム I^j_{OQR} に空間周波数フィルタリングを適用して、物体光 O^j と照明光 Q^j の情報を保持した複素振幅オフアクシスホログラム J^j_{OQR} を生成する。インライン化変調工程（S3）では、フィルタリング工程（S2）によって生成された各複素振幅オフアクシスホログラム J^j_{OQR} のデータを、同じくフィルタリング工程（S1）によって生成された複素振幅オフアクシスホログラム J_{LR} のデータで除算することにより、参照光 R 成分を除去してインラインの構成とした複素振幅インラインホログラム J^j_{OQL} を生成する。

40

【0029】

照明光分離工程（S4）では、特定の再生面 $z = z_s$ において、複素振幅インラインホログラム J^j_{OQL} から、物体光 O^j と照明光 Q^j の再生光波である物体光再生光波 h^j を生成し、その物体光再生光波 h^j から照明光 Q^j の再生光波である照明光再生光波 c^j を分離抽出する。この物体光再生光波 h^j は、物体光 O^j と照明光 Q^j を含んでいる再生光波である。物体光再生光波 h^j と照明光再生光波 c^j は、適宜簡略して再生光波 h^j 、 c^j さらには光波 h^j 、 c^j などと表記される。これらの再生光波の生成に際し、インライン球面波参照光 L の位相 ϕ_L を用いた変調処理、および平面波展開処理が行われる。再

50

生面 $z = z_s$ は、再生光波 c^j を分離抽出することが容易となる特定の面に設定される。再生面は、例えば、ホログラムを取得する際に用いられた CCD などの受光素子の受光面に平行な面である。この場合、 z 軸は、その受光面に直交する軸として設定される受光面の光軸（中心軸）であり、 z 軸上の位置を特定することによって、 z 軸に直交する 1 つの平面を指定できる。画像は、この z 軸に垂直な面に再生される。

【0030】

光波計算工程 (S5) では、再生光波 h^j, c^j を特定の再生面 $z = z_s$ から画像再生用の任意の再生面 $z = z_p$ まで伝搬させることにより、再生面 $z = z_p$ における再生光波 h^j, c^j を生成し、照明光 Q^j の再生光波 c^j に含まれる位相成分 $\phi^j = c^j / |c^j|$ を求める。

10

【0031】

位相調整工程 (S6) では、各入射方向毎に、除算によって物体光の再生光波から位相成分を除去した位相調整再生光波 h^j / ϕ^j を求める。位相調整再生光波 h^j / ϕ^j を求める操作は、各入射方向 j に対する再生光波 h^j の位相を、再生面 $z = z_p$ において互いに規格化する。物体光 O^j は物体の表面（反射型の場合）または内部（透過型の場合）の各点で生じる反射光が重なり合った光であり、各反射光の位相は、その反射光が発生する位置において、その反射光を発生させる照明光 Q^j の位相と同じになる。言い換えると、物体の各点で生じる各物体光は、その物体光が発生する各位置において、各物体光を発生させる各照明光と同位相である。そこで、この除算による位相調整の操作によって、再生面 $z = z_p$ において、各入射方向毎の物体光 O^j を表す光の位相が調整（規格化）される。

20

【0032】

工程 (S7) の光波総和工程では、位相調整再生光波 h^j / ϕ^j を各入射方向 $j, j = 1, \dots, N$ について加算して再生面 $z = z_p$ における光波である合成光波 $H_p = \sum h^j / \phi^j$ を求める。この加算は、各照明光 Q^j の z 軸方向の波数 k_z が所定の許容範囲に収まるように設定された入射方向 j について行われる。言い換えれば、ホログラム I_{OQR} は、画像を再生する位置を通る z 軸に対して許容範囲内で同じと見なされる偏角（天頂角）を有する照明光 Q^j の群によって取得される。加算は重み付けして行われる。例えば、加算データ数の逆数を重みとして用いる（この場合の結果は、加算データの平均値である）。合成光波 H_p は、照明光の方向を変えて記録した物体光（照明光も含まれている）を合成したものに相当するから、合成光波 H_p は、照明光の開口数 NA_Q と物体光の開口数 NA_O との和に等しい開口数 $NA = NA_Q + NA_O$ を有するものとなる。従って、この開口数 NA の値は、1 以上となり得る（後述）。物体光の開口数 NA_O は、物体光を記録した記録面すなわち受光素子の受光面の開口数である。

30

【0033】

工程 (S7) の光強度計算工程では、合成光波 H_p から、再生面 $z = z_p$ における画像 $S_p = |H_p|^2$ が再生される。画像 S_p は、モニタ画面に画像として表示することができる。すなわち、合成光波 H_p は、入射方向を変えて大開口数のホログラムとして記録した物体光と照明光のホログラムから物体光と照明光とを再生し、照明光の位相情報を使って物体光を計算機合成したものであり、開口数が 1 を超える光学系で物体光を記録したホログラムに相当する。開口数が大きいほど高分解能が得られることから、開口数が 1 を超える物体光を表す合成光波 H_p を用いることにより、従来の光学顕微鏡の分解能の限界を超える超高分解能の画像を再生できる。

40

【0034】

（詳細説明、データ取得工程 S0：透過型）

以下では、上記の各工程を詳述する。データ取得工程 (S0) は、例えば、図 2、図 3 に示す透過型のデータ取得装置 10 を用いて実行される。オフアクシスホログラム I_{LR} は、図 2 に示す光学系 3 で取得される。このデータ取得装置 10 は、インライン球面波参照光 L を生成する集光レンズ 30 と、オフアクシス球面波参照光 R を生成する微小球 M （例えば、金などの金属球）と、参照光 L, R の干渉縞の光強度を電気信号に変換して出力

50

する受光素子 4 と、受光素子 4 からの出力をホログラムとして記録する記録部 5 とを備えている。集光レンズ 30 と微小球 M には、それぞれ互いにコヒーレントな光 L, R が入射される。

【0035】

集光レンズ 30 は、受光素子 4 に対してインライン配置とされている。集光レンズ 30 に入射される光 L は、物体 6 が配置される位置（記録する物体光の発生位置）と想定される点 P1 で集光した後、広がって受光素子 4 に至るインライン球面波光 L となる。微小球 M は、受光素子 4 に対してオフアクシス配置とされている。微小球 M に照射される光 R は、その微小球 M の位置する点 P2 から広がって受光素子 4 に至るオフアクシス球面波光 R となる。参照光 L, R は、それぞれの球面波光源である点 P1, P2（仮想点光源）が互いに近接する状態で生成される。従って、参照光 L, R は、受光素子 4 の受光面の周辺部においても、空間周波数の低い干渉縞を生成する。このような光学系 3 により、大開口数のオフアクシスホログラム I_{LR} の記録が実現される。

10

【0036】

オフアクシスホログラム I_{OQL}^j のデータは、図 3 に示す光学系 3 で取得される。この光学系 3 は、上述の球面波参照光 L を生成する集光レンズ 30 に替えて、球面波照明光 Q を生成する集光レンズ 31 が備えられている。微小球 M と受光素子 4 の配置およびこれらによって生成される参照光 R は、上述の図 2 の場合と厳密に同じ条件に保たれている。集光レンズ 31 による集光位置には、透過画像を取得する半透明の物体 6 が配置されている。集光レンズ 31 には、その光軸に対して傾いた角度 θ を有する光 Q が入射される。角度 θ の光 Q を発生させるために、集光レンズ 31 の入り口側に、レンズの光軸に対して直交し、かつ互いに直交する 2 軸の回りに傾動する反射鏡を配置する。この反射鏡と集光レンズ 31 とは、物体に対する照明光 Q の入射方向を変える角度変更部を構成する。集光レンズ 31 の光軸に直交する方向から、集光レンズ 31 の入り口側の開口よりも大きな径を有する平行光を反射鏡に入射させる。傾動した位置の反射鏡によって反射した光の一部が、傾いた角度 θ を有する光 Q となって集光レンズ 31 の開口に入射される。

20

【0037】

光 Q と参照光 R は、互いにコヒーレントな光である。光 Q は、集光レンズ 31 を通過後、角度 θ の大きさに応じて、光軸位置から外れた点 P3（集光点）に集光し、その後広がって受光素子 4 に至る照明光 Q となる。照明光 Q は、集光点 P3 を有するので、種々の方向に伝搬する光の集まりである。また、集光レンズ 31 に入射する光 Q のレンズ光軸からの偏角（角度 θ ）を変化させることにより集光点 P の位置が光軸に直交する方向に略平行移動し、照明光 Q によって照明される物体 6 の局在領域（点 P4 で代表する）に入射する照明光 Q の入射方向が変化する（後述図 4 参照）。このような大きな径の平行光と反射鏡と集光レンズ 31 とを用いる角度変更部は、細い光ビームと回折格子等を用いる角度変更部に較べて、簡単な装置で容易に照明光 Q の方向を制御することができる。

30

【0038】

物体 6 の点 P4 は、照明光 Q によって照明され、そこから球面波状に物体光 O が発生する。物体光 O と、物体 6 を透過した照明光 Q と、参照光 R とは、互いに干渉して受光素子 4 の受光面で干渉縞を発生し、その干渉縞が大開口数のオフアクシスホログラム I_{OQR} として記録される。オフアクシスホログラム I_{OQR} は、物体光 O と照明光 Q の両方の情報を含むホログラムである。本画像再生方法は、画像再生に照明光 Q の位相情報を用いるので、オフアクシスホログラム I_{OQR} から照明光 Q の情報を取り出す必要がある。そこで、照明光 Q が上述の集光点 P3 を有する特性を生かして、その集光点において、広く分布した物体光 O や参照光 R から区別して照明光 Q が抽出される。

40

【0039】

集光レンズ 31 に対する光 Q の入射条件（上記の角度 θ など）を変えることにより、物体 6 に対する照明光 Q の入射方向 θ^j , $j = 1, \dots, N$ を変えた照明光 Q^j , $j = 1, \dots, N$ が得られる。これらの照明光 Q^j を用いて、各入射方向に対する複数のオフアクシスホログラム I_{OQR}^j , $j = 1, \dots, N$ が取得される。この入射方向 θ^j は、3 次

50

元極座標における2個の偏角（方位角と天頂角）をベクトル的に表現するものである。方位角を θ 、天頂角を ϕ で表すと、入射方向 \mathbf{j} は、 $\mathbf{j} = (\sin\phi \cos\theta, \sin\phi \sin\theta, \cos\phi)$ と表される。入射方向 \mathbf{j} を変化させることによって多方向からの照明が行われる。多方向からの照明光が集中する位置における物体の画像が、ホログラフィック顕微鏡による画像として再生される。

【0040】

上述の集光レンズ30, 31は、互いに同じものを用いてもよく、異なるものを用いてもよい。集光レンズ30による集光位置（点P1）と微小球Mの位置（点P2）とは、いずれも仮想点光源と考えられ、これらは互いに近接配置される。また、集光レンズ31による照明光Qの集光位置（点P3）も仮想点光源と考えられ、その点P3の周辺が物体光Oの発生位置である（局在領域、点P4）。これらの点P1～P4は、互いに近接した条件とされている。これにより、大開口数のホログラムを取得して、画像再生に用いることができる。逆に、所望の大開口数のホログラムを取得して画像再生ができるように、このような光学系3を構成すればよい。

10

【0041】

点P2～P4間の位置関係に対する条件を示す。ホログラムを記録する受光素子の受光面上の任意の1点から点P2、点P4を望む角を角度 α 、受光素子の画素間隔を d 、光の波長を λ とする。物体光Oと参照光Rがつくる受光素子上の干渉縞を観測可能とする条件は、干渉縞の間隔が画素間隔 d の2倍以上となる必要があることから、 $\lambda < 2d / \sin\alpha$ となる。また、物体光Oと参照光Rとを記録したホログラムをフーリエ変換して、物体光Oと参照光Rとを分離可能とするための条件から、参照光Rをどれだけオフアクシスとするかというオフアクシスの条件が決まる。これらにより、点P2の配置可能条件が決まる。

20

【0042】

（大開口球面波参照光R, Lについて）

大開口数の物体光をホログラムとして記録するためには、開口数の大きい参照光Rが必要不可欠である。上述の微小球Mを用いずに、例えば集光レンズを使って参照光Rを生成すると、物体光Oと参照光Rとを重ね合わせるためにハーフミラーが必要になり、ハーフミラーを使用すると開口数が1に近いような大開口数物体光を記録することが困難になる。本実施形態では、2枚のオフアクシスホログラム I_{LR} と I_{OR} を使って除算処理によって複素振幅インラインホログラム J_{OL} を求める。この処理により、参照光Rは打ち消し合って J_{OL} の中には現れない。従って、オフアクシスホログラム I_{LR} と I_{OR} を記録できるのであれば参照光Rの正確な空間分布は分からなくてもよい。これに対し、インライン参照光Lは物体光記録において基準になる光波であり、参照光Lとして空間分布が正確に求められる球面波を用いる。

30

【0043】

本実施形態では、半径が数十 μm 程度の微小球Mに細い光ビームを照射して開口数の大きい光として反射させ、この光をオフアクシス参照光Rとして利用する。微小球Mの使用によってハーフミラーが不要になり、記録物体光の開口数を1近くまで拡大することができる。一方、開口数の大きい集光レンズに平行光を入射して高精度の大開口数球面波を生成し、これをインライン球面波参照光Lとして用いる。球面波参照光Lは、微小球Mからの反射光を参照光Rとして、オフアクシスホログラム I_{LR} として一枚だけ記録される。

40

【0044】

微小球Mは、集光レンズとは異なり、大きな空間を占有することなく、オフアクシス球面波参照光Rを生成する。微小球Mは、その凸状の微小球面による光反射によって、ビーム状の光から球面波を生成する。微小球Mに替えて、凹状の微小球面による光反射によってビーム状の光から球面波を生成するようにしてもよい。また、ビーム状の光と微小球面に替えて、集光する光と小さな平面反射鏡とを用いて、その集光位置の近くで反射させて、オフアクシス球面波参照光Rを生成してもよい。なお、各オフアクシスホログラム I_j I_{OR} , $j = 1, \dots, N$ を取得する間、インライン球面波参照光Lのオフアクシスホ口

