

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2013年5月10日(10.05.2013)

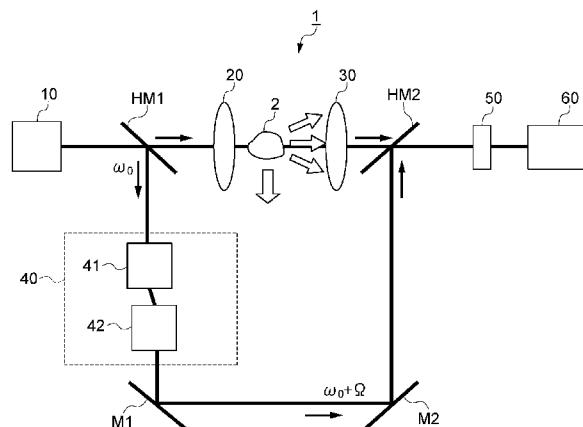


(10) 国際公開番号
WO 2013/065796 A1

- (51) 国際特許分類:
G01B 11/00 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2012/078362
- (22) 国際出願日: 2012年11月1日(01.11.2012)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2011-241590 2011年11月2日(02.11.2011) JP
- (71) 出願人: 浜松ホトニクス株式会社(HAMAMATSU PHOTONICS K.K.) [JP/JP]; 〒4358558 静岡県浜松市東区市野町1126番地の1 Shizuoka (JP).
- (72) 発明者: 岩井 秀直(IWAI Hidenao); 〒4358558 静岡県浜松市東区市野町1126番地の1 浜松ホトニクス株式会社内 Shizuoka (JP).
- (74) 代理人: 長谷川 芳樹, 外(HASEGAWA Yoshiki et al.); 〒1000005 東京都千代田区丸の内二丁目1番1号丸の内 MY PLAZA (明治安田生命ビル) 9階 創英国際特許法律事務所 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): 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, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, 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, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (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), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- 添付公開書類:
— 国際調査報告 (条約第21条(3))

(54) Title: OBSERVATION DEVICE

(54) 発明の名称: 観察装置



(57) Abstract: An observation device (1) is provided with a light source section (10), a detection section (50) and an arithmetic operation section (60). The light source section (10) shines light onto a moving object from multiple directions. For a first-direction position and a second-direction position, at multiple times, the detection section (50) outputs time variance data for a frequency (ω_0) that corresponds to an amount of Doppler shift of light that has arrived at multiple positions on a specified plane, said light being positioned on the specified plane such that among scattered light, scattered light having the same scattering angle (θ') enters at the same position. For data having the first-direction position in the specified plane, the second-direction position in the specified plane, and the time as variables, the arithmetic operation section (60) performs a one-dimensional Fourier transform on the time variable, and from the Fourier-transformed data, extracts data having the same angle of incidence (θ_0) relative to the object, on the basis of the Doppler effect.

(57) 要約:

[続葉有]



WO 2013/065796 A1



観察装置 1 は、光源部 10、検出部 50、及び演算部 60 を備える。光源部 10 は、移動している対象物へ光を多方向から照射する。検出部 50 は、散乱光のうち、同一の散乱角 θ を有する散乱光が同一の位置に入射する所定平面に配置され、所定平面上の各位置に到達した光のドップラーシフト量に応じた周波数 ω で時間的に変化するデータを、第 1 方向及び第 2 方向の各位置について各時刻に出力する。演算部 60 は、所定平面上の第 1 方向の位置、第 2 方向の位置、及び時刻を変数とするデータについて時刻変数に関する 1 次元フーリエ変換を行い、このフーリエ変換後のデータからドップラー効果に基づいて対象物に対する入射角 θ_0 が同一のデータを抽出する。

明 細 書

発明の名称：観察装置

技術分野

[0001] 本発明は、対象物の像を観察する装置に関するものである。

背景技術

[0002] 対象物の像を観察して対象物の3次元画像を得る技術として、非特許文献1や非特許文献2に記載された位相シフト法を用いたものが知られている。これらの位相シフト法に拠る観察装置では、光源から出力された波長 λ の光が2分岐され、一方の分岐光が対象物を透過して物体光とされ、他方の分岐光が参照光とされて、これら物体光と参照光との干渉による2次元像が撮像される。そして、参照光の光路長が $\lambda/4$ ずつ異なるものとされて4枚の2次元画像が得られ、これら4枚の2次元画像について所定の演算が行われて、2次元複素振幅を得た後に、対象物へ入射する光の方向毎に得られるこれら複数枚の複素振幅像から対象物の3次元振幅像及び3次元位相像が得られる。

[0003] また、撮像された1枚の画像から複素振幅像を得る技術として、非特許文献3に記載のヒルベルト変換法が知られている。

先行技術文献

非特許文献

[0004] 非特許文献1: WonshikChoi, "Tomographic phase microscopy," Nature Methods - 4, 717 - 719 (2007).

非特許文献2: NiyomLue, "Synthetic aperture tomographic phase microscopy for 3D imaging of livecells in translational motion," OPTICS EXPRESS, 16, 16240, (2008)

非特許文献3: Takahiro Ikeda, "Hilbert phase microscopy for investigating fast dynamics in transparent systems," OPTICS LETTERS, 30, (2005)

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] 非特許文献1や非特許文献2に記載された位相シフト法を用いた観察装置では、4枚の2次元画像を得る間、対象物は静止している状態であることが必要である。移動している対象物の像を得るには、フレームレートが高く高速撮像が可能な光検出器を用いて、対象物が静止していると思われ得る期間に4枚の2次元画像を得ることが必要である。しかし、高速撮像が可能な光検出器は、高額であり、或いは、画素数が少なく空間分解能が劣る。また露光時間においても、せいぜい対象物が静止していると思われ得る期間内であるため、S/Nの面からも画質が劣り、感度が悪い。また、非特許文献3に記載されたヒルベルト変換法を用いると、空間解像度がおよそ1/4に低下してしまい、画質が低下することとなる。

[0006] 本発明は、上記問題点を解消する為になされたものであり、1画素当りの読み出し速度が低速である光検出器を用いる場合であっても移動している対象物の像を得ることができる観察装置を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0007] 本発明の観察装置では、移動している対象物へ光を多方向から照射する光源部と、光源部による光照射により対象物で生じた散乱光のうち、同一の散乱角を有する散乱光が同一の位置に入射する所定平面に配置され、対象物の移動方向に垂直な方向を第1方向とし、対象物の移動方向に平行な方向を第2方向としたときに、所定平面上の各位置に到達した光のドップラーシフト量に応じた周波数で時間的に変化するデータを、第1方向及び第2方向の各位置について各時刻に出力する検出部と、所定平面上の第1方向の位置、第2方向の位置、及び時刻を変数とするデータについて時刻変数に関する1次元フーリエ変換を行い、このフーリエ変換後のデータからドップラー効果に基づいて対象物に対する入射角が同一のデータを抽出する演算部と、光源部から出力された光を入力して、その入力した光を対象物の前段で2分割して第1の光及び第2の光とし、第1の光又は第2の光を変調器で変調した後に

所定平面上で、第1の光と第2の光とをヘテロダイン干渉させる光学系と、
を備える。

[0008] 本発明の観察装置では、移動している対象物は、光源部により光が多方向から照射されて、散乱光を発生させる。その散乱光は、散乱方向に応じた量のドップラーシフトを受ける。所定の光学系を経た散乱光のうち、同一の散乱角を有する散乱光が検出部上の同一の位置で受光される。検出部から、所定平面上の各位置に到達した光のドップラーシフト量に応じた周波数で時間的に変化するデータが、第1方向及び第2方向の各位置について各時刻に出力される。演算部により、所定平面上の第1方向の位置、第2方向の位置、及び時刻を変数とするデータについて時刻変数に関する1次元フーリエ変換を行い、このフーリエ変換後のデータからドップラー効果に基づいて対象物に対する入射角が同一のデータが抽出される。この構成によれば、ドップラー効果を用いて対象物に対する入射角が同一のデータを抽出することのできるため、対象物が静止していると見做し得る期間内に複数回対象物の撮像をする必要がない。よって、1画素当りの読出し速度が低速である光検出器を用いる場合であっても移動している対象物の像を得ることができる。

[0009] また、演算部が、フーリエ変換後のデータから下記式(1)を満たす平面のデータを抽出してもよい。

[数1]

$$\omega - \Omega = \alpha y + \beta \sin \theta_0 \cdots (1)$$

(式(1)中、 ω は前記フーリエ変換後のデータの時間周波数であり、 Ω は変調周波数であり、 y は前記検出部の前記第2方向の位置であり、 θ_0 は前記入射角であり、 α 、 β は定数である。)

この場合、上記式(1)により、時刻変数に関する1次元フーリエ変換後のデータからドップラー効果に基づいて対象物に対する入射角が同一のデータを抽出することができる。上記式(1)は、対象物が速度Vで移動することによりドップラー効果が生じ、そのドップラー効果に基づいて、時間周波数 ω と位置 y に所定の関係があることを示している。

[0010] また、対象物と検出部の間に配置される集光レンズを更に備え、演算部が、フーリエ変換後のデータから下記式（２）を満たす面のデータを抽出してもよい。

[数2]

$$\omega - \Omega = \frac{2\pi V}{\lambda} \left[\sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{y}{f_y} \right) \right) - \sin \theta_0 \right] \quad \cdots (2)$$

（式（２）中、 ω は前記フーリエ変換後のデータの時間周波数であり、 Ω は前記変調器の変調周波数であり、 V は前記対象物の移動速度であり、前記 λ は前記光源部が照射する光の波長であり、 y は前記検出部の前記第２方向の位置であり、 f_y は前記集光レンズの第２方向の焦点距離であり、 θ_0 は前記入射角である。）

この場合、上記式（２）により、時刻変数に関する１次元フーリエ変換後のデータからドップラー効果に基づいて対象物に対する入射角が同一のデータを正確に抽出することができる。

[0011] また、対象物と検出部の間に配置される集光レンズを更に備え、検出部の受光面が、集光レンズにより第１方向において対象物のフレネル回折像が形成される面であって、第２方向において対象物のフランフォーファー回折像が形成される面に配置され、演算部が、時刻変数に関する１次元フーリエ変換を行う第１フーリエ変換部と、記第１方向に関する１次元フーリエ変換を行う第２フーリエ変換部と、ドップラー効果に基づいて対象物に対する入射角が同一のデータを抽出する斜め切り部と、前記検出部が配置される位置により定まる値である２次位相で除する２次位相除算部とを含んでもよい。この場合、適切に入射角に依存する複素振幅像を得ることができる。

[0012] また、対象物と検出部の間に配置される集光レンズを更に備え、検出部の受光面が、集光レンズにより第１方向において対象物のフランフォーファー回折像が形成される面であって、第２方向において対象物のフランフォーファー回折像が形成される面に配置され、演算部が、時刻変数に関する１次元フーリエ変換を行う第１フーリエ変換部と、ドップラー効果に基づいて対象

物に対する入射角が同一のデータを抽出する斜め切り部とを含んでいてもよい。この場合、適切に入射角に依存する複素振幅像を得ることができる。

[0013] また、対象物と検出部の間に配置される集光レンズを更に備え、検出部の受光面が、集光レンズにより第1方向において対象物の像が形成される結像面であって、第2方向において対象物のフランフォーファー回折像が形成される面に配置され、演算部が、時刻変数に関する1次元フーリエ変換を行う第1フーリエ変換部と、第1方向に関する1次元フーリエ変換を行う第2フーリエ変換部と、ドップラー効果に基づいて対象物に対する入射角が同一のデータを抽出する斜め切り部とを含んでいてもよい。この場合、適切に入射角に依存する複素振幅像を得ることができる。

[0014] また、対象物と検出部の間に配置される集光レンズを更に備え、集光レンズが $f \theta$ レンズであり、演算部が、フーリエ変換後のデータから下記式(3)を満たす面のデータを抽出してもよい。

[数3]

$$\omega - \Omega = \frac{2\pi V_y}{\lambda} \left[\sin\left(\frac{y}{f_y}\right) - \sin\theta_0 \right] \quad \cdots (3)$$

(式(3)中、 ω はフーリエ変換後のデータの時間周波数であり、 Ω は変調器の変調周波数であり、 V_y は対象物の第2方向の移動速度であり、 λ は光源部が照射する光の波長であり、 y は検出部の第2方向の位置であり、 f_y は集光レンズの第2方向の焦点距離であり、 θ_0 は入射角である。)

この場合、上記式(3)により、時刻変数に関する1次元フーリエ変換後のデータからドップラー効果に基づいて対象物に対する入射角が同一のデータをより厳密に抽出することができる。

[0015] また、光源部と対象物との間に配置され、光源部から照射される光を受光して、第2方向に収束又は発散する光を対象物に照射する照明レンズを更に備えていてもよい。この場合、対象物に光を多方向から照射することができる。

[0016] また、対象物の移動速度を検出する速度検出部を更に備え、演算部が、速

度検出部により検出された対象物の速度に基づいて、時刻変数に関する 1 次元フーリエ変換の際に対象物の速度変化に関する補正を行ってもよい。

[0017] また、対象物への光の照射が、透過照明の光学配置であってもよいし、対象物への光の照射が、反射照明の光学配置であってもよい。

[0018] また、光源部が、単一縦モードの光を生成する光源であってもよいし、光源部が、広帯域の光を生成する光源であってもよい。更に、光源部が、モードロックレーザーであってもよい。

発明の効果

[0019] 本発明によれば、1 画素当りの読出し速度が低速である光検出器を用いる場合であっても移動している対象物の像を得ることができる。

図面の簡単な説明

[0020] [図1]本実施形態の観察装置による対象物の像の取得の原理を説明する図である。

[図2] (a) は、入射光 L_0 の入射角を説明する図であり、(b) は対象物 2 で生じる散乱光の散乱角 θ を説明する図である。

[図3]入射光 L_0 が対象物 2 により散乱する様子を ξ 軸方向から見た図である。

[図4]従来技術である位相シフト法によって入射角依存複素振幅像を取得する手順を示す図である。

[図5]第 1 実施形態に係る観察装置 1 における、入射角依存複素振幅像の取得の手順を示す図である。

[図6]第 1 実施形態に係る観察装置 1 の構成を示す図である。

[図7] (a) は照明レンズ 20 を Y 軸方向から見た側面図であり、(b) は照明レンズ 20 を X 軸方向から見た側面図である。

[図8]第 1 配置例の集光レンズ 30 の構成を示す図である。

[図9]集光レンズ 30 を介して検出部 50 に入射される光を模式的に示した図である。

[図10]3 つの入射角を持つ入射光による散乱光が検出部 50 に入射される様

子を模式的に示した図である。

[図11]第1配置例の演算部60の構成を示すブロック図である。

[図12]検出部50によって取得された干渉強度像*i*の例である。

[図13]周波数依存複素振幅像*a*を模式的に示したものである。

[図14]図13の模式図をX軸方向から見た図である。

[図15]第2配置例の集光レンズ30Aの構成を示す図である。

[図16]第2配置例の演算部60Aの構成を示すブロック図である。

[図17]第3配置例の集光レンズ30Bの構成を示す図である。

[図18]第3配置例の演算部60Bの構成を示すブロック図である。

[図19]周波数依存複素振幅像*a*の振幅像を周波数毎に示した図である。

[図20]周波数依存複素振幅像*a*の位相像を周波数毎に示した図である。

[図21]左に、入射角依存複素振幅像*A*の振幅像を、右に入射角依存複素振幅像*A*の位相像を示した図である。

発明を実施するための形態

[0021] 以下、添付図面を参照して、本発明を実施するための形態を詳細に説明する。なお、図面の説明において同一又は類似する要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

[0022] 本実施形態の観察装置は、移動している対象物に光が照射された際に生じるドップラーシフト効果を利用し、特に、対象物に入射する入射光の入射方向とドップラーシフト量との間に一定の関係が存在することを利用して、対象物の像を取得するものである。初めに、図1を用いて、本実施形態の観察装置による対象物の像の取得について原理的な事項について説明する。

[0023] 図1は、本実施形態の観察装置による対象物の像の取得の原理を説明する図である。この図には、 ξ η 座標系、 x y 座標系及びu v 座標系が示されている。 ξ 軸、 η 軸、 x 軸、 y 軸、 u 軸及び v 軸は、何れも集光レンズ30の光軸に垂直である。 ξ 軸及び x 軸は、互いに平行である。 η 軸及び y 軸は、互いに平行である。観察対象である対象物2は ξ η 平面上に存在する。集光レンズ30は x y 平面上に存在する。また、集光レンズ30の後焦点面はu

v 平面と一致する。 $\xi \eta$ 平面と $x y$ 平面との間の距離は d である。 $x y$ 平面と $u v$ 平面との間の距離は集光レンズ 30 の焦点距離 f と一致する。本明細書において、 ξ 軸方向、 x 軸方向、 X 軸方向、第 1 方向は互いに平行な向きであり、 η 軸方向、 y 軸方向、 Y 軸方向、第 2 方向は、互いに平行な向きである。

[0024] 対象物 2 は $\xi \eta$ 平面上で $-\eta$ 方向に移動しており、様々な入射角を有する光 L_0 が対象物 2 に照射されることとする。対象物 2 に光 L_0 が照射されることにより生じる散乱光 $L_1 \sim L_3$ は、様々な方向に進み、また、対象物 2 の移動によりドップラーシフトを受ける。対象物 2 の移動方向と同じ方向に散乱方向ベクトル成分を有する散乱光 L_1 は、光周波数が高くなる。対象物 2 の移動方向に散乱方向ベクトル成分を有しない散乱光 L_2 は、光周波数が変化しない。対象物 2 の移動方向と逆の方向に散乱方向ベクトル成分を有する散乱光 L_3 は、光周波数が低くなる。これらの散乱光 $L_1 \sim L_3$ は、集光レンズ 30 を経て $u v$ 平面に到達する。

