

(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
2020年6月25日(25.06.2020)



(10) 国際公開番号

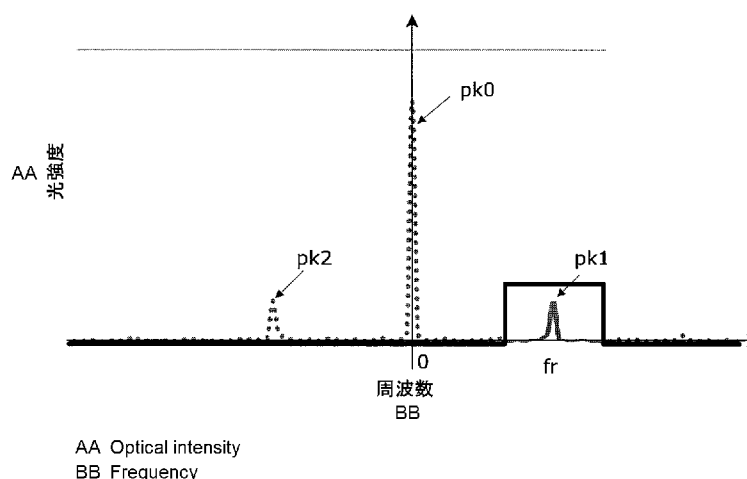
WO 2020/129709 A1

- (51) 国際特許分類:
G01B 11/00 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2019/047880
- (22) 国際出願日: 2019年12月6日(06.12.2019)
- (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 2018-238160 2018年12月20日(20.12.2018) JP
特願 2019-110093 2019年6月13日(13.06.2019) JP
- (71) 出願人: アズビル株式会社 (AZBIL CORPORATION) [JP/JP]; 〒1006419 東京都千代田区丸の内2丁目7番3号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 藤原 久利 (FUJIWARA, Hisatoshi); 〒1006419 東京都千代田区丸の内2丁目7番3号 アズビル株式会社内 Tokyo (JP).
古谷 雅 (FURUYA, Masashi); 〒1006419 東京都千代田区丸の内2丁目7番3号 アズビル株式会社内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 山川 茂樹, 外 (YAMAKAWA, Shigeki et al.); 〒1006104 東京都千代田区永田町2丁目11番1号 山王パークタワー4階 山川国際特許事務所内 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, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,

(54) Title: INTERFERENCE FRINGE ANALYSIS DEVICE, INTERFERENCE FRINGE ANALYSIS METHOD, AND DISTANCE MEASUREMENT DEVICE

(54) 発明の名称: 干渉縞解析装置、干渉縞解析方法、および距離測定装置

[図13]



(57) Abstract: An interference fringe analysis device (12) comprises: a Fourier transform unit (120) for converting an interference fringe signal into a spatial-frequency-domain spectrum; a peak frequency detection unit (121) for detecting, as a standard frequency f_r , the spatial frequency of the peak from among the peaks included in the spectrum that has the highest light intensity; a band-pass filter (122) for allowing the standard frequency f_r to pass; an inverse Fourier transform unit (123) for converting the spectrum after the passing of the standard frequency f_r into a spatial domain signal; a phase calculation unit (124) for calculating the phase of the converted spatial domain signal; and a frequency calculation unit (125) for calculating an interference fringe frequency f on the basis of the calculated phase.

HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, KE, KG, KH,
KN, KP, KR, KW, 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, 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, ST, 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, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

- 一 国際調査報告 (条約第21条(3))

(57) 要約: 干渉縞解析装置 (1 2) は、干渉縞信号を空間周波数領域のスペクトルに変換するフーリエ変換部 (1 2 0) と、スペクトルに含まれるピークのうち、光強度が最大となるピークの空間周波数を基準周波数 f_r として検出するピーク周波数検出部 (1 2 1) と、基準周波数 f_r を透過させるバンドパスフィルタ (1 2 2) と、基準周波数 f_r が透過されたスペクトルを空間領域の信号に変換する逆フーリエ変換部 (1 2 3) と、変換された空間領域の信号の位相を算出する位相算出部 (1 2 4) と、算出された位相に基づいて干渉縞周波数 f を算出する周波数算出部 (1 2 5) とを備える。

明 細 書

発明の名称：

干渉縞解析装置、干渉縞解析方法、および距離測定装置

技術分野

[0001] 本発明は、干渉縞解析装置、干渉縞解析方法、および距離測定装置に関し、特に物体を反射した光の干渉縞を解析して測定対象までの対物距離を測定する光干渉計測技術に関する。

背景技術

[0002] 従来より、レーザ光等の光の干渉を利用して、測定対象までの対物距離や形状、変位などを非接触で測定する光学的測定装置が知られている。このような光学的測定装置では、干渉縞の空間周波数（以下、「干渉縞周波数」ということがある。）を求め、干渉縞周波数に応じた対物距離を算出する。

[0003] 例えば、特許文献１は、レーザ光を測定対象および基準となる参照面に照射して、それらによって反射された反射光が干渉して受光面に生ずる干渉縞の信号を離散フーリエ変換によって解析する技術を開示している。特許文献１では、干渉縞の信号を離散フーリエ変換して求めたパワースペクトルに基づいて干渉縞周波数を求めている。

[0004] 一方、非特許文献１は、位相補正法を用いて音の周波数をより高精度に測定する技術を開示している。非特許文献１に記載の技術では、ある短い時間間隔（ $\Delta T = T_2 - T_1$ ）でのパワースペクトルを求め、そのパワースペクトルのピーク周波数および各時刻 T_1 、 T_2 での信号の位相を求め、位相の変化に基づいてピーク周波数を補正してより高精度に音の周波数を測定している。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献１：特開平９－１９６６１９号公報

非特許文献

[0006] 非特許文献1：井口征士「音楽情報の処理－電算機を用いた自動採譜－、計測と制御」p. 314－419 Vol. 19 No. 3 昭和55年3月

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0007] しかし、特許文献1に記載された従来の離散フーリエ変換を用いた干渉縞の解析技術では、干渉縞周波数の分解能が干渉縞の信号の長さの逆数、すなわち、リニアイメージセンサやフォトダイオードアレイなどの光検出器の受光素子の配列方向における長さの逆数で決まってしまう。しかし、受光素子の配列方向の長さは光検出器の設計による制限を受けるため、干渉縞周波数をより高精度に求めることが困難であった。

[0008] 一方、非特許文献1に記載された従来の位相補正法を干渉縞の空間周波数に適用した場合、位相差を利用することにより、離散フーリエ変換を用いて信号周波数を求めたときの周波数分解能よりも高い分解能を得ることができる。しかし、より短い空間距離の周波数スペクトルを求めるため、各周波数スペクトルのピーク周波数の分解能が低下する。

[0009] また、非特許文献1に記載の技術は、対象とする信号の周波数が変化しない定常状態を前提としており、干渉縞の空間周波数を求める方法として適用した場合、光学収差などに起因する波面のゆがみで干渉縞の間隔が変化する場合には、干渉縞周波数を精度よく求めることが困難になる。

[0010] 本発明は、上述した課題を解決するためになされたものであり、より高精度かつ高分解能で干渉縞周波数を得ることができる干渉縞解析技術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

[0011] 上述した課題を解決するために、本発明に係る干渉縞解析装置は、光検出器によって検出された干渉縞の明暗パターンを示す干渉縞信号を、空間周波数領域のスペクトルに変換するように構成された変換部と、前記変換部によって変換されたスペクトルに含まれるピークのうち、強度が最大となるピークの空間周波数を基準周波数として検出するように構成されたピーク周波数

検出部と、前記ピーク周波数検出部によって検出された前記基準周波数を透過するように構成されたフィルタと、前記フィルタによって前記基準周波数が透過されたスペクトルを、空間領域の信号に変換するように構成された逆変換部と、前記逆変換部によって変換された前記空間領域の信号の位相を算出するように構成された位相算出部と、算出された前記位相に基づいて干渉縞信号の空間周波数を示す干渉縞周波数を算出するように構成された周波数算出部とを備える。

[0012] また、本発明に係る干渉縞解析装置において、前記基準周波数をシフト量として、スペクトルの空間周波数軸をシフトするように構成された周波数シフタをさらに備え、前記逆変換部は、前記フィルタによって前記基準周波数が透過され、かつ、前記周波数シフタによって前記空間周波数軸がシフトされたスペクトルを空間領域の信号に変換してもよい。

[0013] また、本発明に係る干渉縞解析装置において、前記光検出器は、所定の方向に配列された複数の画素を含む受光面を有し、前記位相算出部は、前記複数の画素のそれぞれの位置での、前記逆変換部によって変換された前記空間領域の信号の位相を算出し、前記周波数算出部は、算出された前記位相の空間変化から前記干渉縞周波数を求めてもよい。

[0014] また、本発明に係る干渉縞解析装置において、前記光検出器は、所定の方向に配列された複数の画素を含む受光面を有し、前記位相算出部は、前記複数の画素のそれぞれの位置での、前記逆変換部によって変換された前記空間領域の信号の位相を算出し、前記周波数算出部は、算出された前記位相から前記複数の画素のそれぞれの位置における前記干渉縞周波数と前記基準周波数との差を補正周波数として算出し、前記基準周波数と前記補正周波数とに基づいて、前記干渉縞周波数を求めてもよい。

[0015] また、本発明に係る干渉縞解析装置において、前記周波数算出部は、前記位相算出部によって算出された前記位相の空間変化の近似直線の傾きから前記干渉縞周波数を求めてもよい。

[0016] また、本発明に係る干渉縞解析装置において、前記周波数算出部は、算出

した前記複数の画素のそれぞれの位置における干渉縞信号の前記干渉縞周波数と前記光検出器の画素同士の間隔を示す画素ピッチと、前記光検出器の画素数とを用いて干渉縞信号の平均周波数を算出してもよい。

[0017] また、本発明に係る干渉縞解析装置において、前記ピーク周波数検出部は、前記スペクトルに含まれる正の空間周波数成分のうち、強度が最大となるピークの空間周波数を前記基準周波数として検出してもよい。

[0018] また、本発明に係る干渉縞解析装置において、前記光検出器によって検出された干渉縞信号に含まれる直流成分を除去するように構成されたDCカット部をさらに備え、前記変換部は、前記DCカット部によって直流成分が除去された干渉縞信号を空間周波数領域のスペクトルに変換してもよい。

[0019] 上述した課題を解決するために、本発明に係る距離測定装置は、上記の干渉縞解析装置と、光源からの光を測定対象に集光させて照射する照射光学系と、前記測定対象から反射される反射光を入射光として、前記入射光の位相を変えて予め設定された2つの次数の回折光を出射する回折光学素子と、を有する光学系と、前記回折光学素子から出射された前記2つの次数の回折光により生じた干渉縞を検出する光検出器と、前記干渉縞解析装置によって求められた干渉縞の周波数に基づいて、前記光検出器から前記測定対象までの対物距離を算出する距離算出器とを備える。

[0020] 上述した課題を解決するために、本発明に係る干渉縞解析方法は、光検出器によって検出された干渉縞の明暗パターンを示す干渉縞信号を、空間周波数領域のスペクトルに変換する第1ステップと、前記第1ステップで変換されたスペクトルに含まれるピークのうち、強度が最大となるピークの空間周波数を基準周波数として検出する第2ステップと、前記第2ステップで検出された前記基準周波数をフィルタによって透過させる第3ステップと、前記第3ステップで前記基準周波数が透過されたスペクトルに基づいて、空間領域の信号に変換する第4ステップと、前記第4ステップで変換された前記空間領域の信号の位相を算出する第5ステップと、前記第5ステップで算出された前記位相に基づいて干渉縞信号の空間周波数を示す干渉縞周波数を算出

する第6ステップとを備える。

[0021] また、本発明に係る干渉縞解析方法において、前記基準周波数をシフト量として、スペクトルの空間周波数軸をシフトする第6ステップをさらに備え、前記第5ステップは、前記第3ステップで前記基準周波数が透過され、かつ、前記第6ステップで前記空間周波数軸がシフトされたスペクトルに基づいて、空間領域の信号に変換してもよい。

発明の効果

[0022] 本発明によれば、干渉縞信号における空間周波数領域のスペクトルに含まれるピークのうち、強度が最大となるピークの空間周波数を透過させて得られたスペクトルを空間領域の信号に変換するので、より高精度かつ高分解能な干渉縞周波数を得ることができる。

図面の簡単な説明

[0023] [図1]図1は、本発明の第1の実施の形態に係る干渉縞解析装置を備える距離測定装置の構成例を示すブロック図である。

[図2]図2は、第1の実施の形態に係る干渉縞解析装置の構成例を示すブロック図である。

[図3]図3は、第1の実施の形態に係る干渉縞解析装置を実現するコンピュータの構成例を示すブロック図である。

[図4]図4は、第1の実施の形態に係る光学系の構成例を示す模式図である。

[図5]図5は、第1の実施の形態に係る距離測定の原理を説明する図である。

[図6]図6は、第1の実施の形態に係る回折光学素子による回折を説明する図である。

[図7]図7は、第1の実施の形態に係る異なる次数の回折光と光スポット間隔との関係を説明する図である。

[図8]図8は、第1の実施の形態に係る光スポット間隔と光路差との関係を説明する図である。

[図9]図9は、第1の実施の形態に係る距離測定装置の動作の一例を説明するためのフローチャートである。

[図10]図 1 0 は、第 1 の実施の形態に係る干渉縞の解析処理の一例を説明するためのフローチャートである。

[図11]図 1 1 は、第 1 の実施の形態に係る検出面に生じた干渉縞を示す画像例である。

[図12]図 1 2 は、第 1 の実施の形態に係る周波数スペクトルの強度分布の一例を示す図である。

[図13]図 1 3 は、第 1 の実施の形態に係るバンドパスフィルタを説明するための図である。

[図14]図 1 4 は、第 1 の実施の形態に係る干渉縞信号の位相および干渉縞周波数の算出例を説明するための図である。

[図15]図 1 5 は、第 2 の実施の形態に係る干渉縞解析装置の構成例を示すブロック図である。

[図16]図 1 6 は、第 2 の実施の形態に係る干渉縞の解析処理の一例を説明するためのフローチャートである。

[図17]図 1 7 は、第 2 の実施の形態に係る周波数シフタを説明するための図である。

[図18]図 1 8 は、第 3 の実施の形態に係る干渉縞解析装置の構成例を示すブロック図である。

[図19]図 1 9 は、第 3 の実施の形態に係る干渉縞の解析処理の一例を説明するためのフローチャートである。

発明を実施するための形態

[0024] 以下、本発明の好適な実施の形態について、図 1 から図 1 9 を参照して詳細に説明する。

[第 1 の実施の形態]

距離測定装置 1 は、測定対象 T に光を照射して反射させ、その反射光の干渉縞を解析して得られた干渉縞周波数に基づいて測定対象 T までの対物距離 a を測定する。