50

グラム $I_{L,R}$ を取得したオフアクシス球面波参照光 R の光学的条件を維持する必要がある。

【 0 0 4 5 】

(照明光 Q について)

物体中の注目点以外のある位置で集光する光を照明光 Q として用いると、ホログラムから再生される照明光 Q はその位置でスポット状に集光する。これに対してホログラムから再生される物体光 O は照明光 Q が集光しているその位置を広った状態で伝搬する。この照明光 Q の集光性を利用すると、物体光 O と照明光 Q とを効果的に分離して取り出すことができる。照明光 Q は、開口数の大きい集光レンズを使って平行光をスポット状に集光し、集光した光、または集光する光として構成され、これを使って物体 6 を照明する。照明光 Q の方向は、種々の方法で変えることができる。集光性を有する光で照明すると横方向の変位に対して光の伝搬方向を替えることができるので、照明光 Q を横方向に少し移動させるだけで、ある位置における照明光の方向を容易に変えることができる。上述したように、集光レンズ 3 1 に入射する平行光の方向を反射鏡を使って調整し、照明光の位置を移動させることができ、これにより照明光 Q の物体への入射方向を容易に変化させることができる。

10

【 0 0 4 6 】

図 4 (a) (b) は、上述の図 3 における光学系 3 による多方向照明と物体光の発生の様子を示す。図 4 (a) に示すように、逆円錐形状に集光する照明光を、互いに平行移動させると、各照明光が形成する円錐における互いに近い側の母線に沿った照明光 Q 1 , Q 2 は、物体 6 における下面側の領域 6 a に、互いに逆の入射方向で入射する。ここで、平行光から円錐形状に集光する照明光は、頂点を共有し互いに同軸かつ頂角の異なる無数の円錐状の光の集合である。照明光 Q 1 , Q 2 は、互いに平行移動した頂角が同じ円錐の母線に沿った光である。このような照明光 Q 1 , Q 2 等によるホログラムデータを用いた再生画像は、領域 6 a で最も鮮明で高解像度の画像が得られる。また、領域 6 a の上方の物体 6 の厚みの中も入射方向が互いに同様に变化した照明光 Q 1 , Q 2 等によって照明されて、物体光が発生しているので、画像の再生条件を変えることにより、その厚み部分の画像を再生して観察できる。

20

【 0 0 4 7 】

また、図 4 (b) の場合、照明光 Q 1 , Q 2 が物体 6 における上面側の領域 6 b に集中しており、この照明光 Q 1 , Q 2 に基づいて画像を再生すると、この領域 6 b で最も鮮明で高解像度の画像が得られる。しかしながら、領域 6 b の下方の物体 6 は、照明光 Q 1 , Q 2 によっては、何ら照明されてなく、物体光も発生していないので、これらの部分の画像を再生して観察することはできない。再生条件を変更することにより、照明光による照明位置と物体 6 との相対的な位置関係を変更した画像を再生でき、観察する位置を選択できる。また、ホログラムを取得する条件を変更することにより、図中の領域 6 c を観察領域とするように物体の相対的な位置を設定することもできる。さらに、領域 6 a や領域 6 b の位置を平行移動させて、各平行移動した位置でホログラムを取得することにより、物体 6 上を走査した広い再生画像を生成することができる。

30

【 0 0 4 8 】

図 5 は、多方向からの細いビーム状の照明光を生成する例を示す。この光学系 (角度変更部) は、平面内で互いに直交方向に形成された回折格子を有する回折素子 G r と、回折素子 G r の法線方向軸を囲むように、矩形 4 辺に配置して互いに対面させた 4 つの反射鏡 M r とを備えている。回折素子 G r に垂直に光源光 Q s が入射されると、4 つの 1 次回折光 Q 1 ~ Q 4 と、1 つの 0 次回折光とが発生する。回折素子 G r を通過して直進する 0 次回折光は遮蔽板で遮断する。回折光 Q 1 ~ Q 4 は、反射鏡 M r によって反射される。この光学系により、回折光 Q 1 ~ Q 4 の全てが、1 つの点 6 p を通過するように、また、対称的に設定できる。点 6 p の位置に物体を配置することにより、回折光 Q 1 ~ Q 4 を照明光 Q 1 ~ Q 4 として用いて、物体を 4 方向から照明することができる。照明光 Q 1 ~ Q 4 は、点 6 p を通る法線方向軸の回りの偏角 (方位角) が互いに 90 ° 間隔であって互いに

40

50

同一の天頂角 θ_j を有して成る入射方向 θ_j , $j = 1 \sim 4$ からの照明光である。また、この構成は、光源光 Q_s を太い平行光として点 P_1 の位置を集光レンズの入射側開口の位置とすることにより、上述の図 3 における光学系 3 の実現に適用できる。回折素子 G_r は、平面内に 1 方向のみに形成された回折格子とすることもできる。この場合、回折素子 G_r を、その法線方向軸回りに順次回転して、任意の方位角 θ_j を有する入射方向 θ_j からの照明光を生成できる。

【0049】

図 6、図 7 は上述の図 5 の光学系を応用したデータ取得装置 10 を示す。図 6 と図 7 の関係は、上述の図 2 と図 3 の関係に対応する。図 6 (a) (b) に示すデータ取得装置 10 の光学系 3 によって、インライン球面波参照光 L のオフアクシスホログラム $I_{L,R}$ のデータが取得される。データ取得装置 10 は、互いに対角方向にある 4 方向からの照明光 $Q_1 \sim Q_4$ のホログラムを取得できるように、受光素子 4 の他に、4 つの受光素子 $4_1 \sim 4_4$ を受光素子 4 の 4 隅に備えている。

10

【0050】

インライン球面波参照光 L は、集光点 P_1 を有する集光レンズ 30 によって生成される。各受光素子 $4, 4_1 \sim 4_4$ は、それらの光軸上、すなわち各受光素子の中心を通る法線方向の軸上に、点 P_1 が位置するように配置されて、参照光 L に対してインライン配置となっている。参照光 R は、点 P_2 位置の微小球 M によって生成される。点 P_1, P_2 は互いに近接して配置されている。参照光 L, R は、受光素子 $4, 4_1 \sim 4_4$ の各受光面を照射する大きな開口数を有する。各受光素子 $4, 4_1 \sim 4_4$ に入射する参照光 L のホログラム $I_{L,R}$ が、各受光素子 $4, 4_1 \sim 4_4$ ごとに取得される。集光レンズ 30 として開口数の大きなレンズが入手できない場合に、参照光 L の開口数を 1 に近づけることができるようにするには、直径が光の波長以下のピンホールを点 P_1 に配置すればよい。ピンホールは、例えば、ガラス上の金属薄膜のリソグラフィによって形成できる。参照光 L の開口数は、ピンホールの回折効果によって 1 に近づけることができる。

20

【0051】

図 7 (a) (b) に示すデータ取得装置 10 の光学系 3 によって、物体光 O と照明光 Q をそれぞれ記録したオフアクシスホログラム $I_{O,Q,R}^j, I_{Q,R}^j, j = 1 \sim 4$ のデータが取得される。この場合、例えば、照明光 Q_1 で物体 6 を照明すると、入射方向 θ_j ($j = 1$) についての物体光 O_1 と照明光 Q_1 のホログラム $I_{O,Q,R}^1$ が受光素子 4 で取得され、同時に、照明光 Q_1 のホログラム $I_{Q,R}^1$ が受光素子 4_1 で取得される。照明光 Q_1 のホログラム $I_{Q,R}^1$ は、照明光 Q_1 の情報を取得するためのものであるが、通常、ホログラム $I_{Q,R}^1$ 中に物体光 O_1 が混入している。そこで、各照明光 Q は、例えば、物体 6 を透過後に集光して広がるような集光点を有する細いビームを上述の図 5 における光源光 Q_s として用いて生成される。このような集光点を有する照明光 Q を用いることにより、その集光点において、広く分布した物体光 O や参照光 R から区別でき、後処理によってホログラムデータから照明光 Q を抽出することができる。また、物体光 O^i と照明光 Q^i のホログラム $I_{O,Q,R}^i$ は、細いビームを光源光 Q_s として用いることにより、実質的に照明光 Q^i を含まないホログラムとすることができる。

30

【0052】

(データ取得工程 S_0 : 反射型)

図 8 (a) (b) は、反射型のホログラフィック顕微鏡におけるデータ取得装置 10 を示す。オフアクシスホログラム $I_{L,R}$ のデータは、図 8 (a) に示す光学系 3 で取得される。光学系 3 は、受光素子 4 の正面に配置したハーフミラー HM と、インライン球面波参照光 L をハーフミラー HM で反射させて受光素子 4 に照射する集光レンズ 30 と、ハーフミラー HM を通してオフアクシス球面波参照光 R を受光素子 4 に照射する集光レンズ 32 と、を備えている。参照光 L の集光点 P_1 の近くに物体 6 を配置することが想定され、集光レンズ 30 の対向位置に照明光用の集光レンズ 31 を配置することが想定されている。参照光 L と参照光 R の各集光点 P_1, P_2 の位置、および物体 6 からの物体光の発生点の位置は、互いに近接する配置とされている。これにより、大開口数のホログラム取得が可

40

50

能となる。なお、インライン球面波参照光 L は、ホログラフィック画像処理の基準となる光である。従って、光学系 3 は、参照光 L に擾乱を与えないように、参照光 L がハーフミラー HM を通過しない構成となっている。

【 0 0 5 3 】

オフアクシスホログラム I^j_{OQR} のデータは、図 8 (b) に示す光学系 3 で取得される。この光学系 3 では、上述の集光レンズ 3 0 の位置に物体 6 が配置され、ハーフミラー HM を挟んで物体 6 に対向する位置に、照明光 Q 用の集光レンズ 3 1 が配置される。物体 6 の上には、照明光 Q の一部を反射させるカバーガラス 6 1 が配置されている。集光レンズ 3 1 に入射される光 Q を角度 θ で示すように左右に、より一般的には歳差運動的に、振ることにより、物体 6 を照射する照明光 Q の入射方向が変化する。各入射方向の照明光 Q によって照明される共通の局在領域が、画像を取得して再生される注目領域（観察領域）である。物体光 O は、ハーフミラー HM で反射して受光素子 4 に入射する。照明光 Q の一部は、カバーガラス 6 1 で反射されて受光素子 4 に入射する。受光素子 4 に至った物体光 O と照明光 Q は、参照光 R によって、共通の大開口数のオフアクシスホログラム I^j_{OQR} として記録される。オフアクシス球面波参照光 R は、これらのホログラムを記録する間、参照光 L のオフアクシスホログラム I_{LR} を取得した光学的条件に維持される。

10

【 0 0 5 4 】

カバーガラス 6 1 は、照明光 Q を正確に再生するために用いられる。カバーガラス 6 1 の平面の平坦度は、その表面の凹凸変化が照明光 Q の波長 λ 程度以下とされる。反射によって得られた照明光 Q のデータは、物体光 O が発生している位置における照明光となるようにデータ処理される。すなわち、照明光 Q は、カバーガラス 6 1 で反射された位置まで逆向きに伝搬され、その後、もとの照明光の進行方向に沿って媒質の屈折率を考慮しつつ、カバーガラス 6 1 の内部に伝搬される。

20

【 0 0 5 5 】

カバーガラス 6 1 に替えて、例えば、エレクトロクロミズムの原理に基づく調光ミラーデバイスを用いることにより、照明光 Q の情報を単独で、オフアクシスホログラム I^j_{OQR} として取得することができる。これにより、カバーガラス 6 1 や物体 6 の配置を操作することなく、調光ミラーデバイスによる反射と透光とを電氣的に切り替えて、照明光 Q の反射光だけを、物体光 O と分離して効率的に記録することができる。この場合、オフアクシスホログラム I^j_{OQR} から照明光 Q の情報を抽出する処理が不要となる。また、後述の偏光および偏光板を用いる方法と組み合わせて、物体光 O を照明光 Q から分離して効率的に記録することができる。また、カバーガラス 6 1 の上面には、例えば、光を通さない金属蒸着膜層などによって形成した、開口を有するマスクを設けることが好ましい。マスクの開口は、例えば、物体 6 の観察領域を限定し、かつ照明光 Q を通過させる大きさに制限する。このようなマスクにより、物体 6 の内部や非観察領域で発生する多重反射光などの擾乱光（バックグラウンド光）が受光素子 4 に入射するのを防止でき、高品質のホログラムを取得できる。

30

【 0 0 5 6 】

図 9 (a) (b) は、多方向からの細いビーム状の照明光 Q を用いる場合の、反射型のデータ取得装置 1 0 を示す。受光素子 4 に対向して物体 6 が配置され、物体 6 の表面には、照明光 Q の一部を反射するカバーガラス 6 1 が配置されている。この反射型のデータ取得装置 1 0 の光学系 3 は、上述の図 6 (a) (b)、図 7 (a) (b) に示した透過型の光学系 3 における照明光 Q 1 ~ Q 4 を、受光素子 4 の側方側から物体 6 の表面に入射させるように構成したものである。受光素子 4 によって、照明光 Q 1 ~ Q 4 による物体光 O と照明光 Q のホログラム I^j_{OQR} , $j = 1 \sim 4$ のデータが取得される。ホログラム I^i_{OQR} は、実質的に照明光 Q i を含まないホログラムとすることができる。