[0025] 図 2 (a) は、入射光 L_0 の入射角を説明する図であり、図 2 (b) は対象物 2 で生じる散乱光 L の散乱角を説明する図である。図 2 (a) に示すように、入射光 L_0 の入射角を表現するには、それぞれ仰角 θ_0 及び方位角 ϕ_0 の 2 つの変数で記述する必要がある。対象物 2 内に仮想的に配置した点光源を $\xi \eta$ 座標系の原点とする。その原点に対して、入射する入射光 L_0 の入射方向ベクトルと ξ 軸とがなす角度を仰角 θ_0 とし、その入射方向ベクトルの $\xi \eta$ 平面への投影ベクトルと ξ 軸とがなす角度を方位角 ϕ_0 とする。また、入射光 L_0 の $\eta \xi$ 平面への投影ベクトルと ξ 軸とがなす角度を θ_0' とする。同様に、図 2 (b) に示すように、点光源からの散乱光 L の方向ベクトルと ξ 軸とがなす角度を仰角 θ とし、その散乱方向ベクトルの $\xi \eta$ 平面への投影ベクトルと ξ 軸とがなす角度を方位角 ϕ とする。また、散乱光 L の $\eta \xi$ 平面への投影ベクトルと ξ 軸となす角度を θ' とする。

[0026] 図 3 は、入射光 L_0 が対象物 2 により散乱する様子を ξ 軸方向から見た図である。図 3 では、入射光 L_0 の入射単位ベクトルを s_0 とし、散乱光 L の散乱

単位ベクトルを s と表している。

[0027] 速度ベクトル V で移動する対象物 2 に周波数 ω_0 をもつ光を照射すると、対象物 2 で生じる散乱波の周波数は、ドップラー効果により下記式 (4) で表されるドップラーシフト周波数 ω_d だけ変化する。式 (4) では、対象物 2 に対する入射光の入射単位ベクトルを s_0 とし、対象物 2 で生じた散乱波の散乱方向を示す散乱単位ベクトルを s としている。式 (4) において、 λ は光の波長である。式 (4) はドップラーシフト量 ω_d は、 $(s - s_0)$ と移動物体の速度ベクトル V の内積に比例することを表している。式 (4) において、入射単位ベクトル s_0 と速度ベクトル V との内積の項 ($\omega_{d1} = -(2\pi/\lambda) s_0 \cdot V$) による周波数遷移を第 1 のドップラー効果と呼ぶこととする。また、散乱単位ベクトル s と速度ベクトル V との内積の項 ($\omega_{d2} = (2\pi/\lambda) s \cdot V$) による周波数遷移を第 2 のドップラー効果と呼ぶこととする。この場合、対象物 2 で生ずる散乱光の光周波数は、入射ベクトル成分及び散乱方向ベクトル成分により、以下のような影響を受ける。すなわち、対象物 2 の移動方向と同じ方向に入射ベクトル成分を有する入射光は、第 1 のドップラー効果により、対象物 2 で生ずる散乱光の光周波数は低くなる。対象物 2 の移動方向と逆の方向に入射ベクトル成分を有する入射光は、第 1 のドップラー効果により、対象物 2 で生ずる散乱光の光周波数は高くなる。対象物 2 の移動方向と平行な方向に入射ベクトル成分を有しない入射光は、第 1 のドップラー効果は起きず、対象物 2 で生ずる散乱光の光周波数は変わらない。対象物 2 の移動方向と同じ方向に散乱方向ベクトル成分を有する散乱光は、第 2 のドップラー効果により、その散乱光の光周波数は高くなる。対象物 2 の移動方向と逆の方向に散乱方向ベクトル成分を有する散乱光は、第 2 のドップラー効果により、その散乱光の光周波数が低くなる。対象物 2 の移動方向と平行な方向に散乱方向ベクトル成分を有しない散乱光は、第 2 のドップラー効果は起きず、その散乱光の光周波数は変わらない。

[0028] [数4]

$$\omega_d = \frac{2\pi}{\lambda} (s - s_0) \cdot V \quad \cdots (4)$$

[0029] 式(4)より、速度 V と散乱単位ベクトル s が一定である場合、ある位置で観測される回折波のドップラーシフト周波数 ω_d は、入射単位ベクトル s_0 と一対一で対応することが分かる。このように、そのドップラーシフト周波数 ω_d での波の複素振幅像は、入射波の入射角 θ_0 に依存するものである。

[0030] 入射角 θ_0 を変数とする複素振幅像（以下、「入射角依存複素振幅像」ともいう。）からX線CTアルゴリズムや回折トモグラフィーアルゴリズムを用いて3次元振幅像及び3次元位相像を得られることが知られている。したがって、入射角依存複素振幅像を得ることができれば、対象物の3次元振幅像及び3次元位相を得ることができる。以下では、本発明の理解を容易にするために、本発明の一実施形態に係る観察装置における、入射角依存複素振幅像の取得の手順を、位相シフト法による入射角依存複素振幅像の取得の手順と比較して説明する。

[0031] 図4は、従来技術である位相シフト法によって入射角依存複素振幅像を取得する手順を示す図である。図4上段のグラフの縦軸は対象物の位置を示し、横軸は時間を示している。図4上段に示す矢印は、撮像タイミングを示している。対象物は所定の方法に、一定速度で移動しているものとする。位相シフト法では、時刻 t_1 において移動する対象物に対し、対象物が移動していないと見做し得る時間内に対象物の像を複数枚撮像して、複数枚の干渉強度像を取得する。このとき、位相シフト法では、干渉強度像を光路長が $\lambda/4$ ずつ異ならせた参照光と干渉させて、対象物の位置を変数とする複素振幅像を取得する（以下、「位置依存複素振幅像」ともいう。）。なお、対象物は一定速度で移動しているため、位置依存複素振幅像は、時間を変数とする複素振幅像でもある。このような位置依存複素振幅像は、所定の時間間隔で複数回取得される（図4の t_1 , t_2 , t_3 ）。合成開口トモグラフィーでは、各時刻で得られた位置依存複素振幅像に対して時刻変数 t に関する1次元フーリエ変換を行うことにより、周波数を変数とする複素振幅像（以下、「周波数依存複素振幅像」ともいう。）を得る。その後、周波数 ω と入射角 θ_0 との間に所定の関係があることを利用して、入射角依存複素振幅像を得ている。

[0032] 上記のように、位相シフト法では、移動する対象物に対し、対象物が移動していないと見做し得る時間内に対象物を複数枚撮像して、複数枚の干渉強度像を取得する必要がある。フローサイトメーターで細胞等の対象物を流す場合、細胞は数 $\mu\text{m}/\text{s}$ で移動する。仮に、 $1\mu\text{m}/\text{s}$ で移動する直径 $10\mu\text{m}$ の細胞に波長 633nm のレーザー光を照射し、 $\text{NA}=0.45$ （20倍相当）の対物レンズで撮影を行う場合、本対物レンズによる回折限界は約 $0.9\mu\text{m}$ と試算される。そのため、移動によるボケも $0.9\mu\text{m}$ に抑える必要がある。したがって、対象物の強度像だけを得るのであれば、 $0.9\mu\text{m}/1\mu\text{m}/\text{s}=0.9\mu\text{s}$ 時間内に撮影を完了する必要がある。一方、4枚の干渉像から1枚の複素振幅像を求める場合、その複素振幅像が持つ位相精度を100分の1程度に抑える必要がある。したがって、4枚の連続する干渉像の時間間隔は、 $0.633\mu\text{m}/1\mu\text{m}/\text{s}/0.45/100\sim 10^{-8}\text{s}$ と試算される。このことから、この条件の下では、位相シフト法では、約100MHzのフレームレートを有する2次元検出器を用いて干渉強度像を得る必要がある。しかし、このような超高速でかつ画素数を有している2次元光検出器は入手困難である。

[0033] これに対し、図5は、本発明の一実施形態に係る観察装置における、入射角依存複素振幅像の取得の手順を示す図である。図4と同様に、図5上段のグラフの縦軸は対象物の位置を示し、横軸は時間を示している。図5上段に示す矢印は、撮像タイミングを示している。対象物は所定の方法に、一定速度で移動しているものとする。本実施形態に係る観察装置では、時刻 t_1 において移動する対象物に対し、対象物が移動していないと見做し得る時間内に対象物を1枚だけ撮像して、1枚の干渉強度像を取得する。このような干渉強度像は、所定の時間間隔で複数回取得される（図5の t_1 , t_2 , t_3 ）。その後、位置依存干渉強度像から位置依存複素振幅像を算出する操作を行うことなく、各時刻で得られた干渉強度像を時間変数 t に関して1次元フーリエ変換し、周波数依存複素振幅像を得る。その後、ドップラーシフト周波数 ω と入射角 θ_0 に所定の関係があることを利用して周波数依存複素振幅像が

ら入射角依存複素振幅像を得る。このように、本実施形態に係る観察装置では、対象物が移動していないと見做し得る時間内に対象物を1枚だけ撮像すればよいので、高いフレームレートを有する2次元光検出器でなくても精度よく入射角依存複素振幅像を得ることができる。以下に、本実施形態に係る観察装置の構成について説明する。

[0034] (第1実施形態)

(第1配置例)

本実施形態の観察装置1は、以上で説明した原理に基づいて、対象物2の入射角依存複素振幅像を取得するものである。図6は、第1実施形態の観察装置1の構成を示す図である。本実施形態の観察装置1は、図6に示すように、光源部10、照明レンズ20、ビームスプリッタHM1、集光レンズ30、ビームスプリッタHM2、変調部40、ミラーM1、ミラーM2、検出部50及び演算部60を備えている。

[0035] 光源部10は、照明レンズ20を介して移動している対象物へドップラー効果が起こるように光を多方向から照射する。光源部10は、例えばHeNeレーザ光源であり、対象物2に照射されるべき光(光周波数 ω_0)を平行光として出力する。ビームスプリッタHM1は、光源部10から出力された光を対象物2の前段で入力し、この光を2分割して第1の光及び第2の光とし、そのうちの第1の光を照明レンズ20に出力し、第2の光を変調部40に出力する。

[0036] 照明レンズ20は、ビームスプリッタHM1から出力された光を受光し、Y軸方向に種々の方向を持ち、X軸方向に一定の方向を持つ光を対象物2に照射する。照明レンズ20としては、シリンドリカルレンズが用いられる。図7は、照明レンズ20の一例を示す図であり、図7(a)は照明レンズ20をY軸方向から見た側面図であり、図7(b)は照明レンズ20をX軸方向から見た側面図である。図7に示す点線は、照明レンズ20における光の結像の様子を表している。図7の f_{LS2} は、照明レンズ20の焦点距離を示している。図7に示すように、照明レンズ20は、曲率を有する面がY軸方向

と平行に配置され、曲率を有さない面がX軸方向と平行に配置される。このような照明レンズ20により、対象物2にはX軸方向が平行光であって、Y軸方向が収束光である光が照射される。つまり、対象物2には、Y軸方向において多方向から光が照射される。なお、図7では、照明レンズ20として、凸レンズのシリンドリカルレンズを示したが、凹レンズのシリンドリカルレンズを用いてもよい。この場合、対象物2にはX軸方向が平行光であって、Y軸方向が発散光である光が照射される。上記の照明レンズ20により出力される収束光または発散光のそれぞれの入射ベクトル s_0 は、同一平面 S_0 内に存在することが好ましい。平面 S_0 は、光軸 z と対象物2の移動方向により形成される面である。なお、本実施形態の観察装置1が照明レンズ20を備えず、光源部10からX軸方向が平行光であって、Y軸方向が収束光又は発散光である光が照射されてもよい。

[0037] 変調部40は、第1変調器41及び第2変調器42を備えている。第1変調器41及び第2変調器42は、例えば音響光学素子である。第1変調器41は、第1変調信号により、光源部10から出力された光を回折させ、その回折光を第2変調器42へ出力する。第2変調器42は、第2変調信号により、第1変調器41から出力された光を回折させ、その回折光をミラーM1へ出力する。第2変調器42から出力された光は、ミラーM1、M2により順次に反射され、ビームスプリッタHM2へ出力される。なお、変調部40は、第1の光の光路上に配置されてもよい。

[0038] 第1変調器41に与えられる第1変調信号の周波数と、第2変調器42に与えられると第2変調信号の周波数とは僅かに異なる。例えば、第1変調周波数は40MHzであり、第2変調周波数は40.000010MHzであり、両者の差 Ω は10Hzである。第1変調信号及び第2変調信号それぞれは正弦波である。なお、変調部40は必ずしも第1変調器41と第2変調器42の2つから構成される必要はない。すなわち、変調器40は、光の周波数を所定の周波数 Ω （以後、変調周波数 Ω と呼ぶ）だけ周波数遷移する役割を有するものであればよく、変調部40は1つの変調器から構成されてもよい。

し、3つ以上の変調器を備えてもよい。

[0039] 集光レンズ30は、照明レンズ20から出力された光の照射により対象物2で生じた散乱波を入力し、検出部50の受光面においてX軸方向がフレネル回折像であって、Y軸方向がフランフォーファー回折像である像を形成する。集光レンズ30は、このような光をビームスプリッタHM2に出力する。集光レンズ30の構成を図8に示す。図8(a)は集光レンズ30をY軸方向から見た側面図であり、図8(b)は集光レンズ30をX軸方向から見た側面図である。図8に示す点線は、集光レンズ30における光の結像の様子を表している。図8に示すように、集光レンズ30は、レンズOB、レンズLS1、レンズLS2、及びレンズLS3の4つのレンズにより構成される。

[0040] レンズOBは、20倍相当の開口数 $NA=0.45$ である対物レンズである。レンズOBの後焦点面をFPとする。レンズLS1は、X軸方向に曲率を持たず、Y軸方向に曲率を持つレンズである。レンズLS2は、X軸方向に曲率を持ち、Y軸方向に曲率を持たないレンズである。レンズLS3は、X軸方向に曲率を持たず、Y軸方向に曲率を持つレンズである。レンズLS1とレンズLS3のY方向は、4f光学系を成している。4f光学系とは、レンズLS1の後焦点面とレンズLS3の前焦点面が一致し、レンズLS1の前焦点面の像がレンズLS3の後焦点面に結像される光学系のことである。レンズLS2は、レンズLS1の後焦点面とは異なる面であって、レンズLS3の前焦点面とは異なる面に配置される。集光レンズ30は、図8(a)に示すように、X軸方向において、レンズOBから出力された光をレンズLS2により、検出部50の受光面に、フランフォーファー回折像面ではなく、結像面でもないフレネル回折像面を形成する。また、集光レンズ30は、図8(b)に示すように、Y軸方向において、レンズOBの後焦点面FPから出力された光をレンズLS1により平行光とさせ、レンズLS3により収束させることで、検出部50の受光面にフランフォーファー回折像面を形成させる。このような集光レンズ30を対象物2と検出部50の間に備えるこ

とで、対象物2からの散乱光のうち、入射角 θ_0 が異なり、散乱角 θ' が同一である光が検出部50の受光面の1点に集光される。

[0041] ビームスプリッタHM2は、集光レンズ30から到達した光（物体光）と、ミラーM1、M2を介して変調部40から到達した光（参照光）とを検出部50の受光面へ入射させて、両光を検出部50の受光面上でヘテロダイン干渉させる。変調部40から出力されて検出部50の受光面に入射される光の周波数は、 $\omega_0 + \Omega$ となる。 Ω は、第1変調周波数と第2変調周波数との差周波数である。物体光と参照光とが検出部50の受光面上でヘテロダイン干渉されることで、検出部50では物体光と参照光との干渉ビート信号が観測される。

[0042] 検出部50は、同一の散乱角を有する散乱光が同一の位置に入射する所定平面に配置され、所定平面上の各位置に到達した光のドップラーシフト量に応じた周波数で時間的に変化するデータを、第1方向及び第2方向の各位置について各時刻に出力する。検出部50は、X軸方向及びY軸方向に並設される画素構造により、検出部50の受光面に到達した光を検出し、検出された光に応じた信号を出力する2次元光検出器である。検出部50の受光面は、集光レンズ30により第1方向において対象物2のフレネル回折像が形成される面であって、第2方向において対象物2のフランフォーファー回折像が形成される面に配置される。ここで、平面 S_0 内に平行であって、Z軸に垂直な方向をu方向とし、平面 S_0 内に平行であって、u方向に垂直な方向をv方向と定める。なお、X軸及びY軸に垂直な軸をZ軸とする。

[0043] 図9は、集光レンズ30を介して検出部50に入射される光を模式的に示した図である。図9では、Y軸方向において、集光レンズ30の前焦点面に対象物2が配置され、集光レンズ30の後焦点面に検出部50の受光面が配置されている。

[0044] 図9(a)は、入射角 θ_0 が $-\phi$ である入射光に着目し、この入射光により対象物2で生じた散乱光 $L_1 \sim L_3$ が、検出部50に入射している様子を示している。対象物2が-Y軸方向に移動しているとすると、対象物2の移動方