[0025] 距離測定装置 1 は、図 1 に示すように、光学系 1 0、光検出器 1 1、干渉

縞解析装置 12、距離算出器 13、設定器 14、記憶装置 15、および表示装置 16 を備える。距離測定装置 1 は、例えば、図 1 には図示しないケーシング内部に収納されていてもよい。

[0026] 光学系 10 は、図 4 に示すように、光源 101 からの光を集光して測定対象 T に照射する照射光学系と、測定対象 T から反射される反射光を入射光として、入射光の位相を変えて予め設定された 2 つの次数の回折光を出射する回折光学素子 104 とを備える。回折光学素子 104 から出射された 2 つの次数の回折光により干渉縞が生ずる。なお、光学系 10 の詳細は後述する。

[0027] 光検出器 11 は、複数の受光素子が空間的に配列された検出面 110 を有し、図 4 に示すように、光学系 10 の回折光学素子 104 を挟んで測定対象 T とは反対側に配置されている。光検出器 11 は、望ましくは、光学系 10 の光軸上に、検出面 110 と光軸とが互いに直交するように配置されて、回折光学素子 104 から出射された 2 つの次数の回折光により生じた干渉縞による明暗パターンを検出する。

[0028] 光検出器 11 としては、例えば、CCD (Charged Coupled Device) 等の撮像素子や、CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) やフォトダイオードなどの受光素子を空間的に配列したリニアイメージセンサやフォトダイオードアレイなどを用いることができる。

[0029] 干渉縞解析装置 12 は、光検出器 11 によって検出された干渉縞の明暗パターンを示す干渉縞信号から干渉縞の空間周波数、すなわち干渉縞周波数を求める。干渉縞解析装置 12 の詳細は後述する。

[0030] 距離算出器 13 は、干渉縞解析装置 12 によって求められた干渉縞周波数に基づいて光検出器 11 から測定対象 T までの対物距離 a を算出する。

[0031] 設定器 14 は、光学系 10、光検出器 11、および表示装置 16 の動作を制御する。また、設定器 14 は、干渉縞解析装置 12 が備えるバンドパスフィルタ 122 のフィルタ係数の設定などを外部からの入力に応じて行う。

[0032] 記憶装置 15 は、例えば、HDD やフラッシュメモリなどの記憶装置から

なり、光検出器 11 が検出した干渉縞を記憶する。また、記憶装置 15 は、干渉縞解析装置 12 によって求められた干渉縞周波数、および距離算出器 13 によって算出された対物距離 a を記憶する。さらに、記憶装置 15 は、設定器 14 が光学系 10 や光検出器 11 などの駆動制御を行う際の初期設定に関する情報を記憶する。

[0033] 表示装置 16 は、液晶画面などのディスプレイで構成され、光検出器 11 によって検出された干渉縞の波形を表示する。また、表示装置 16 は、干渉縞解析装置 12 によって求められた干渉縞周波数を示す情報や、距離算出器 13 によって算出された対物距離 a を示す情報を表示する。

[0034] [干渉縞解析装置の構成]

次に、上述した干渉縞解析装置 12 の機能構成について図 2 を参照してより詳細に説明する。

干渉縞解析装置 12 は、フーリエ変換部（変換部）120、ピーク周波数検出部 121、バンドパスフィルタ（フィルタ）122、逆フーリエ変換部（逆変換部）123、位相算出部 124、干渉縞周波数算出部（周波数算出部）125、および記憶部 126 を備える。

[0035] フーリエ変換部 120 は、光検出器 11 によって検出された干渉縞の明暗パターンを示す干渉縞信号を、空間周波数領域のスペクトルに変換する。より詳細には、フーリエ変換部 120 は、空間領域の干渉縞信号を離散フーリエ変換して、干渉縞信号の空間周波数分布を示す周波数スペクトルを出力する。一般的に、フーリエ変換部 120 によって得られる周波数スペクトルには、直流成分および正負の周波数成分を含む複数のピークが含まれている。

[0036] ピーク周波数検出部 121 は、フーリエ変換部 120 によって得られた干渉縞信号の周波数スペクトルに含まれるピークのうち、光強度が最大となるピークの空間周波数（以下、「基準周波数 f_r 」という。）を検出する。より詳細には、ピーク周波数検出部 121 は、周波数スペクトルに含まれる直流成分（周波数ゼロ）および負の周波数成分を除いた正の周波数成分のピークのうち、光強度が最大となるピークの空間周波数を基準周波数 f_r として検出

する。

[0037] バンドパスフィルタ 122 は、フーリエ変換部 120 によって得られた周波数スペクトルに対して基準周波数 f_r を透過させるフィルタである。バンドパスフィルタ 122 の通過帯域は基準周波数 f_r に応じて可変とする。より詳細には、バンドパスフィルタ 122 は、干渉縞信号の周波数スペクトルに対して、基準周波数 f_r 付近の周波数帯のみを通過させ、干渉縞信号に含まれる直流成分や負の周波数成分および正の高調波成分を含む他の周波数成分を除去する。バンドパスフィルタ 122 は、中心周波数である基準周波数 f_r から任意の帯域幅に設計すればよく、例えば、基準周波数 f_r に隣接するピークが排除される帯域幅を用いてもよい。これにより、干渉縞信号に含まれるノイズを低減させることができる。

[0038] 逆フーリエ変換部 123 は、バンドパスフィルタ 122 によって基準周波数 f_r 付近の周波数帯のみが透過された空間周波数の周波数スペクトルに基づいて、空間領域の干渉縞信号を復元する。より詳細には、逆フーリエ変換部 123 は、バンドパスフィルタ 122 から出力される周波数スペクトルを逆離散フーリエ変換し、複素数表現の干渉縞信号を復元する。逆フーリエ変換部 123 が出力する干渉縞信号は、元の干渉縞信号からその直流成分や負の周波数成分が除かれた信号である。なお、上述したフーリエ変換部 120 と逆フーリエ変換部 123 とは互に対応する構成を有する。

[0039] 位相算出部 124 は、逆フーリエ変換部 123 によって復元された干渉縞信号の位相を算出する。より詳細には、位相算出部 124 は、逆フーリエ変換部 123 によって復元された複素数表現の干渉縞信号の実部と虚部とに基づいて、光検出器 11 の複数の受光素子（画素）のそれぞれの位置での干渉縞信号の位相を算出する。

[0040] また、位相算出部 124 は、隣接画素間の位相の値に 2π の位相とびがある場合に、 2π の整数倍を加減して位相接続を行う。例えば、隣接画素間の位相差を求め、その位相差が予め設定されている位相のしきい値を超えている場合に、位相接続を行う構成としてもよい。このように、位相算出部 12

4 は、位相接続された位相分布における干渉縞信号の位相を求める。

[0041] 干渉縞周波数算出部 125 は、位相算出部 124 が算出した、復元された干渉縞信号の位相に基づいて、干渉縞の空間周波数である干渉縞周波数を算出する。より詳細には、干渉縞周波数算出部 125 は、位相算出部 124 が算出した光検出器 11 の i 番目 (i は整数) および $i+1$ 番目の画素のそれぞれの位置における復元された干渉縞信号の位相 $\phi(i)$ および $\phi(i+1)$ の値を用いて、 i 番目の画素の位置での干渉縞周波数 $f(i)$ を次式 (1) により算出する。なお、次式 (1) において p_{pixel} は光検出器 11 の受光素子同士の間隔、すなわちピクセルピッチを示す。

$$f(i) = \{\phi(i+1) - \phi(i)\} / 2\pi p_{\text{pixel}} \cdots (1)$$

[0042] 干渉縞周波数算出部 125 は、例えば、位相算出部 124 が算出した複数の画素について算出した干渉縞信号の位相 $\phi(i)$ (ただし、 $i=1, 2, \dots, N$) に対する近似直線の傾きから干渉縞周波数 f を求めてもよい。干渉縞周波数算出部 125 は、例えば、最小二乗法によって位相 $\phi(i)$ の近似直線を求めることができる。

[0043] [数1]

$$f_{\text{avg}} = \frac{\sum_{i=1}^n f(i)}{n} \cdots (2)$$

上式 (2) において、 $f(i)$ は i 画素位置での干渉縞周波数、 n は光検出器 11 の画素数を示し、 p_{pixel} は光検出器 11 の受光素子同士の間隔、すなわちピクセルピッチを示す。

[0044] このように、リニアイメージセンサなどの光検出器 11 における一定の距離での干渉縞信号の平均周波数を求めることで、光学系 10 に起因した収差などの影響を抑えた干渉縞周波数を求めることができる。

[0045] 記憶部 126 は、フーリエ変換部 120 によって得られた干渉縞信号の周波数スペクトル、ピーク周波数検出部 121 によって検出された基準周波数 f_r 、および逆フーリエ変換部 123 によって復元された干渉縞信号を記憶する。また、記憶部 126 は、位相算出部 124 によって算出された干渉縞信

号の位相、干渉縞周波数算出部 1 2 5 によって算出された干渉縞周波数 f を記憶する。

[0046] [干渉縞解析の原理]

次に、本実施の形態に係る干渉縞解析の原理について説明する。

光検出器 1 1 で検出された干渉縞信号が正弦波であると仮定して、干渉縞信号を関数 $\cos(\omega_0 x)$ と表す。ただし、 ω_0 は干渉縞信号における基本角周波数を表し、 $\omega_0 = 2\pi f_0$ (f_0 は干渉縞周波数の基本周波数) である。また、 x は光検出器 1 1 の受光素子の配列方向の距離を示す。光検出器 1 1 で検出された干渉縞信号をフーリエ変換して得られる周波数スペクトル $F(\omega)$ は次式 (3) で表される。

[0047] [数2]

$$\begin{aligned} F(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} \cos(\omega_0 x) e^{-j\omega x} dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{j\omega_0 x} + e^{-j\omega_0 x}}{2} e^{-j\omega x} dx \\ &= \frac{1}{2} \{ \delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0) \} \end{aligned} \quad \dots (3)$$

[0048] 上式 (3) において、干渉縞信号の空間周波数分布を示す周波数スペクトルには、 $+\omega_0$ と $-\omega_0$ の正負の周波数成分が含まれている。

ここで、正の周波数成分 $+\omega_0$ だけを周波数スペクトルから取り出して逆フーリエ変換した信号は、次の式 (4) で表される。

[0049] [数3]

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\omega - \omega_0) e^{j\omega x} \frac{d\omega}{2\pi} &= e^{j\omega_0 x} \\ &= \cos(\omega_0 x) + j \sin(\omega_0 x) \end{aligned} \quad \dots (4)$$

[0050] 上式 (4) の実部と虚部より、光検出器 1 1 に含まれる複数の画素それぞれ

れの位置における位相 ϕ は、次の式（５）で求めることができる。

[0051] [数4]

$$\phi(x) = \tan^{-1} \left(\frac{\sin(\omega_0 x)}{\cos(\omega_0 x)} \right) \quad \dots (5)$$

[0052] 干渉縞信号の位相の変化が、ここで求める干渉縞の周波数となり、干渉縞周波数 $f(x)$ は次の式（６）で求めることができる。

[0053] [数5]

$$f(x) = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(x)}{dx} \quad \dots (6)$$

[0054] 実際には、上述した式（１）により、 i 番目の画素の位相 $\phi(i)$ および $(i+1)$ 番目の画素の位相 $\phi(i+1)$ より干渉縞周波数 $f(i)$ を求めることができる。

[0055] [干渉縞解析装置のコンピュータ構成]

上述した構成を有する干渉縞解析装置１２を実現するコンピュータ構成について図３を参照して説明する。

[0056] 図３に示すように、干渉縞解析装置１２は、例えば、バス２０１を介して接続されるＣＰＵ２０２、主記憶装置２０３、通信インターフェース２０４、補助記憶装置２０５、入出力装置２０６を備えるコンピュータと、これらのハードウェア資源を制御するプログラムによって実現することができる。干渉縞解析装置１２は、外部に設けられた光学系１０、光検出器１１、および表示装置１６がそれぞれバス２０１を介して接続されている。

[0057] 主記憶装置２０３には、ＣＰＵ２０２が各種制御や演算を行うためのプログラムが予め格納されている。ＣＰＵ２０２と主記憶装置２０３とによって、図２に示した位相算出部１２４や干渉縞周波数算出部１２５を含む干渉縞解析装置１２の各機能が実現される。

[0058] 通信インターフェース２０４は、通信ネットワークNWを介して各種外部

電子機器との通信を行うためのインターフェース回路である。

- [0059] 通信インターフェース204としては、例えば、LTE、3G、無線LAN、Bluetooth（登録商標）などの無線データ通信規格に対応した演算インターフェースおよびアンテナを用いることができる。
- [0060] 補助記憶装置205は、読み書き可能な記憶媒体と、その記憶媒体に対してプログラムやデータなどの各種情報を読み書きするための駆動装置とで構成されている。補助記憶装置205には、記憶媒体としてハードディスクやフラッシュメモリなどの半導体メモリを使用することができる。
- [0061] 補助記憶装置205は、光検出器11によって検出された干渉縞を示すデータを記憶する記憶領域や、干渉縞解析装置12が干渉縞の解析処理を行うためのプログラムを格納するプログラム格納領域を有する。さらには、例えば、上述したデータやプログラムなどをバックアップするためのバックアップ領域などを有していてもよい。
- [0062] 入出力装置206は、光学系10、光検出器11や表示装置16など外部機器からの信号を入力したり、外部機器へ信号を出力したりするI/O端子により構成される。
- [0063] ここで、補助記憶装置205のプログラム格納領域に格納されているプログラムは、本明細書で説明する干渉縞の解析処理の順序に沿って時系列に処理が行われるプログラムであってもよく、並列に、あるいは呼び出しが行われたときなどの必要なタイミングで処理が行われるプログラムであってもよい。また、プログラムは、1つのコンピュータにより処理されるものでもよく、複数のコンピュータによって分散処理されるものであってもよい。
- [0064] また、図1で説明した距離算出器13は、上述の干渉縞解析装置12と同様のコンピュータにより実現することができる。また、図1で説明した距離測定装置1についても、同様のコンピュータによって実現することができる。距離算出器13と干渉縞解析装置12とは、同一のコンピュータで構成されていてもよい。

- [0065] [光学系の構成]

次に、本実施の形態に係る光学系10について図4を参照して説明する。

光学系10は、光源101、光源レンズ102、ビームスプリッタ103、回折光学素子104、および集光レンズ105を備える。光学系10によって生成された干渉縞は、光検出器11の検出面110で検出され、干渉縞解析装置12に入力される。

[0066] 光源101と、光源レンズ102と、ビームスプリッタ103とは、光源101から出射される光を測定対象Tに集光して照射する照射光学系を構成する。

[0067] 光源101は、距離測定に用いる単一波長の光（単色光）を発する装置である。光源101としては、半導体レーザ装置、ナトリウムランプのような単色光や、白色光源と狭帯域バンドパスフィルタにより単一波長化された光を発する装置を用いることができる。