40

【 0 0 5 7 】

受光素子 4 の周辺に配置した受光素子 4 1 ~ 4 4 によって、照明光 Q 1 ~ Q 4 のホログラム I^j_{OQR} , $j = 1 \sim 4$ のデータが取得される。各受光素子 4 1 ~ 4 4 には、参照光 R と照明光 Q 1 ~ Q 4 の他に、物体光 O j が入射する。そこで、カバーガラス 6 1 で反射し

50

た後に集光する集光点を有する照明光を用いることにより、ホログラム I^j_{OQR} から照明光 Q^j の情報を抽出容易とする。また、照明光 Q を単独で記録するために、カバーガラス 61 に替えて、エレクトロクロミズムの原理に基づく調光ミラーデバイスを用いて、照明光 $Q_1 \sim Q_4$ のホログラム I^j_{OQR} , $j = 1 \sim 4$ を取得するようにしてもよい。

【0058】

(画像再生の工程 (S1 乃至 S7) の詳細)

以下では、ホログラムのデータ処理等について、数式表現を用いて説明する。各式中の係数、引数、添え字などは、一般的な表現と意味に解釈される。また、以下の各式において、位置座標 (x, y) の明示、各入射方向 j , $j = 1, \dots, N$ を区別する添え字 j などは、適宜省略される。ホログラムの取得と画像再生には、参照光 R, L 、物体光 O 、照明光 Q 、物体光 O と照明光 Q の混合光などが関与する。なお、数式の表記上、物体光 O と照明光 Q の混合光を混合光 T と表記する。同様に、このような混合光に関する各ホログラムについての表記を適宜改めて I_{OQR} を I_{TR} , J_{OQR} を J_{TR} , J_{OQL} を J_{TL} で表記する ($I_{OQR} = I_{TR}$, $J_{OQR} = J_{TR}$, $J_{OQL} = J_{TL}$ である)。

10

【0059】

そこで、受光素子 4 の受光面 (平面であると想定されている) における位置座標 (x, y) を用いて、参照光 $R(x, y, t)$, $L(x, y, t)$ 、および混合光 $T(x, y, t)$ を、それぞれ一般的な形で、下式 (1) ~ (3) のように表す。これらの光は、互いにコヒーレントな角周波数 ω の光である。受光素子 4 の表面における干渉縞の光強度 $I_{LR}(x, y)$, $I_{TR}(x, y)$ は下式 (4) (5) となり、これらがオフアクシスホログラムとして記録される。

20

【0060】

【数 1】

$$R(x, y, t) = R_0(x, y) \exp[i(\phi_R(x, y) - \omega t)] \quad (1)$$

$$L(x, y, t) = L_0(x, y) \exp[i(\phi_L(x, y) - \omega t)] \quad (2)$$

$$T(x, y, t) = T_0(x, y) \exp[i(\phi_T(x, y) - \omega t)] \quad (3)$$

$$I_{LR}(x, y) = L_0^2 + R_0^2 + L_0 R_0 \exp[i(\phi_L - \phi_R)] + L_0 R_0 \exp[-i(\phi_L - \phi_R)] \quad (4)$$

30

$$I_{TR}(x, y) = T_0^2 + R_0^2 + T_0 R_0 \exp[i(\phi_T - \phi_R)] + T_0 R_0 \exp[-i(\phi_T - \phi_R)] \quad (5)$$

【0061】

(フィルタリング工程 S1, S2)

上式 (4) (5) に空間周波数フィルタリングを適用して各式の右辺第 3 項のみを取り出す。空間周波数フィルタリングは、上式 (4) (5) を空間周波数の空間における表現にするフーリエ変換と、バンドパスフィルタによるフィルタリングと、その後の、逆フーリエ変換とによって行われる。この工程により、参照光 L を記録した複素振幅ホログラム J_{LR} 、および混合光 T を記録した複素振幅ホログラム $J_{TR} (= J_{OQR})$ が、下式 (6) (7) に得られる。これらはいずれもオフアクシスホログラムである。参照光 R, L が球面波とされていることにより、空間周波数空間において、光強度成分および共役像成分から、直接像成分を分離することができる。なお、受光素子 4 における画素が画素ピッチ d で 2 次元配列されているとすると、受光素子 4 を用いて記録可能なホログラムの最大空間周波数は、 $f_s = 1/d$ となる。

40

【0062】

【数 2】

$$J_{LR} = L_0 R_0 \exp[i(\phi_L - \phi_R)] \quad (6)$$

$$J_{TR} = T_0 R_0 \exp[i(\phi_T - \phi_R)] \quad (7)$$

50

【 0 0 6 3 】

(インライン化変調工程 S 3)

得られた J_{LR} によって J_{TR} を割ると、式 (6) (7) から参照光 R の振幅 R_0 と位相 ϕ_R とを取り除くことができる。この除算処理により、像再生に用いる混合光 T の複素振幅ホログラム J_{TL} が、下式 (8) に得られる。この割り算の処理は、空間ヘテロダイン変調の処理であり、かつ、強度に対する処理でもあり、オフアクシスの複素振幅ホログラム J_{TR} から、参照光 R の成分 (強度と位相の両方) を除去する処理である。数式上には現れていないが、参照光 R がオフアクシス球面波参照光 R であり、参照光 L がインライン球面波参照光 L であることにより、 J_{TL} は複素振幅インラインホログラム J_{TL} ($= J_{OQL}$) となり、これは大開口数を有するホログラムとなる。

10

【 0 0 6 4 】

【数 3】

$$J_{TL} = (T_0 / L_0) \exp[i(\phi_T - \phi_L)] \quad (8)$$

【 0 0 6 5 】

(照明光分離工程 S 4)

照明光分離工程 (S 4) では、物体光 O を含む複素振幅インラインホログラム J_{TL} に対し、インライン球面波参照光 L の位相 ϕ_L を用いて空間ヘテロダイン変調を行い、再生面 $z = 0$ における光波 g を生成する。その後、平面波展開を用いて前記光波 g を特定の再生面 $z = z_s$ に伝搬させる。これにより、複素振幅インラインホログラム J_{TL} から、特定の再生面 $z = z_s$ における物体光 O と照明光 Q の再生光波である物体光再生光波 h を生成する。再生光波 h は物体光 O と照明光 Q を含んでいる。その再生光波 h から、照明光 Q の再生光波 c を分離抽出する。特定の再生面 $z = z_s$ は、混合光 T の中の照明光 Q の光波が局在し、物体光 O が広がる位置の再生面であり、照明光 Q の集光点の位置が選ばれる。

20

【 0 0 6 6 】

空間ヘテロダイン変調のために、インライン球面波参照光 L の受光素子 4 の受光面における位相 $\phi_L(x, y)$ が、参照光 L が球面波であることを用いて、関数式の形で求められる。位相 ϕ_L を用いる空間ヘテロダイン変調は、上式 (8) に、 $\exp(i\phi_L(x, y))$ を乗じることで実施される。この空間ヘテロダイン変調の結果、下式 (9) に示す混合光 T の複素振幅インラインホログラム $g(x, y)$ が得られる。この複素振幅インラインホログラム $g(x, y)$ は、上述の再生面 $z = 0$ における光波 g に対応するものであり、以下では、このホログラムを光波 $g(x, y)$ または光波 g などと称する。インライン球面波参照光 L は、このように、オフアクシスホログラムから参照光 R の成分 (強度と位相の両方) を除去し、自らの位相も除去してオフアクシスホログラムからインラインホログラムを導出する基準光として重要な役割を担っている。また、球面波の位相 $\phi_L(x, y)$ は数学的に正確に求められるので、得られる光波 $g(x, y)$ も数学的に正確なものとなる。

30

【 0 0 6 7 】

【数 4】

$$g(x, y) = (T_0(x, y) / L_0(x, y)) \exp(i\phi_T(x, y)) \quad (9)$$

40

【 0 0 6 8 】

この光波 $g(x, y)$ は、受光素子 4 の受光面における混合光 T の波面、すなわち、受光面の法線方向にとられた z 軸における受光面の位置を $z = 0$ としたときの $z = 0$ における混合光の光波分布を表す。光波 $g(x, y)$ は、ホログラフィック顕微鏡による観測対象となる局在領域 (物体光の光源) からの光を記録したものであり、その空間周波数は、凸レンズによるニュートンリングのごとく、平面状の受光面の中心から離れるにつれて大きくなり端で最大になる。開口数が大きくなればなるほど、混合光を表す光波 $g(x, y)$ の空間周波数帯は広くなる。物体光の光源近くに局在した仮想点光源を有する球面波参

50

照光 R , L を用いてホログラムを記録することにより、平面波参照光を用いる場合よりも、ホログラムにおける空間周波数を低く押さえることができる。受光素子を望む開口半角を θ とすると $NA = \sin \theta$ であり、開口端部における干渉縞の間隔は $\lambda / \sin \theta$ すなわち λ / NA となる。従って、ホログラムの開口数 NA および光波長 λ を用いると、光波 $g(x, y)$ の最大空間周波数は NA / λ である。

【0069】

(平面波展開)

z 軸上の任意位置での光波(波面)は、以下に示す平面波展開法によって、受光面上の光波 $g(x, y)$ から再生できる。平面波展開法では、光波 g をフーリエ変換した結果である変換関数 G を求め、平面波の分散関係を満たす空間周波数 (u, v, w) および変換関数 G を用いて混合光 T を、平面波の重ね合わせによって再生する。電磁波に関するヘルムホルツ方程式の厳密解として球面波と平面波がある。この厳密解である平面波を用いて混合光 T 、および物体光 O や照明光 Q を記録したホログラムを展開すると、それらの光の正確な光波を再生できる。そこで、まず、上式(9)の $g(x, y)$ をフーリエ変換して、 $z = 0$ における変換関数 G を、下式(10)のように求める。この変換関数 G は、混合光 T の空間周波数スペクトルである。

10

【0070】

【数5】

$$G(u, v) = \iint g(x, y) \exp[-i2\pi(ux + vy)] dx dy \quad (10)$$

20

【0071】

次に、平面波の分散関係を満たす空間周波数 (u, v, w) および上記の変換関数 G を用いて、下式(11)に示すように、 $z = z_s$ における xy 平面上の混合光 T の光波 $h(x, y)$ を再生する。再生光波 $h(x, y)$ は、混合光 T の空間周波数スペクトルである変換関数 G の重み付けによって平面波を重ね合わせることににより求められる。再生位置は任意の値とすることができるので、 z_s は光波 $h(x, y)$ から照明光の光波 c を分離しやすい位置の(値)とする。ここで、 (u, v, w) における u, v はそれぞれ x, y 方向の空間周波数であり、 z 方向の空間周波数 w は、下式(12)に示すように、平面波の分散式から求められる。式(12)における λ は光波長であり、 n は、光路上の媒質の屈折率である。式(11)の光波 $h(x, y)$ は、受光素子4の受光面における境界条件としての光波 $g(x, y)$ を満たすヘルムホルツ方程式の厳密解である。

30

【0072】

【数6】

$$h(x, y) = \iint G(u, v) \exp[i2\pi w(u, v)z_s] \exp[i2\pi(ux + vy)] du dv \quad (11)$$

$$w(u, v) = \sqrt{(n/\lambda)^2 - u^2 - v^2} \quad (12)$$

【0073】

式(11)の光波 $h(x, y)$ は、その絶対値の2乗 $|h(x, y)|^2$ によって求めた画素毎の光の強度を電子ディスプレイに表示することにより、無歪の画像として見ることができる。そのような画像中の強度の大きな領域が照明光 Q の存在する領域として特定できる。そのような特定領域のデータを、光波 $h(x, y)$ のデータから抽出することにより、照明光 Q の光波 $c(x, y)$ を分離して取得できる。

40

【0074】

(光波計算工程 S5)

上述の $z = z_s$ における光波 $h(x, y)$, $c(x, y)$ を、画像再生用の任意の再生面 $z = z_p$ まで伝搬させた光波 $h(x, y)$, $c(x, y)$ を求める。その再生面 $z = z_p$ の位置で、光波 $c(x, y)$ の位相成分 ϕ_c を、 $\phi_c = c / |c|$ によって求める。光波 h

50

(x, y) は、上式 (11) を用いて、 $z = z_s$ から $z = z_p$ まで伝搬させることができる。光波 $c(x, y)$ を伝搬させるために、光波 $c(x, y)$ から、上式 (10) の $G(u, v)$ と同様の変換関数 $B(u, v)$ を下式 (13) によって求める。また、 $z = z_p$ まで伝搬させた光波 $h(x, y)$ 、 $c(x, y)$ は、それぞれ下式 (14) (15) となる。下式 (14) の光波 $c(x, y)$ を用いて、位相成分 $\phi = c / |c|$ が求められる。

【0075】

【数7】

$$B(u, v) = \iint c(x, y) \exp[-i2\pi(ux + vy)] dx dy \quad (13)$$

10

$$h(x, y) = \iint G(u, v) \exp[i2\pi\omega(u, v)(z_p)] \exp[i2\pi(ux + vy)] du dv \quad (14)$$

$$c(x, y) = \iint B(u, v) \exp[i2\pi\omega(u, v)(z_p - z_s)] \exp[i2\pi(ux + vy)] du dv \quad (15)$$

【0076】

(位相調整工程 S6)

この工程は、大開口の画像を再生するための重要な工程である。位相調整工程 (S6) は、混合光 T (物体光 O と照明光 Q との混合光) の光波 $h(x, y)$ から、照明光 Q の光波 $c(x, y)$ の位相成分を除去する工程である。位相成分の除去は、光波 $h(x, y)$ を位相成分 ϕ によって除算して、位相調整再生光波 h / ϕ 、すなわち、 $h / (c / |c|)$ を求めることで実施される。上述の各工程 (S2 乃至 S6) の処理は、各入射方向 j 、 $j = 1, \dots, N$ の光について行われる。このことを明示して位相調整再生光波 h / ϕ を表示すると、 h^j / ϕ^j 、 $j = 1, \dots, N$ となる。

20

【0077】

(光波総和工程と光強度計算工程 S7)