向と逆の方向に入射ベクトル成分を有する入射光 L_0 は、第1のドップラー効果により、対象物2で生ずる散乱光の光周波数は高くなる($\omega_{d1} = \delta$)。対象物2は、第1のドップラー効果を受けた光を散乱させる。対象物2の移動方向と平行な方向に散乱方向ベクトル成分を有しない散乱光 L_1 は、第2のドップラー効果は起きない($\omega_{d2} = 0$)。したがって、散乱光 L_1 の光周波数は、第1のドップラー効果による周波数遷移のみが観測される($\omega_d = \delta + 0 = \delta$)。対象物2の移動方向と逆の方向に散乱方向ベクトル成分を有する散乱光 L_2 は第2のドップラー効果により光周波数が低くなる($\omega_{d2} = -\delta$)。したがって、散乱光 L_2 の光周波数は、第1のドップラー効果と第2のドップラー効果により光周波数が変化しない($\omega_d = \delta - \delta = 0$)。対象物2の移動方向と逆の方向に散乱方向ベクトル成分を有する散乱光 L_3 は、ドップラーシフトにより周波数変調を受け、光周波数が低くなる($\omega_{d2} = -2\delta$)。したがって散乱光 L_3 の光周波数は、第1のドップラー効果と第2のドップラー効果により光周波数が低くなる($\omega_d = \delta - 2\delta = -\delta$)。これらの散乱光 $L_1 \sim L_3$ は、集光レンズ30を経て、それぞれ検出部50の位置 $P_1 \sim P_3$ に到達する。

- [0045] 図9(b)は、入射角 θ_0 が0である入射光に着目し、この入射光により対象物2で生じた散乱光 $L_1 \sim L_3$ が、検出部50に入射している様子を示している。対象物2が-Y軸方向に移動しているとする、対象物2の移動方向と平行な方向に入射ベクトル成分を有しない入射光 L_0 は、第1のドップラー効果は起きず、対象物2で生ずる散乱光の光周波数は入射光と同じである($\omega_{d1} = 0$)。対象物2は、第1のドップラー効果がない光を散乱させる。対象物2の移動方向と同じ方向に散乱方向ベクトル成分を有する散乱光 L_1 は、ドップラー効果による周波数変調を受け、光周波数が高くなる($\omega_{d2} = +\delta$)。したがって、散乱光 L_1 の光周波数は、第1のドップラー効果と第2のドップラー効果により光周波数が高くなる($\omega_d = 0 + \delta = +\delta$)。対象物2の移動方向と平行な方向に散乱方向ベクトル成分を有しない散乱光 L_2 は、光周波数が変化しない($\omega_{d2} = 0$)。したがって散乱光 L_2 の光周波数は、第1の

ドップラー効果と第2のドップラー効果により光周波数は変化しない ($\omega_d = 0 - 0 = 0$)。対象物2の移動方向と逆の方向に散乱方向ベクトル成分を有する散乱光 L_3 は、ドップラーシフトにより周波数変調を受け、光周波数が低くなる ($\omega_{d2} = -\delta$)。したがって、散乱光 L_3 の光周波数は、第1のドップラー効果と第2のドップラー効果により光周波数が低くなる ($\omega_d = 0 - \delta = -\delta$)。これらの散乱光 $L_1 \sim L_3$ は、集光レンズ30を経て、それぞれ検出部50の位置 $P_2 \sim P_4$ に到達する。

[0046] 図9(c)は、入射角 θ_0 が ϕ である入射光に着目し、この入射光により対象物2で生じた散乱光 $L_1 \sim L_3$ が、検出部50に入射している様子を示している。対象物2が-Y軸方向に移動しているとすると、対象物2の移動方向と同じ方向に入射ベクトル成分を有する入射光 L_0 は、第1のドップラー効果により、対象物2で生ずる散乱光の光周波数は入射光より低くなる ($\omega_{d1} = -\delta$)。対象物2は、第1のドップラー効果を受けた光を散乱させる。対象物2の移動方向と同じ方向に散乱方向ベクトル成分を有する散乱光 L_1 は、ドップラー効果による周波数変調を受け、光周波数が高くなる ($\omega_{d2} = 2\delta$)。したがって、散乱光 L_1 の光周波数は、第1のドップラー効果と第2のドップラー効果により光周波数が高くなる ($\omega_d = -\delta + 2\delta = \delta$)。対象物2の移動方向と同じ方向に散乱方向ベクトル成分を有する散乱光 L_2 は、ドップラー効果による周波数変調を受け、光周波数が高くなる ($\omega_{d2} = \delta$)。したがって散乱光 L_2 の光周波数は、第1のドップラー効果と第2のドップラー効果により光周波数は変化しない ($\omega_d = -\delta + \delta = 0$)。対象物2の移動方向と平行な方向に散乱方向ベクトル成分を有しない散乱光 L_3 は、光周波数が変化しない ($\omega_{d2} = 0$)。したがって散乱光 L_3 の光周波数は、第1のドップラー効果と第2のドップラー効果により光周波数が低くなる ($\omega_d = -\delta + 0 = -\delta$)。これらの散乱光 $L_1 \sim L_3$ は、集光レンズ30を経て、それぞれ検出部50の位置 $P_3 \sim P_5$ に到達する。

[0047] 検出部50の位置 P_n ($n = 1 \sim 5$)では、周波数 Ω を基準として、散乱光 $L_1 \sim L_3$ のドップラー効果により、周波数 ω_d だけ周波数遷移した信号が干渉

ビート信号として観測される。この干渉ビート信号を所定期間にわたり記録し、その干渉ビート信号の振幅及び位相を計算することにより各散乱角の振幅及び位相（すなわち、複素振幅値）が得られる。

[0048] 図10は、3つの入射角 $\theta_0 = -\phi, 0, \phi$ を持つ入射光による散乱光が検出部50に入射される様子を模式的に示した図である。各入射角 θ_0 に対して、様々な散乱角 θ' を有する散乱光が生じるが、図10では、特定の散乱角 θ' を有する散乱光 $L_1 \sim L_3$ を図示している。同一の散乱角 θ' を持つ散乱光 $L_1 \sim L_3$ は、集光レンズ30を介して同一の位置 P_2 に到達する。これらの散乱光 $L_1 \sim L_3$ は、入射角 θ_0 が異なるため、ドップラー効果により、それぞれが異なる周波数遷移を受けている。つまり、散乱光 $L_1 \sim L_3$ の周波数は互いに異なっている。したがって、異なる入射角 θ_0 を有する入射光による散乱光は、検出部50の同一画素に到達するが、散乱光の周波数遷移からフーリエ変換等の手法により周波数弁別することで、入射角毎の信号を抽出することができる。

[0049] 上記のように、集光レンズ30により、対象物2からの散乱光のうち、入射角 θ_0 が異なり、散乱角 θ' が同一である光が検出部50の受光面の1点（ x, y ）に集まる。ここで、点（ x, y ）は、2次元に並設された検出部50の画素の座標である。すなわち、点（ x, y ）で観測される散乱光の散乱角 θ は固定値である。また、対象物2で生じた散乱光は、式（4）により周波数 ω_d の周波数遷移を起こすことから、光ヘテロダイン干渉計測により、点（ x, y ）において検出される干渉強度は、周波数 ω_d で変動することとなる。種々の入射角 θ_0 により生じる散乱光が点（ x, y ）に到達するために、点（ x, y ）においては、入射角 θ_0 に応じた周波数遷移を受けた種々の周波数の重ね合わせたビート信号が観測される。これらのビート信号に対し時刻変数 t に関するフーリエ変換をすると、このビート信号に含まれるドップラーシフト周波数 ω_d が分かる。さらに点（ x, y ）では、式（4）の散乱角 θ は固定値であることから、ドップラーシフト周波数 ω_d と入射角 θ_0 の間に式（5）に示すように一定の関係にある。よって、簡単な変換により入射角にお

ける複素振幅像を得ることができる。尚、 V_y は対象物の速度のY軸成分であり、説明を簡単にするために変調周波数 Ω を0とした。

[0050] [数5]

$$\omega_d = \frac{2\pi}{\lambda}(\mathbf{s} - \mathbf{s}_0) \cdot \mathbf{V} = \frac{2\pi V_y}{\lambda}(\sin \theta' - \sin \theta_0) \quad \cdots (5)$$

[0051] なお、最大入射角を $\theta_{0\max}$ とし、最大受光散乱角を $\theta_{\max}$ とすれば、最大ドップラーシフト周波数 B_w は、式(6)で表すことができる。式(6)において、 λ は入射光の波長であり、 V は対象物の速度である。したがって、ドップラーシフト周波数帯域は $2 B_w$ となる。

[0052] [数6]

$$B_w = \frac{2\pi}{\lambda} |V| (|\sin \theta_{0\max}| + |\sin \theta_{\max}|) \quad \cdots (6)$$

[0053] 本実施形態では、入射単位ベクトル $\mathbf{s}_0$ はX軸成分を持たないとしたため、Y-Z平面への投影入射角 θ_0' は入射角 θ_0 と一致する。もし、入射単位ベクトル $\mathbf{s}_0$ がX軸成分を持つ場合には、式(5)の θ_0 を投影入射角 θ_0' に置き換えればよい。

[0054] 演算部60は、検出部50が取得した所定平面上の第1方向の位置、第2方向の位置、及び時刻を変数とするデータについて、時刻変数に関する1次元フーリエ変換し、このフーリエ変換後のデータからドップラー効果に基づいて入射角が同一のデータを抽出する。

[0055] 図11に示すように、演算部60は、第1フーリエ変換部61、斜め切り部62（抽出部）、第2フーリエ変換部64、及び2次位相除算部63を備えている。第1フーリエ変換部61は、検出部50により取得された干渉強度像について時刻変数に関する1次元フーリエ変換を行う。斜め切り部62は、第1フーリエ変換部61により1次元フーリエ変換されたデータからドップラー効果に基づいて入射角が同一のデータを抽出する。第2フーリエ変換部64は、斜め切り部62から出力されたデータについて変数 x に関する1次元フーリエ変換を行う。2次位相除算部63は、第2フーリエ変換部64から出力されたデータを2次位相 $H(x)$ で除する。なお、第1フーリエ

変換部 6 1、斜め切り部 6 2、第 2 フーリエ変換部 6 4、及び 2 次位相除算部 6 3 は、2 次位相除算部 6 3 が第 2 フーリエ変換部 6 4 の後段に配置されている限り、互いに入れ替えて任意の順序で配置されてもよい。

[0056] 検出部 5 0 により取得された干渉強度像を $i(x, y; \eta)$ と表す。図 1 2 に、検出部 5 0 によって取得された干渉強度像 $i(x, y; \eta)$ の例を示す。図 1 2 の例では、速度 $10 \mu\text{m}/\text{秒}$ で移動させた直径 $25 \mu\text{m}$ の円形開口を対象物 2 として用いた。また、検出部 5 0 としては、1 画素サイズ $7.4 \times 7.4 \mu\text{m}$ で、 640×128 画素を持つ画像を毎秒 180 枚出力する CCD カメラを用いた。図 1 2 に示す干渉強度像 $i(x, y; \eta)$ では、干渉縞の間隔が番号 1 から 7 に向かって変化していることが分かる。

[0057] 対象物 2 が速度 V で移動しているとすると、対象物 2 の位置 $\eta = V t$ と表すことができる。ここで、 t は時刻である。対象物 2 は一定速度で移動するため、干渉強度像 $i(x, y; \eta)$ は、 $i(t, x, y)$ と表すことができる。第 1 フーリエ変換部 6 1 は、干渉強度像 $i(t, x, y)$ に対して時刻変数 t に関するフーリエ変換を行うことで、周波数依存複素振幅像 $a(\omega, x, y)$ を得る。ここで、 ω は時間周波数である。図 1 3 は、フーリエ変換により得られる周波数依存複素振幅像 $a(\omega, x, y)$ を模式的に示したものである。図 1 4 は、図 1 3 を X 軸方向から見た図である。周波数依存複素振幅像 a は、図 1 3 及び図 1 4 に示すように、X 軸方向については、X-Y 平面が紙面方向に並列して並んでいることから、説明を簡単にするため、以降、 ω -Y 平面の 2 次元で説明する。

[0058] 式 (5) 中の散乱角 θ' は、対象物 2、集光レンズ 3 0、及び検出部 5 0 の物理的配置に基づき定まる値であり測定中は一定となる値である。集光レンズ 3 0 の Y 軸方向の焦点距離を f_y とすると、集光レンズ 3 0 の Y 軸方向の後焦点面と検出部 5 0 の受光面とが一致している場合には、散乱角 θ' は、集光レンズ 3 0 の焦点距離 f_y 及び受光面座標 (x, y) を用いて式 (7) で表される。

[0059]

[数7]

$$\theta' = \tan^{-1}(y/f_Y) \quad \cdots (7)$$

ここで、 f_Y は既知の値であるため、散乱角 θ' は、変数 y のみで決定される投影散乱角である。式(7)の散乱角 θ' を式(5)に代入し、ヘテロダイン周波数 Ω を加味すると、第1フーリエ変換部61が出力する時間周波数 ω は以下の式(8)となる。

[0060] [数8]

$$\omega - \Omega = \frac{2\pi V_Y}{\lambda} \left(\frac{y}{f_Y} - \sin \theta_0 \right) \quad \cdots (8)$$

[0061] 式(8)において、 $\alpha = 2\pi V_Y / (\lambda f_Y)$ 、 $\beta = -2\pi V_Y / \lambda$ と置くと、式(8)は以下の式(1)のように表すことができる。つまり、式(1)は、 y 及び ω の線形一次関数である。なお、式(1)において、 $\beta \sin \theta_0$ の項を一定とした場合の複素振幅値は、一定の入射角 θ_0 で対象物に照射したときの受光面での複素振幅値である。

[0062] [数1]

$$\omega - \Omega = \alpha y + \beta \sin \theta_0 \quad \cdots (1)$$

[0063] 斜め切り部62は、周波数依存複素振幅像 $a(\omega, x, y)$ から、式(1)を満たす平面を抽出する。このように斜め切り部62により抽出された像は、入射角依存複素振幅像 $A(\theta_0, x, y)$ である。図13及び図14は、この数学的な操作を模式的に表している。図13及び図14において、破線で描かれた斜めの面が、斜め切り部62により、抽出された入射角依存複素振幅像 $A(\theta_0, x, y)$ である。この入射角依存複素振幅像 $A(\theta_0, x, y)$ は、複数枚の複素振幅像 $a(\omega, x, y)$ に対し、周波数 ω 方向及び Y 軸方向を横切るように抽出されている。図14に示すように、入射角依存複素振幅像 $A(\theta_0, x, y)$ の要素データは、式(1)のように $\omega - Y$ 平面において線形一次関数上の要素データとなっている。

[0064] 式(5)と(7)から導いた式(1)及び式(8)は、 $\sin \theta'$ を θ' と近似し、 θ' を y / f_Y と近似している。このような近似を用いることによ

り、入射角依存複素振幅像 $A(\theta_0, x, y)$ は平面となる。上記のような近似を用いない場合には、入射角依存複素振幅像 $A(\theta_0, x, y)$ の面は、曲面となる。

[0065] なお、 θ' を y/f_y とする近似に関しては、集光レンズ 30 の Y 軸方向に f_θ レンズを用いることにより、この近似値を真の値に近づけることができる。通常のレンズは、その焦点距離が f のとき、前焦点から角度 θ をもつ入射光がレンズ後焦点面の位置 y に到達するとき、入射角 θ と位置 y との関係が $y = f \tan \theta$ で表せるが、 f_θ レンズはその関係が $y = f_\theta \theta$ と表せるレンズのことである。この場合には、斜め切り部 62 は、周波数依存複素振幅像 $a(\omega, x, y)$ から、式 (3) を満たす平面を抽出する。

[0066] [数3]

$$\omega - \Omega = \frac{2\pi V_y}{\lambda} \left[\sin\left(\frac{y}{f_y}\right) - \sin \theta_0 \right] \quad \dots (3)$$

[0067] 本配置例では、検出部 50 の受光面が、X 軸方向が対象物 2 のフレネル回折像であって、Y 軸方向が対象物 2 のフランフォーファー回折像が形成される面に配置されている。検出部 50 がフレネル回折像面に配置されると、像のボケとして 2 次位相 $H(x)$ が現れる。したがって、本配置例では、X 軸方向に 2 次位相 $H(x)$ が現れる。

[0068] 2 次位相除算部 63 は、斜め切り部 62 において得た入射角依存複素振幅像 $A(\theta_0, x, y)$ を変数 x に関する 1 次元フーリエ変換後、2 次位相 $H(x)$ で除することで、本配置例により得られた複素振幅像から、検出部 50 の受光面が、X 軸方向が対象物 2 のフランフォーファー回折像であって、Y 軸方向が対象物 2 のフランフォーファー回折像が形成される面に配置された場合と同じ複素振幅像を得る。2 次位相 $H(x)$ は、検出部 50 が配置される位置により決まる値である。2 次位相 $H(x)$ は、式 (9) で表される。式 (9) において、 γ は定数である。

[0069] [数9]

$$H(x) = \exp(\gamma x^2) \quad \dots (9)$$

[0070] 2次位相除算部63は、式(1)により得られた入射角依存複素振幅像 $A(\theta_0, x, y)$ を変数 x に関する1次元フーリエ変換後、式(9)の2次位相 $H(x)$ で除することで、ボケのない入射角依存複素振幅像 A を得る。以上のように、本配置例の観察装置1は、入射角依存複素振幅像 A を得る。

[0071] (第2配置例)