[0068] 光源レンズ102は、光源101から出射された光を集光してビームスプリッタ103へ出射する。

[0069] ビームスプリッタ103は、集光学系の光路O上に配置されて、光源レンズ102で集光された光源101からの光を反射して、光路Oに沿って測定対象Tの光スポットAに照射する。また、ビームスプリッタ103は、光スポットAで拡散反射された反射光のうち、光路O方向に反射された反射光を回折光学素子104に入射させる。

[0070] 回折光学素子104は、光路O上に配置され、ビームスプリッタ103を透過した測定対象Tからの反射光が入射される。回折光学素子104は、予め設定された回折特性により入射光を制御し、入射光の位相を変えて回折特性に基づく、予め設定された2つの次数の回折光のみを出射する。

[0071] より詳細には、回折光学素子104は、凹凸構造が2次元に、かつ周期的に配列された回折格子で構成される。本実施の形態では、回折光学素子104として、透過型の位相回折格子を用いる場合について説明するが、反射型の位相回折格子を用いてもよい。

[0072] 回折光学素子104は、石英やZnSeなどの光学基板表面に微細な凹凸

構造が形成され、凹凸構造による光の回折現象を利用して入射光の強度分布を所望の分布に整形することができる素子である。より具体的には、回折光学素子 104 は、必要とされる次数の回折光、例えば、±1 次の回折光のみを出力し、その他の不要な次数の回折光を出射しないことができる。

[0073] 回折光学素子 104 は、凹凸構造が、例えば、正弦波形状の断面形状を有していてもよい。正弦波形状の断面形状を有することにより、回折光学素子 104 は、±1 次の回折光のみを出射し、高次の回折光を除去することができる。

[0074] また、本実施の形態に係る回折光学素子 104 は透過型の位相回折格子であるので、0 次の回折光を除去するために、正弦波形状が有する山と谷との段差 D は、光路長で次の式 (7) を満たす構成とすることができる。

$$D = n (m + 1/2) \lambda \cdot \cos \phi \quad \dots (7)$$

上式 (7) において、n は回折光学素子 104 の材質の屈折率、m は整数 (m = 0, ±1, ...)、λ は、光源 101 から出射される光の波長、φ は回折光学素子 104 における任意の入射角を示す。

[0075] 一方、回折光学素子 104 として反射型の位相回折格子を用いる場合、正弦波形状が有する山と谷との段差 D は、光路長で次の式 (8) を満たす構成とすることができる。

$$D = (m + 1/2) \lambda \cdot \cos \phi / 2 \quad \dots (8)$$

上式 (8) において、m は整数 (m = 0, ±1, ...)、λ は、光源 101 から出射される光の波長、φ は回折光学素子 104 における任意の入射角を示す。

[0076] なお、上式 (7) および (8) において、位相では、π となるような段差 D を設計すればよい。すなわち、回折光学素子 104 から出射される回折光の位相が互いに逆位相となることにより打ち消し合い、0 次の回折光が除去されることになる。

[0077] また、回折光学素子 104 である位相型格子の格子周期 d は、光源 101 の光の波長 λ に比べて十分に大きく、例えば、 $d > 10\lambda$ 程度とする。これ

により、位相型格子として実用に足る構成とすることができる。

[0078] 上記の条件のもと、例えば、 ± 1 次の回折光を得るためには、所望の次数の出射光の分布を逆フーリエ変換した空間的な光路分布に基づいて回折光学素子 104 の格子形状を設計すればよいことになる。

[0079] 集光レンズ 105 は、回折光学素子 104 による 2 つの次数の回折光を集光させる。本実施の形態では、集光レンズ 105 は、例えば凸レンズからなり、光路 O 上に配置されて、回折光学素子 104 から出射される 2 つの次数の回折光を結像面 F に集光させる。

[0080] 光検出器 11 は、回折光学素子 104 から出射された 2 つの次数の回折光により発生した干渉縞を検出し、検出結果を出力する。より詳細には、光検出器 11 は、検出面 110 を有し、この検出面 110 において干渉縞の明暗パターンを検出する。

[0081] [距離測定の原理]

次に、本発明に係る距離測定装置 1 における距離測定の原理について、図 5 から図 8 を参照して説明する。

[0082] なお、図 5 では、光学系 10 のうち、集光学系のみを要部として示し、投影光学系については省略している。また、図 5 から図 8 において、位相回折格子で構成される回折光学素子 104 における格子の一方の長手方向（紙面垂直方向）を X 方向とし、格子の面内でかつ格子の長手方向に直交する方向（紙面上下方向）を Y 方向とし、格子面に垂直な方向（紙面左右方向）を Z 方向とする。

[0083] また、本来、レンズには光の入射方向に応じて 2 つの主点があり、それぞれの位置が異なるが、以下では、数式の複雑化を避けるため、集光レンズ 105 が薄肉単レンズからなり、主点がレンズ中心に 1 つだけ存在すると仮定して、各式を導出した。

[0084] 図 5 に示すように、測定対象 T から主点 M すなわち集光レンズ 105 の位置までの対物距離を a とし、主点から結像面 F までの距離を b とし、集光レンズ 105 の焦点距離を f とした場合、これらの関係は、結像の公式（レン

ズの公式)により、次の式(9)で表される。

[数6]

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad \dots (9)$$

[0085] 上式(9)からも分かるように、集光レンズ105から測定対象Tまでの対物距離aの変化に応じて、結像面Fの位置も変化するものとなる。

また、図6に示すように、回折光学素子104に形成された凹凸構造の間隔、すなわち格子周期をdとし、回折次数をk (k=0, ±1, ±2, ...)とし、光源101の波長をλとし、各回折光の回折角θ_kとする。この場合、隣接する回折光間の光路差ΔLは、次の式(10)で表される。

[0086] [数7]

$$\Delta L = d \sin \theta_k = k\lambda \quad \dots (10)$$

[0087] さらに、図7に示すように、回折光学素子104から出射された回折光は、集光レンズ105により、結像面F上のY方向に複数の光スポットを形成する。ここで、異なる2つの次数k, k'の回折光の回折角をθ_k, θ_{k'}とし、これら回折光による光スポットをA_k, A_{k'}とし、光軸と結像面が交わる点A₀から光スポットA_k, A_{k'}までのY方向に沿った距離をW₁, W₂とした場合、これら光スポットA_k, A_{k'}のY方向のずれ幅Wは、次の式(11)で表される。

[0088] [数8]

$$\begin{aligned} W &= W_1 - W_2 = b \tan \theta_{k'} - b \tan \theta_k \\ &= b \left[\tan \left\{ \sin^{-1} \left(\frac{k'\lambda}{d} \right) \right\} - \tan \left\{ \sin^{-1} \left(\frac{k\lambda}{d} \right) \right\} \right] \quad \dots (11) \end{aligned}$$

[0089] ここで、上式(11)において、実際の回折光学素子104における凹凸構造の格子周期dは、kλ, k'λに比べて十分大きく、kλ/dおよびk'λ/dが十分小さい値となるため、式(11)は次の式(12)のように

近似される。

[数9]

$$\begin{aligned} W &= b \left\{ \tan\left(\frac{k'\lambda}{d}\right) - \tan\left(\frac{k\lambda}{d}\right) \right\} \\ &= b \frac{(k' - k)\lambda}{d} \end{aligned} \quad \dots(12)$$

[0090] 一方、図8に示すように、結像面F上の光スポットA_k、A_{k'}の光スポット間隔をWとし、光スポットA_k、A_{k'}からの回折光が光検出器11の検出面110に到達した到達点をVとする。また、光スポットA_k、A_{k'}の中間点からZ方向に伸ばした線と光検出器11の検出面110とが交わる点をV₀とし、検出面110上でY方向に沿ったV₀からVまでの距離をPとする。結像面Fから検出面110までの距離をcとした場合、光スポットA_kから到達点Vへの回折光の光路長L_kは三平方の定理により求められる。しかし、距離cに比較して光スポット間隔Wと距離Pとが十分小さいため、次の式(13)のように近似できる。

[0091] [数10]

$$L_k = \sqrt{c^2 + \left(P + \frac{W}{2}\right)^2} = c \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{P + W/2}{c} \right)^2 \right\} \quad \dots(13)$$

また、光スポットA_kから到達点Vへの回折光の光路長L_{k'}も、光路長L_kと同様にして、次の式(14)のように近似できる。

[0092] [数11]

$$L_{k'} = \sqrt{c^2 + \left(P - \frac{W}{2}\right)^2} = c \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{P - W/2}{c} \right)^2 \right\} \quad \dots(14)$$

[0093] したがって、これら光路長L_k、L_{k'}の光路差ΔLは、次の式(15)で求められる。検出面110上では、この光路差ΔLにより干渉縞が生ずる。より具体的には、光路差ΔLが光の波長λの整数j(jは、0以上の整数

) 倍となる場合、検出面 1 1 0 において明線が生じる。

[0094] [数12]

$$\begin{aligned}\Delta L &= |L_{k'} - L_k| \\ &= \left| c \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{P + \frac{W}{2}}{c} \right)^2 \right\} - c \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{P - \frac{W}{2}}{c} \right)^2 \right\} \right| \\ &= \frac{WP}{c} = j\lambda\end{aligned}\quad \dots (15)$$

[0095] ここで、検出面 1 1 0 上に生じた各明線のうち、隣接する明線の間隔が干渉縞ピッチ p となり、式 (15) の $j = 1$ の場合に相当する。よって、光検出器 1 1 の検出面 1 1 0 上に生じた干渉縞の干渉縞ピッチ p は、式 (15) を変形することにより、次の式 (16) で求められる。

[数13]

$$p = P_{(at\ j=1)} = \frac{c\lambda}{W}\quad \dots (16)$$

[0096] この際、光スポット間隔 W は式 (12) で求められているため、これを式 (16) に代入すれば、式 (17) となる。

[数14]

$$p = \frac{cd}{b(k' - k)}\quad \dots (17)$$

[0097] さらに、回折次数 k , k' の次数差を Δk とし、集光レンズ 1 0 5 の主点から結像面 F までの距離 b と、結像面 F から検出面 1 1 0 までの距離 c を、集光レンズ 1 0 5 の主点から検出面 1 1 0 までの距離 L で置換する。この場合、式 (17) は、次の式 (18) となる。

[数15]

$$p = \frac{L - b}{b\Delta k} d\quad \dots (18)$$

[0098] したがって、干渉縞ピッチ p は、集光レンズ 105 の主点から検出面 110 までの距離 L に依存する関数で求められることが分かる。

この際、集光レンズ 105 の主点から結像面 F までの距離 b は、前述した式 (9) に示したように、測定対象 T から主点 M すなわち集光レンズ 105 の位置までの対物距離 a と、集光レンズ 105 の焦点距離 f とで表される。これより、式 (18) は式 (19) のように変形できる。

[数16]

$$p = \frac{\left(\frac{1}{f} - \frac{1}{a}\right)L - 1}{\Delta k} d \quad \dots (19)$$

[0099] ここで、集光レンズ 105 の焦点距離 f 、集光レンズ 105 の主点から検出面 110 までの距離 L 、および回折次数 k, k' の次数差 Δk は、それぞれ既知の値である。このことから、結果として、干渉縞ピッチ p は、測定対象 T から主点 M すなわち集光レンズ 105 の位置までの対物距離 a の関数となることが分かる。そのため、光検出器 11 の検出面 110 で検出される干渉縞ピッチ p を測定することにより、次の式 (20) により、測定対象 T までの対物距離 a を求めることができる。

[数17]

$$a = \frac{fLd}{(L-f)d - f\Delta kp} \quad \dots (20)$$

[0100] [距離測定方法]

次に、本実施の形態に係る干渉縞解析装置 12 を備える距離測定装置 1 の動作について、図 9 のフローチャートを参照して説明する。まず、測定対象 T が光学系 10 の所定の測定領域に配置される。また、設定器 14 は、外部からの入力により、光源 101 の光量や露光時間などの初期調整を行う。

[0101] その後、光源 101 から出射された光は、光源レンズ 102 によって集光されて、ビームスプリッタ 103 により測定対象 T に向けて照射される (ス

テップS 1)。次に、測定対象Tの表面で反射された光は、ビームスプリッタ103を透過して、回折光学素子104に入射する。回折光学素子104は、予め設定された回折特性により入射光を制御し、入射光の位相を変えてその回折特性に基づく、予め設定された2つの次数の回折光のみを出射する(ステップS 2)。

[0102] 次に、回折光学素子104から出射された2つの次数の回折光は、集光レンズ105によって集光される。そして、2つの次数の回折光により発生する干渉縞は、光検出器11によって検出される(ステップS 3)。

[0103] その後、光検出器11は、検出した干渉縞の明暗パターンを示す干渉縞信号を干渉縞解析装置12に入力する(ステップS 4)。そして、干渉縞解析装置12は、上述した干渉縞解析の原理に基づく演算を行い、干渉縞周波数 f を求める(ステップS 5)。

[0104] 次に、距離算出器13は、干渉縞解析装置12によって求められた干渉縞周波数 f を用いて、上述した距離測定の原理に基づく演算を行い、集光レンズ105から測定対象Tまでの対物距離 a を算出する(ステップS 6)。

[0105] [干渉縞解析方法]

次に、干渉縞解析装置12による干渉縞の解析処理(図9のステップS 5)について、図10のフローチャートを参照して説明する。まず、光検出器11によって検出された、例えば、図11に示す干渉縞の明暗パターンは、干渉縞信号として干渉縞解析装置12に入力される。図11に示す干渉縞は、横軸が干渉縞に直行するY方向に沿った画像のピクセル位置[$p i c$]を示し、縦軸が各ピクセル位置における光強度(無単位)である。得られた検出結果は、ほぼ正弦波形状をなしており、そのピーク位置が明線に相当している。

[0106] まず、フーリエ変換部120は、光検出器11によって検出された干渉縞信号をフーリエ変換して、干渉縞信号の周波数スペクトルを出力する(ステップS 50)。図12は、フーリエ変換部120から出力される周波数スペクトルの強度分布の一例を示す図である。図12において、横軸は空間周波

数、縦軸は光強度を示している。図 12 の例に示すように、フーリエ変換部 120 によって干渉縞信号がフーリエ変換されて得られた周波数スペクトルには、周波数ゼロの直流成分のピーク p_{k0} 、負の周波数のピーク p_{k2} 、およびこれと対となる正の周波数のピーク p_{k1} など複数のピークを含んでいる。

[0107] 次に、ピーク周波数検出部 121 は、ステップ S50 で得られた干渉縞信号の周波数スペクトルに含まれる複数のピークのうち、直流成分のピークおよび負の周波数成分のピークを除いた正の周波数成分のピークのなかで光強度が最大となるピークの空間周波数を検出する（ステップ S51）。図 12 の例では、ピーク周波数検出部 121 は、ピーク p_{k1} を検出し、この空間周波数を基準周波数 f_r として記憶部 126 に記憶する。