これらの工程において、画像再生用の再生面 $z = z_p$ における光波である合成光波 H_p および画像 S_p が、下式 (16) (17) によって生成される。

【0078】

【数8】

30

$$H_p(x, y, z_p) = \sum_{j=1}^m \frac{h^j}{c^j / |c^j|} \quad (16)$$

$$S_p(x, y, z_p) = |H_p(x, y, z_p)|^2 \quad (17)$$

【0079】

画像 S_p は、画素毎の光の強度を電子ディスプレイに表示することにより、無歪の画像として見ることができる。無歪の画像は、物体光 O (混合光 T) の発生位置と受光素子 4 との間に結像レンズを設けないことによって実現される。式 (14) (15) における $z = z_p$ の値を変えることにより、その位置での画像を再生して表示することができる。

40

【0080】

図 10、図 11 は、上述の画像再生方法における、開口数の拡大を周波数空間において概念的に示す。これらの図は、上述の図 6 (a) (b)、図 7 (a) (b) に示した、広がり少ないビーム状の照明光 $Q_1 \sim Q_4$ を用いて透過型の装置による画像再生を想定している。照明光 Q は、真四角の受光素子 4 の対角線方向 (入射方向 j 、 $j = 1 \sim 4$) から照射されている。ここで、受光素子 4 の開口数を NA_o 、照明光 Q の斜め入射に基づく開口数を NA_q として、波長を λ を用いて、 $a = (NA_o) / \lambda$ 、 $b = (NA_o + NA_q) / \lambda$ を定義する。周波数空間 uv において、 $\pm a$ の領域は、受光素子 4 によって記録できる空間周波数領域である。

【0081】

50

図10(a)(b)は、上述の位相調整工程(S6)の処理を行う前の、照明光Q1~Q4と物体光O1~O4(これらの物体光は、一般に照明光も含む混合光である)の周波数分布を示す。照明光Q1~Q4は、受光素子4の外周の受光素子41~44によって記録されており、位相調整前の図10(a)において、±aの領域の外部に現れている。また、物体光O1~O4は、受光素子41~44の配置中心にある受光素子4によって記録されており、位相調整前の図10(b)において、±aの領域に現れている。これらの物体光O1~O4は、物体に対して斜め入射した照明光Q1~Q4によって発生した光であり、物体を正面から照明したときには得られない光である。これらの物体光O1~O4は、斜め入射の照明光Q1~Q4によって空間周波数が変調された光となっている。

【0082】

図11(a)(b)に示すように、位相調整工程(S6)の処理を行った後では、斜め入射照明光による周波数変調によって画像の空間周波数がシフト、すなわち復調されている。位相調整後の図11(a)に示すように、位相調整を行うと、斜め入射の照明光Q1~Q4は中央の低周波数側に移動する。また、物体光O1~O4については、位相調整後の図11(b)に示すように、h/による位相調整によって、画像の空間周波数は復調され、各物体光O^jの空間周波数は、それぞれ対応する照明光Q^jの位相に基づいて、対角方向に、高周波数領域に向けて移動する。

【0083】

画像の空間周波数領域が拡大されることにより、高分解能の画像が得られる。これを開口数の観点から見ると、位相調整後の光波h^j/の加算によって、物体光の開口数は(N_{A_Q} + N_{A_O})に拡大されることになる。少なくとも2方向からの照明光によって、部分的に解像度を向上できる。より多くの入射方向からの照明光を用いることにより、空間周波数空間をより満遍なく物体光のデータで覆うことができ、実空間における各方向の解像度を満遍なく向上させることができる。また、光波h^j/を多重に加算することにより、スペックルの影響を減らしたり、感度を上げたりすることができる。

【0084】

上述の光波h^j/の加算は、観察する物体光Oの発生位置において各照明光Qのz軸方向の波数k_zが所定の許容範囲内で同じとなる条件を満たす照明光Q^jについて行われる。各照明光Q^jの波数k_zを同じとするには、各照明光Q^jの入射方向θ^j = (θ_z^j, θ_r^j)における方位角θ_r^jは任意であるが、天頂角θ_z^jを同じにする必要がある。このような条件により、加算結果であるh^j/の位相におけるk_z(z - z_p)に起因するz依存性をなくすることができる。このz依存性は、焦点深度に関連する。従って、焦点深度の許容範囲に基づいて、天頂角θ_zの振れ幅の許容範囲が設定される。なお、物体光波h^jには、再生面z = z_p以外の空間で発生した物体光の情報も含まれている。

【0085】

(多方向入射照明光を用いた高分解能画像の記録と再生)

ここで、開口数と分解能について説明する。波長λの正面入射の照明光、つまり入射角θ_i = 0の照明光を間隔dの回折縞(回折格子として作用する)に入射すると、回折角θ_rと波長λおよび間隔dとの間に関係式、d・sin θ_r = λが成り立つ。回折縞の空間周波数uは、u = 1/d = sin θ_r/λである。開口数がN_{A_O}である正方形の受光素子で回折光を記録する場合、記録可能な回折縞の空間周波数帯域は、-(N_{A_O})/λ < u < (N_{A_O})/λと表せる。この空間周波数帯域に対する理論分解能Δxは、Δx = λ/(2N_{A_O})である。受光素子の開口数はN_{A_O} < 1であるので光学的な分解能限界はλ/2となる。これは、伝搬する物体光を開口数N_{A_O}のホログラムとして記録したときの分解能限界を表す。

【0086】

照明光の入射角θ_iをゼロ以外とする場合には、d・sin θ_i + d・sin θ_r = λの関係式から、回折縞の空間周波数uは、u = 1/d = (sin θ_i + sin θ_r)/λである。従って、開口数N_{A_O}の正方形受光素子で記録する場合、記録可能な回折縞の空間周波数帯域は、(sin θ_i - N_{A_O})/λ < u < (sin θ_i + N_{A_O})/λと表せ

10

20

30

40

50

る。つまり、斜め入射の照明光によって周波数シフトが発生する。照明光 Q の開口数を NA_Q で表し、照明光の入射角 θ_i を $-NA_Q < \sin \theta_i < NA_Q$ の範囲で変化させると、記録可能な回折縞の空間周波数帯域を、 $(-NA_Q - NA_O) / \lambda < u < (NA_Q + NA_O) / \lambda$ の範囲まで拡大することができる。

【0087】

空間周波数 u が、 $-(1/\lambda)$ 以下および $(1/\lambda)$ 以上の波は、入射角 $\theta_i = 0$ の照明光の場合には伝搬できないエバネッセント波となるが、斜め入射照明光の場合には照明光によって周波数変調されて伝搬可能な波に変換される。上式中の $(NA_Q + NA_O)$ は照射光の方向変化によって拡大された結果の開口数を表し、各開口数 NA_Q 、 NA_O は、通常、いずれも 1 より小さく、 $NA_Q < 1$ 、 $NA_O < 1$ であるが、照明光の方向を最大限に変えて物体光を記録すると開口数を最大 2 近くまで拡大できる。また、記録可能な最大の空間周波数帯域は、 $-2/\lambda < u < 2/\lambda$ となる。この空間周波数帯域の幅から決まる分解能限界は $\lambda/4$ となる。このことは、照明方向を変えながら物体光を記録することにより、分解能限界を 2 倍近くまで高くできることを示す。

10

【0088】

記録された物体光 O は、物体内部の各点で照明光 Q によって生じた光が重なり合った光であり、各光の位相は、その光が発生する位置において、照明光 Q の位相と同じになる。このことを利用して各照明光 Q 毎に、物体光 O の再生光波から位相成分を除去した位相調整再生光波 $h / (c / |c|)$ を求める。この位相調整操作は、各照明光 Q に対する物体光 O の位相を互いに規格化する。この除算による位相調整の操作によって、各照明光 Q に対して再生面上で生じた物体光の位相が調整される。また、発生時に斜め入射の照明光 Q によって周波数変調されて物体光が生じ、記録され、記録された物体光はこの位相調整の操作によって周波数復調される。復調に伴う周波数シフトによって高周波成分が生じる。

20

【0089】

位相調整再生光波 $h / (c / |c|)$ を各照明光 Q について加算して再生面における合成された物体光を求めると、物体光 O を構成する各光の位相は、その光が発生する位置において照明光 Q の位相と一致しているので、再生面近傍で発生する物体光は位相調整後の加算によって強くなる。また、位相調整再生光波 $h / (c / |c|)$ を各照明光 Q について加算することによって、合成された物体光の空間周波数帯域は広くなり、その結果として、合成された物体光から再生される画像の分解能は高くなる。図 12 は、これらの画像再生方法の処理の流れをまとめたものである。

30

【0090】

本実施形態の高分解能ホログラム画像用のデータ処理方法、すなわち、高分解能ホログラム画像再生方法および高分解能画像用のホログラムデータ取得方法によれば、球面波参照光と多方向照明光とで記録した複数の物体光を各照明光の位相情報によって調整して加算するので、物体光の開口数に照明光の開口数を加算した大開口数条件で画像を再生できる。大開口数条件での画像再生により、従来の光学顕微鏡の分解能を超えることができる。また、物体光と照明光とは、原理的に、透過型と反射型のいずれでもホログラムに記録できるので、透過型と反射型のいずれの顕微鏡も実現できる。

40

【0091】

結像レンズの開口数は 1 より小さく、通常の光学顕微鏡の分解能は光の半波長を超えることはできない。照明光の方向を変えて物体光を記録すると、より高い次数の回折光まで記録できる。また、通常方法で記録される各物体光を複数枚用いることによって、分解能限界を超えることはできない。これらの事実はよく知られている。本実施形態は、この限界を超えて超高分解能を達成する方法として、照明光の方向を変えて、複数枚のホログラムに物体光を照明光と共に正確に記録し、記録した複数枚のホログラムの物体光を使い、かつ、照明光の位相情報を用いて、開口数を拡大した物体光を合成する。本実施形態においては、レンズレスホログラフィを用いて、物体光と照明光とを大開口数のホログラムとして記録し、得られたホログラムから照明光を分離し、複数の照明光再生光波と物体光再生光波を使って開口数が 1 を超える物体光を計算機合成している。このように合成した

50

物体光を使うことにより、高分解能ホログラム画像を再生することができる。

【0092】

(複数受光素子を用いた高開口数での記録)

図13、図14は、複数の受光素子4を用いて物体光を記録する例を示す。通常市販のCCD等の受光素子は、レンズを通して正面からの光を平面の受光面で受光することが想定されているため、受光面への斜め入射光に対して感度が落ちるという問題がある。そこで、複数の受光素子を用いることにより、斜め入射光に対する感度の問題を回避することができる。各受光素子4による記録画像は、座標変換等を含むデータ処理によって、例えば、正面の受光素子4の受光面を画像再生用の再生面 $z = z_p$ として再生して合成することができる。

10

【0093】

(複数受光素子間の較正方法)

図15は、上述の図6、図7、図9、および図13、図14に示したような、複数の受光素子を用いて物体光Oや照明光Qを記録した場合の各データ間の較正処理について示す。このようなデータ取得装置の構成の場合、各受光素子の光軸(受光素子の中心法線)上にインライン球面波参照光Lの基準点(集光点P1)が位置するように、各受光素子が配置される(#1)。次に、物体配置位置に、位置と平面を決定できるパターンを有する較正用物体、例えば、ガラス面上の中央に三角形に配置した微小な点パターンを配置する(#2)。中央正面の受光素子の受光面に平行に配置する。その後、較正用物体について、上述の図1におけるデータ取得工程(S0)と同様に、各受光素子によって、ホログラム

20

【0094】

その後、入射方向ループ $j = 1, \dots, N$ 、受光素子ループ $j_2 = 1, \dots, N_2$ (工程#4~#10)において、受光素子の位置すなわち基準点P1からの距離、および、受光素子の2軸方向の傾き角度 θ_1, θ_2 が決定される。工程(#4~#7)では、各受光素子の中心と基準点P1との距離 r を決定する。まず仮の距離 r_0 を設定し(#4)、較正用物体上の点パターンの1つに合焦させ(#5、#6)、距離 r を決定する(#7)。

【0095】

工程(#8、#9)では、距離 r が決定された点パターンを不動点として、再生画像を回転角度 α_1, α_2 で2軸方向に回転させ、画像全体で合焦した角度を、受光素子の傾き角度 θ_1, θ_2 として決定する。距離 r と角度 θ_1, θ_2 とが、受光素子配置情報として記録される(#10)。受光素子配置情報(r, θ_1, θ_2)は、各受光素子の画像データを、互いに同一平面内で重ね合わせて合成する際の位置調整情報として用いられる。

30

【0096】

(画像の高分解能化)

図16、図17(a)(b)は画像の高分解能化、すなわち、画像の面内分解能の向上について示す。この画像の高分解能化によって、画像の拡大が可能になる。高分解能化は、複素振幅インラインホログラム J^j_{OQL} のサンプリング間隔を細分化して実質的にサンプル数を増やすことで実現される。上述した複素振幅インラインホログラム J^j_{OQL} は、球面波参照光R、Lを用いて、また、結像レンズを用いることなく求められている。従って、空間サンプリング間隔を細分化して光波長程度まで小さくしたホログラムを作成し、そのホログラムから画像を再生して拡大しても歪みは発生しない。そこで、図16に示すように、この高分解能化の処理工程は、実質的に画素数を増やす画素数増大工程(S4a)と、その後の照明光分離工程(S4b)と、を備えている。これらの工程は、図1に示した照明光分離工程(S4)における、分解能についての改良版になっている。

40

【0097】

画素数増大工程(S4a)では、図17(a)(b)に示すように、受光素子4の画素ピッチ d に対応する空間サンプリング間隔 d を有する複素振幅インラインホログラム J^j_{OQL} に対して、空間サンプリング間隔 d を細分化して空間サンプリング間隔 d_0 とする。その後、細分化によって生じた新たなサンプリング点に対してデータ補間を行って実質的