次に、本実施形態の第2配置例について説明する。第2配置例では、検出部50の受光面が、X軸方向が対象物2のフランフォーファー回折像であって、Y軸方向が対象物2のフランフォーファー回折像が形成される面に配置される。このため、本配置例では、第1配置例の集光レンズ30に代えて、集光レンズ30Aを備えている。また、本配置例では、第1配置例の演算部60に代えて、演算部60Aを備えている。その他の構成は第1配置例と同じである。以下では、第1配置例との相違点についてのみ説明し、第1配置例と同一と見做し得る点については説明を省略する。

[0072] 図15は、本配置例で採用される集光レンズ30Aを示している。集光レンズ30Aは、照明レンズ20から出力された光の照射により対象物2で生じた散乱波を入力し、検出部50の受光面においてX軸方向がフランフォーファー回折像であって、Y軸方向がフランフォーファー回折像である像を形成する。図15(a)は集光レンズ30AをY軸方向から見た側面図であり、図15(b)は集光レンズ30AをX軸方向から見た側面図である。図15に示す点線は、集光レンズ30Aにおける光の結像の様子を表している。図15に示すように、集光レンズ30Aは、レンズOB、レンズLS1及びレンズLS3の3つのレンズにより構成される。

[0073] レンズOBは、20倍相当の開口数 $NA=0.45$ である対物レンズである。レンズOBの後焦点面をFPとする。レンズLS1は、X軸方向及びY軸方向に曲率を持つレンズである。レンズLS3は、X軸方向及びY軸方向に曲率を持つレンズである。集光レンズ30Aは、図15(a)に示すように、X軸方向において、レンズOBの後焦点面から出力された光をレンズLS1により平行光とし、レンズLS3により収束させることで、検出部50

の受光面にフランフォーファー回折像を形成する。また、集光レンズ30Aは、図15(b)に示すように、Y軸方向において、レンズOBの後焦点面から出力された光をレンズLS1により平行光とし、レンズLS3により収束させることで、検出部50の受光面にフランフォーファー回折像を形成する。このような集光レンズ30Aを対象物2と検出部50の間に備えることで、対象物2からの散乱光のうち、入射角 θ_0 が異なり、散乱角 θ' が同一である光が検出部50の受光面の1点に集光される。

[0074] 検出部50は、集光レンズ30Aにより同一の散乱角 θ' を有する散乱光が同一の位置に入射される所定平面に配置され、所定平面上の各位置に到達した光のドップラーシフト量に応じた周波数で時間的に変化するデータを、第1方向及び第2方向の各位置について各時刻に出力する。

[0075] 図16に示すように、本配置例の演算部60Aは、第1フーリエ変換部61、斜め切り部62を備えているが、第2フーリエ変換部64、及び2次位相除算部63を備えていない。本配置例では、検出部50の受光面が、X軸方向が対象物2のフランフォーファー回折像であって、Y軸方向が対象物2のフランフォーファー回折像が形成される面に配置されている。検出部50がフランフォーファー回折像に配置されている場合、レンズ30Aを構成するレンズLS1とLS3が備えるX方向に曲率を持つレンズ作用により変数 x に関する1次元フーリエ変換が光学的に行われ、さらに2次位相 $H(x)$ は1となる。したがって、本配置例では、第2フーリエ変換部64により変数 x に関する1次元フーリエ変換をする必要がない。更に2次位相除算部63により2次位相 $H(x)$ を除する必要もない。

[0076] 本配置例において得られる入射角依存複素振幅像 $A(\theta_0, x, y)$ は、第1配置例で式(1)により得られた入射角依存複素振幅像 $A(\theta_0, x, y)$ を式(9)の2次位相 $H(x)$ で除したボケのない入射角依存複素振幅像 A と同じ像である。つまり、第2配置例では、集光レンズ30Aの光学的作用により2次位相除算部63と同様な効果が得られている。逆にいえば、第1配置例において、2次位相除算部63は、第2配置例のレンズ30Aの光学

的作用を、演算によって実現しているともいえる。

[0077] (第3配置例)

次に、本実施形態の第3配置例について説明する。第3配置例では、検出部50の受光面が、X軸方向が対象物2の結像面であって、Y軸方向が対象物2のフランフォーファー回折像が形成される面に配置される。このため、本配置例では、第1配置例の集光レンズ30、第2配置例の集光レンズ30Aに代えて、集光レンズ30Bを備えている。また、本配置例では、第1配置例の演算部60、第2配置例の演算部60Aに代えて、演算部60Bを備えている。その他の構成は第1配置例及び第2配置例と同じである。以下では、第1配置例及び第2配置例との相違点についてのみ説明し、第1配置例及び第2配置例と同一と見做し得る点については説明を省略する。

[0078] 図17は、本配置例で採用される集光レンズ30Bを示している。集光レンズ30Bは、照明レンズ20から出力された光の照射により対象物2で生じた散乱波を入力し、検出部50の受光面においてX軸方向に対象物2の物体像であって、Y軸方向に対象物2のフランフォーファー回折像を形成する。図17(a)は集光レンズ30BをY軸方向から見た側面図であり、図17(b)は集光レンズ30BをX軸方向から見た側面図である。図17に示す点線は、集光レンズ30Bにおける光の結像の様子を表している。図17に示すように、集光レンズ30Bは、レンズOB、レンズLS1、レンズLS2、及びレンズLS3の4つのレンズにより構成される。

[0079] レンズOBは、20倍相当の開口数NAが0.45である対物レンズである。レンズOBの後焦点面をFPとする。レンズLS1は、X軸方向に曲率を持たず、Y軸方向に曲率を持つレンズである。レンズLS2は、X軸方向に曲率を持ち、Y軸方向に曲率を持たないレンズである。レンズLS3は、X軸方向に曲率を持たず、Y軸方向に曲率を持つレンズである。レンズLS2は、レンズLS1の後焦点面であって、レンズLS3の前焦点面に配置される。集光レンズ30Bは、図17(a)に示すように、X軸方向において、レンズOBの後焦点面から出力された光をレンズLS2により平行光とし

て、検出部50の受光面に、物体像を形成する。また、集光レンズ30Bは、図17(b)に示すように、Y軸方向において、レンズOBの後焦点面から出力された光をレンズLS1により平行光とさせ、レンズLS3により収束させることで、検出部50の受光面にフランフォーファー回折像面を形成させる。このような集光レンズ30Bを対象物2と検出部50の間に備えることで、対象物2からの散乱光のうち、入射角 θ_0 が異なり、散乱角 θ' が同一である光が検出部50の受光面の1点に集光される。

[0080] 図18に示すように、本配置例の演算部60Bは、第1フーリエ変換部61、斜め切り部62に加えて、第2フーリエ変換部64を更に備えている。第2フーリエ変換部64は、第1フーリエ変換部から出力されたデータについて変数 x に関する1次元フーリエ変換を行う。第1フーリエ変換部61及び斜め切り部62の機能は第1配置例と同じである。なお、第1フーリエ変換部61、第2フーリエ変換部64は、互いに入れ替えて任意の順序で配置されてもよい。つまり、第3配置例では、演算部60Bの第2フーリエ変換部64の作用により、第2配置例における集光レンズ30AのX方向に関する光学的な作用を、演算によって実現しているともいえる。

[0081] 図19～21に、本配置例の観察装置によって取得された複素振幅像を示す。図19～21では、対象物2として速度 $10\mu\text{m}/\text{秒}$ で移動させた直径 $25\mu\text{m}$ の円形開口を用いた。また、検出部50としては、1画素サイズ $7.4\times 7.4\mu\text{m}$ で、 640×128 画素を持つ画像を毎秒180枚出力するCCDカメラを用いた。図19は、演算部60Bにより算出された周波数依存複素振幅像 $a(\omega, x, y)$ の振幅像を周波数毎(番号1～6)に示したものである。図20は、演算部60Bにより取得された周波数依存複素振幅像 $a(\omega, x, y)$ の位相像を周波数毎(番号1～6)に示したものである。図19及び20では、横軸をX軸とし、縦軸をY軸としている。

[0082] 図21は、図19及び20の周波数依存複素振幅像 $a(\omega, x, y)$ を、斜め切り部62により式(1)を満たす平面で抽出されることで得られた入射角依存複素振幅像 $A(\theta_0, x, y)$ である。同図(a)は、入射角 $\theta_0=$

0.7 mrad の場合の入射角依存複素振幅像 A であり、同図 (b) は、入射角 $\theta_0 = 0$ mrad の場合の入射角依存複素振幅像 A であり、同図 (c) は、入射角 $\theta_0 = -0.7$ mrad の場合の入射角依存複素振幅像 A である。同図左は、入射角依存複素振幅像 A の振幅像であり、同図右は入射角依存複素振幅像 A の位相像である。図 21 では、横軸を X 軸とし、縦軸を Y 軸としている。

[0083] 本実施形態の観察装置 1 では、移動している対象物 2 は、光源部 10 及び照明レンズ 20 により光が多方向から照射されて、散乱光を発生させる。その散乱光は、散乱角 θ' に応じた量のドップラーシフトを受ける。散乱光のうち、同一の散乱角 θ' を有する散乱光が検出部 50 上の同一の位置で受光される。検出部 50 から、受光面の各位置に到達した光のドップラーシフト周波数 ω_d で時間的に変化するデータが、第 1 方向及び第 2 方向の各位置について各時刻に出力される。演算部 60 により、所定平面上の第 1 方向の位置、第 2 方向の位置、及び時刻を変数とするデータについて時刻変数に関する 1 次元フーリエ変換を行い、このフーリエ変換後のデータからドップラー効果に基づいて対象物に対する入射角 θ_0 が同一のデータが抽出される。この構成によれば、ドップラー効果を用いて対象物に対する入射角 θ_0 が同一のデータを抽出することできるため、対象物 2 が静止していると見做し得る期間内に複数回対象物 2 の撮像をする必要がない。よって、1 画素当りの読出し速度が低速である検出部 50 を用いる場合であっても移動している対象物 2 の像を得ることができる。

[0084] (第 2 実施形態)

第 1 実施形態では、斜め切り部 62 が、式 (1) を満たす平面を抽出して入射角依存複素振幅像 $A(\theta_0, x, y)$ を得た。第 2 実施形態では、斜め切り部 62 が抽出する面が異なり、それ以外の点は同じである。以下では、主に第 1 実施形態と異なる点について説明し、第 1 実施形態と同一である点については説明を省略する。

[0085] 式 (5) と (7) から導いた式 (1) 及び式 (8) は、 $\sin \theta'$ を θ'

と近似し、 θ' を y/f_y と近似している。このような近似を用いることにより、入射角依存複素振幅像 $A(\theta_0, x, y)$ は平面となる。なお、式(1)及び式(8)は、Y軸方向に関して正弦条件 (Abbe sine condition) を満たす集光レンズ30、30A、30Bに対して成り立つ式である。このため、上記の近似を行う代わりに、正弦条件を満たす集光レンズ30、30A、30Bを用いた場合にも、入射角依存複素振幅像 $A(\theta_0, x, y)$ は平面となる。本実施形態の斜め切り部62では、上記2つの近似を適用せず、式(1)及び式(8)の厳密式である下記式(2)を用いて入射角依存複素振幅像 $a(\theta_0, x, y)$ を得る。

[0086] [数2]

$$\omega - \Omega = \frac{2\pi V}{\lambda} \left[\sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{y}{f_y} \right) \right) - \sin \theta_0 \right] \quad \cdots (2)$$

[0087] 厳密式である式(2)は、近似式である式(1)及び式(8)とは異なり、線形一次関数ではない。ただし、式(2)を満たす面Sにて入射角依存複素振幅像 $A(\theta_0, x, y)$ を抽出することにより、精度の高い入射角依存複素振幅像Aを得ることができる。

[0088] (変形例)

本実施形態の観察装置1では、対象物2の速度が変化するとドップラー信号に周波数変調が生じて、最終的に得られる対象物2の像が流れ方向に伸縮する。このような伸縮を補正するために、本実施形態の観察装置1は、対象物2の移動速度を検出する速度検出部を更に備えるのが好適である。そして、演算部60は、速度検出部により検出された対象物2の速度に基づいて、時間方向の1次元フーリエ変換の際に対象物2の速度変化に関する補正を行うのが好適である。または、速度検出部より検出された対象物2の速度に基づいて、検出部50の撮影タイミングを図ってもよい。

[0089] この速度検出部は、任意のものが用いられ得るが、移動速度とドップラーシフト量との間の関係を利用して、集光レンズ30の後焦点面の散乱光到達位置における信号の周波数を検出することでも対象物2の移動速度を求める

ことができる。この場合、速度検出部は、ビームスプリッタHM2から検出部50へ向う光の一部が分岐されたものをフーリエ面上で検出してもよいし、或いは、検出部50の受光面の一部に独立に設けられた画素を含むものであってもよい。その画素の大きさは、対象物2の移動速度Vとドップラー周波数 ω_d との関係から導かれる移動速度の分解能を有する面積を持つことが好ましい。

[0090] 本実施形態の観察装置1において、第2実施形態では、対象物2に照射される光L0のうち対象物2により散乱されなかった光（0次光）は、検出部50の1点に集光される。この0次光が検出部50の受光面に到達すると、検出部50により得られる信号の質が劣化する。そこで、このような0次光が検出部50の受光面にすべてが到達しないように0次光を減衰させるための減光フィルタが設けられてもよい。或いは、0次光の発生が少ないようなビーム断面を有する光を対象物2に照射してもよい。そして、光源部10と検出部50との間に対象物2が存在しないときに、検出部50に到達する光強度を加味させ、強度ムラを補正することが好ましい。

[0091] 以上の説明では、光源の対象物の像を透過照明で取得する実施例を主に示したが、反射（落射）照明、または限外照明で取得してもよいことは、明らかである。光源として、単一縦モードの光の利用が好適であるが、これに限定されない。例えば、広帯域の光を用いることで、位相物体の深さに関する情報も取得可能となる。その他、広帯域の光として、波長成分間の位相関係が一定であるものを用いるのが好適である。このような光源として、例えばモードロックレーザーを用いることができる。

符号の説明

[0092] 1…観察装置、2…対象物、10…光源部、20…照明レンズ、30, 30A, 30B…集光レンズ、40…変調部（変調器）、50…検出部、60, 60A, 60B…演算部、61…第1フーリエ変換部、62…斜め切り部（抽出部）、63…2次位相除算部、64…第2フーリエ変換部。

請求の範囲

[請求項1]

移動している対象物へ光を多方向から照射する光源部と、
前記光源部による光照射により前記対象物で生じた散乱光のうち、
同一の散乱角を有する散乱光が同一の位置に入射する所定平面に配置
され、前記対象物の移動方向に垂直な方向を第1方向とし、前記対象
物の移動方向に平行な方向を第2方向としたときに、前記所定平面上
の各位置に到達した光のドップラーシフト量に応じた周波数で時間的
に変化するデータを、前記第1方向及び前記第2方向の各位置につい
て各時刻に出力する検出部と、

前記所定平面上の前記第1方向の位置、前記第2方向の位置、及び
時刻を変数とするデータについて時刻変数に関する1次元フーリエ変
換を行い、このフーリエ変換後のデータからドップラー効果に基づい
て前記対象物に対する入射角が同一のデータを抽出する演算部と、

前記光源部から出力された光を入力して、その入力した光を前記対
象物の前段で2分割して第1の光及び第2の光とし、前記第1の光又
は第2の光を変調器で変調した後に前記所定平面上で、前記第1の光
と前記第2の光とをヘテロダイン干渉させる光学系と、を備える観察
装置。

[請求項2]

前記演算部が、前記フーリエ変換後のデータから下記式(1)を満
たす平面のデータを抽出する、請求項1に記載の観察装置。

[数1]

$$\omega - \Omega = \alpha y + \beta \sin \theta_0 \cdots (1)$$

(式(1)中、 ω は前記フーリエ変換後のデータの時間周波数であり
、 Ω は変調周波数であり、 y は前記検出部の前記第2方向の位置であ
り、 θ_0 は前記入射角であり、 α 、 β は定数である。)

[請求項3]

前記対象物と前記検出部の間に配置される集光レンズを更に備え、
前記演算部が、前記フーリエ変換後のデータから下記式(2)を満
たす面のデータを抽出する、請求項1に記載の観察装置。

[数2]

$$\omega - \Omega = \frac{2\pi V}{\lambda} \left[\sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{y}{f_y} \right) \right) - \sin \theta_0 \right] \quad \cdots (2)$$

(式(2)中、 ω は前記フーリエ変換後のデータの時間周波数であり、 Ω は前記変調器の変調周波数であり、 V は前記対象物の移動速度であり、 λ は前記光源部が照射する光の波長であり、 y は前記検出部の前記第2方向の位置であり、 f_y は前記集光レンズの第2方向の焦点距離であり、 θ_0 は前記入射角である。)

[請求項4]

前記対象物と前記検出部の間に配置される集光レンズを更に備え、
前記検出部の受光面が、前記集光レンズにより前記第1方向において前記対象物のフレネル回折像が形成される面であって、前記第2方向において前記対象物のフランフォーファー回折像が形成される面に配置され、

前記演算部が、前記時刻変数に関する1次元フーリエ変換を行う第1フーリエ変換部と、前記第1方向に関する1次元フーリエ変換を行う第2フーリエ変換部と、ドップラー効果に基づいて前記対象物に対する入射角が同一のデータを抽出する抽出部と、前記検出部が配置される位置により定まる値である2次位相で除する2次位相除算部とを含む、請求項1又は2に記載の観察装置。

[請求項5]

前記対象物と前記検出部の間に配置される集光レンズを更に備え、
前記検出部の受光面が、前記集光レンズにより前記第1方向において前記対象物のフランフォーファー回折像が形成される面であって、前記第2方向において前記対象物のフランフォーファー回折像が形成される面に配置され、