[0108] 次に、バンドパスフィルタ 122 は、干渉縞信号の周波数スペクトルに含まれる空間周波数成分のうち、基準周波数 f_r 付近の周波数帯を透過させる（ステップ S52）。具体的には、図 13 の太線で示すように、バンドパスフィルタ 122 は、基準周波数 f_r 付近の周波数帯を透過させ、それ以外の直流成分のピーク p_{k0} および負の周波数成分のピーク p_{k2} を含む点線で示す周波数成分を除去する。

[0109] その後、逆フーリエ変換部 123 は、ステップ S51 で基準周波数 f_r 付近の周波数帯が透過された周波数スペクトルを逆フーリエ変換する（ステップ S53）。より詳細には、逆フーリエ変換部 123 は、上述した干渉縞解析の原理による演算（式（4））に従って逆フーリエ変換を行う。

[0110] 次に、位相算出部 124 は、逆フーリエ変換部 123 によって復元された空間領域の干渉縞信号の位相を算出する（ステップ S54）。より詳細には、位相算出部 124 は、逆フーリエ変換によって得られた複素数表現の干渉縞信号の実部および虚部（式（4））より、光検出器 11 に含まれる複数の画素それぞれの位置における位相を算出する（式（5））。

[0111] 次に、位相算出部 124 は、ステップ S54 で算出した位相において、隣接画素の位相差に基づいて位相接続を行う（ステップ S55）。 i 画素位置

での干渉縞信号の位相 ϕ (i) は $-\pi \sim \pi$ の間に畳み込まれ、 2π 周期で不連続な値となる。そのため、位相算出部 124 は、隣接画素間の位相の値に 2π の位相とびがある場合に、 2π の整数倍を加減して位相接続を行う。

[0112] 次に、干渉縞周波数算出部 125 は、位相算出部 124 によって算出された、復元された干渉縞信号の位相に基づいて干渉縞周波数 f を算出する（ステップ S56）。より詳細には、干渉縞周波数算出部 125 は、光検出器 11 の複数の画素それぞれの位置での干渉縞信号の位相の空間変化を干渉縞周波数 f として求める（式（6））。干渉縞周波数算出部 125 は、例えば、図 14 に示すように、画素位置ごとの位相のデータから最小二乗法による近似直線の傾きを求め、これを干渉縞周波数 f として求めてもよい。

[0113] なお、干渉縞周波数算出部 125 は、ステップ S56 で算出した干渉縞周波数に基づいて、光検出器 11 における受光素子の配列距離における平均周波数を算出してもよい（式（2））。

[0114] このように、本実施の形態に係る干渉縞解析方法では、干渉縞信号の空間周波数領域において直流成分や負の周波数成分を除去するので、より高精度な干渉縞周波数を得ることができる。また、干渉縞周波数の平均周波数を求めることにより、収差による影響が低減された干渉縞周波数を得ることができる。

[0115] その後、処理は図 9 のステップ S6 に戻り、距離算出器 13 によって干渉縞周波数または干渉縞信号の平均周波数に基づいて対物距離 a が算出される。

[0116] 以上説明したように、第 1 の実施の形態によれば、干渉縞解析装置 12 は、干渉縞信号からノイズの原因となる直流成分や負の周波数成分などを分離するので、リニアイメージセンサなどの受光素子の配列における設計上の制限を受けずに、より高精度かつ高分解能な干渉縞周波数を得ることができる。

[0117] また、本実施の形態に係る干渉縞解析装置 12 によれば、干渉縞信号から直流成分や負の周波数成分などを分離した信号を逆フーリエ変換して得られ

た位相変化を周波数変換するので、計算量や回路規模を抑えつつ、より高精度かつ高分解能な干渉縞周波数を得ることができる。

[0118] また、本実施の形態に係る距離測定装置 1 によれば、高精度かつ高分解能な干渉縞周波数を用いるので、対物距離 a の測定精度を向上させることができる。

[0119] なお、上述の実施の形態において、ピーク周波数検出部 121 は、干渉縞信号の周波数スペクトルから基準周波数 f_r を検出する場合について説明したが、これとは異なる方法により基準周波数 f_r を取得してもよい。例えば、光検出器 11 によって検出された干渉縞信号から直流成分を除去してゼロクロス点を検出して、そのゼロクロス点に同期した信号を基準周波数 f_r として求めてもよい。

[0120] あるいは、ピーク周波数検出部 121 は、光検出器 11 によって検出された干渉縞信号を微分して、微分した値における減少から増加への切り替わりを検出して基準周波数 f_r を求めてもよい。

[0121] [第 2 の実施の形態]

次に、本発明の第 2 の実施の形態について説明する。なお、以下の説明では、上述した第 1 の実施の形態と同じ構成については同一の符号を付し、その説明を省略する。

[0122] 第 1 の実施の形態では、バンドパスフィルタ 122 によって基準周波数 f_r 付近の周波数が透過された周波数スペクトルを逆フーリエ変換部 123 が逆フーリエ変換する場合について説明した。これに対して、第 2 の実施の形態は、バンドパスフィルタ 122 を透過された周波数スペクトルに対して周波数シフトを行う周波数シフタ 127 をさらに備える。以下、第 1 の実施の形態と異なる構成を中心に説明する。

[0123] 図 15 に示すように、第 2 の実施の形態に係る干渉縞解析装置 12A は、フーリエ変換部 120、ピーク周波数算出部 121、バンドパスフィルタ 122、逆フーリエ変換部 123、位相算出部 124、干渉縞周波数算出部 125、記憶部 126、および周波数シフタ 127 を備える。なお、干渉縞解

析装置 12A を備える距離測定装置 1 の構成は、図 1 で説明した第 1 の実施の形態の構成と同様である。

[0124] 周波数シフタ 127 は、基準周波数 f_r をシフト量として、フーリエ変換部 120 によって得られた周波数スペクトルの空間周波数軸をシフトさせる周波数シフトを行う。より詳細には、周波数シフタ 127 は、バンドパスフィルタ 122 から出力された周波数スペクトルに対して周波数シフトを行う。周波数シフタ 127 は、基準周波数 f_r を有する周波数スペクトルの強度のピーク位置が周波数ゼロの位置となるように周波数スペクトルの空間周波数軸を $-f_r$ だけずらす。

[0125] 周波数シフタ 127 は、干渉縞信号の周波数スペクトルにおいて、基準周波数 f_r 、すなわち、周波数スペクトルの強度が最大となるピークの空間周波数をキャリア周波数としたときに、この空間的なキャリア周波数に相当する空間周波数を除去して、基準周波数 f_r を変調する変調周波数成分、または揺らぎの空間周波数成分を抽出することになる。

[0126] なお、周波数シフタ 127 は、バンドパスフィルタ 122 を通す前の、直流成分が含まれている干渉縞信号の周波数スペクトルに対して周波数シフトを行ってもよい。

[0127] 逆フーリエ変換部 123 は、バンドパスフィルタ 122 によって基準周波数 f_r 付近の周波数帯のみが透過され、かつ、周波数シフタ 127 によって周波数がシフトされた空間周波数の周波数スペクトルに基づいて、空間領域の干渉縞信号を復元する。より詳細には、逆フーリエ変換部 123 は、周波数シフタ 127 から出力される周波数スペクトルを逆離散フーリエ変換し、複素数表現の干渉縞信号を復元する。逆フーリエ変換部 123 が出力する干渉縞信号は、元の干渉縞信号からその直流成分や負の周波数成分、および空間的なキャリア周波数成分（基準周波数 f_r ）が除かれた信号である。

[0128] 位相算出部 124 は、逆フーリエ変換部 123 によって復元された干渉縞信号の位相を算出する。より詳細には、位相算出部 124 は、逆フーリエ変換部 123 によって復元された複素数表現の干渉縞信号の実部と虚部とに基

づいて、光検出器 11 の複数の受光素子（画素）のそれぞれの位置での干渉縞信号の位相を算出する。

[0129] また、位相算出部 124 は、隣接画素間の位相の値に 2π の位相とびがある場合に、 2π の整数倍を加減して位相接続を行う。例えば、隣接画素間の位相差を求め、その位相差が予め設定されている位相のしきい値を超えている場合に、位相接続を行う構成としてもよい。このように、位相算出部 124 は、位相接続された位相分布における干渉縞信号の位相を求める。

[0130] 干渉縞周波数算出部 125 は、位相算出部 124 が算出した、復元された干渉縞信号の位相に基づいて、干渉縞の空間周波数である干渉縞周波数を算出する。より詳細には、干渉縞周波数算出部 125 は、位相算出部 124 が算出した光検出器 11 の i 番目（ i は整数）および $i+1$ 番目の画素のそれぞれの位置における復元された干渉縞信号の位相 $\phi(i)$ および $\phi(i+1)$ の値を用いて、 i 番目の画素の位置での干渉縞周波数 $f(i)$ を上述した式 (1) ($f(i) = f_r + \{\phi(i+1) - \phi(i)\} / 2\pi p_{\text{pixel}}$) により算出する。

[0131] これを換言するならば、干渉縞周波数算出部 125 は、まず、式 (1) における位相 $\phi(i)$ と位相 $\phi(i+1)$ の差、すなわち位相の空間変化から補正周波数 $f_c = \{\phi(i+1) - \phi(i)\} / 2\pi$ を求める。干渉縞周波数算出部 125 は、例えば、位相算出部 124 が算出した複数の画素について算出した干渉縞信号の位相 $\phi(i)$ （ただし、 $i = 1, 2, \dots, N$ ）に対する近似直線の傾きを求めて補正周波数 f_c としてもよい。干渉縞周波数算出部 125 は、例えば、最小二乗法によって位相 $\phi(i)$ の近似直線を求めてもよい。次いで、干渉縞周波数算出部 125 は、基準周波数 f_r に補正周波数 f_c を加えた空間周波数を干渉縞周波数 f として算出する。

[0132] また、干渉縞周波数算出部 125 は、上式 (1) によって求めた i 画素位置での干渉縞周波数 $f(i)$ を用いて、干渉縞信号の平均周波数 f_{avg} を上述した式 (2) により求めることができる。

[0133] このように、リニアイメージセンサなどの光検出器 11 における一定の距

離での干渉縞信号の平均周波数を求めることで、光学系 10 に起因した収差などの影響を抑えた干渉縞周波数を求めることができる。

[0134] 記憶部 126 は、フーリエ変換部 120 によって得られた干渉縞信号の周波数スペクトル、ピーク周波数検出部 121 によって検出された基準周波数 f_r 、および逆フーリエ変換部 123 によって復元された干渉縞信号を記憶する。また、記憶部 126 は、位相算出部 124 によって算出された干渉縞信号の位相、干渉縞周波数算出部 125 によって算出された補正周波数 f_c 、および補正後の干渉縞周波数 f を記憶する。

[0135] [干渉縞解析の原理]

次に、本実施の形態に係る干渉縞解析の原理について説明する。

フーリエ変換の性質より、光検出器 11 によって検出された干渉縞信号をフーリエ変換した信号を $F(\omega - \omega_r)$ とする。ただし、 ω 、 ω_r は、それぞれ干渉縞信号 f の角周波数、基準周波数 f_r の角周波数であり、 $\omega = 2\pi f$ 、 $\omega_r = 2\pi f_r$ である。

[0136] 上記の干渉縞信号をフーリエ変換した信号 $F(\omega - \omega_r)$ を逆フーリエ変換した信号は、次の式 (21) で表される。

[数18]

$$F(\omega - \omega_r) \rightarrow f(x)e^{j\omega_r x} \quad \dots (21)$$

[0137] 上式 (21) において、 x は光検出器 11 の受光素子の配列方向の距離を示す。上式 (21) の干渉縞周波数 $f(x)$ を次の式 (22) で表す。

[0138] [数19]

$$f(x) = e^{-j\omega x + \phi_x} \quad \dots (22)$$

[0139] 上式 (22) において、 ϕ_x は初期位相を示す。また、上式 (21) を、式 (22) を用いて書き直すと次の式 (23) で表される。

[0140]

[数20]

$$\begin{aligned}
 f(x)e^{j\omega_r x} &= e^{-(j\omega x + \varphi_x)} e^{j\omega_r x} \\
 &= e^{-\{j(\omega - \omega_r)x + \varphi_x\}} \quad \dots (23)
 \end{aligned}$$

[0141] 上式(23)の実部および虚部より、光検出器11に含まれる複数の画素それぞれの位置における位相 ϕ_c は、次の式(24)で求めることができる。

[0142] [数21]

$$\begin{aligned}
 \varphi_c(x) &= (\omega - \omega_r)x + \varphi_x \\
 &= 2\pi(f - f_r)x + \varphi_x \quad \dots (24)
 \end{aligned}$$

[0143] 上式(24)は、干渉縞信号の位相 $\phi_c(x)$ と干渉縞周波数 $f(x)$ との関係を示しており、画素間における位相 $\phi_c(x)$ の変化 $d\phi_c(x)/dx$ は、干渉縞周波数 f と基準周波数 f_r との差 $f_c(x)$ に比例する。各画素位置間の干渉縞周波数 f と基準周波数 f_r との差の補正周波数 f_c は、位相 ϕ_c の微分から、次式(25)で表される。

[0144] [数22]

$$f_c(x) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi_c(x)}{dx} = f - f_r \quad \dots (25)$$

[0145] 上式(25)より、干渉縞周波数 f が距離との関係 $f(x)$ となり、その $f(x)$ は、基準周波数 f_r に補正周波数 f_c を加えた式(26)により求まる。

[0146] [数23]

$$f(x) = f_r + f_c(x) \quad \dots (26)$$

[0147] [干渉縞解析方法]

次に、干渉縞解析装置12Aによる干渉縞の解析処理について、図16のフローチャートを参照して説明する。なお、本実施の形態に係る距離測定方法については、第1の実施の形態(図9)と同様である。まず、光検出器11によって検出された、例えば、図11に示す干渉縞の明暗パターンは、干

渉縞信号として干渉縞解析装置 12 に入力される。図 11 に示す干渉縞は、横軸が干渉縞に直行する Y 方向に沿った画像のピクセル位置 $[pic]$ を示し、縦軸が各ピクセル位置における光強度（無単位）である。得られた検出結果は、ほぼ正弦波形状をなしており、そのピーク位置が明線に相当している。

[0148] まず、フーリエ変換部 120 は、光検出器 11 によって検出された干渉縞信号をフーリエ変換して、干渉縞信号の周波数スペクトルを出力する（ステップ S50A）。図 12 の例に示すように、フーリエ変換部 120 によって干渉縞信号がフーリエ変換されて得られた周波数スペクトルには、周波数ゼロの直流成分のピーク p_{k0} 、負の周波数のピーク p_{k2} 、およびこれと対となる正の周波数のピーク p_{k1} など複数のピークを含んでいる。