50

に画素数を増やす。データ補間の方法として、画像処理における周知の3次式によるデータ補間や sinc 関数によるデータ補間を用いることができる。データ補間として sinc 補間を用いれば、3次式を用いた補間に比べて数値計算に時間がかかるが、より正確な結果を得ることができる。複素振幅インラインホログラム $J^j_{o, q, L}$ (別の表記で $J^j_{T, L}$) に対してデータ補間によって画素数を増やした結果を複素振幅インラインホログラム $K^j_{o, q, L}$ (別の表記で $K^j_{T, L}$) と表すことにする。なお、受光素子4の画素ピッチ d は、画素の配列方向 (x, y 方向) で互いに異なってもよく、空間サンプリング間隔も画素の配列方向で互いに異なるものとして行うことができる。

【0098】

照明光分離工程 (S4b) では、ホログラム $J^j_{o, q, L}$ ($J^j_{T, L}$) の代わりにホログラム $K^j_{o, q, L}$ ($K^j_{T, L}$) を用いて、図1に示した照明光分離工程 (S4) と同様の処理が行われ、再生光波 h^j の生成、照明光の再生光波 c^j の抽出分離が行われる。これらの再生光波 h^j, c^j を用いて再生される画像は、分解能が d/λ 倍に高められた画像であり、歪みなしで倍率 d/λ 倍に拡大された画像を得ることができる。画像の大きさ (絶対寸法) は、画素ピッチ d を物差しとして計測される。

【0099】

(画像再生の高速化)

図18、図19(a)(b)、図20(a)(b)(c)は、画像再生時の計算量を削減できる高速化処理について示す。高速化処理は、図18に示すように、分割工程 (S21)、合成工程 (S22)、変換関数生成工程 (S23) によって行われる。これらの処理の全体は、上述の式 (10) の変換関数 $G(u, v)$ の生成についての、計算速度の改良版である。この計算速度の高速化は、上述の式 (13) の再生光波 c からの変換関数 $B(u, v)$ の生成についても同様に適用できる。この高速化は、上述の画素数増大に起因する要請に答えるものである。上述のように、複素振幅インラインホログラム $J^j_{o, q, L}$ (すなわち $J^j_{T, L}$) から高分解能な再生光を再生することができるので、平面波展開を用いて高分解能画像を再生するために、空間サンプリング間隔を光波長程度まで狭くする。このとき、例えば、高速フーリエ変換 (FFT) を用いて、妥当な計算時間のもとで数値計算が可能となる範囲に、サンプリングデータ数を抑える必要がある。逆に、計算時間の短縮が図られるならば、サンプリングデータ数をさらに増加させることができ、より高分解能で無歪画像を再生することができる。

【0100】

この高速化は、互いに周波数帯域の異なるデータは波の重ね合わせによって互いに足し合わせた状態で計算処理をすることができる、という原理に基づく。異なる周波数帯域に記録されたそれぞれの情報は空間的に重ねても失われずに保存される。このことを利用することにより、周波数帯域の広いホログラムを分割して重ねて、広帯域でコンパクトな「微小ホログラム」を作成することができる。また、複素振幅インラインホログラム $J^j_{o, q, L}$ ($J^j_{T, L}$) や上式 (9) の複素振幅インラインホログラムとしての光波 $g^j(x, y)$ は、これらを分割しても、その分割した各領域に画像を再生するための情報を保持している。ここで改めて、光波 $g^j(x, y)$ をホログラム $g^j(x, y)$ と呼ぶ。

【0101】

図19(a)は、幅 D のホログラム $g^j(x, y)$ を幅 d の微小ホログラム g_1, g_2, g_3 に分割する様子を示す。このホログラム $g^j(x, y)$ は、1枚で再生像 60 を再生できる。このようなホログラム $g^j(x, y)$ を、図19(b)に示すように、幅 d だけずらしながら重ねたホログラムは、幅 D の周期を有する周期的なホログラムになり、多数の同じ再生像 60 を幅 D の間隔ごとに再生することができる。計算点数は、重ね合わせた微小ホログラム g^j_i の枚数の逆数分に圧縮される。つまり、 n 枚重ねると、計算量は、 $1/n$ になる。照明光複素振幅インラインホログラム $b^j(x, y)$ についても同様である。

【0102】

そこで、分割工程 (S21) において、図20(a)に示すように、例えば、ホログラ

10

20

30

40

50

$\Delta g^j(x, y)$ を幅 Δ の数枚の微小ホログラム g^j_i に分割し、図 20 (b) (c) に示すように、各微小ホログラム g^j_i を互いに重ね合わせて合成微小ホログラム G^j を再生する。この合成微小ホログラム G^j に対して、上述の式 (10) (11) (12) に基づく計算を行えば、計算時間の短縮が図られる。

【0103】

分割工程 (S21) では、ホログラム g^j を分割して複数の微小ホログラム g^j_i , $i = 1, \dots, n$ を生成する。合成工程 (S22) では、微小ホログラム g^j_i , $i = 1, \dots, n$ を互いに重ねて合成した合成微小ホログラム G^j を求める。変換関数生成工程 (S23) では、合成微小ホログラム G^j をフーリエ変換して変換関数 $G^j(u, v)$ を求める。フーリエ変換による変換関数 $G^j(u, v)$ を一度求めておけば、任意の距離 $z = z_p$ における光波 $h^j(x, y, z_p)$ は式 (11) より求められる。光波 $c^j(x, y)$ についても、同様に分割して、合成微小ホログラム G^j を求め、合成微小ホログラム G^j をフーリエ変換して上式 (13) の変換関数 $B^j(u, v)$ を求めることができる。

10

【0104】

このような画像再生方法によると、FFT を用いた数値計算により、自由焦点画像を容易かつ精度良く、高速に再生することができる。微小ホログラム g^j_i の幅 Δ は、ホログラム $g^j(x, y)$ の大きさ (幅 D) や形状とは無関係に再生画像の大きさに合わせて設定することができる。分割の幅 Δ が、再生画像の大きさより小さくなると、再生像が隣同士で重なって再生される。従って、例えば、被写体の寸法が 0.5 mm ならば、幅 Δ は 0.5 mm より大きな寸法にする。

20

【0105】

(受光素子のダイナミックレンジの確保)

図 21 は、反射型の場合のデータ取得方法においてホログラム I^j_{OQR} を記録する際に、受光素子 4 が受光する物体光 O と照明光 Q の両者の光強度を光の偏光を用いて調節することについて示す。物体 6 から放たれる物体光 O は一般に広い指向性を持ち、また、発生効率が低いので、受光素子 4 に到達する物体光 O の強度は照明光 Q に比べて小さくなる。弱い物体光 O を照明光 Q と同時に記録するためには、受光素子 4 に到達する照明光 Q を大幅に減衰させて物体光 O と同じ程度になるまで光強度を小さくする必要がある。

【0106】

そこで、照明光 Q を方向 Pq に偏光させ、参照光 R を方向 Pr に偏光させ、受光素子 4 に入射する照明光 Q と参照光 R とを互いに直交する偏光状態とする。受光素子 4 の前方には、偏光板 PP を配置する。共通ホログラム I^j_{OQR} の記録は、物体光 O と照明光 Q の反射光とを偏光板 PP を透過させることによって照明光 Q の反射光を減衰させた状態で行う。偏光板 PP は方向 Pp に偏光した光を透過させるものとする。偏光板 PP の配置した位置において、方向 Pp と照明光 Q の偏光の方向 Pq との角度を直角に近づけることにより、参照光 R は減衰させずに、照明光 Q だけを大きく減衰させることができる。また、物体光 O は、その発生時にランダムな偏光状態になると考えられるので、偏光板 PP の影響を受けないと考えられる。参照光 R は、本来、独立にその強度を調整できる。従って、参照光 R と物体光 O に対して照明光 Q の強度を適切に調整した状態の光を、受光素子 4 に入射させることができる。このような偏光と偏光板 PP とを用いるデータ取得方法により、物体光 O の光強度を保ちながら、受光素子 4 のダイナミックレンジを確保することができ、鮮明なホログラムを記録することができる。

30

40

【0107】

(ホログラム画像再生方法の他の実施形態)

図 22、図 23 は、ホログラム画像再生方法の他の実施形態を示す。この実施形態は、データ取得工程 (S30) において、照明光 Q^j のホログラム I^j_{QR} のデータが、物体光 O^j から分離して取得される場合を想定している。物体光 O^j のデータは、照明光 Q^j を含まないホログラム I^j_{OR} と、含むホログラム I^j_{OQR} のいずれでもよい。ここでは代表して I^j_{OR} によって説明している。物体光 O^j から分離した、照明光 Q^j 単独のホログラム I^j_{QR} は、例えば、反射型の場合に、物体 6 の全面においたカバーガラス 6

50

1 や、エレクトロクロミズムの原理に基づく調光ミラーデバイスを用いることにより取得できる。照明光 Q^j 単独のホログラム I^j_{OQR} が得られることにより、上述の図 1 に示した照明光分離工程 (S4) の処理による、オフアクシスホログラム I^j_{OQR} から照明光 Q の情報を抽出する処理が不要となる。言い換えれば、照明光 Q^j のホログラム I^j_{OQR} のデータが得られない場合に、オフアクシスホログラム I^j_{OQR} から照明光 Q の情報を抽出する照明光分離工程 (S4) の処理を行えばよい。

【0108】

フィルタリング工程 (S31) は、図 1 におけるフィルタリング工程 (S1) と同様である。フィルタリング工程 (S32) では、ホログラム I^j_{OR} , I^j_{QR} の両方について処理が行われて、それぞれ複素振幅オフアクシスホログラム J^j_{OR} , J^j_{QR} が生成される。インライン化変調工程 (S33) では、ホログラム J^j_{OR} , J^j_{QR} から、それぞれ参照光 R 成分を除去した複素振幅インラインホログラム J^j_{OL} , J^j_{QL} が生成される。

10

【0109】

光波計算工程 (S32) では、照明光分離工程を経ることなく、画像再生用の任意の再生面 $z = z_p$ において各ホログラム J^j_{OL} , J^j_{QL} から再生光波 h^j , c^j の生成、位相成分 $\phi^j = c^j / |c^j|$ の算出が行われる。位相調整工程 (S35) および光波総和と光強度計算の工程 (S36) は、図 1 の位相調整工程 (S6) および光波総和と光強度計算の工程 (S7) と同様である。図 23 は、これらの画像再生方法の処理の流れをまとめたものである。照明光 Q^j の再生光波 c^j については、ホログラム J^j_{QL} から $z = 0$ での再生光波 b^j の生成、変換関数 B^j の生成が、上式 (9) (10) の g , G と同様に行われる。その後、最終的に、画像再生用の再生面 $z = z_p$ における再生光波 c^j が生成される。

20

【0110】

(ホログラフィック顕微鏡)

図 24 は本発明の一実施形態に係るホログラフィック顕微鏡 (以下、顕微鏡 1 という) を示す。顕微鏡 1 は、入射方向を替えた照明光 Q を用いて微小物体 6 のホログラムを取得するデータ取得部 10 と、データ取得部 10 によって取得されたホログラムから画像を再生する画像再生部 20 と、を備えている。顕微鏡 1 は、さらに、データ取得部 10 および画像再生部 20 を制御する制御部 11 と、FFT 等の計算用プログラム、制御用データ等を記憶するメモリ 11a とを備えている。データ取得部 10 は、光源 10a と、角度変更部 2 と、光学系 3 と、受光素子 4 と、記録部 5 とを備えている。光源 10a は、コヒーレント光を放射するレーザである。角度変更部 2 は、光学系 3 と組み合わせて用いられ、物体に対する照明光 Q の入射方向 j , $j = 1, \dots, N$ を順次、同時、または任意の方法で変更する。

30

【0111】

光学系 3 は、角度変更部 2 と組み合わせられて、光源 10a が放射する光から照明光 Q^j , $j = 1, \dots, N$ 、オフアクシス球面波参照光 R 、およびインライン球面波参照光 L を構成し、これらの光と照明光 Q によって照明される微小物体 6 から放たれる物体光 O とを伝搬させる。受光素子 4 は、1 または複数用いられ、それぞれ光強度を電気信号に変換して記録部 5 に出力する。記録部 5 は、物体光 O と照明光 Q の混合光 T とオフアクシス球面波参照光 R との干渉縞 I_{OQR} 、オフアクシス球面波参照光 R とインライン球面波参照光 L との干渉縞 I_{LR} 等を、光源 10a が放射する各入射方向 j , $j = 1, \dots, N$ の照明光毎に、受光素子 4 を用いてホログラム I^j_{OQR} , I^j_{LR} , $j = 1, \dots, N$ とし記録する。ホログラムのデータは、メモリ 11a やデータベース DT1 に保存される。他のホログラム I^j_{OR} , I^j_{QR} や、複数の受光素子の配置を校正するためのホログラムデータ等も同様に取得保存される。

40

【0112】

画像再生部 20 は、フィルタリング部 21 と、インライン化変調部 22 と、光波計算部 23 と、照明光分離部 24 と、画像計算部 25 と、表示部 26 と、を備えている。フィル

50

タリング部 2 1 は、記録部 5 によって記録されたホログラム I^j_{OQR} , I^j_{LR} 等に空間周波数フィルタリングを適用して、それぞれ、物体光 O^j と照明光 Q^j を記録した複素振幅オフアクシスホログラム J^j_{OQR} 、およびオフアクシス球面波参照光 R を記録した複素振幅オフアクシスホログラム J^j_{LR} 等を生成する。

【0113】

インライン化変調部 2 2 は、フィルタリング部 2 1 によって生成された各複素振幅オフアクシスホログラム J^j_{OQR} 等のデータを、フィルタリング部 2 1 によって生成された複素振幅オフアクシスホログラム J^j_{LR} のデータでそれぞれ除算することにより、参照光 R 成分を除去した複素振幅インラインホログラム J^j_{OQL} 等を生成する。

