

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6282358号  
(P6282358)

(45) 発行日 平成30年2月21日(2018.2.21)

(24) 登録日 平成30年2月2日(2018.2.2)

(51) Int. Cl. F I  
**GO 1 C 15/00 (2006.01)**  
 GO 1 C 15/00 1 O 3 D  
 GO 1 C 15/00 1 O 3 E  
 GO 1 C 15/00 1 O 4 A

請求項の数 7 (全 18 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2016-568363 (P2016-568363)                  (86) (22) 出願日 平成28年1月6日(2016.1.6)                  (86) 国際出願番号 PCT/JP2016/000035                  (87) 国際公開番号 W02016/111245                  (87) 国際公開日 平成28年7月14日(2016.7.14)                  審査請求日 平成28年8月10日(2016.8.10)                  (31) 優先権主張番号 特願2015-1062 (P2015-1062)                  (32) 優先日 平成27年1月6日(2015.1.6)                  (33) 優先権主張国 日本国(JP)</p>	<p>(73) 特許権者 000102739                  エヌ・ティ・ティ・アドバンステクノロジー株式会社                  神奈川県川崎市幸区大宮町1310番地                  (73) 特許権者 000100942                  アイレック技建株式会社                  東京都台東区雷門一丁目4番4号                  (74) 代理人 110001243                  特許業務法人 谷・阿部特許事務所                  (72) 発明者 八木 生剛                  神奈川県川崎市幸区大宮町1310番地                  エヌ・ティ・ティ・アドバンステクノロジー株式会社内</p>
---	--

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 測量機

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

波長可変光源からの光を発出可能な1ないし複数の発出口と、隣接する測量機から発出された光または反射された光を受光する1ないし複数の受光部を有する測量機であって、前記発出口からの発出光が扇状のパターンであり、かつ、扇状に広がる方向と垂直方向に、出射角度が光の波長の単調な関数として変わるように発出され、

隣接する測量機から発出され受光される波長、または、隣接する測量機によって反射された光を発出した測量機自身が受光する波長を求めることで、測量機の相対的位置関係及び姿勢のパラメータの少なくとも一つを測定することを特徴とする、測量機。

【請求項2】

前記波長可変光源の波長は、所定波長範囲内において所定周期で掃引されており、光を発出した測量機に隣接する測量機、または、光を発出した測量機自身が、波長掃引の一周中に所定波長を受光する2つの時刻の時間差を測定することで、受光する波長を求めることを特徴とする、請求項1に記載の測量機。

【請求項3】

前記波長可変光源の出力光は、特定の周波数で強度変調されており、光発出前の光強度変化を参照信号として検出するとともに、光学反射素子を備えた隣接測量機からの反射光の光強度変化を反射信号として検出し、両信号の位相差を、少なくとも二つの周波数で求めることにより、隣接測量機との間の距離を求めることを特徴とする、請求項1または2に記載の測量機

## 【請求項 4】

隣接する測量機に、少なくとも二つの受光部を設け、かつ、該二つの受光部は、光を発生する測量機から発生された光ビームの掃引方向に所定間隔で異なる位置に配置され、前記二つの受光部が受光する時間差を測定する事により、二つの測量機間の距離を求めることを特徴とする、請求項 2 に記載の測量機。

## 【請求項 5】

前方または後方を向く少なくとも一面から、少なくとも二つの出射角度変更パターンで光を発生し、発生される光の出射角度を変更する方向が、互いに直交していることを特徴とする、請求項 1 乃至 4 のいずれかに記載の測量機。

10

## 【請求項 6】

波長可変光源を有する親機からの波長可変光を光ファイバーにより受信し、一部を分岐して発出口より発生するとともに、残りを光ファイバーで更に下流の測量機へ伝送する請求項 1 乃至 5 のいずれかに記載の測量機を縦続接続してなる測量システム。

## 【請求項 7】

測量機自身が波長可変光源を有してなり、トンネル先端の掘削機に設けられた光学反射素子からの光を受光する請求項 1 乃至 5 のいずれかに記載の測量機。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、測量機に関し、より詳細には、トンネル工事におけるトンネルの軌跡の測量などの曲線状の軌跡の測量に用いられる測量機に関する。

20

## 【背景技術】

## 【0002】

従来、測量機を用いたトンネル工事におけるトンネルの軌跡の測量は、以下のような方法がとられていた。トンネル入り口の立抗に設置した親機のレーザー発振器からの平行光ビームを、トンネル内に設置した子機の間プリズムユニットに向けて照射する。子機の間プリズムユニット内には、二枚のウエッジプリズムが搭載されている。親機から照射された光ビームを、二枚のウエッジプリズムを適切に回転させることにより、上下左右に光の進行方向を変えて、次の子機の間プリズムユニットに照射する。中間プリズムユニットに光が照射されているかどうかは、光が通過すべきウエッジプリズムペアの周囲に備えられたフォトディテクタの信号を測定する事で判定する。