[0149] 次に、ピーク周波数検出部 121 は、ステップ S50A で得られた干渉縞信号の周波数スペクトルに含まれる複数のピークのうち、直流成分のピークおよび負の周波数成分のピークを除いた正の周波数成分のピークのなかで光強度が最大となるピークの空間周波数を検出する（ステップ S51A）。図 12 の例では、ピーク周波数検出部 121 は、ピーク p_{k1} を検出し、この空間周波数を基準周波数 f_r として記憶部 126 に記憶する。

[0150] 次に、バンドパスフィルタ 122 は、干渉縞信号の周波数スペクトルに含まれる空間周波数成分のうち、基準周波数 f_r 付近の周波数帯を透過させる（ステップ S52A）。具体的には、図 13 の太線で示すように、バンドパスフィルタ 122 は、基準周波数 f_r 付近の周波数帯を透過させ、それ以外の直流成分のピーク p_{k0} および負の周波数成分のピーク p_{k2} を含む点線で示す周波数成分を除去する。

[0151] 次に、周波数シフタ 127 は、バンドパスフィルタ 122 から出力された周波数スペクトルに対して周波数シフトを行う（ステップ S53A）。より詳細には、図 17 に示すように、周波数シフタ 127 は、基準周波数 f_r の周波数をシフト量として、干渉縞信号の周波数スペクトルについて、ピーク p_{k1} の周波数を原点（周波数ゼロ）の位置になるように空間周波数軸をシフ

トさせる。

[0152] その後、逆フーリエ変換部 1 2 3 は、ステップ S 5 2 A で基準周波数 f_r 付近の周波数帯が透過され、さらに、ステップ S 5 3 A で周波数シフトされた周波数スペクトルを逆フーリエ変換する（ステップ S 5 4 A）。より詳細には、逆フーリエ変換部 1 2 3 は、上述した干渉縞解析の原理による演算（式（2 1）から式（2 3））に従って逆フーリエ変換を行う。

[0153] 次に、位相算出部 1 2 4 は、逆フーリエ変換部 1 2 3 によって復元された空間領域の干渉縞信号の位相を算出する（ステップ S 5 5 A）。より詳細には、位相算出部 1 2 4 は、逆フーリエ変換によって得られた複素数表現の干渉縞信号の実部および虚部（式（2 4））より、光検出器 1 1 に含まれる複数の画素それぞれの位置における位相を算出する。

[0154] また、位相算出部 1 2 4 は、ステップ S 5 5 A において隣接画素の位相差に基づいて位相接続を行う。 i 画素位置での干渉縞信号の位相 ϕ_i は $-\pi \sim \pi$ の間に畳み込まれ、 2π 周期で不連続な値となる。そのため、位相算出部 1 2 4 は、隣接画素間の位相の値に 2π の位相とびがある場合に、 2π の整数倍を加減して位相接続を行う。例えば、隣接画素間の位相差を求め、その位相差が予め設定されている位相のしきい値を超えている場合に、位相接続を行う構成としてもよい。このように、位相算出部 1 2 4 は、位相接続された位相分布における干渉縞信号の位相 ϕ_i を求める。

[0155] 次に、干渉縞周波数算出部 1 2 5 は、位相算出部 1 2 4 によって算出された、復元された干渉縞信号の位相に基づいて補正周波数 f_c を算出する（ステップ S 5 6 A）。より詳細には、干渉縞周波数算出部 1 2 5 は、光検出器 1 1 の複数の画素それぞれの位置での干渉縞信号の位相の空間変化を補正周波数 f_c として求める。干渉縞周波数算出部 1 2 5 は、例えば、図 1 4 に示すように、画素位置ごとの位相のデータから最小二乗法による近似直線の傾きを求め、これを補正周波数 f_c としてもよい。

[0156] 次に、干渉縞周波数算出部 1 2 5 は、ステップ S 5 6 A で算出された補正周波数 f_c で基準周波数 f_r を補正し、干渉縞周波数 f を求める（ステップ S

57A)。より詳細には、干渉縞周波数算出部125は、基準周波数 f_r と補正周波数 f_c とを足し合わせることで、補正された干渉縞周波数 f を算出する。

[0157] なお、干渉縞周波数算出部125は、ステップS57Aで算出した干渉縞周波数に基づいて、光検出器11における受光素子の配列距離における平均周波数を算出してもよい。

[0158] このように、本実施の形態に係る干渉縞解析方法では、干渉縞信号の空間周波数領域において直流成分や負の周波数成分を除去して周波数シフトを行うので、より高精度な干渉縞周波数を得ることができる。また、干渉縞周波数の平均周波数を求めることにより、収差による影響が低減された干渉縞周波数を得ることができる。

[0159] その後、処理は図9のステップS6に戻り、距離算出器13によって干渉縞周波数または干渉縞信号の平均周波数に基づいて対物距離 a が算出される。

[0160] 以上説明したように、第2の実施の形態によれば、干渉縞解析装置12は、干渉縞信号からノイズの原因となる直流成分や負の周波数成分などを分離して干渉縞信号を補正するので、リニアイメージセンサなどの受光素子の配列における設計上の制限を受けずに、より高精度かつ高分解能な干渉縞周波数を得ることができる。

[0161] また、本実施の形態に係る距離測定装置1によれば、高精度かつ高分解能な干渉縞周波数を用いるので、対物距離 a の測定精度を向上させることができる。

[0162] なお、説明した実施の形態では、周波数シフタ127は、バンドパスフィルタ122から出力された基準周波数 f_r 付近の周波数帯が透過された周波数スペクトルについての周波数シフトを行う場合について説明した。しかし、これらの手順が実行される順序はこれに制限されない。例えば、周波数シフタ127が干渉縞信号の周波数スペクトルの周波数シフトを行った後に、バンドパスフィルタ122を通してよい。

[0163] また、周波数シフタ 127 は、基準周波数 f_r をシフト量として、基準周波数 f_r のピークが原点（周波数ゼロ）の位置となるように、周波数スペクトルの空間周波数軸に対する周波数シフトを行う場合について説明したが、本発明はこれに限られない。例えば、周波数シフタ 127 は、所定のシフト量を用いて周波数ゼロ付近に周波数をシフトすれば、必ずしも原点の位置に一致するように周波数シフトしなくてもよい。

[0164] [第3の実施の形態]

次に、本発明の第3の実施の形態について説明する。なお、以下の説明では、上述した第1および第2の実施の形態と同じ構成については同一の符号を付し、その説明を省略する。

[0165] 第1および第2の実施の形態では、干渉縞信号の周波数スペクトルにバンドパスフィルタ 122 を通して、基準周波数 f_r 付近の周波数帯を透過させ、直流成分および負の周波数成分を除去する場合について説明した。これに対し、第3の実施の形態では、干渉縞解析装置 12 は、DC カット部 128 を備え、フーリエ変換部 120 に入力される干渉縞信号から予め直流成分を除去する。以下、第1および第2の実施の形態と異なる構成を中心に説明する。

[0166] 図 18 に示すように、干渉縞解析装置 12 B は、フーリエ変換部 120、ピーク周波数検出部 121、バンドパスフィルタ 122、逆フーリエ変換部 123、位相算出部 124、干渉縞周波数算出部 125、記憶部 126、周波数シフタ 127、および DC カット部 128 を備える。

[0167] DC カット部 128 は、光検出器 11 によって検出された干渉縞信号に含まれる直流成分を除去する。DC カット部 128 は、例えば、光検出器 11 の受光素子（画素）に対応する値（輝度）の平均値を求め、画素ごとにこの平均値と輝度との差分を求めることによって直流成分を除去することができる。DC カット部 128 によって直流成分が除去された干渉縞信号は、フーリエ変換部 120 に入力される。フーリエ変換部 120 に入力される干渉縞信号から予め直流成分を低減させることで、干渉縞信号に含まれるノイズを

より確実に低減することができる。

[0168] 次に、本実施の形態に係る干渉縞解析装置 12B によって実行される干渉縞の解析処理について、図 19 のフローチャートを用いて説明する。なお、距離測定装置 1 による動作は図 9 で説明した処理と同様である。

[0169] まず、DC カット部 128 は、光検出器 11 によって検出された干渉縞の明暗パターンを示す干渉縞信号から直流成分を除去する（ステップ S 150）。その後、フーリエ変換部 120 は、DC カット部 128 によって直流成分が除去された干渉縞信号をフーリエ変換して周波数スペクトルを出力する（ステップ S 151）。

[0170] 次に、ピーク周波数検出部 121 は、ステップ S 151 で得られた、直流成分が除去された周波数スペクトルに含まれるピークのうち、正の周波数帯で光強度が最大となっているピークの空間周波数を検出する（ステップ S 152）。ピーク周波数検出部 121 は、検出したピークの空間周波数を基準周波数 f_r として記憶部 127 に記憶する。

[0171] 次に、バンドパスフィルタ 122 は、干渉縞信号に含まれる空間周波数帯のうち、基準周波数 f_r 付近の周波数帯を透過させる（ステップ S 153）。より詳細には、バンドパスフィルタ 122 は、直流成分が除去された干渉縞信号の周波数スペクトルにおいて、基準周波数 f_r 付近の周波数帯のみを透過させ、負の周波数成分を含む他の空間周波数の成分を除去する。

[0172] 次に、周波数シフタ 127 は、バンドパスフィルタ 122 から出力された干渉縞信号の周波数スペクトルについて、周波数シフトを行う（ステップ S 154）。具体的には、周波数シフタ 127 は、基準周波数 f_r をシフト量として、基準周波数 f_r のピークを原点（周波数ゼロ）の位置となるように、周波数スペクトルの空間周波数軸に対する周波数シフトを行う。

[0173] その後、逆フーリエ変換部 123 は、ステップ S 153 で基準周波数 f_r 付近の周波数帯を透過させ、ステップ S 154 で周波数シフトした干渉縞信号の周波数スペクトルを逆フーリエ変換する（ステップ S 155）。逆フーリエ変換部 123 は、空間周波数領域の周波数スペクトルを逆フーリエ変換し

て空間領域の干渉縞信号を復元する（式（21）から（式（23）））。

[0174] 次に、位相算出部124は、逆フーリエ変換部123によって復元された空間領域の干渉縞信号の位相を算出する（ステップS156）。より詳細には、位相算出部124は、逆フーリエ変換により得られた複素数表現の干渉縞信号の実部および虚部（式（24））より、光検出器11に含まれる複数の画素それぞれの位置における位相を算出する。

[0175] 次に、干渉縞周波数算出部125は、位相算出部124によって算出された、復元された干渉縞信号の位相に基づいて補正周波数 f_c を算出する（ステップS157）。より詳細には、干渉縞周波数算出部125は、光検出器11の複数の画素それぞれの位置での干渉縞信号の位相の空間変化を補正周波数 f_c として求める。干渉縞周波数算出部125は、画素位置ごとの位相のデータから最小二乗法による回帰直線の傾きを求め、これを補正周波数 f_c としてもよい。

[0176] 次に、干渉縞周波数算出部125は、ステップS157で算出された補正周波数 f_c で基準周波数 f_r を補正し、干渉縞周波数 f を求める（ステップS158）。より詳細には、干渉縞周波数算出部125は、基準周波数 f_r と補正周波数 f_c とを足し合わせることで、補正された干渉縞周波数 f を算出する。

[0177] なお、干渉縞周波数算出部125は、ステップS158で算出した干渉縞周波数に基づいて、光検出器11における受光素子の配列距離における平均周波数を算出してもよい。

[0178] その後、処理は図9のステップS6に戻り、距離算出器13によって干渉縞周波数または干渉縞信号の平均周波数に基づいて対物距離 a が算出される。

[0179] なお、説明した第3の実施の形態に係る干渉縞解析装置12Bは、周波数フィルタ127を備える構成を用いて説明したが、干渉縞解析装置12Bは、周波数フィルタ127を備えていない第1の実施の形態に係る干渉縞解析装置12と同様の構成にも適用できる。

- [0180] 以上説明したように、第3の実施の形態に係る干渉縞解析装置12Bによれば、DCカット部128が、光検出器11によって検出された干渉縞信号の直流成分を予め除去するので、基準周波数 f_r の検出やバンドパスフィルタ122による負の周波数帯の除去および基準周波数 f_r 付近の周波数帯の透過においてノイズの影響をより確実に抑制することができる。その結果として、より高精度な干渉縞周波数を得ることができ、対物距離 a の測定精度も向上する。
- [0181] また、説明した実施の形態に係る距離測定装置1によれば、測定対象Tから反射される反射光を入射光として、入射光の位相を変えて予め設定された2つの次数の回折光のみを出射する回折光学素子104を有するので、スペイシャルフィルタを不要とし、より簡素化された光学系10を用いて対物距離 a を測定することができる。
- [0182] また、回折光学素子104は、予め設定された2つの次数の回折光のみを出射するため、従来の振幅型の回折格子を用いた技術では必要とされた、フーリエ変換を行うためのレンズも不要となる。そのため、距離測定装置1は、フーリエ変換面の位置にスペイシャルフィルタを設置するためなどの光学系における精密な位置調整を行うことなく、対物距離 a を測定することができる。
- [0183] また、説明した実施の形態に係る距離測定装置1は、回折光学素子104において、入射光の一部を遮断することなく回折光を出射する。そのため、振幅型の回折格子を用いた場合と比較して、本実施の形態に係る距離測定装置1は、所望の次数の回折光に対してより高い回折効率が得られる。その結果として、より信号強度の強い光を用いて距離測定を行うことができる。
- [0184] また、説明した実施の形態では、レーザ光などの光の反射光によって生ずる干渉縞の周波数を求める場合について説明したが、X線など、可視光、紫外線、および赤外線以外の電磁波の干渉計測を行うこともできる。この場合、光学系10はミラーなどを有する反射光学系で構成することができる。また、光検出器11は、例えば、シンチレータなどを用いて構成することがで