前記演算部が、前記時刻変数に関する1次元フーリエ変換を行う第1フーリエ変換部と、ドップラー効果に基づいて前記対象物に対する入射角が同一のデータを抽出する抽出部とを含む、請求項1又は2に記載の観察装置。

[請求項6] 前記対象物と前記検出部の間に配置される集光レンズを更に備え、
前記検出部の受光面が、前記集光レンズにより前記第1方向において前記対象物の像が形成される結像面であって、前記第2方向において前記対象物のフランフォーファー回折像が形成される面に配置され、

前記演算部が、前記時刻変数に関する1次元フーリエ変換を行う第1フーリエ変換部と、前記第1方向に関する1次元フーリエ変換を行う第2フーリエ変換部と、ドップラー効果に基づいて前記対象物に対する入射角が同一のデータを抽出する抽出部とを含む、請求項1又は2に記載の観察装置。

[請求項7] 前記検出部の受光面が、前記集光レンズにより前記第1方向において前記対象物のフレネル回折像が形成される面であって、前記第2方向において前記対象物のフランフォーファー回折像が形成される面に配置され、

前記演算部が、前記時刻変数に関する1次元フーリエ変換を行う第1フーリエ変換部と、前記第1方向に関する1次元フーリエ変換を行う第2フーリエ変換部と、ドップラー効果に基づいて前記対象物に対する入射角が同一のデータを抽出する抽出部と、前記検出部が配置される位置により定まる値である2次位相で除する2次位相除算部とを含む、請求項3に記載の観察装置。

[請求項8] 前記検出部の受光面が、前記集光レンズにより前記第1方向において前記対象物のフランフォーファー回折像が形成される面であって、前記第2方向において前記対象物のフランフォーファー回折像が形成される面に配置され、

前記演算部が、前記時刻変数に関する1次元フーリエ変換を行う第1フーリエ変換部と、ドップラー効果に基づいて前記対象物に対する入射角が同一のデータを抽出する抽出部とを含む、請求項3に記載の観察装置。

[請求項9] 前記検出部の受光面が、前記集光レンズにより前記第1方向において前記対象物の像が形成される結像面であって、前記第2方向において前記対象物のフランフォーファー回折像が形成される面に配置され、

前記演算部が、前記時刻変数に関する1次元フーリエ変換を行う第1フーリエ変換部と、前記第1方向に関する1次元フーリエ変換を行う第2フーリエ変換部と、ドップラー効果に基づいて前記対象物に対する入射角が同一のデータを抽出する抽出部とを含む、請求項3に記載の観察装置。

[請求項10] 前記対象物と前記検出部の間に配置される集光レンズを更に備え、
前記集光レンズがfθレンズであり、
前記演算部が、前記フーリエ変換後のデータから下記式(3)を満たす面のデータを抽出する、請求項1に記載の観察装置。

[数3]

$$\omega - \Omega = \frac{2\pi V_y}{\lambda} \left[\sin\left(\frac{y}{f_y}\right) - \sin\theta_0 \right] \quad \dots (3)$$

(式(3)中、 ω は前記フーリエ変換後のデータの時間周波数であり、 Ω は前記変調器の変調周波数であり、 V_y は前記対象物の前記第2方向の移動速度であり、 λ は前記光源部が照射する光の波長であり、 y は前記検出部の前記第2方向の位置であり、 f_y は前記集光レンズの前記第2方向の焦点距離であり、 θ_0 は前記入射角である。)

[請求項11] 前記光源部と前記対象物との間に配置され、前記光源部から照射される光を受光して、前記第2方向に収束又は発散する光を前記対象物に照射する照明レンズを更に備える、請求項1～10の何れか一項に記載の観察装置。

[請求項12] 前記対象物の移動速度を検出する速度検出部を更に備え、
前記演算部が、前記速度検出部により検出された前記対象物の速度に基づいて、前記時刻変数に関する1次元フーリエ変換の際に前記対

象物の速度変化に関する補正を行う、請求項 1 ～ 1 1 の何れか 1 項に記載の観察装置。

[請求項13] 前記対象物への光の照射が、透過照明の光学配置によって行われる請求項 1 ～ 1 2 の何れか 1 項に記載の観察装置。

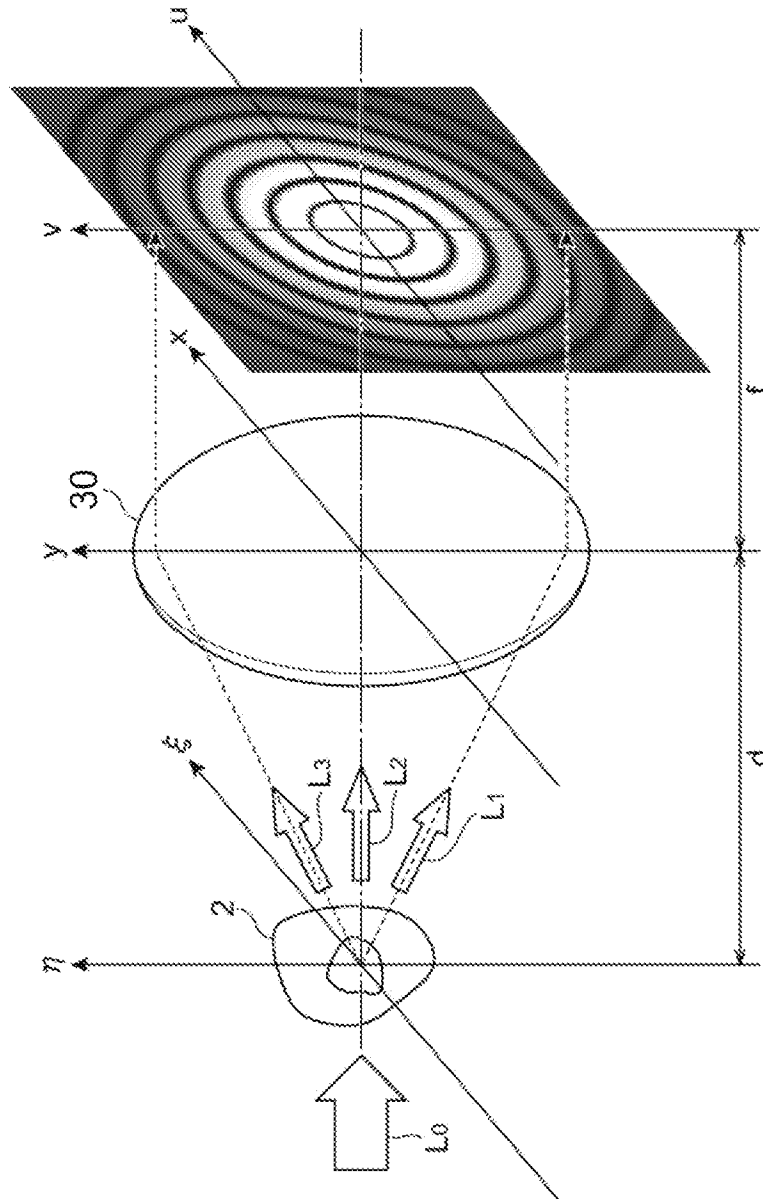
[請求項14] 前記対象物への光の照射が、反射照明の光学配置によって行われる請求項 1 ～ 1 2 の何れか 1 項に記載の観察装置。

[請求項15] 前記光源部が、単一縦モードの光を生成する光源である請求項 1 ～ 1 4 の何れか 1 項に記載の観察装置。

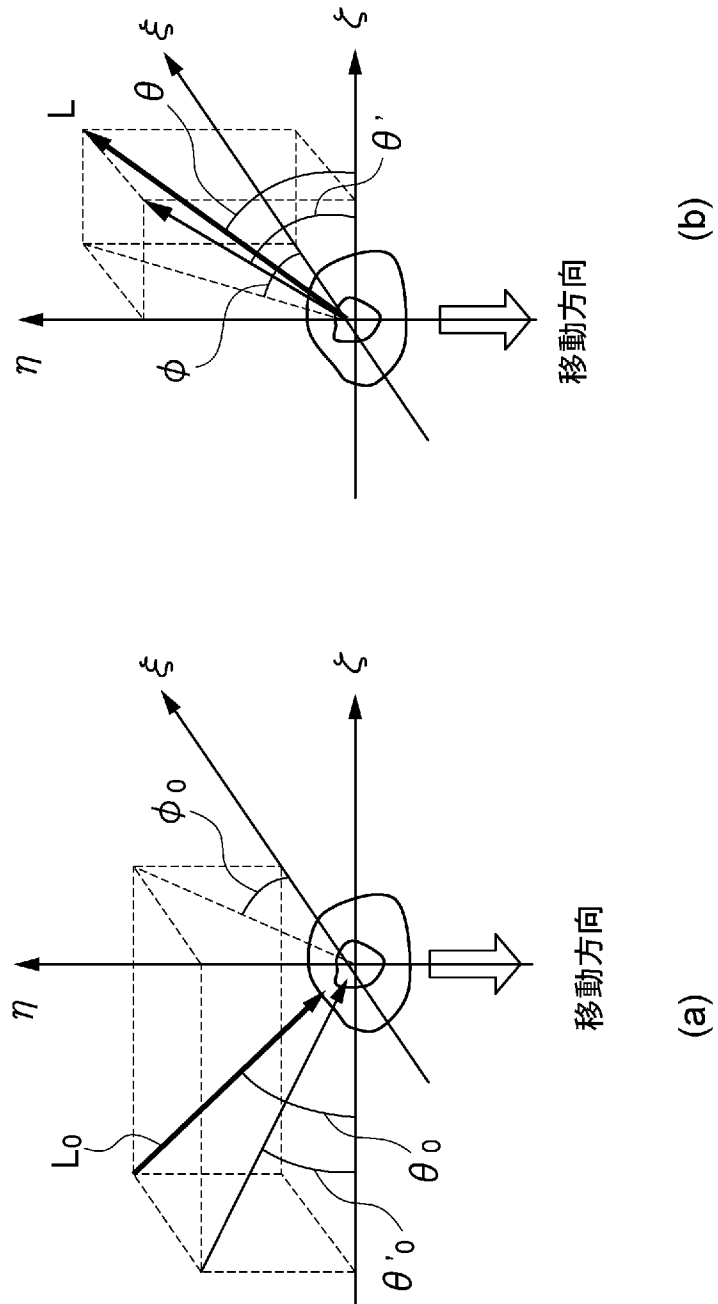
[請求項16] 前記光源部が、広帯域の光を生成する光源である請求項 1 ～ 1 4 の何れか 1 項に記載の観察装置。

[請求項17] 前記光源部が、モードロックレーザーである請求項 1 6 に記載の観察装置。

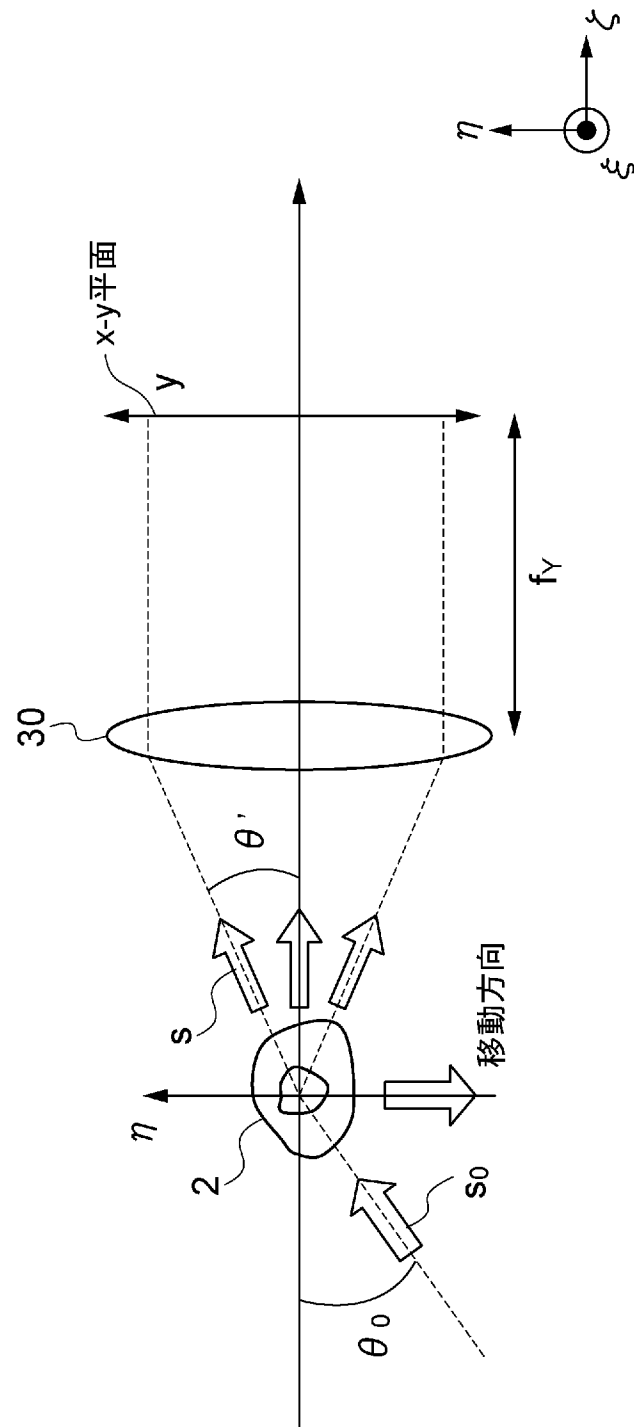
[図1]



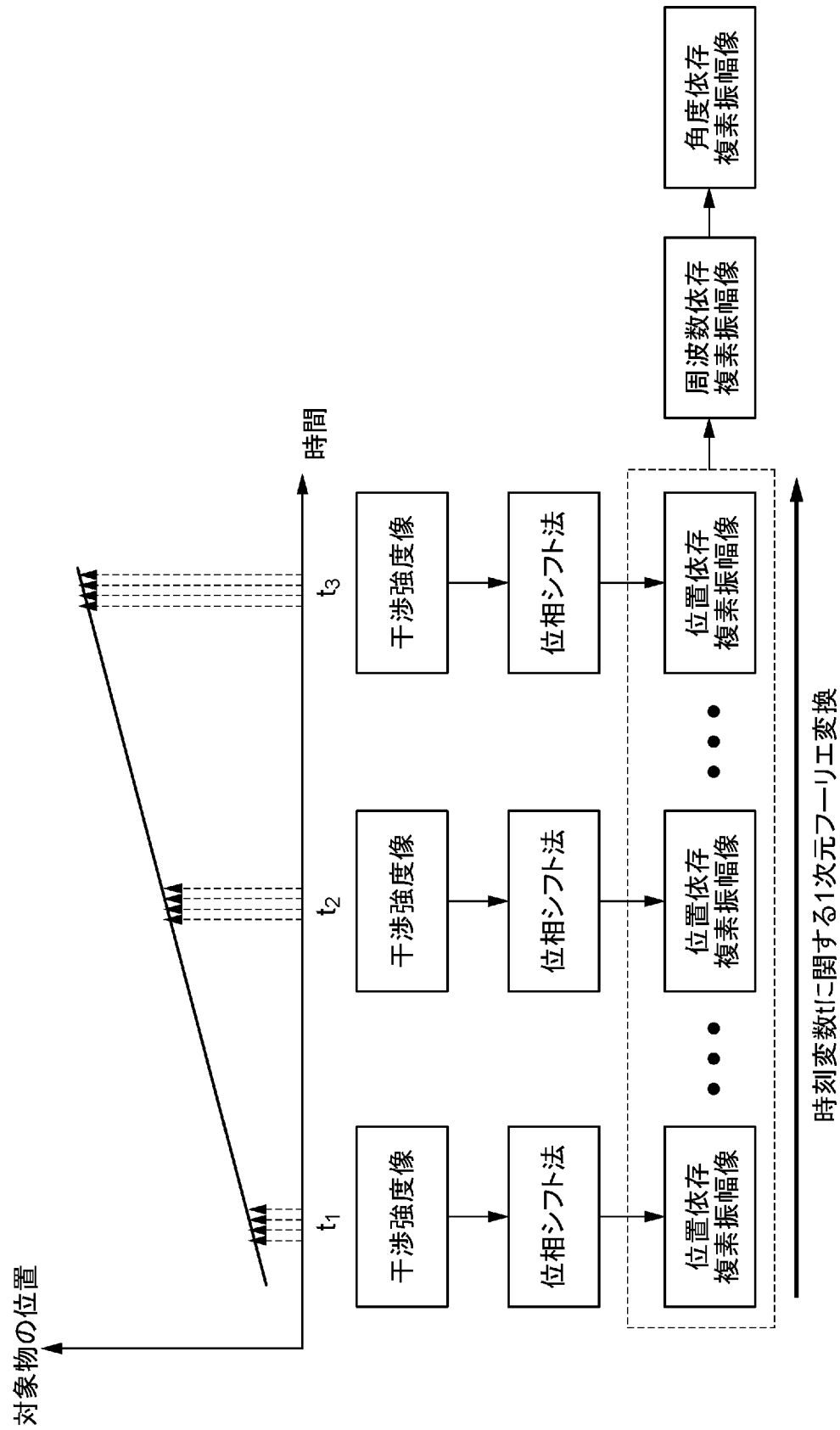
[図2]