【0114】

光波計算部 2 3 と照明光分離部 2 4 とは、光波の再生と伝搬の計算、および照明光の位相を用いた位相調整の処理を行い、照明光分離部 2 4 は、さらに、物体光 O と照明光 Q の混合光 T から照明光の光波 c の分離を行う。すなわち、光波計算部 2 3 は、図 1 に示した光波計算工程 (S 5) の処理、図 2 2 に示した光波計算工程 (S 3 4) の処理を行い、照明光分離部 2 4 は、図 1 に示した照明光分離工程 (S 4) の処理を行う。

【0115】

光波計算部 2 3 と照明光分離部 2 4 とは、これらの処理を高速、高分解能で行うために、画素数増大部 2 3 a と、空間変調部 2 3 b と、分割部 2 3 c と、合成部 2 3 d と、を備え、任意位置で光波を生成するために平面波展開部 2 3 e を備えている。画素数増大部 2 3 a は、複素振幅インラインホログラム J^j_{OQL} 等の空間サンプリング間隔を細分化し、細分化によって生じた新たなサンプリング点に対してデータ補間を行って実質的に画素数を増やす。空間変調部 2 3 b は、画素数増大部 2 3 a によって画素数を増やした複素振幅インラインホログラム K^j_{OQL} から物体光を表すホログラム g^j を生成する。分割部 2 3 c は、ホログラム g^j を複数枚の微小ホログラム g^j_i , $i = 1, \dots, n$ に分割する。合成部 2 3 d は、分割部 2 3 c によって得られた各微小ホログラム g^j_i を互いに重ね合わせて合成微小ホログラム g^j を再生する。これらの処理は、図 1 6 に示した画像の高分解能化、図 1 8 に示した画像再生の高速化の処理である。

【0116】

平面波展開部 2 3 e は、例えば、空間変調部 2 3 b が再生したホログラム g^j をフーリエ変換し、その結果である変換関数 G^j を求め、平面波の分散関係を満たす空間周波数 (u, v, w) および変換関数 G^j を用いて、再生光波 h^j を生成する。また、平面波展開部 2 3 e は、合成部 2 3 d によって生成された合成微小ホログラム g^j をフーリエ変換することにより変換関数 G^j を求め、これを用いて上記同様に再生光波 h^j を生成する。平面波展開部 2 3 e は、照明光についても同様の処理を行う。

【0117】

画像計算部 2 5 は、図 1 に示した光波総和と光強度計算の工程 (S 7) の処理を行い、合成光波 H_p と画像 S_p を求める。表示部 2 6 は、液晶表示装置などの FPD であり、画像等を表示する。画像再生部 2 0 の各部は、表示部 2 6 を除いて、コンピュータ上で動作するプログラムとそのサブルーティン群を含むソフトウェアを用いて構成される。

【0118】

(実施例)

図 2 5 乃至図 3 0 は、原理的な実証実験の実施例を示す。この実施例では、上述の図 2 , 図 3 に示した照明光用に集光レンズ 3 1 を用いる透過型のデータ取得装置を備えたホログラフィック顕微鏡を用いて、USAF テストターゲットの画像を再生した。各ホログラムの取得に、半導体励起固体レーザー (波長 532 nm、出力 50 mW) をコヒーレント光の光源として使用し、ホログラムの記録にはカメラリンク CCD カメラを受光素子として使用した。レーザー光を直径約 100 μ m の金球 (微小球 M) で反射させて開口数の大きい参照光 R を作り、参照光 R と球面波参照光 L が作る干渉縞 I_{LR} を記録した。また、USAF ターゲットを $NA = 0.28$ のレンズで集光した照明光 Q で照明し、その照射角 (ターゲットへの入射方向) を 4 方向に変化させて、物体光 O と参照光 R が作る干渉縞 I_{OQ}

10

20

30

40

50

R のホログラムを 4 枚記録した。

【 0 1 1 9 】

図 2 5 (a) (b) は入射方向を一方向に傾けた照明光で取得した U S A F テストターゲットの 1 つのホログラムにおける物体光と照明光の再生光波の空間周波数分布を示す。この図は、照明光 Q と物体光 O とを含む物体光再生光波 h に対応する。図 2 6 (a) (b) は上記の再生光波 h から照明光 Q を分離して生成された照明光再生光波 c の位相を用いて位相調整 (周波数変調) した後の物体光再生光波 h / の空間周波数分布を示す。位相調整によって、空間周波数分布がシフトしている。図 2 7 は、図 2 6 (a) の光波と同様に、4 方向の入射方向の照明光を用いてそれぞれ取得したホログラムについて、位相調整した 4 枚のホログラム (再生光波) を互いに加算する様子を概念的に示す。図 2 8 は、この処理で合成された再生光波の空間周波数分布を示す。

10

【 0 1 2 0 】

図 2 9 は、U S A F テストターゲットに対する照明光の入射方向が異なる 4 枚のホログラムのうち 1 枚から再生した画像を示す。図 3 0 (a) は、実施例を示し、図 2 9 の画像中の四角で示した部分について、入射方向の異なる 4 枚のホログラムを用いて再生した U S A F テストターゲットの再生画像、すなわち合成光波 H_p から求めた再生画像を示す。図 3 0 (b) は、参考例として、同ホログラムのうち 1 枚から再生した U S A F テストターゲットの再生画像を示す。

【 0 1 2 1 】

図 3 0 (a) の画像において、金球 (微小球 M) の表面の凹凸により、参照光 R の光強度分布に起因するムラが生じている。参照光 R の情報は、本来、画像再生の処理の中で消去されるべきものであるが、干渉縞 I_{L R} の記録と干渉縞 I_{O Q R} の記録の間に、参照光 R を生成する微小球 M の位置変動などが生じると、参照光 R の情報がノイズとして残ってしまう。図 3 0 (a) により、このようなノイズによる画質の低下が確認できる。これらのノイズは、より滑らかな金球を用いて、より安定に金球の保持条件を確保することにより、低減することができる。また、本実施例において、照明光 Q の再生光波 c は、被写体である U S A F テストターゲットを透過した照明光 Q が一点に集光し、被写体によって散乱された光が集光点の周りに広く分布することを利用して物体光 O から分離した。

20

【 0 1 2 2 】

図 3 0 (a) の再生画像では、線間隔 0 . 7 8 μ m の最小部分を見分けることができる。1 枚のホログラムの N A = 0 . 2 8 から求まる分解能が 0 . 9 5 μ m となることと比較して、本実施例における物体光の合成による高分解能化が確認できる。また、実施例では、図 3 0 (b) に示す再生画像と比較して画質が大きく改善されている。

30

【 0 1 2 3 】

なお、本発明は、上記構成に限られることなく種々の変形が可能である。例えば、上述した各実施形態の構成を互いに組み合わせた構成とすることができる。

【 産業上の利用可能性 】

【 0 1 2 4 】

本発明に係る多方向照明光を用いたオフアクシスホログラフィに基づくホログラフィック顕微鏡、データ処理方法 (高分解能画像用のホログラムデータ取得方法、および高分解能ホログラム画像再生方法) は、結像レンズを用いない無歪物体光波の高速記録、開口数が 1 を超える透過物体光または反射物体光の記録、厳密解を用いた超高分解能な無歪自由焦点画像の再生、F F T を用いた高速画像再生、波の位相分布を用いた光透過物体の定量的解析など、多くの利点を有する。従って、本発明は、細胞分化・組織形成分野、再生医療分野、バイオテクノロジー分野、医療診断分野、精密光計測分野などにおいてこれらの利点を活かした広い用途に適用できる。従来技術に対する本発明の新規性と優位性として、(1) 培養液中の生体組織や生体細胞の大深度超高分解能 3 次元計測を可能にする、(2) 低エネルギー照射により生きた生体組織の超高分解能計測を可能にする、(3) 位相分布を使った透明生体組織の超高分解能計測を可能にする、(4) 反射物体光を使った超高分解能な 3 次元光計測を可能にする、などが挙げられる。本発明は、開口数の大きい

40

50

ホログラム複数枚を使って空気中開口数 (NA) が 1 を超える大開口数ホログラムを合成することができ、通常の光学顕微鏡の解像限界を超える 3 次元像の再生を可能にする。これにより、超高分解能 3 次元生物顕微鏡を実現でき、ミトコンドリアやバクテリアなどの極微な被写体を 3 次元観察可能となる。

【 0 1 2 5 】

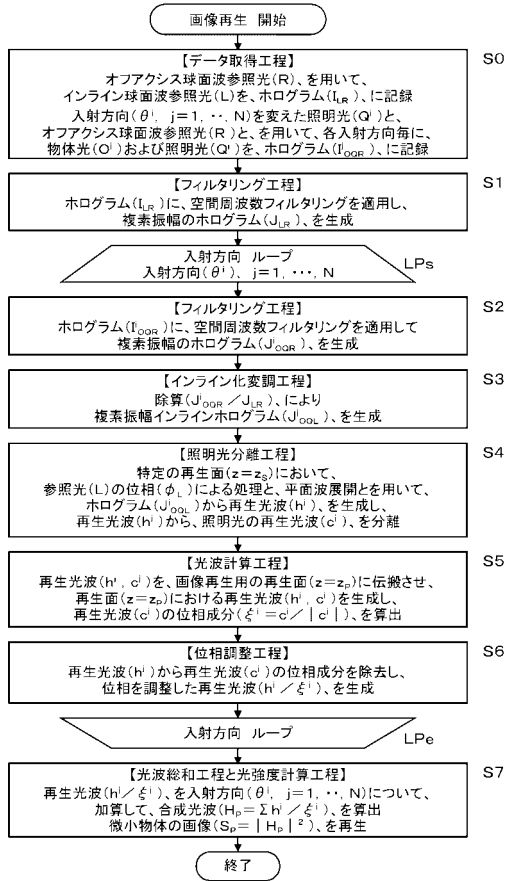
本願は日本国特許出願 2 0 1 3 - 2 2 3 7 6 1 に基づいており、その内容は、上記特許出願の明細書及び図面を参照することによって結果的に本願発明に合体されるべきものである。

【 符号の説明 】

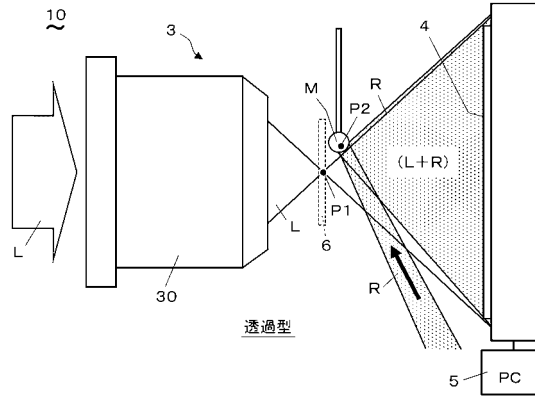
【 0 1 2 6 】

1	ホログラフィック顕微鏡	
1 0	データ取得装置、データ取得部	
1 0 a	光源	
2	角度変更部	
2 0	画像再生部	
2 2	インライン化変調部	
2 3	光波計算部	
2 4	照明光分離部	
2 3 a	画素数増大部	
3	光学系	20
4 , 4 1 ~ 4 4	受光素子	
5	記録部	
6	物体	
H _P	合成光波	
I ^j _{L R}	参照光オフアクシスホログラム	
I ^j _{Q R}	照明光オフアクシスホログラム	
I ^j _{O R}	物体光オフアクシスホログラム	
I ^j _{O Q R}	物体光照明光オフアクシスホログラム	
J ^j _{L R}	参照光複素振幅オフアクシスホログラム	
J ^j _{O R}	物体光複素振幅オフアクシスホログラム	30
J ^j _{Q R}	照明光複素振幅オフアクシスホログラム	
J ^j _{O Q R}	物体光照明光複素振幅オフアクシスホログラム	
J ^j _{O L}	物体光複素振幅インラインホログラム	
J ^j _{Q L}	照明光複素振幅インラインホログラム	
J ^j _{O Q L}	物体光照明光複素振幅インラインホログラム	
L	インライン球面波参照光	
M	微小球 (微小球面)	
O , O ^j , O 1 ~ O 4	物体光	
Q , Q ^j , Q 1 ~ Q 4	照明光	
R	オフアクシス球面波参照光	40
S _P	再生画像 (光強度)	
c ^j	照明光の再生光波 (照明光再生光波)	
g ^j	光波、ホログラム	
h ^j	物体光の再生光波 (物体光再生光波)	
j	入射方向を識別する整数変数	
Z _P , Z _S	再生面	
^j	照明光 Q の再生光波 c に含まれる位相成分	
^j _L	インライン球面波参照光の位相	