きる。

- [0185] また、説明した実施の形態では、位相算出部 124 が i 画素位置における位相 $\phi(i)$ を算出し、干渉縞周波数算出部 125 が位相変化、すなわち位相の微分を行って干渉縞信号を補正した干渉縞周波数 $f(i)$ を求める場合について説明した。このときに、位相算出部 124 は、例えば、算出した i 画素位置での位相 $\phi(i)$ について、光学系 10 に起因した収差による干渉縞の影響を補正してもよい。
- [0186] また、説明した実施の形態では、対物距離 a を測定する場合について説明したが、干渉縞解析装置 12 によって算出された干渉縞周波数に基づいて、測定対象 T の形状や変位を測定してもよい。
- [0187] また、説明した実施の形態では、距離測定装置 1 は、集光レンズ 105 を備え、収束光を構成する場合について説明した。しかし、距離測定装置 1 は、結像面 F においてフーリエ変換面を構成する必要はないため、集光レンズ 105 の代わりに、平行光や発散光を生成するレンズを用いてもよい。
- [0188] また、集光レンズ 105 を用いずに、回折光学素子 104 から出射される 2 つの次数の回折光により発生する干渉縞を、直接的に、光検出器 11 で検出する構成を採用してもよい。この場合、距離測定装置 1 は、対物距離 a として、光検出器 11 の検出面 110 から測定対象 T までの距離を測定する。
- [0189] また、説明した実施の形態に係る距離測定装置 1 において、回折光学素子 104 と光検出器 11 との間の光路 O 上に、回折光学素子 104 の回折方向と光軸に直交する方向に 2 つの次数の回折光を集光する手段を設けてもよい。集光手段としては、例えば、光の屈折を利用したシリンドリカルレンズや、反射鏡などが挙げられる。また、回折光学素子 104 自体にレンズの機能を設け、集光手段を構成してもよい。このような集光手段をさらに備えることで、距離測定装置 1 において、回折光の信号強度をより大きくさせることが可能となる。
- [0190] また、説明した実施の形態に係る距離測定装置 1 は、位相回折格子で構成される回折光学素子 104 を備える場合について説明した。しかし、回折光

学素子 104 は、位相回折格子に限られず、例えば、空間光変調器を用いることができる。

[0191] 空間光変調器は、例えば、液晶層と、その液晶層の表面に沿って配置された複数の電極を有し、複数の電極のそれぞれから液晶層に個別に電圧を印加して、液晶層を入射する入射光に対して位相変調を行い、予め設定された 2 つの次数の回折光のみを出射する。空間光変調器を用いることにより、出射する 2 つの回折光の次数を用途に応じて可変とすることができる。

[0192] なお、ここで開示された実施の形態に関連して記述された機能ブロック、モジュール、および回路は、汎用プロセッサ、GPU、デジタル信号プロセッサ (DSP)、特定用途向け集積回路 (ASIC)、FPGA あるいはその他のプログラマブル論理デバイス、ディスクリートゲートあるいはトランジスタロジック、ディスクリートハードウェア部品、または上述した機能を実現するために設計された上記いずれかの組み合わせを用いて実行されうる。

[0193] 汎用プロセッサとしてマイクロプロセッサを用いることが可能であるが、代わりに、従来技術によるプロセッサ、コントローラ、マイクロコントローラ、あるいは状態機器を用いることも可能である。プロセッサは、例えば、DSP とマイクロプロセッサとの組み合わせ、複数のマイクロプロセッサ、DSP コアに接続された 1 つ以上のマイクロプロセッサ、またはこのような任意の構成である計算デバイスの組み合わせとして実現することも可能である。

[0194] 以上、本発明の干渉縞解析装置、干渉縞解析方法、および距離測定装置における実施の形態について説明したが、本発明は説明した実施の形態に限定されるものではなく、請求項に記載した発明の範囲において当業者が想定し得る各種の変形を行うことが可能である。

符号の説明

[0195] 1…距離測定装置、10…光学系、11…光検出器、12…干渉縞解析装置、13…距離算出器、14…設定器、15…記憶装置、16…表示装置、

101…光源、102…光源レンズ、103…ビームスプリッタ、104…回折光学素子、105…集光レンズ、110…検出面、120…フーリエ変換部、121…ピーク周波数検出部、122…バンドパスフィルタ、123…逆フーリエ変換部、124…位相算出部、125…干渉縞周波数算出部、126…記憶部、201…バス、202…CPU、203…主記憶装置、204…通信インターフェース、205…補助記憶装置、206…入出力装置、NW…通信ネットワーク、T…測定対象、F…結像面、a…対物距離、p…干渉縞ピッチ。

請求の範囲

- [請求項1] 光検出器によって検出された干渉縞の明暗パターンを示す干渉縞信号を、空間周波数領域のスペクトルに変換するように構成された変換部と、
- 前記変換部によって変換されたスペクトルに含まれるピークのうち、強度が最大となるピークの空間周波数を基準周波数として検出するように構成されたピーク周波数検出部と、
- 前記ピーク周波数検出部によって検出された前記基準周波数を透過するように構成されたフィルタと、
- 前記フィルタによって前記基準周波数が透過されたスペクトルを、空間領域の信号に変換するように構成された逆変換部と、
- 前記逆変換部によって変換された前記空間領域の信号の位相を算出するように構成された位相算出部と、
- 算出された前記位相に基づいて干渉縞信号の空間周波数を示す干渉縞周波数を算出するように構成された周波数算出部と
- を備える干渉縞解析装置。
- [請求項2] 請求項1に記載の干渉縞解析装置において、
- 前記基準周波数をシフト量として、スペクトルの空間周波数軸をシフトするように構成された周波数シフタをさらに備え、
- 前記逆変換部は、前記フィルタによって前記基準周波数が透過され、かつ、前記周波数シフタによって前記空間周波数軸がシフトされたスペクトルを空間領域の信号に変換することを特徴とする干渉縞解析装置。
- [請求項3] 請求項1に記載の干渉縞解析装置において、
- 前記光検出器は、所定の方向に配列された複数の画素を含む受光面を有し、
- 前記位相算出部は、前記複数の画素のそれぞれの位置での、前記逆変換部によって変換された前記空間領域の信号の位相を算出し、

前記周波数算出部は、算出された前記位相の空間変化から前記干渉縞周波数を求める

ことを特徴とする干渉縞解析装置。

[請求項4]

請求項2に記載の干渉縞解析装置において、

前記光検出器は、所定の方向に配列された複数の画素を含む受光面を有し、

前記位相算出部は、前記複数の画素のそれぞれの位置での、前記逆変換部によって変換された前記空間領域の信号の位相を算出し、

前記周波数算出部は、算出された前記位相から前記複数の画素のそれぞれの位置における前記干渉縞周波数と前記基準周波数との差を補正周波数として算出し、前記基準周波数と前記補正周波数とに基づいて、前記干渉縞周波数を求める

ことを特徴とする干渉縞解析装置。

[請求項5]

請求項3または請求項4に記載の干渉縞解析装置において、

前記周波数算出部は、前記位相算出部によって算出された前記位相の空間変化の近似直線の傾きから前記干渉縞周波数を求めることを特徴とする干渉縞解析装置。

[請求項6]

請求項3から5のいずれか1項に記載の干渉縞解析装置において、

前記周波数算出部は、算出した前記複数の画素のそれぞれの位置における干渉縞信号の前記干渉縞周波数と前記光検出器の画素同士の間隔を示す画素ピッチと、前記光検出器の画素数とを用いて干渉縞信号の平均周波数を算出する

ことを特徴とする干渉縞解析装置。

[請求項7]

請求項1から6のいずれか1項に記載の干渉縞解析装置において、

前記ピーク周波数検出部は、前記スペクトルに含まれる正の空間周波数成分のうち、強度が最大となるピークの空間周波数を前記基準周波数として検出することを特徴とする干渉縞解析装置。

[請求項8]

請求項1から7のいずれか1項に記載の干渉縞解析装置において、

前記光検出器によって検出された干渉縞信号に含まれる直流成分を除去するように構成されたDCカット部をさらに備え、

前記変換部は、前記DCカット部によって直流成分が除去された干渉縞信号を空間周波数領域のスペクトルに変換することを特徴とする干渉縞解析装置。

[請求項9]

請求項1から8のいずれか1項に記載の干渉縞解析装置と、

光源からの光を測定対象に集光させて照射する照射光学系と、

前記測定対象から反射される反射光を入射光として、前記入射光の位相を変えて予め設定された2つの次数の回折光を出射する回折光学素子と、

を有する光学系と、

前記回折光学素子から出射された前記2つの次数の回折光により生じた干渉縞を検出する光検出器と、

前記干渉縞解析装置によって求められた干渉縞の周波数に基づいて、前記光検出器から前記測定対象までの対物距離を算出する距離算出器と

を備える距離測定装置。

[請求項10]

光検出器によって検出された干渉縞の明暗パターンを示す干渉縞信号を、空間周波数領域のスペクトルに変換する第1ステップと、

前記第1ステップで変換されたスペクトルに含まれるピークのうち、強度が最大となるピークの空間周波数を基準周波数として検出する第2ステップと、

前記第2ステップで検出された前記基準周波数をフィルタによって透過させる第3ステップと、

前記第3ステップで前記基準周波数が透過されたスペクトルに基づいて、空間領域の信号に変換する第4ステップと、

前記第4ステップで変換された前記空間領域の信号の位相を算出する第5ステップと、

前記第5ステップで算出された前記位相に基づいて干渉縞信号の空間周波数を示す干渉縞周波数を算出する第6ステップと
を備える干渉縞解析方法。

[請求項11]

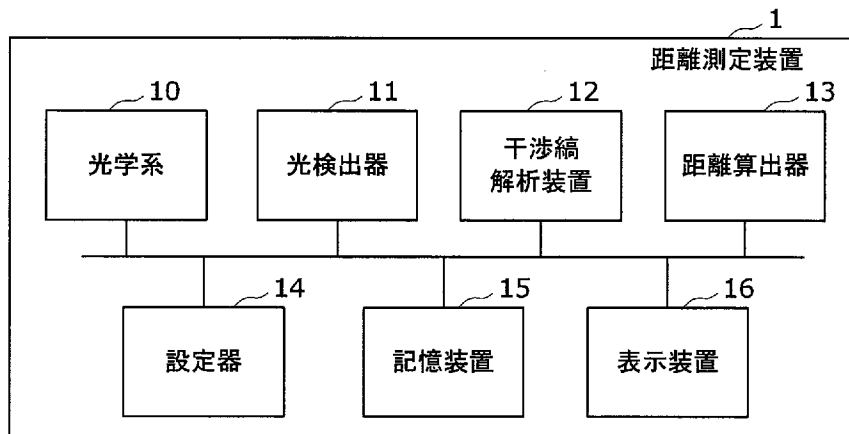
請求項10に記載の干渉縞解析方法において、

前記基準周波数をシフト量として、スペクトルの空間周波数軸をシフトする第6ステップをさらに備え、

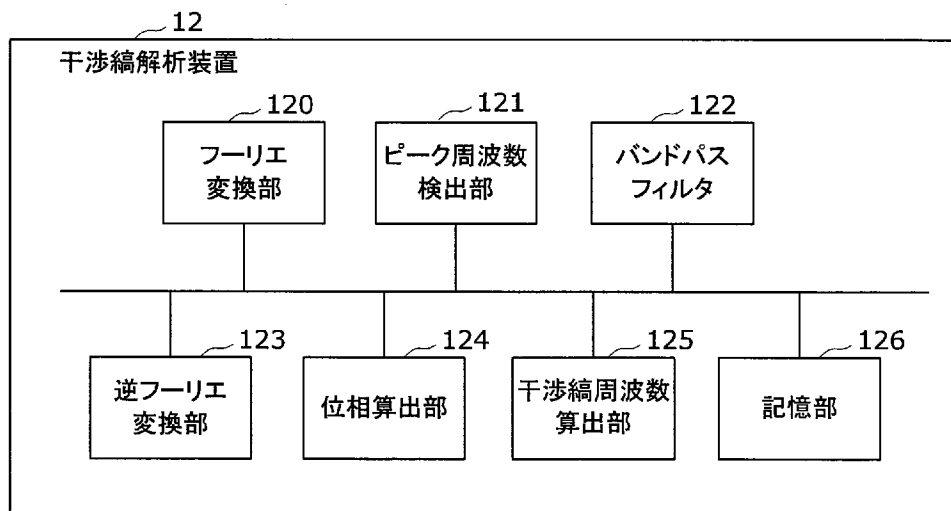
前記第5ステップは、前記第3ステップで前記基準周波数が透過され、かつ、前記第6ステップで前記空間周波数軸がシフトされたスペクトルに基づいて、空間領域の信号に変換する

ことを特徴とする干渉縞解析方法。

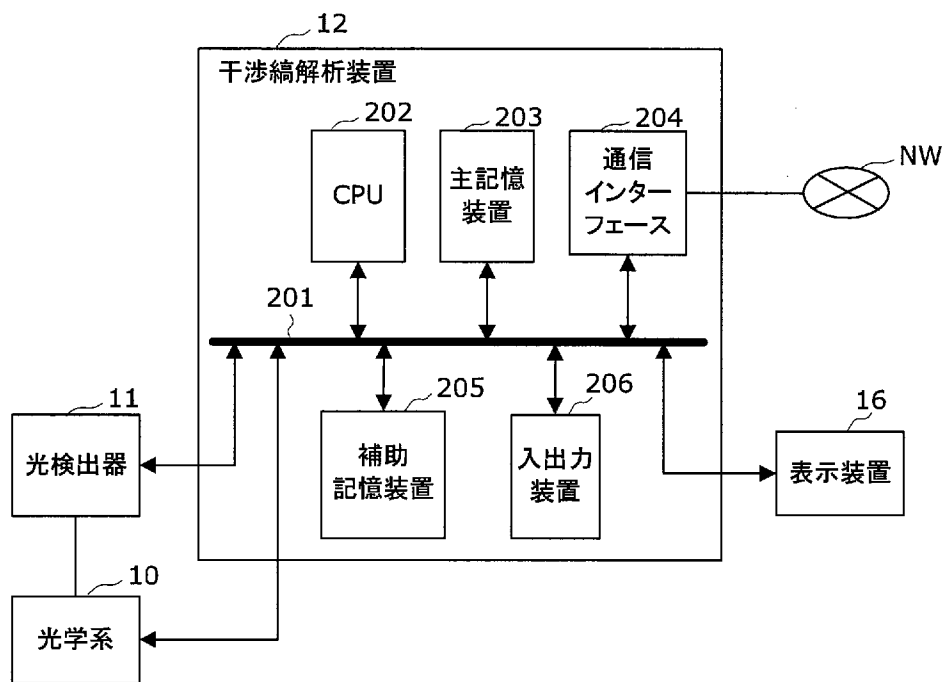
[図1]