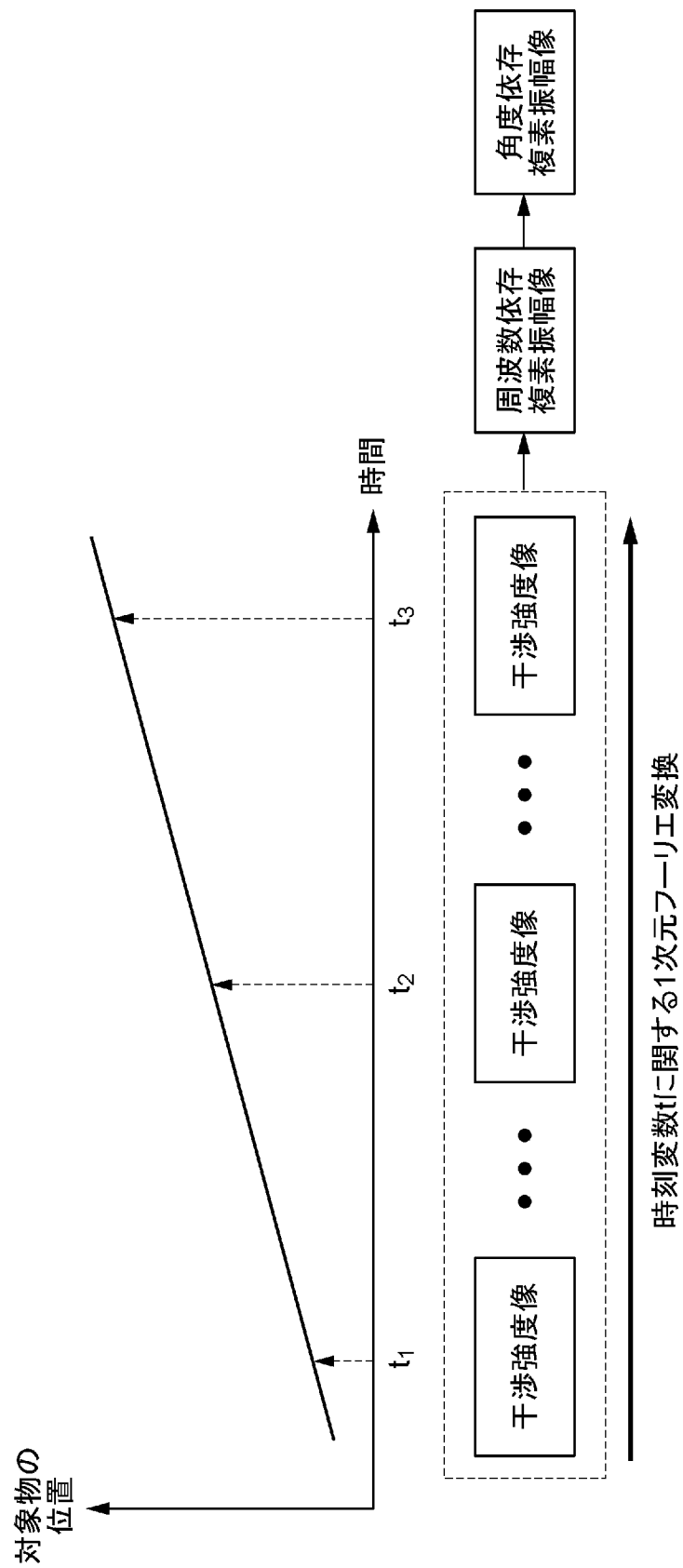
[図3]



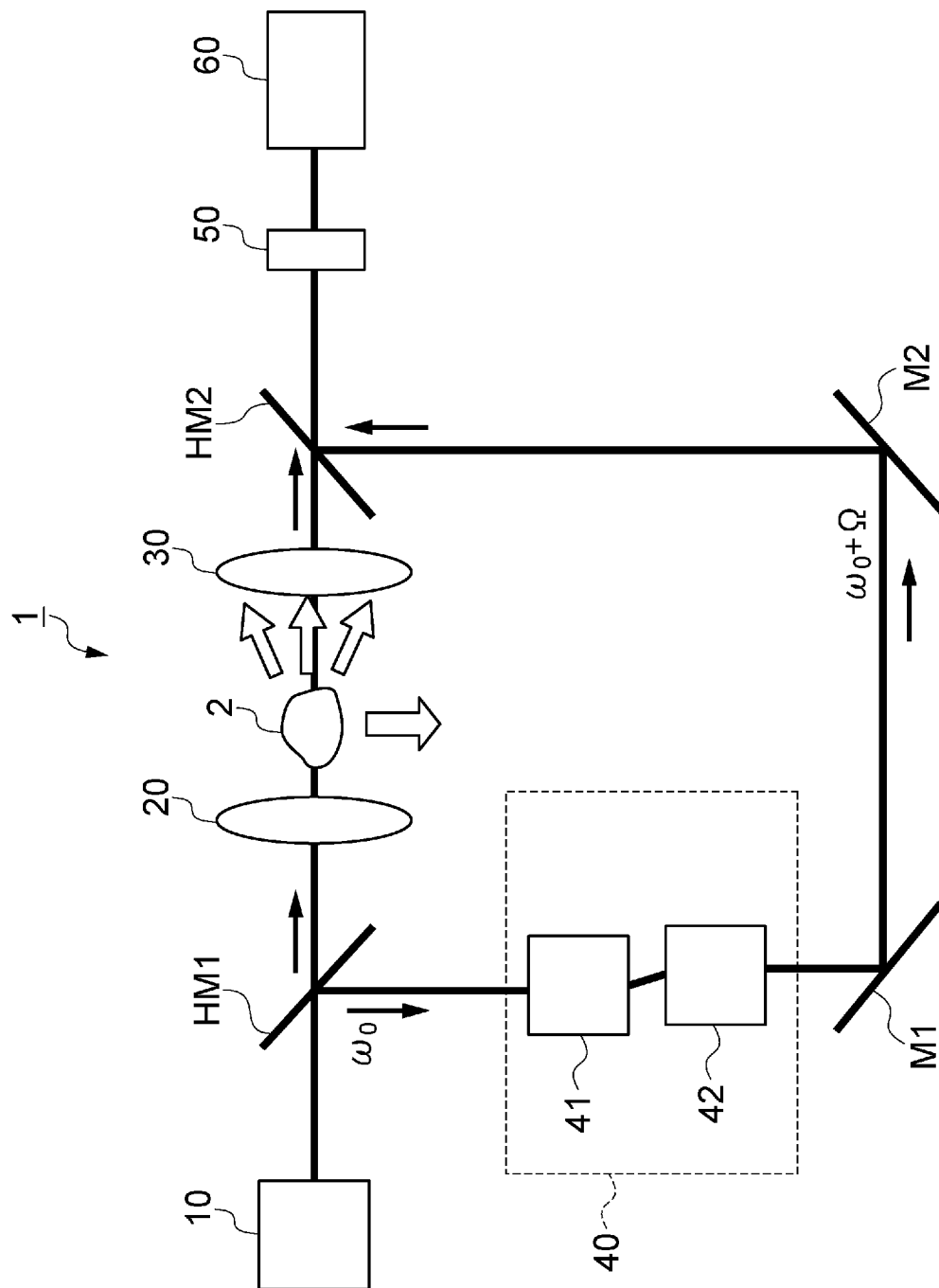
[図4]



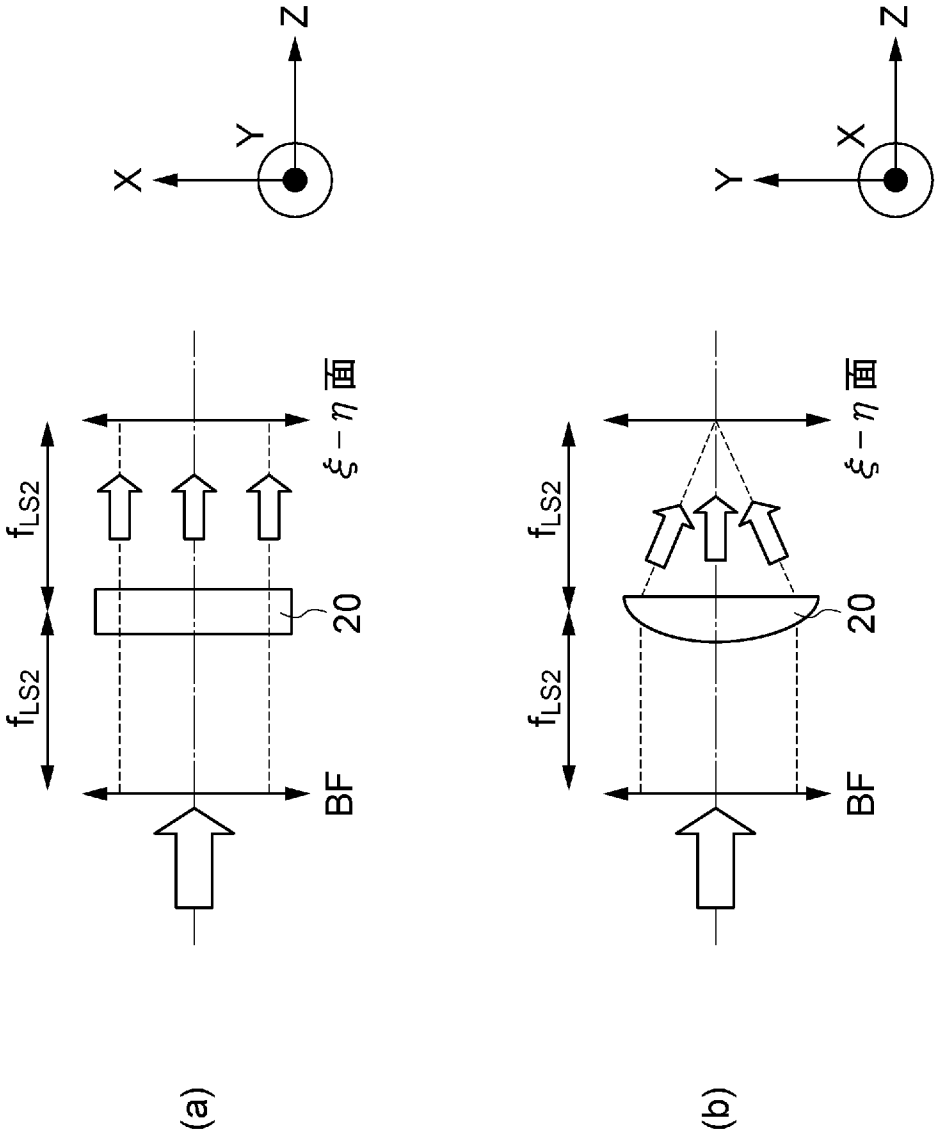
[図5]



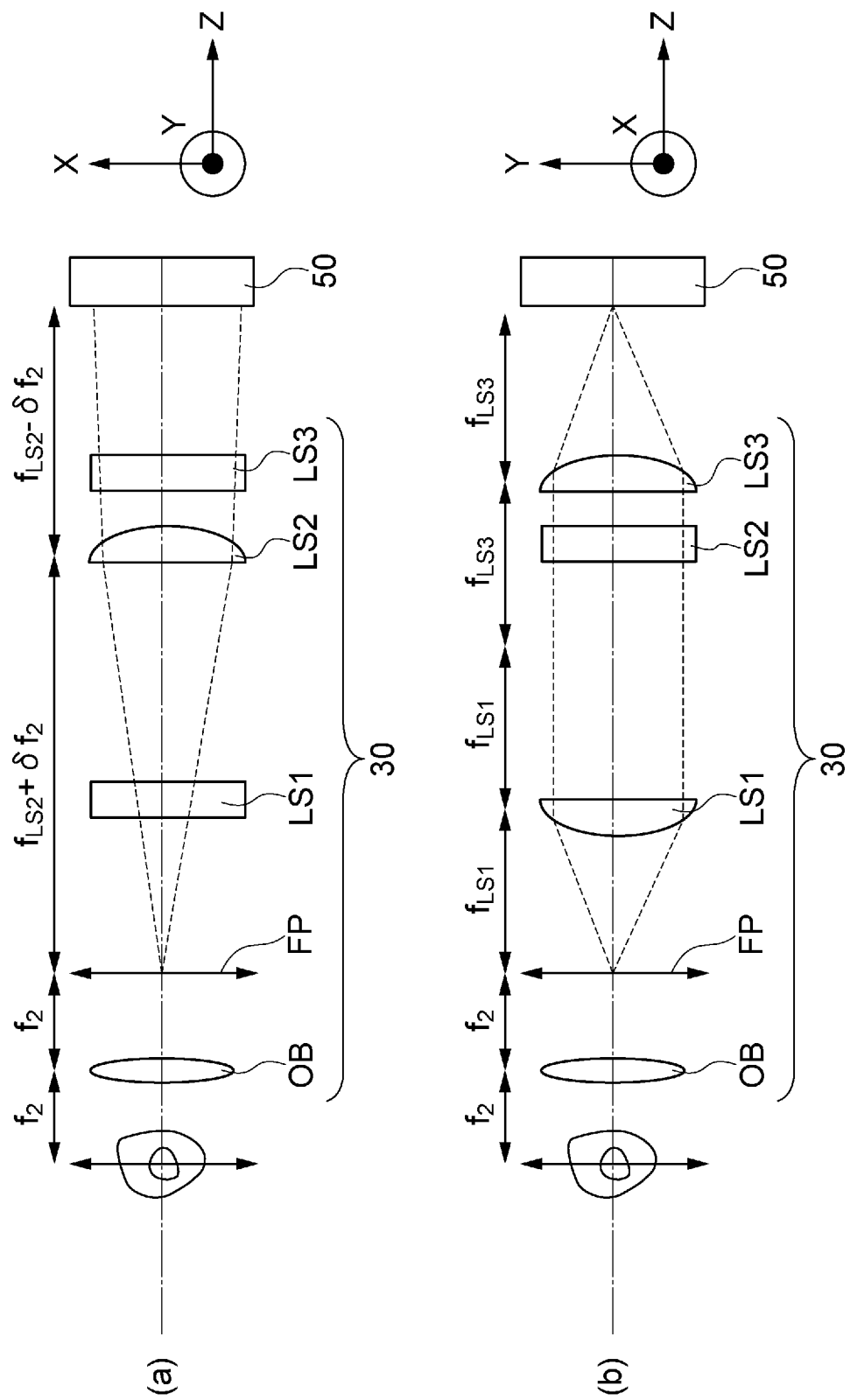
[図6]



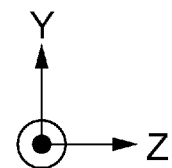
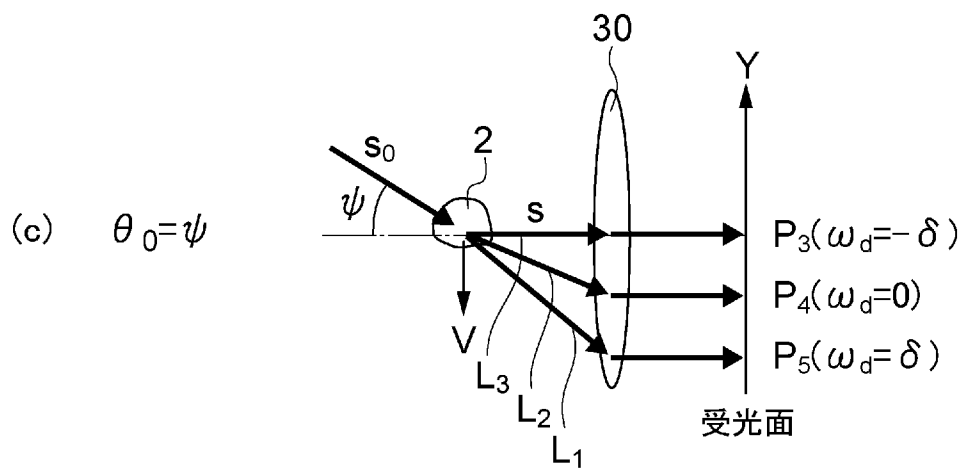
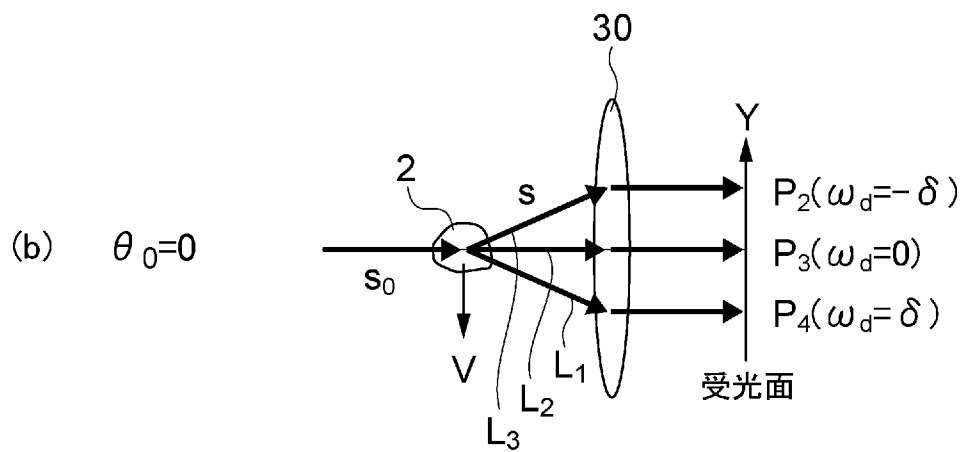
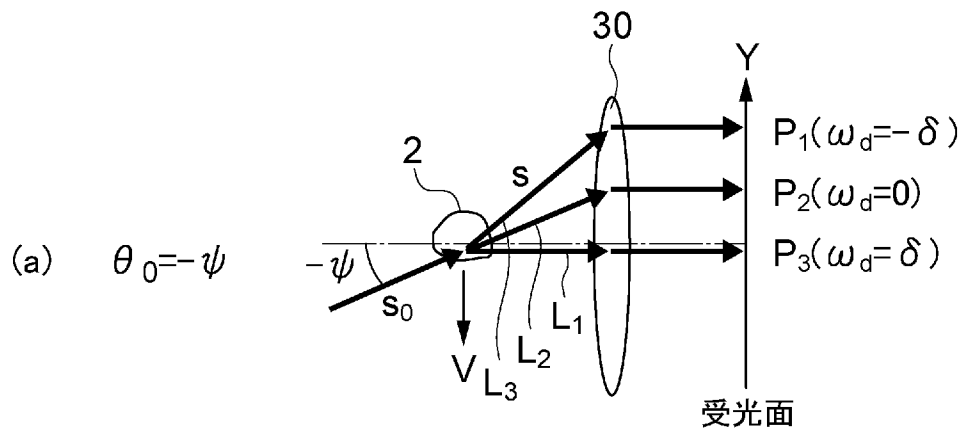
[図7]