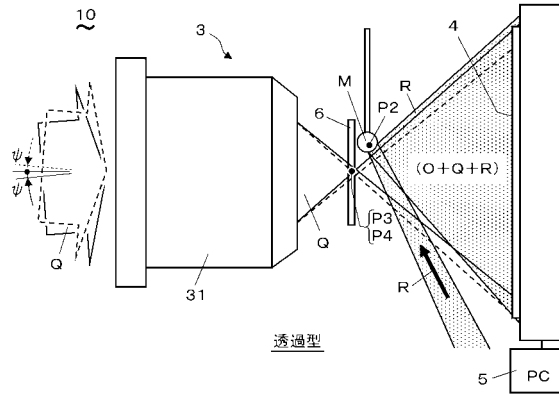
【図1】



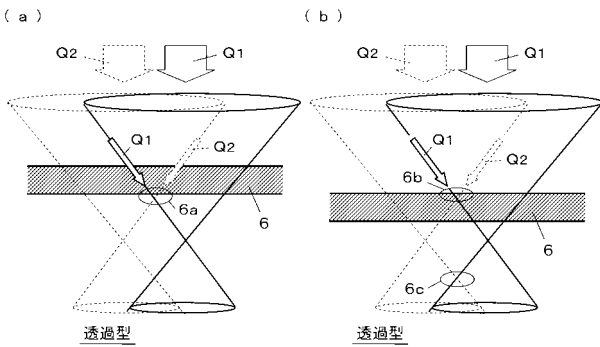
【図2】



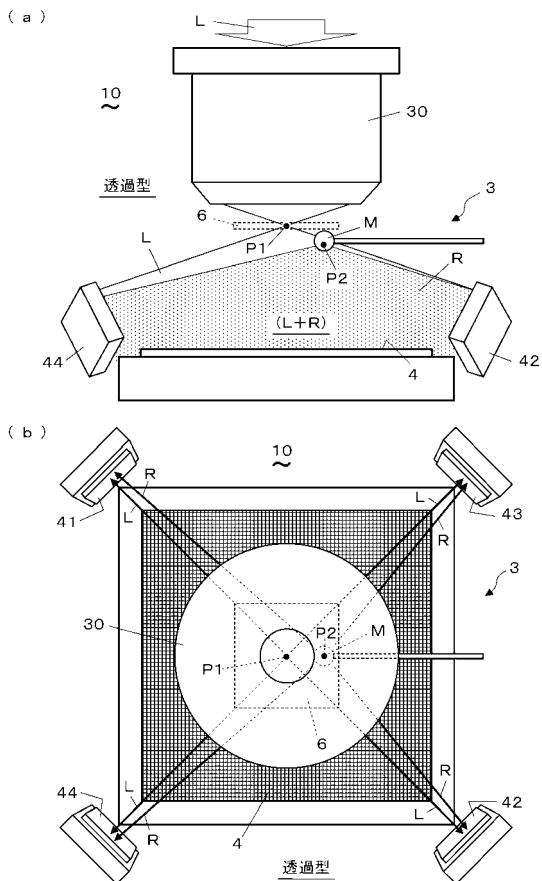
【図3】



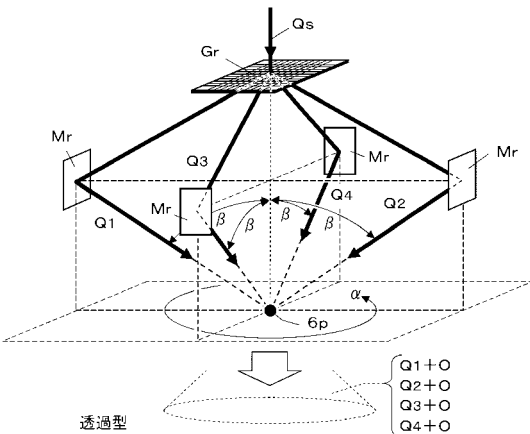
【図4】



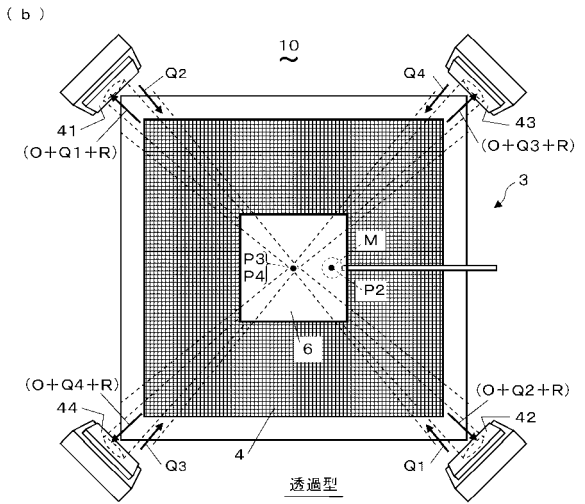
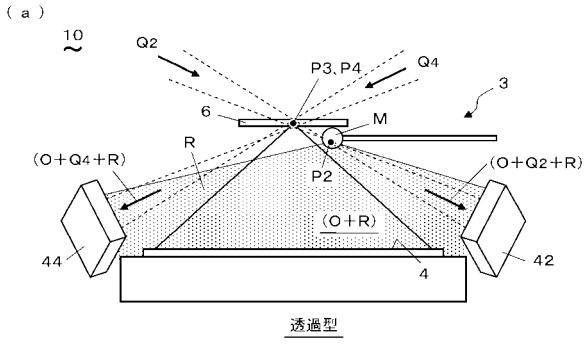
【図6】



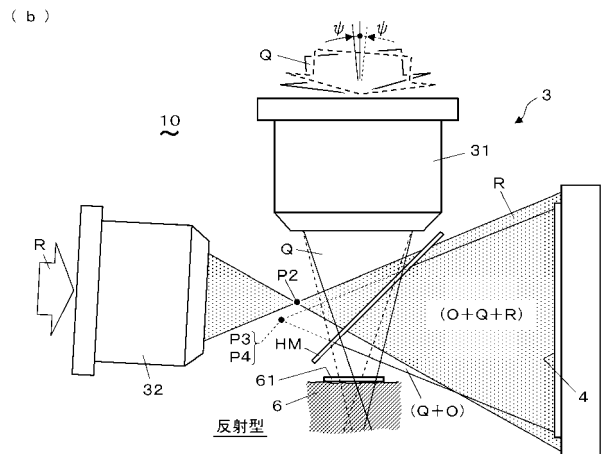
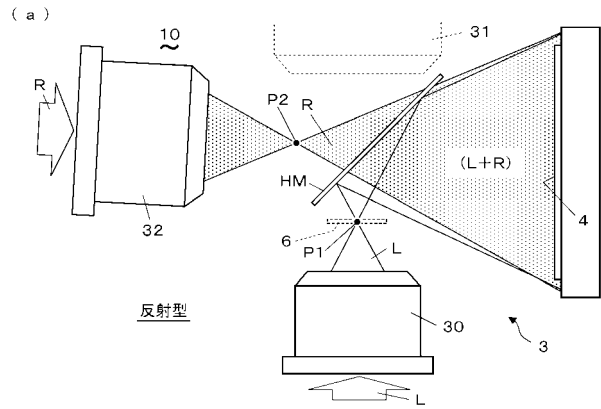
【図5】



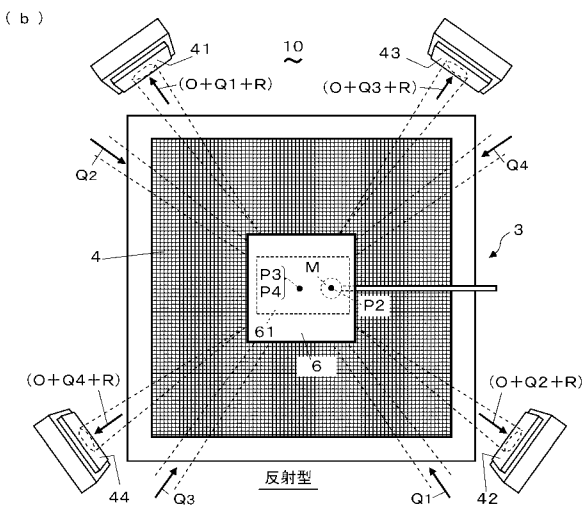
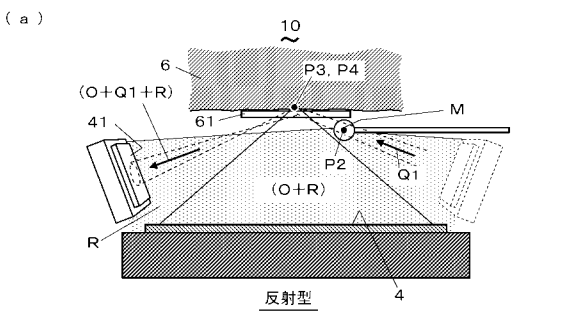
【 図 7 】



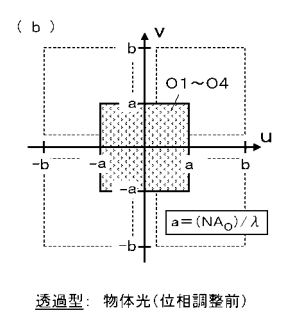
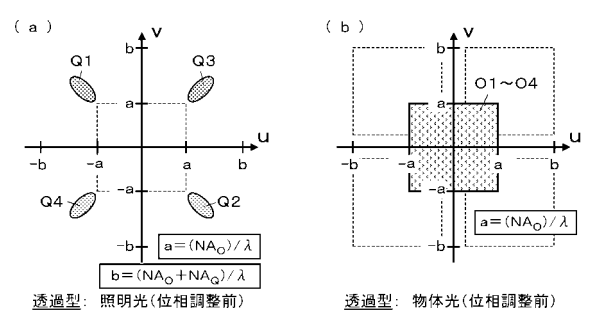
【 図 8 】



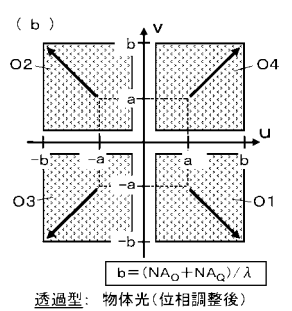
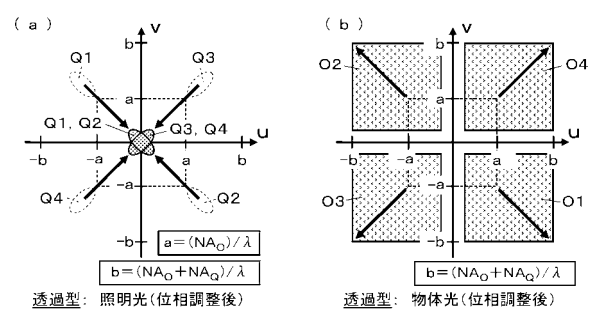
【 図 9 】