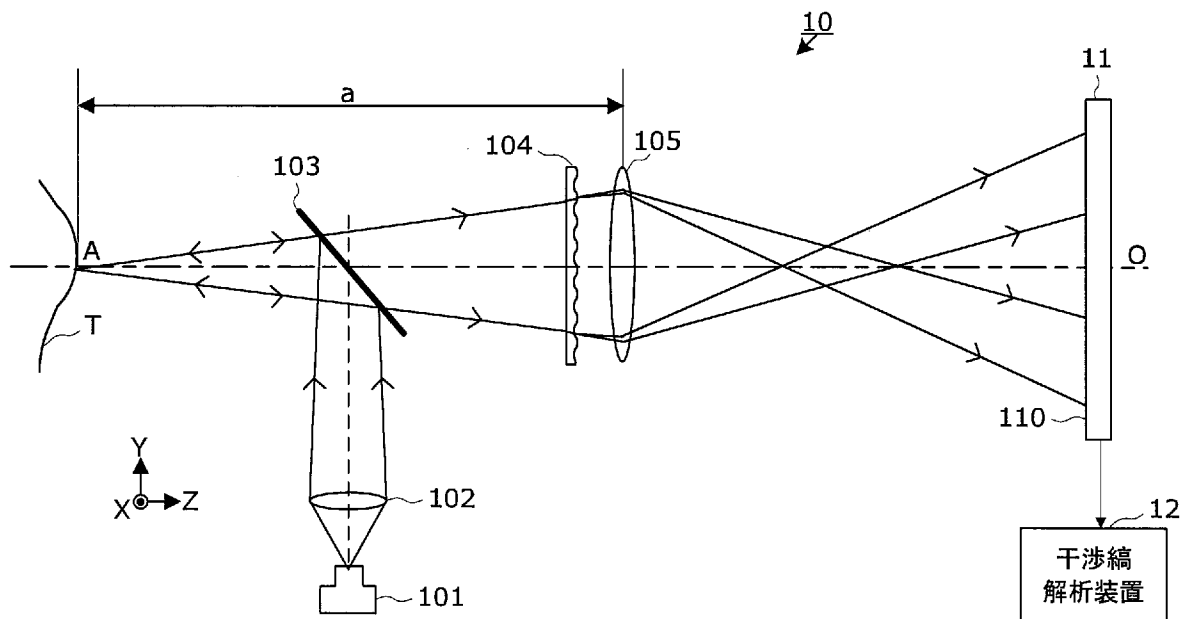
[図2]



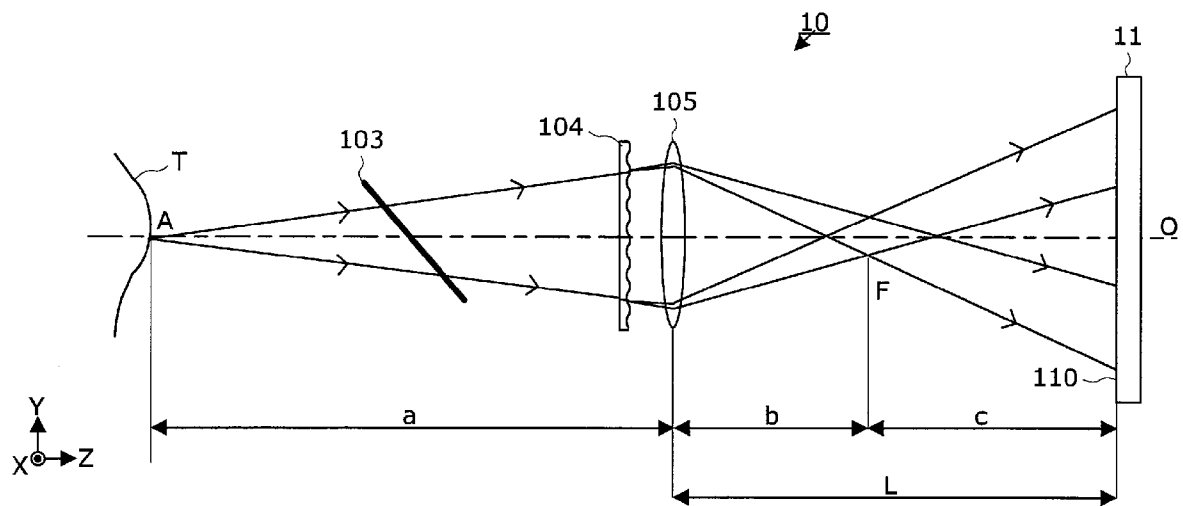
[図3]



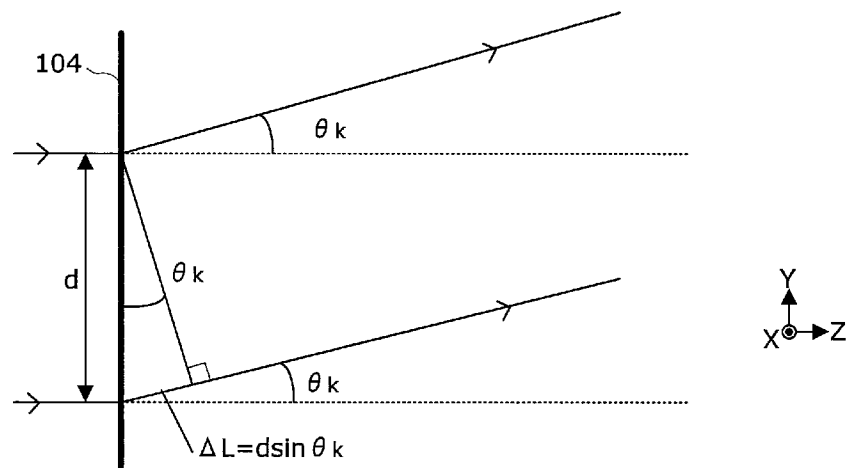
[図4]



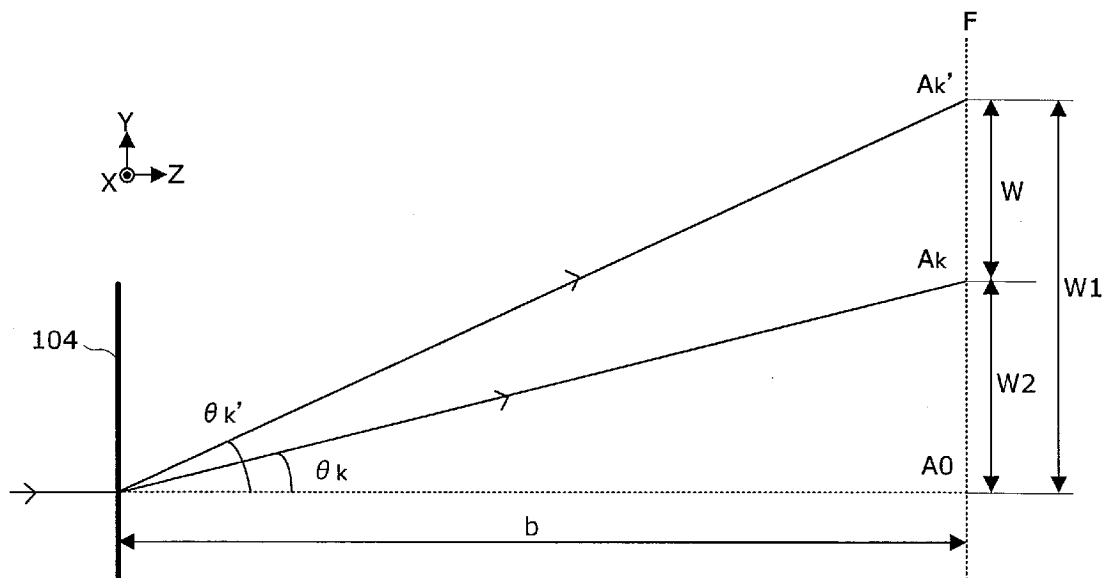
[図5]



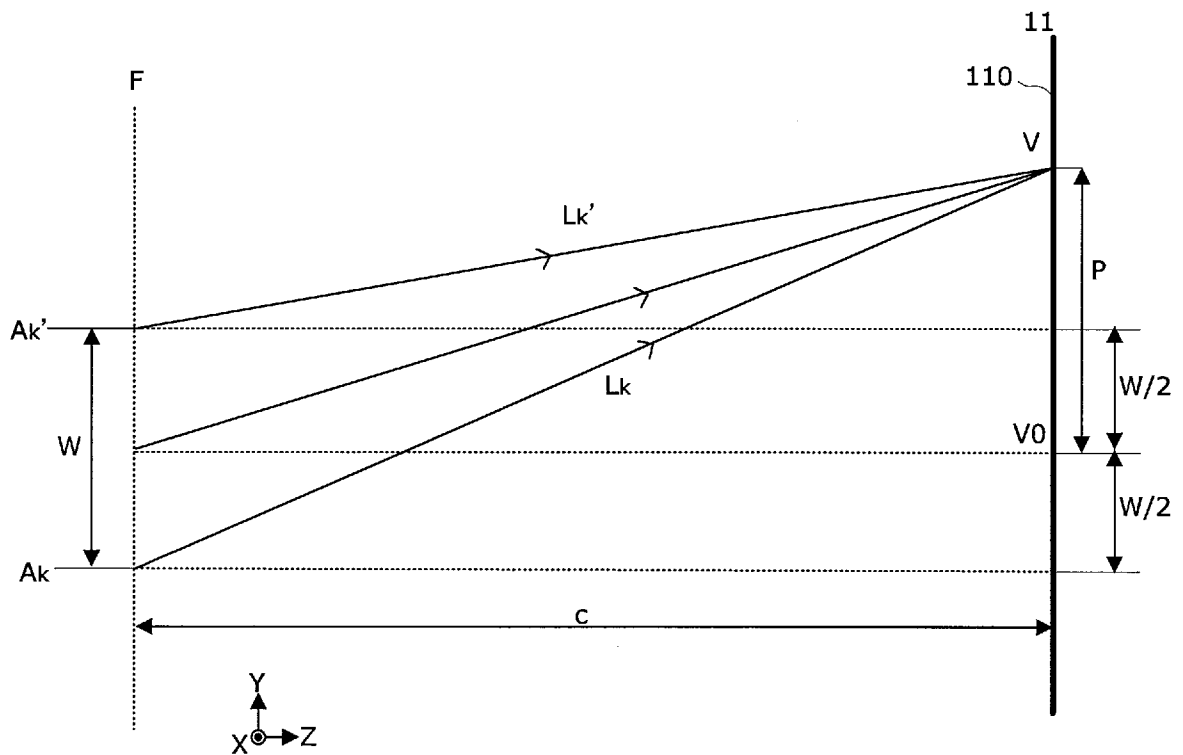
[図6]



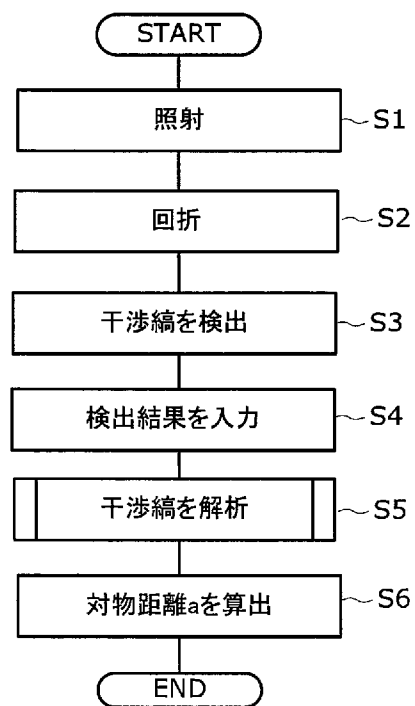
[図7]



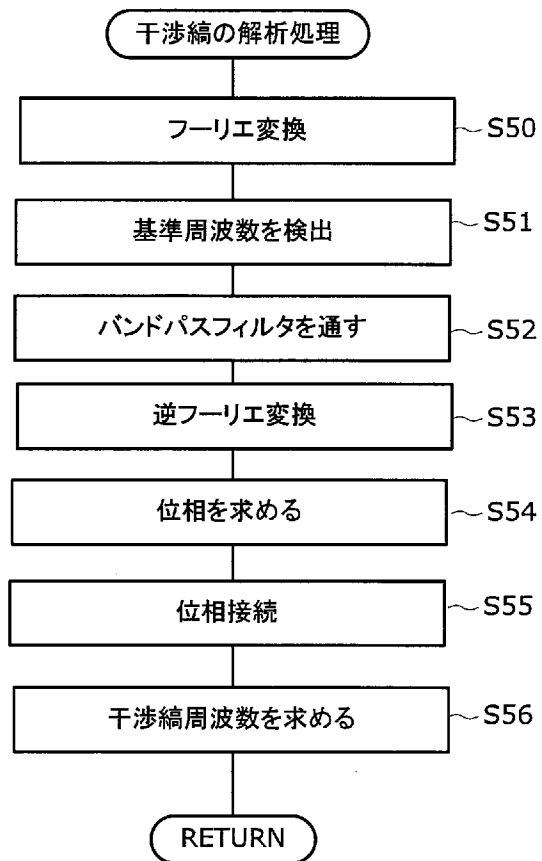
[図8]



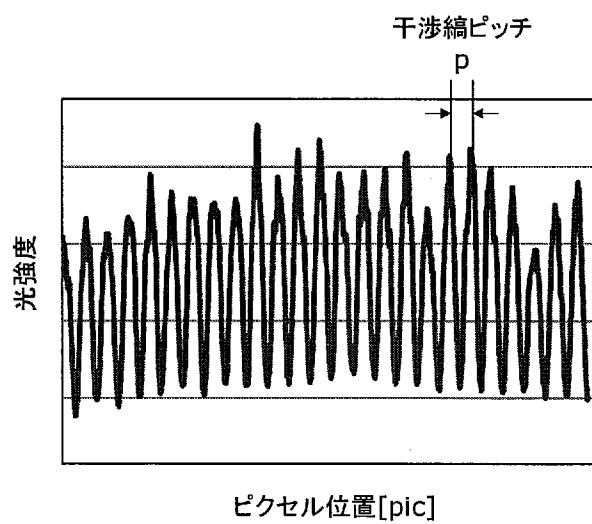
[図9]



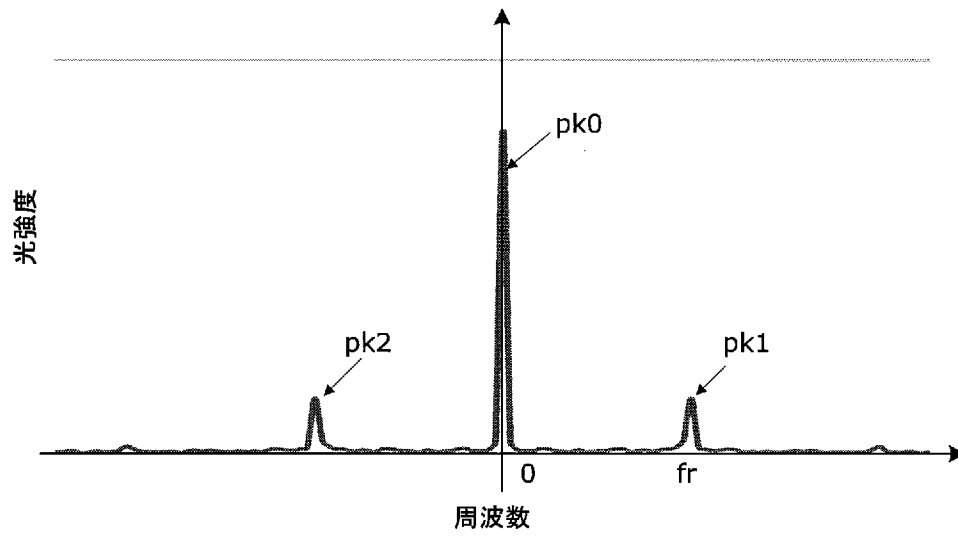
[図10]