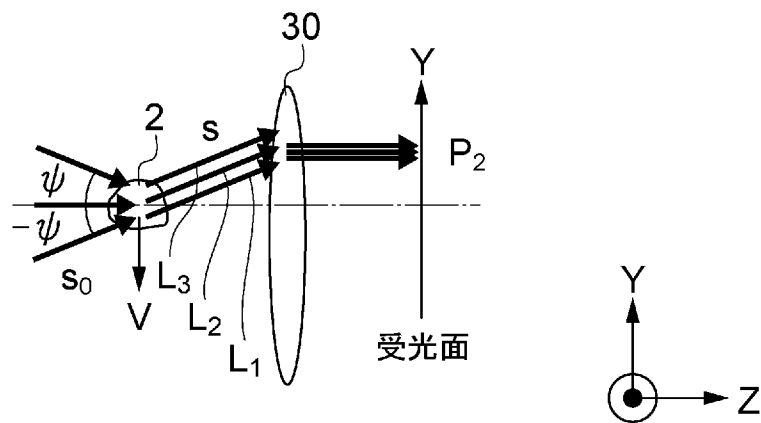
[図8]



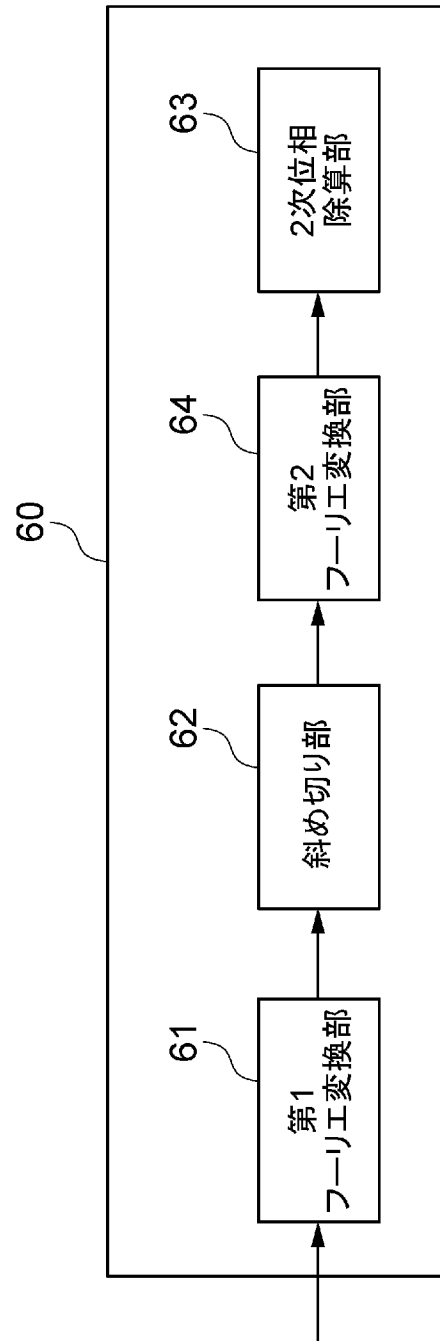
[図9]



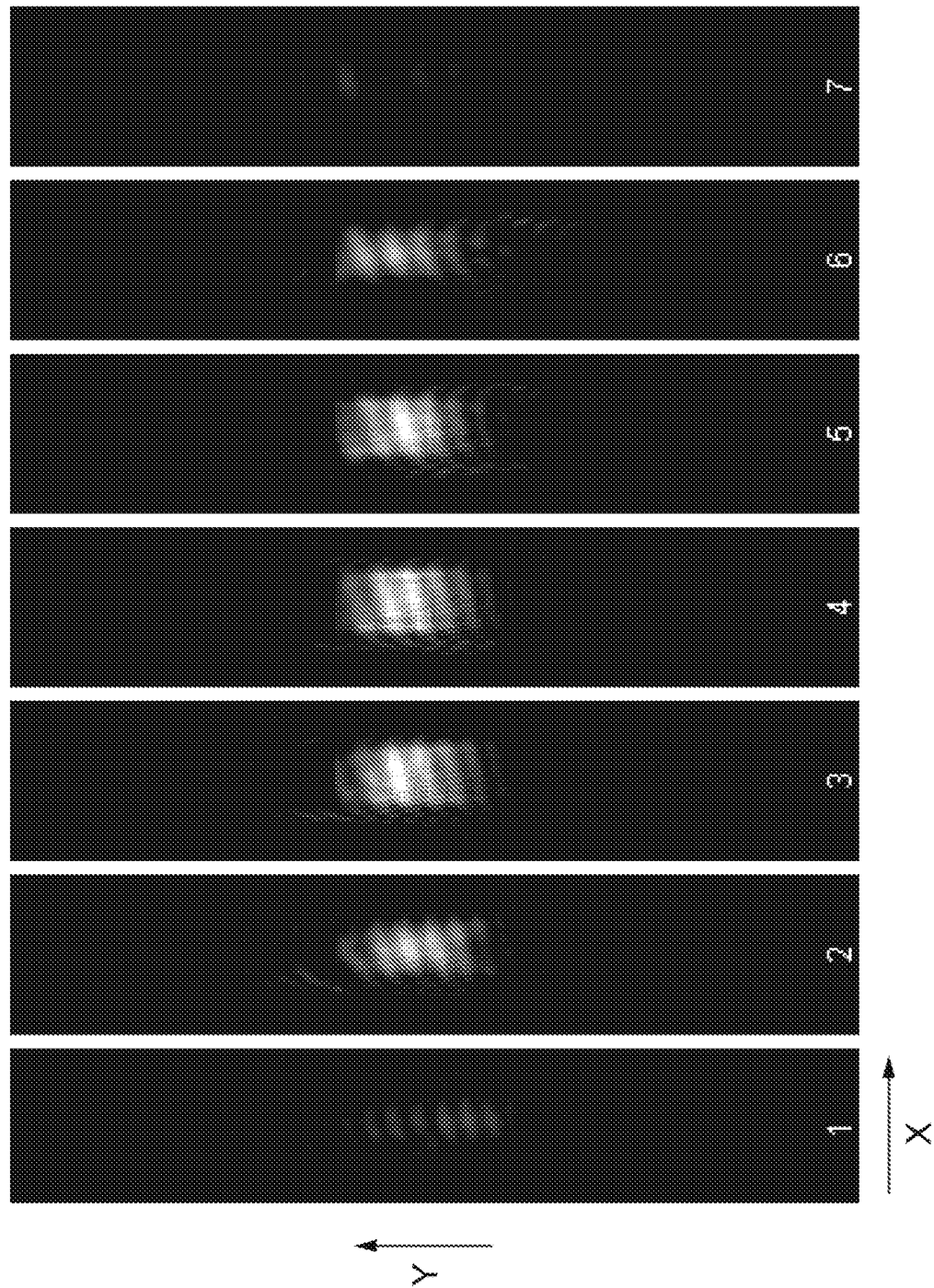
[図10]



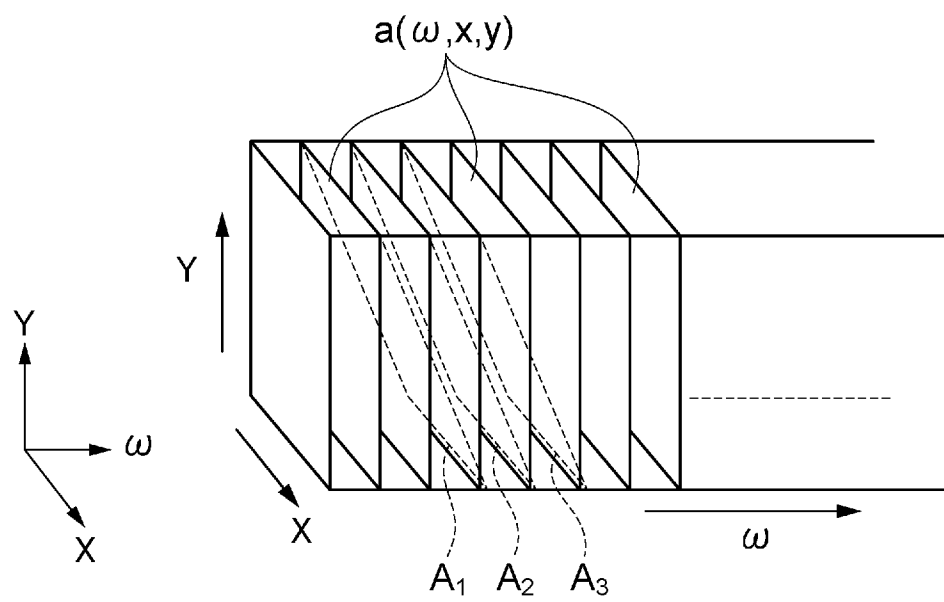
[図11]



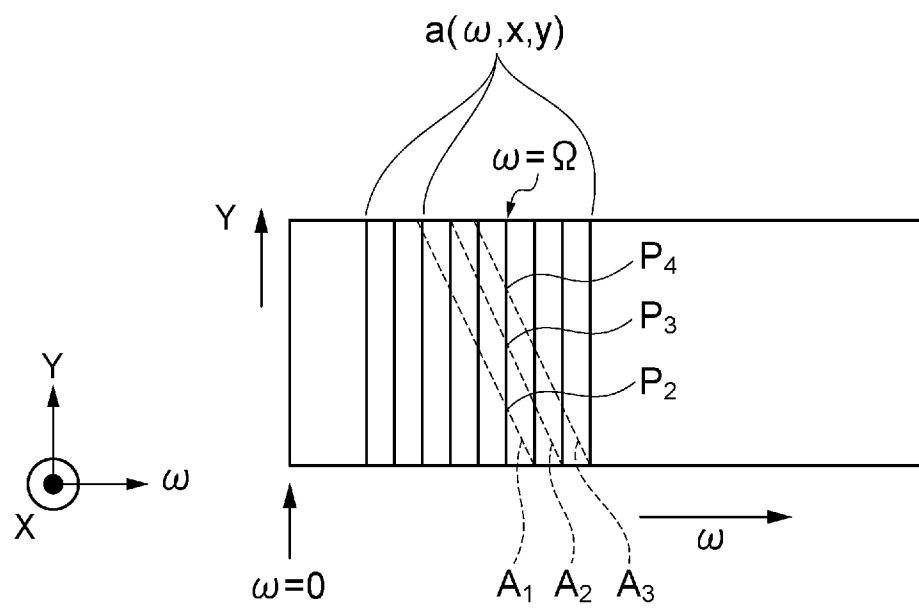
[図12]



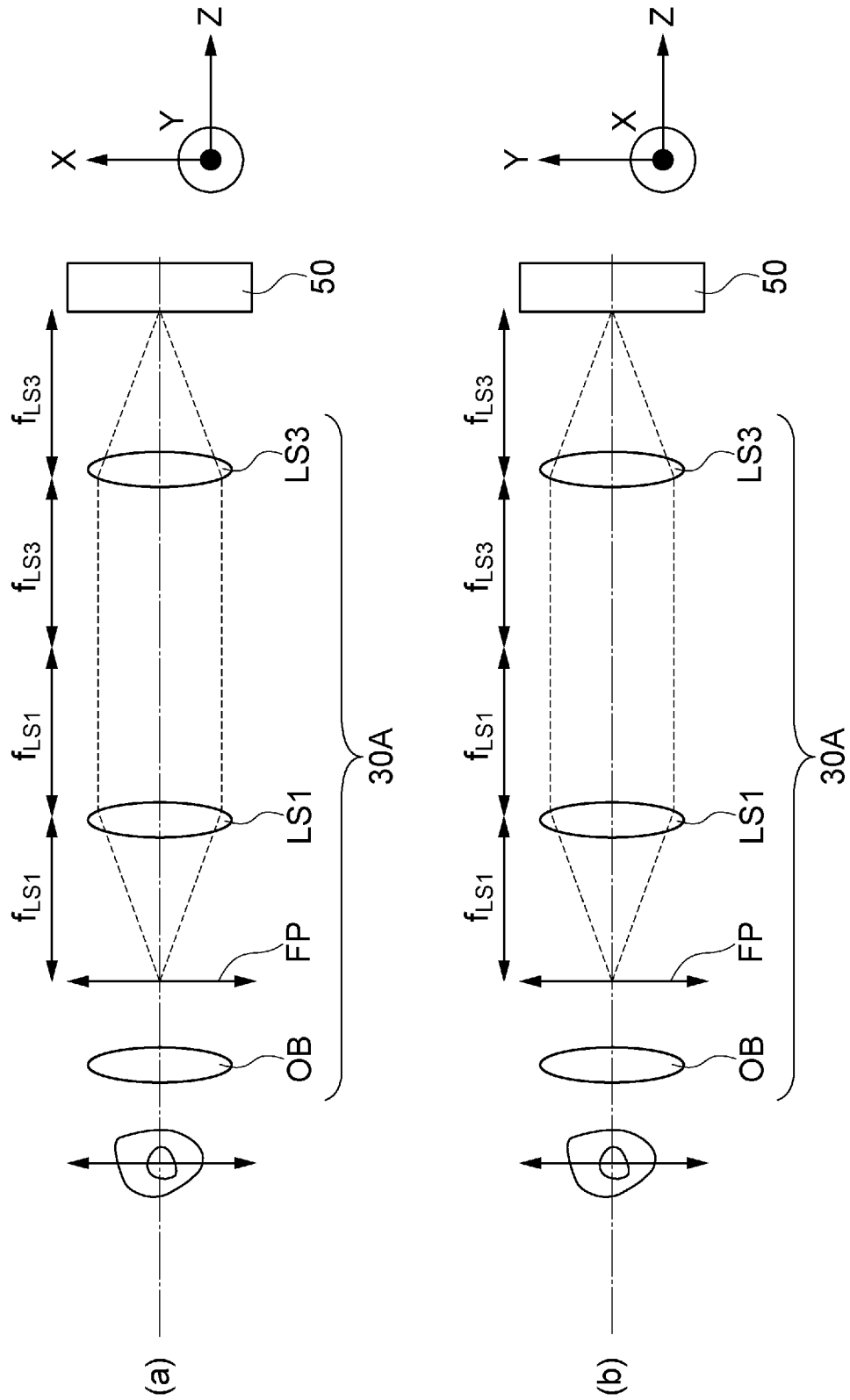
[図13]



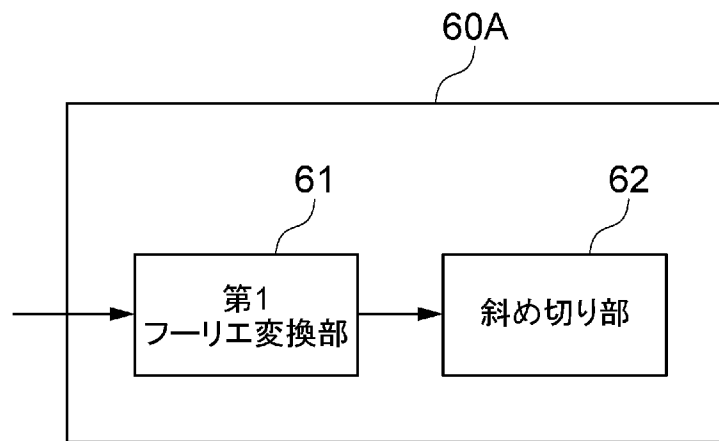
[図14]