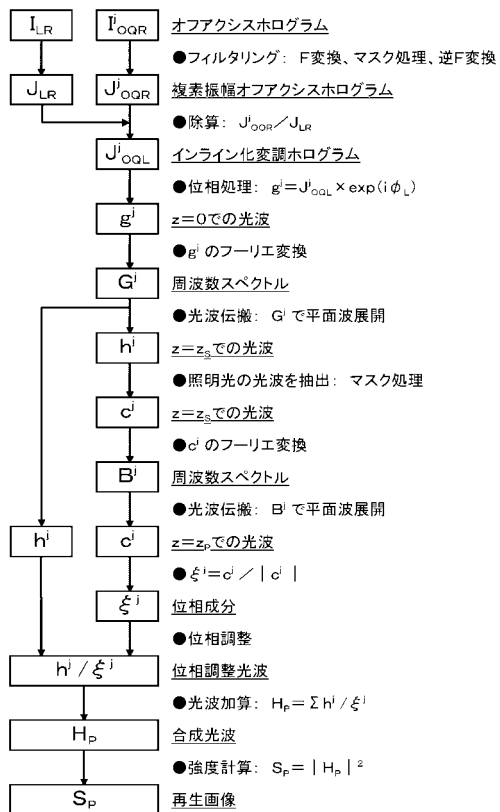
【 図 10 】



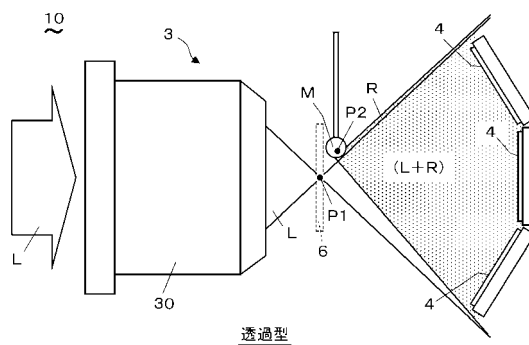
【 図 11 】



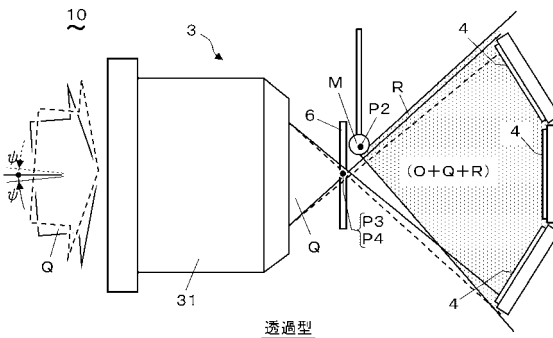
【図 1 2】



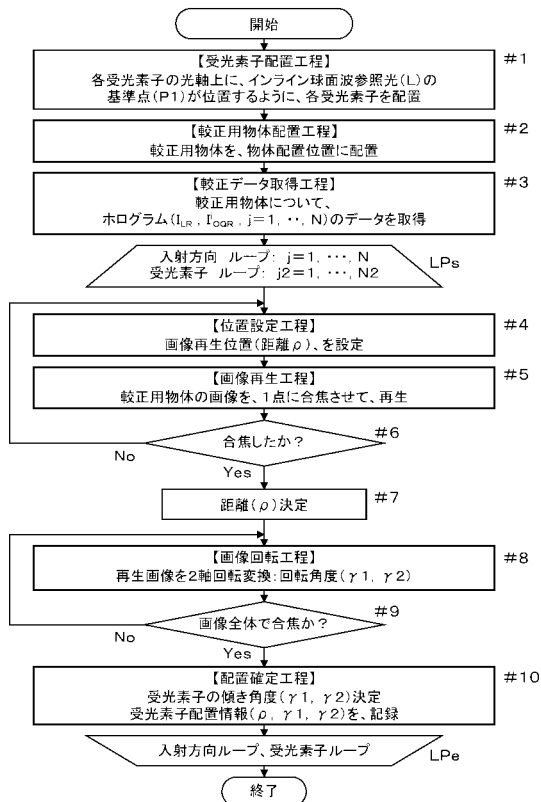
【図 1 3】



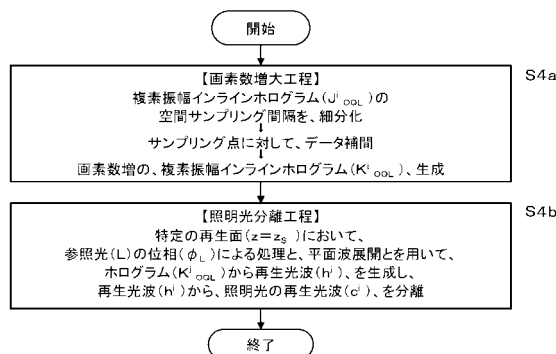
【図 1 4】



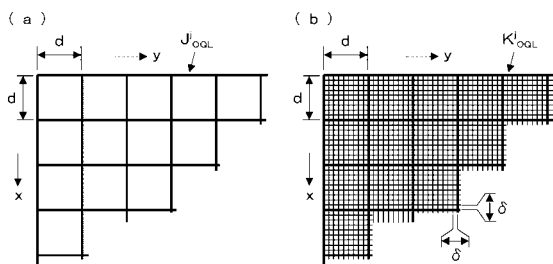
【図 1 5】



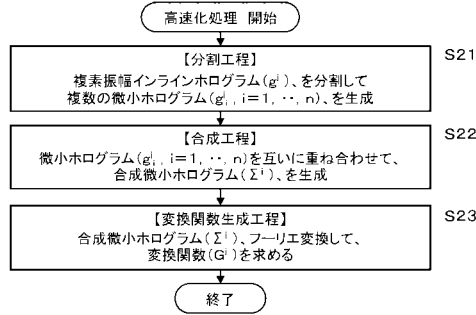
【図 1 6】



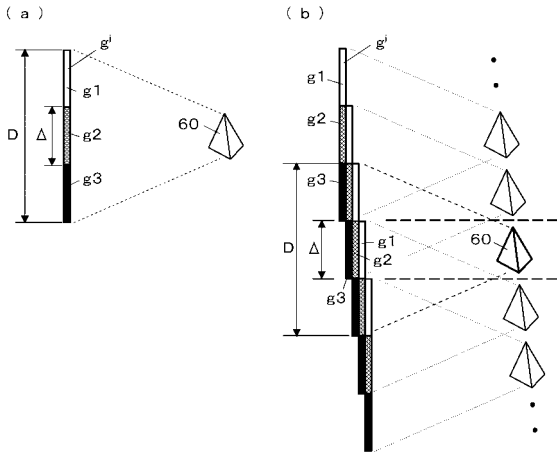
【図 1 7】



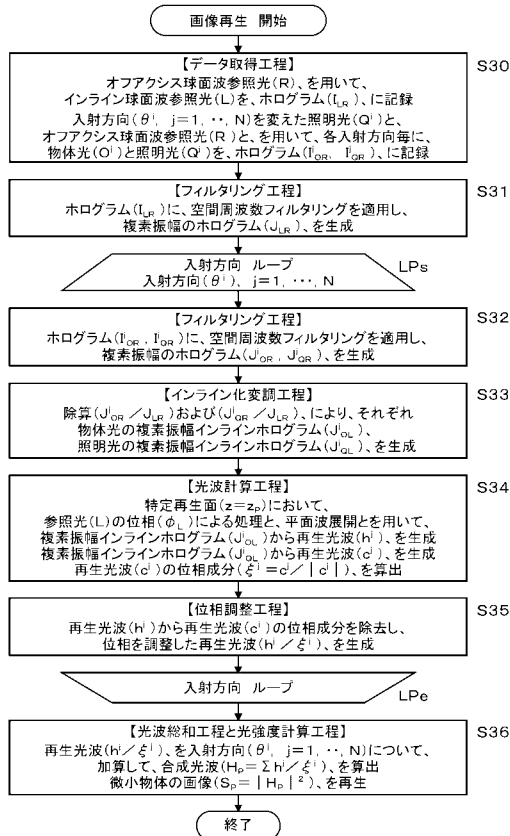
【図18】



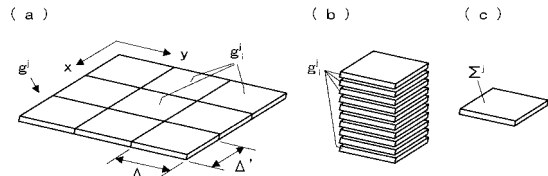
【図19】



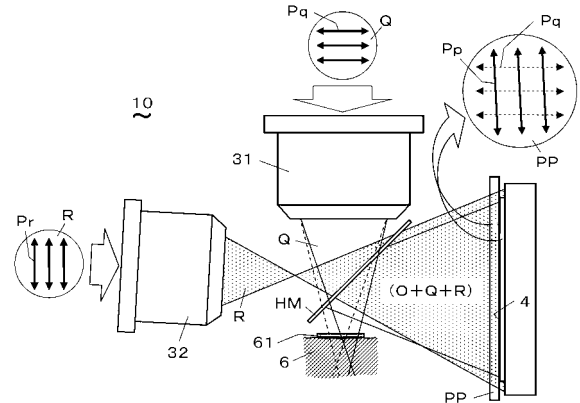
【図22】



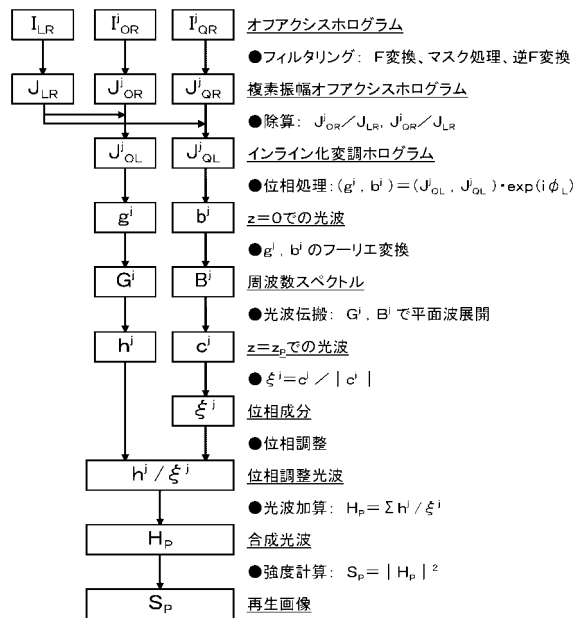
【図20】



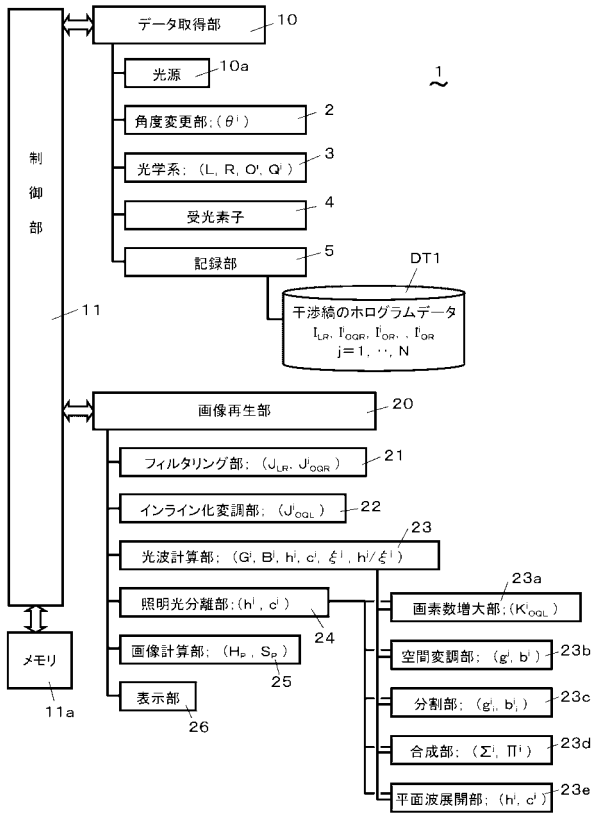
【図21】



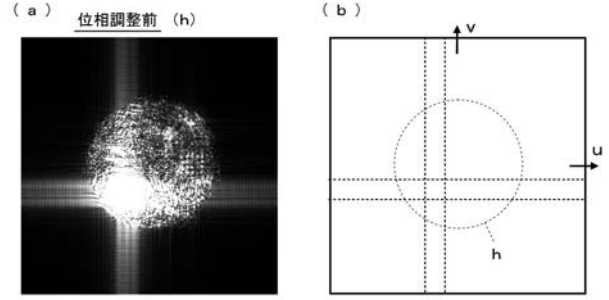
【図23】



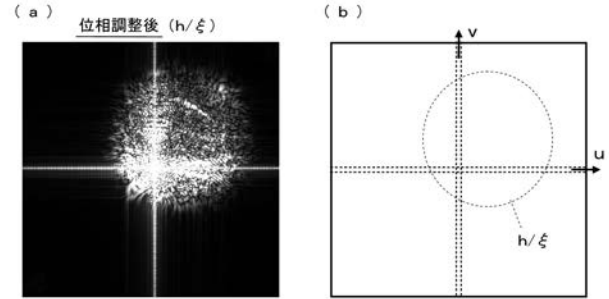
【図 2 4】



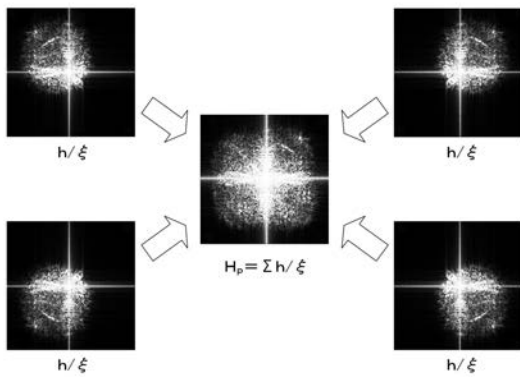
【図 2 5】



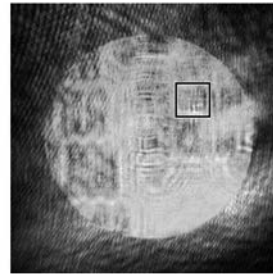
【図 2 6】



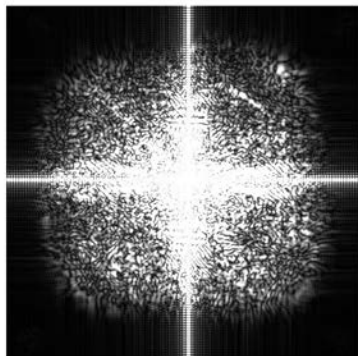
【図 2 7】



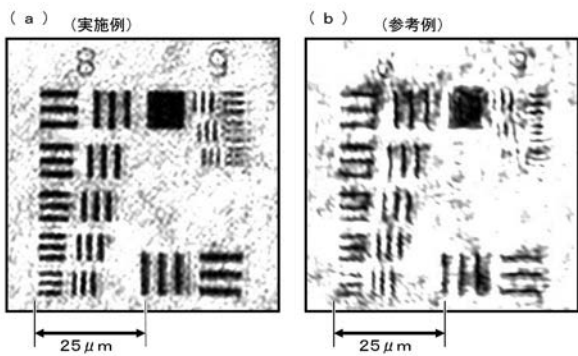
【図 2 9】



【図 2 8】



【図 3 0】



【 国際調査報告 】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International application No. PCT/JP2014/005448
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER G03H1/00(2006.01)i, G02B21/00(2006.01)i According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G03H1/00, G02B21/00 Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2014 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2014 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2014 Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) JSTPlus/JMEDPlus/JST7580 (JDreamIII)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
P, A	WO 2014/054776 A1 (University of Hyogo), 10 April 2014 (10.04.2014), entire text; all drawings (Family: none)	1-15
A	WO 2012/005315 A1 (Hyogo-Ken), 12 January 2012 (12.01.2012), entire text; all drawings & JP 5444530 B & EP 2592459 A1 & US 2013/0100241 A1	1-15
A	WO 2013/047709 A1 (Ushio Inc.), 04 April 2013 (04.04.2013), entire text; all drawings (Family: none)	1-15
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 25 December 2014 (25.12.14)		Date of mailing of the international search report 13 January 2015 (13.01.15)
Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office		Authorized officer
Facsimile No.		Telephone No.

国際調査報告		国際出願番号 PCT/J P 2 0 1 4 / 0 0 5 4 4 8	
A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. G03H1/00(2006.01)i, G02B21/00(2006.01)i			
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. G03H1/00, G02B21/00			
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1922-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2014年 日本国実用新案登録公報 1996-2014年 日本国登録実用新案公報 1994-2014年			
国際調査で使用了電子データベース (データベースの名称、調査に使用了用語) JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamIII)			
C. 関連すると認められる文献			
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号	
P, A	WO 2014/054776 A1 (公立大学法人兵庫県立大学) 2014.04.10, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-15	
A	WO 2012/005315 A1 (兵庫県) 2012.01.12, 全文, 全図 & JP 5444530 B & EP 2592459 A1 & US 2013/0100241 A1	1-15	
A	WO 2013/047709 A1 (ウシオ電機株式会社) 2013.04.04, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-15	
C欄の続きにも文献が列挙されている。		パテントファミリーに関する別紙を参照。	
* 引用文献のカテゴリー 「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行者若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す) 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願		の日の後に公表された文献 「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」同一パテントファミリー文献	
国際調査を完了した日 25.12.2014		国際調査報告の発送日 13.01.2015	
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		特許庁審査官 (権限のある職員) 加藤 昌伸	20 3700
		電話番号 03-3581-1101 内線 3271	

フロントページの続き

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

(注) この公表は、国際事務局(WIPO)により国際公開された公報を基に作成したものである。なおこの公表に係る日本語特許出願(日本語実用新案登録出願)の国際公開の効果は、特許法第184条の10第1項(実用新案法第48条の13第2項)により生ずるものであり、本掲載とは関係ありません。