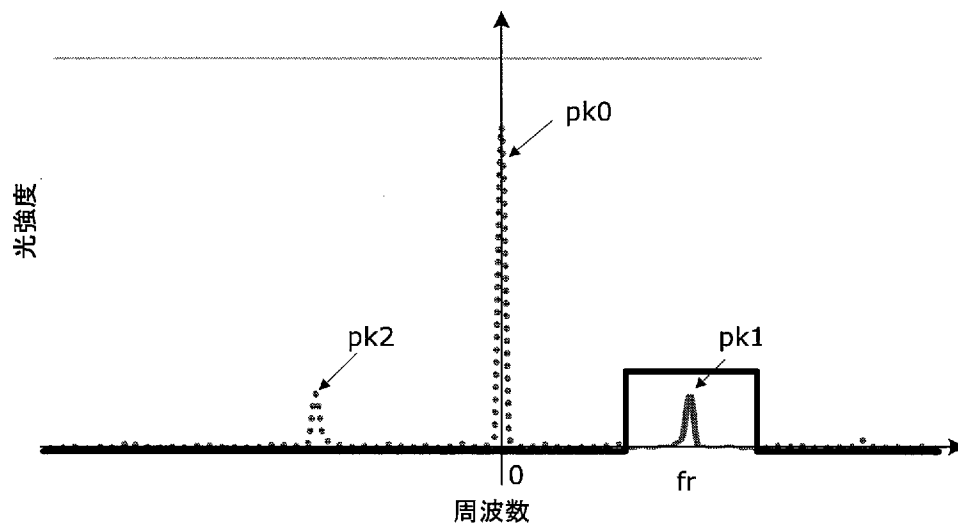
[図11]



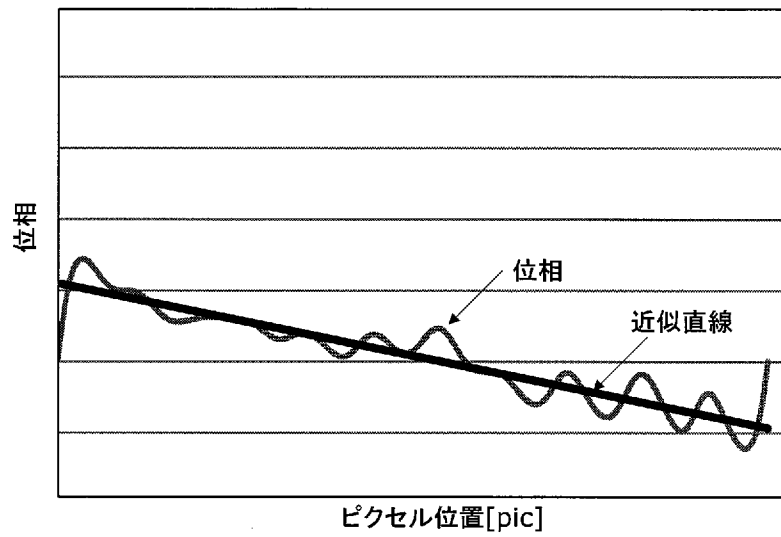
[図12]



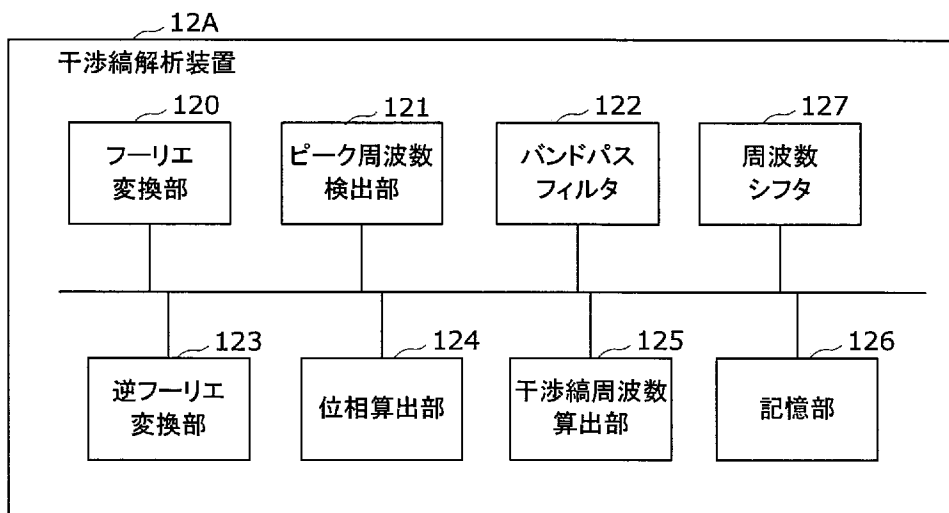
[図13]



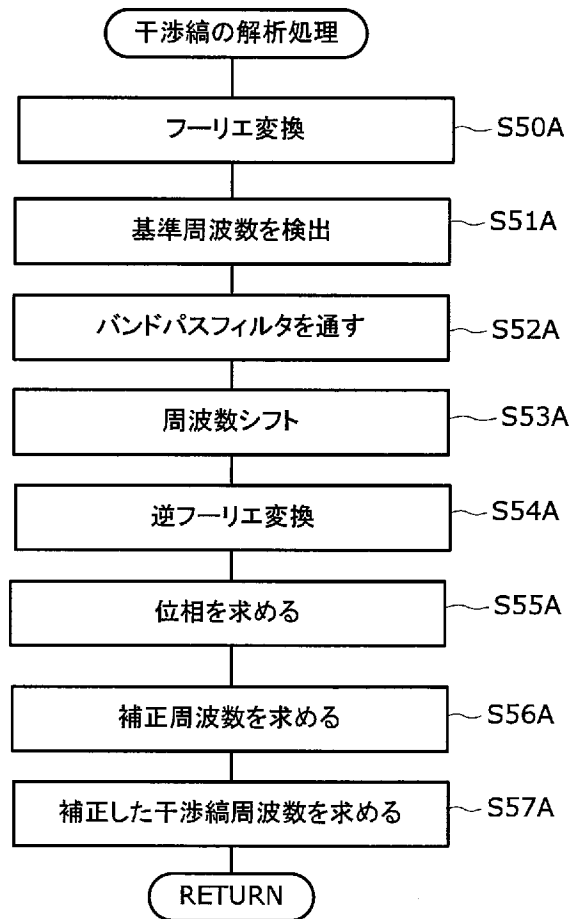
[図14]



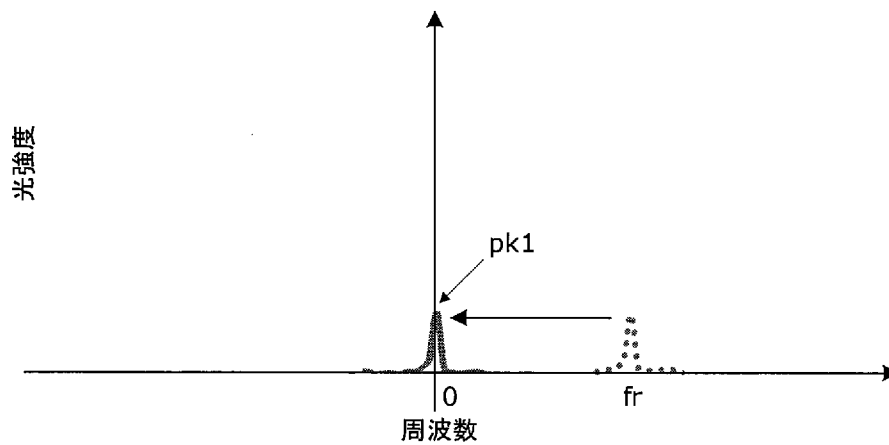
[図15]



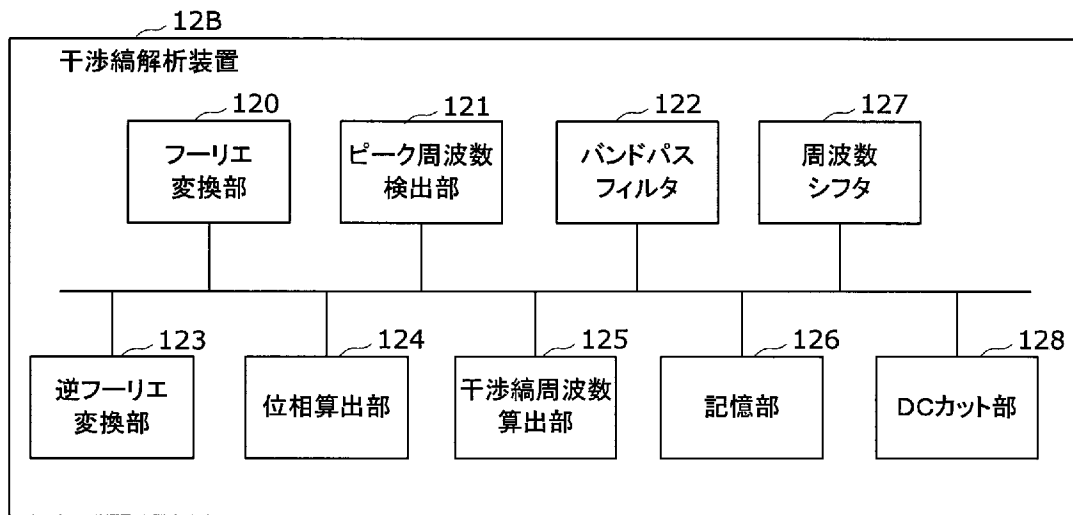
[図16]



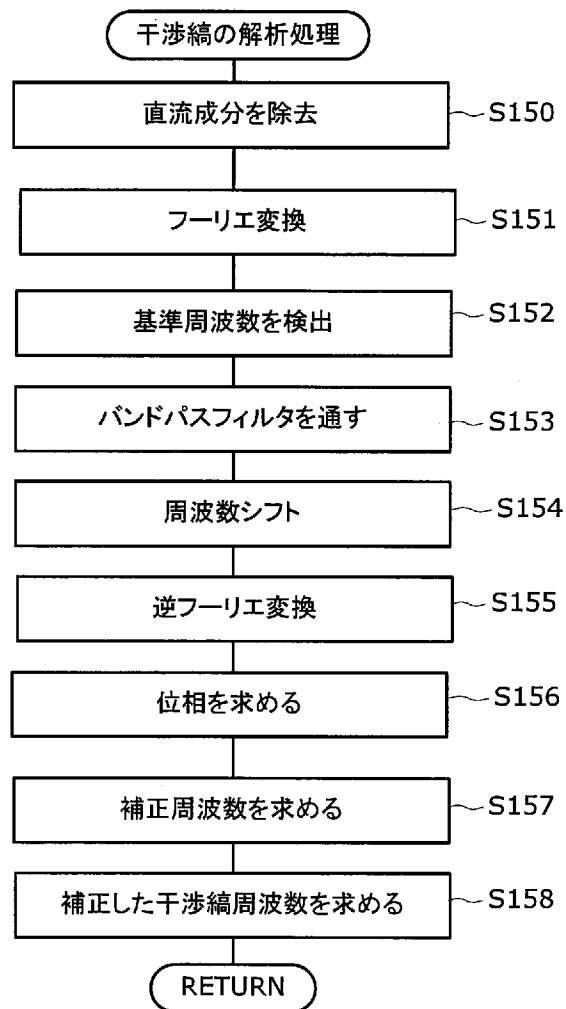
[図17]



[図18]



[図19]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/047880

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int. Cl. G01B11/00 (2006.01) i

FI: G01B11/00 G

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)

Int. Cl. G01B11/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996

Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2020

Registered utility model specifications of Japan 1996-2020

Published registered utility model applications of Japan 1994-2020

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.
X	WO 2006/137448 A1 (NATIONAL UNIVERSITY CORPORATION	1, 10
Y	HOKKAIDO UNIVERSITY) 28 December 2006, paragraphs [0055]-[0143], fig. 1-5	2-9, 11
Y	JP 2003-90765 A (FUJI PHOTO OPTICAL CO., LTD.) 28 March 2003, paragraphs [0049]-[0063]	2-9, 11
Y	JP 2017-75832 A (AZBIL CORP.) 20 April 2017, paragraphs [0019]-[0055], fig. 1-9	9
Y	JP 2017-533445 A (CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE) 09 November 2017, paragraphs [0007], [0037]-[0057], [0077], [0086]-[0090], fig. 1-3, 5, 9	9

☐ 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
03.02.2020

Date of mailing of the international search report
18.02.2020

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2019/047880

Patent Documents referred to in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
WO 2006/137448 A1	28.12.2006	(Family: none)	
JP 2003-90765 A	28.03.2003	(Family: none)	
JP 2017-75832 A	20.04.2017	(Family: none)	
JP 2017-533445 A	09.11.2017	US 2017/0299375 A1 paragraphs [0007], [0052]-[0074], [0080], [0105]-[0109], fig. 1- 3, 5, 9 WO 2016/050460 A1	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） G01B 11/00(2006.01)i FI: G01B11/00 G		
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）） G01B11/00		
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 1971-2020年 日本国実用新案登録公報 1996-2020年 日本国登録実用新案公報 1994-2020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
X	WO 2006/137448 A1 (国立大学法人 北海道大学) 28.12.2006 (2006-12-28) [0055] - [0143]、図1-5	1,10
Y		2-9,11
Y	JP 2003-90765 A (富士写真光機株式会社) 28.03.2003 (2003-03-28) [0049] - [0063]	2-9,11
Y	JP 2017-75832 A (アズビル株式会社) 20.04.2017 (2017-04-20) [0019] - [0055]、図1-9	9
Y	JP 2017-533445 A (サントル ナショナル ドウ ラ ルシエルシュ シアンティフィク) 09.11.2017 (2017-11-09) [0007]、[0037] - [0057]、[0077]、[0086] - [0090]、図1-3、5、9	9
☐ 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、一般的な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抵触するものではなく、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 03.02.2020		国際調査報告の発送日 18.02.2020
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		権限のある職員（特許庁審査官） 眞岩 久恵 2S 4067 電話番号 03-3581-1101 内線 3216

国際調査報告
 パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2019/047880

引用文献			公表日	パテントファミリー文献	公表日
WO	2006/137448	A1	28.12.2006	(ファミリーなし)	
JP	2003-90765	A	28.03.2003	(ファミリーなし)	
JP	2017-75832	A	20.04.2017	(ファミリーなし)	
JP	2017-533445	A	09.11.2017	US 2017/0299375 A1 [0007]、[005 2]－[0074]、[0 080]、[0105]－ [0109]、図1－3、 5、9 WO 2016/050460 A1	