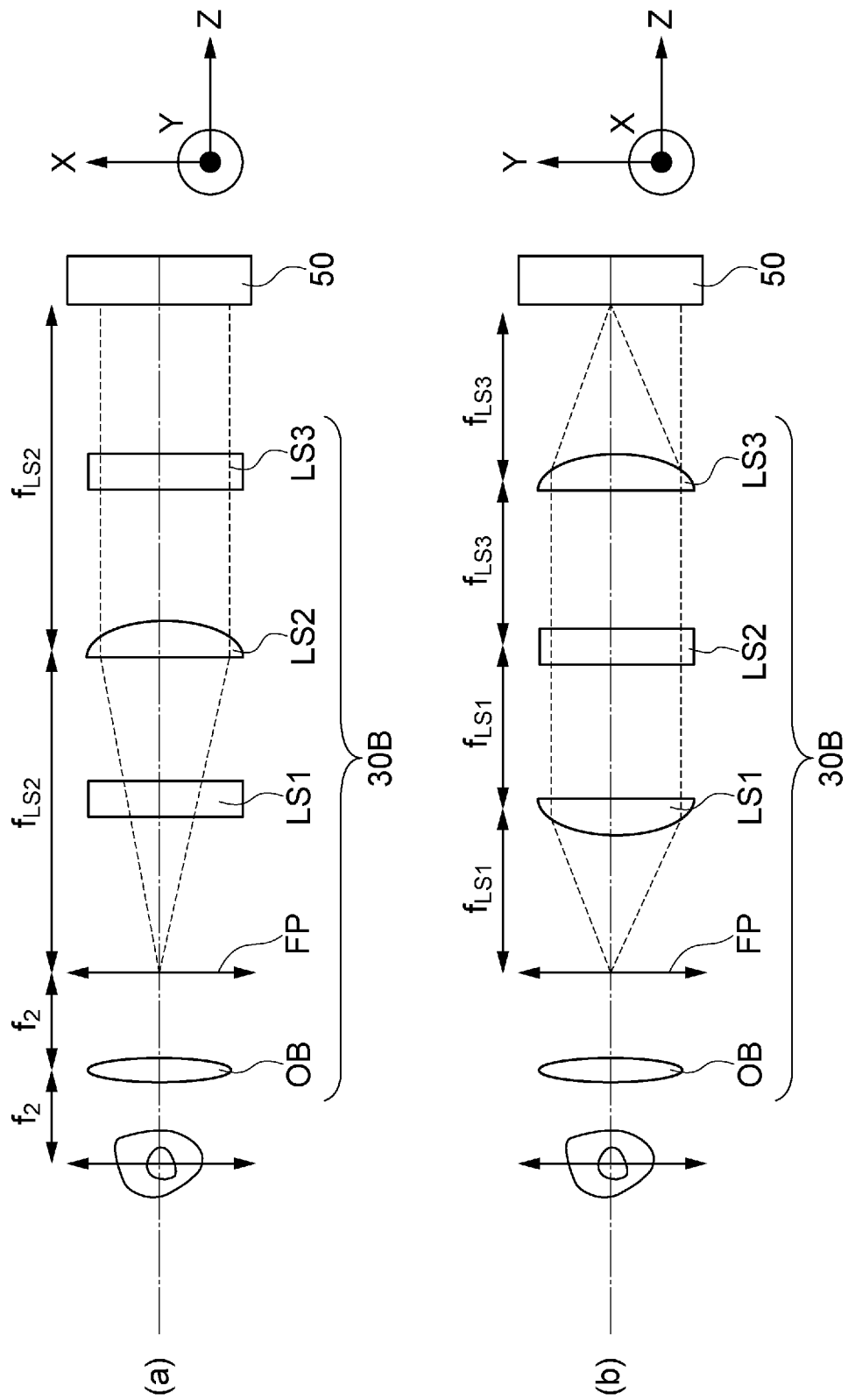
[図15]



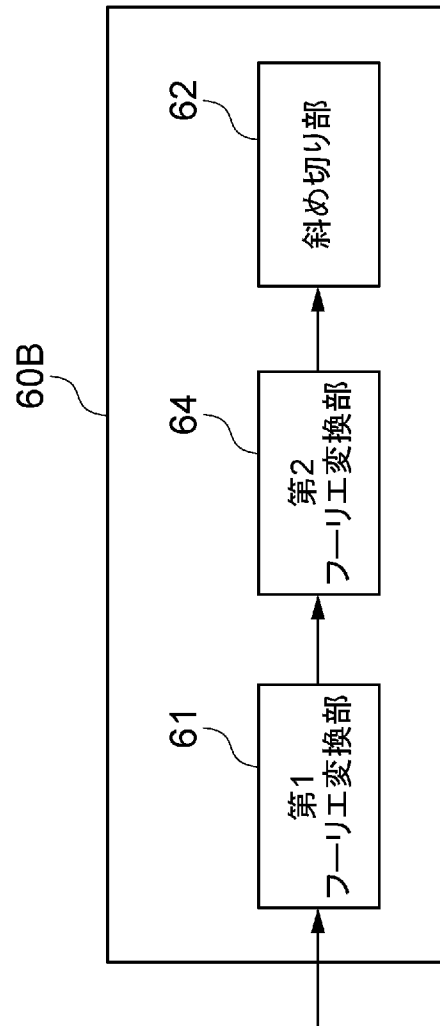
[図16]



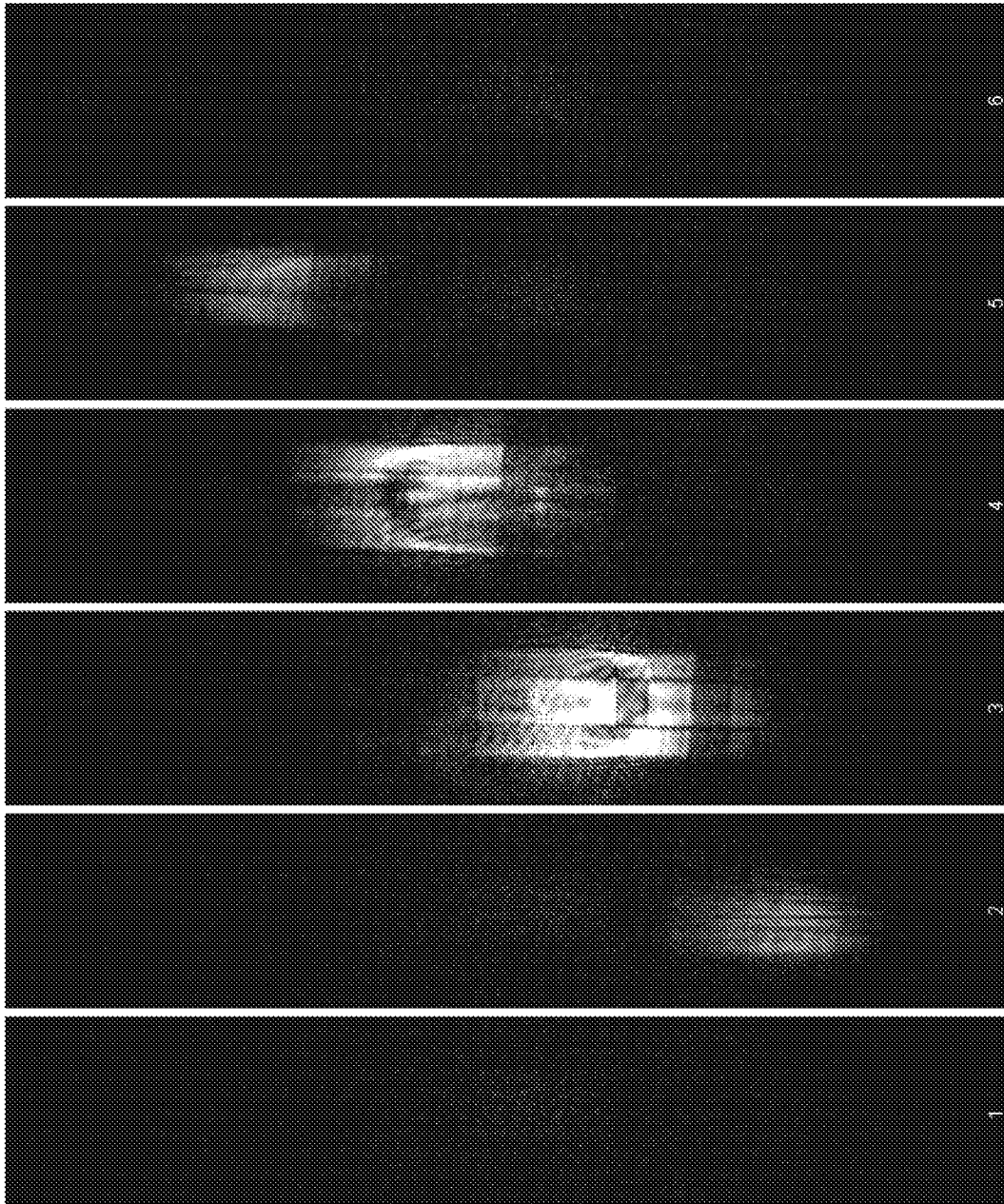
[図17]



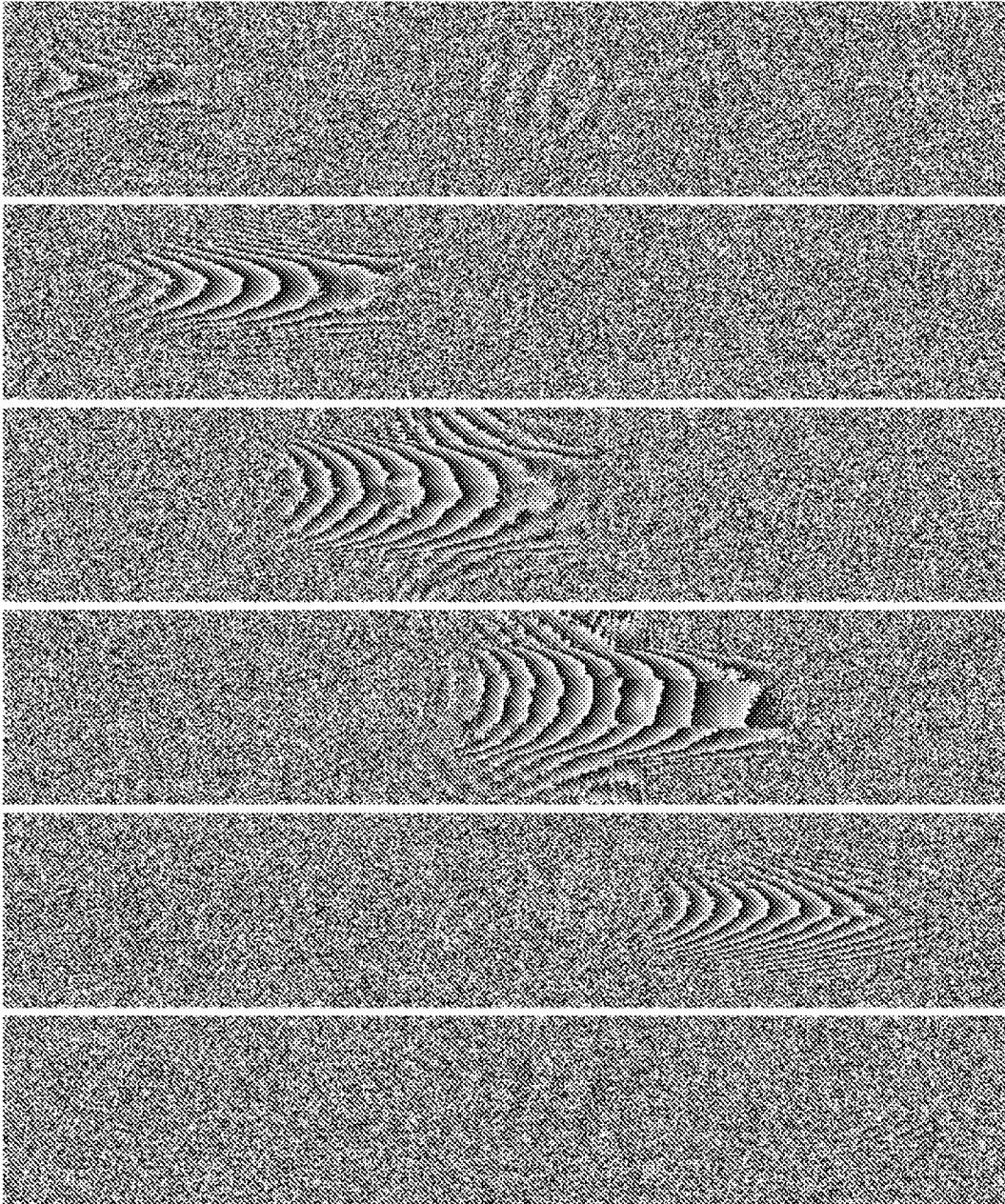
[図18]



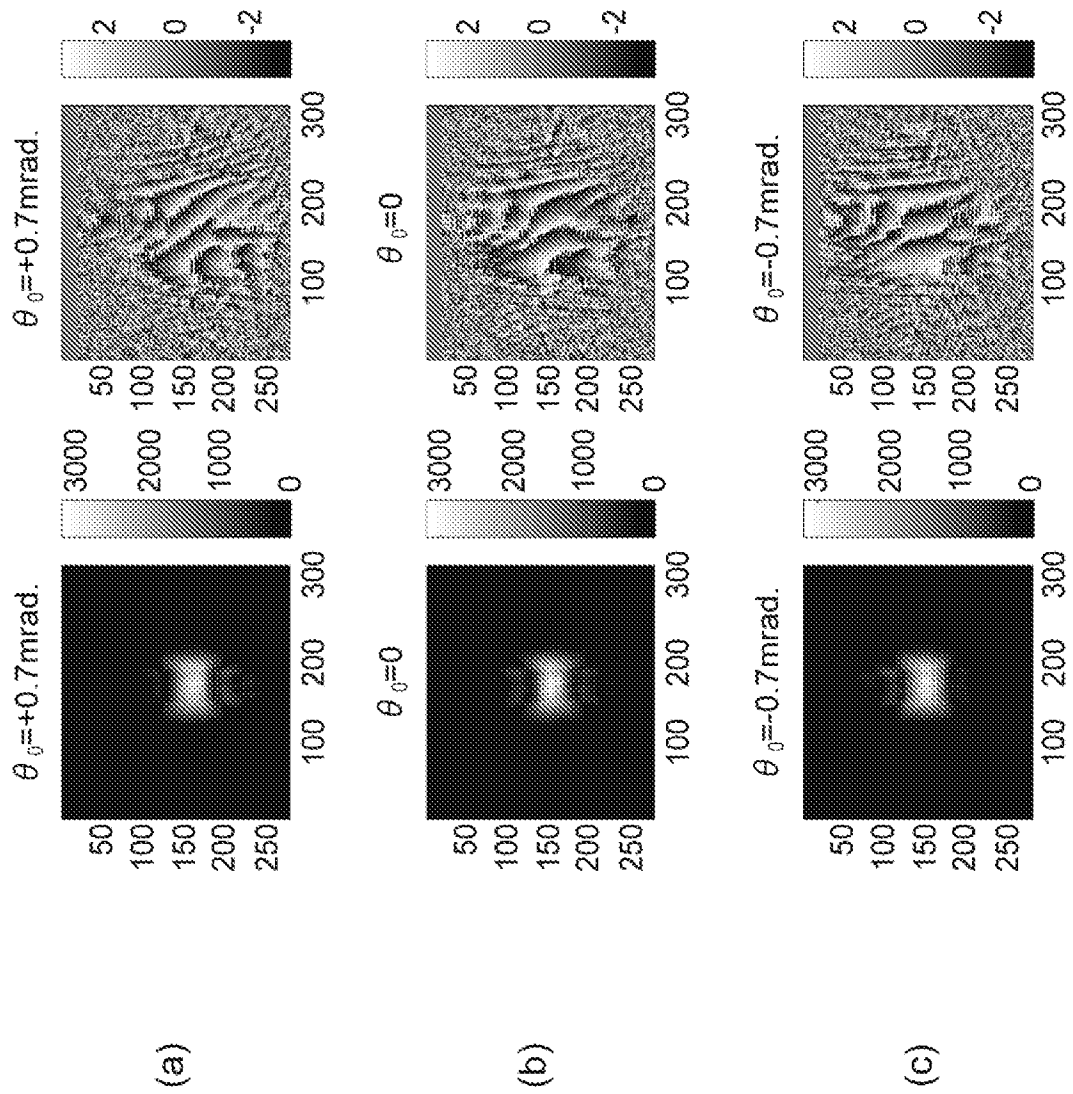
[図19]



[図20]



[図21]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2012/078362

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01B11/00 (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)

G01B11/00-11/30, G01B9/02

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	1996-2012
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2012	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2012

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
E, A	WO 2011/136382 A1 (Hamamatsu Photonics Kabushiki Kaisha), 03 November 2011 (03.11.2011), entire text; all drawings & WO 2011/136381 A	1-17
A	JP 5-60511 A (Mitsubishi Electric Corp.), 09 March 1993 (09.03.1993), entire text; all drawings & US 5305084 A	1-17
A	JP 2010-540973 A (Volcano Corp.), 24 December 2010 (24.12.2010), entire text; all drawings & US 2009/0093980 A1 & EP 2201325 A & WO 2009/046431 A1	1-17

☐

Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐

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, 2012 (25.12.12)

Date of mailing of the international search report
15 January, 2013 (15.01.13)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (I P C))

Int.Cl. G01B11/00 (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 (I P C))

Int.Cl. G01B11/00-11/30, G01B9/02

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	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 2 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 2 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 2 年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

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
EA	WO 2011/136382 A1 (浜松ホトニクス株式会社) 2011.11.03, 全文全図 & WO 2011/136381 A	1-17
A	JP 5-60511 A (三菱電機株式会社) 1993.03.09, 全文全図 & US 5305084 A	1-17
A	JP 2010-540973 A (ヴォルカノ コーポレーション) 2010.12.24, 全文全図 & US 2009/0093980 A1 & EP 2201325 A & WO 2009/046431 A1	1-17

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日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

2 5 . 1 2 . 2 0 1 2

国際調査報告の発送日

1 5 . 0 1 . 2 0 1 3

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (I S A / J P)

郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5

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)

櫻井 仁

2 S

9 0 0 8

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 2 5 8