30

## 【0003】

トンネル内に沿って一列に設置された複数の子機により、中間プリズムユニット間で光ビームの偏向を繰り返して、トンネルの曲線状の軌跡に沿って、光ビームがトンネル先端の最終目標地点の子機まで到達する。以降、説明の便宜のため、親機に近い側を上流、親機から遠い側を下流と呼ぶこととする。光ビームが最も下流の子機まで到達すると、各々の子機の間プリズムユニット内のウエッジプリズムペアの回転角から、トンネルの軌跡を求めることができる。

## 【0004】

トンネルに沿って光ビームを中継する子機を一列に配置する測量方式では、親機からみた下流側の子機の位置（上下の角度、左右の角度、子機間の距離）、光ビームの光軸と測量機の基準線とがなす角として表される姿勢（ピッチング、ローリング、ヨーイング）の 6 つのパラメータの値を知ることが必要である。しかし、従来のウエッジプリズムを利用した方式では、上下の角度、左右の角度という二つの値しか知ることができない。他のパラメータのうち、距離、ピッチングおよびローリングに関しては、他の測量方式を用いて計測している。従って、トンネル内の測量には、手間がかかり測量の効率を落としていた。また、ヨーイングに関しては測定手段がなく、子機を増やした時の誤差要因となっていた。

40

## 【0005】

50

本発明の目的は、光ビームを中継する子機を一行に配置する測量方式において必要な位置と姿勢のパラメータの全てまたは一部を提供し、誤差要因を減らし測量精度を上げつつ測量効率も向上した測量機を実現することにある。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【特許文献1】特開2002-90142号公報

【特許文献2】特開2004-015476号公報

【特許文献3】特開2012-14148号公報

【非特許文献】

【0007】

【非特許文献1】前田公洋、「新曲線位置計測技術 - prism -」、月刊推進技術、pp.10-15、Vol. 18、No. 6、2004

【発明の概要】

【0008】

上述の目的を達成するために、本発明の一実施態様は、波長可変光源からの光を發出可能な1ないし複数の発出口と、隣接する測量機から發出された光または反射された光を受光する1ないし複数の受光部を有する測量機であって、前記発出口からの發出光が扇状のパターンであり、かつ、扇状に広がる方向と垂直方向に、出射角度が光の波長の単調な関数として変わるように發出され、隣接する測量機から發出され受光される波長、または、隣接する測量機によって反射された光を發出した測量機自身が受光する波長を求め、測定することを特徴とする。

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図1A】図1Aは、出射角度が光の波長の単調な関数として変わる扇状掃引光を生成する光波長掃引器を示す上面図、

【図1B】図1Bは、出射角度が光の波長の単調な関数として変わる扇状掃引光を生成する光波長掃引器を示す側面図、

【図2】図2は、測量機の前方向と後方に扇状掃引光を發出する光波長掃引器を示す上面図、

【図3】図3は、光を發出する子機（測量機）および前後に隣接する子機の間光ビームの関係を示す図、

【図4A】図4Aは、子機の光発出口と受光部の配置を示す図、

【図4B】図4Bは、子機の光発出口と受光部の配置を示す図、

【図5】図5は、トンネル工事における測量機の配置を示す図、

【図6】図6は、三角法による測量機間距離測定を可能とする子機の受光部の配置を示す図、

【図7】図7は、波長掃引光源を使用して受光タイミングから受光波長を求める方法を説明するための図、

【図8A】図8Aは、飛行時間法による測量機間の距離測定を可能とする子機の受光部の配置を示す図、

【図8B】図8Bは、飛行時間法による測量機間の距離測定を可能とする子機の受光部の配置を示す図、

【図9】図9は、波長掃引光源の強度を高周波で変調する装置を示す図、

【図10】図10は、飛行時間法で測量機間距離を測定する際の光波長掃引器を示す上面図、

【図11A】図11Aは、レトロリフレクタからの反射信号を示す図、

【図11B】図11Bは、レトロリフレクタからの参照信号を示す図、

【図12】図12は、位置と姿勢の全6パラメータを計測するための掃引光パターンを示す

10

20

30

40

50

す図、

【図 1 3 A】図 1 3 A は、位置と姿勢の全 6 パラメータを計測するための子機の構成を示す上層の上面図、

【図 1 3 B】図 1 3 B は、位置と姿勢の全 6 パラメータを計測するための子機の構成を示す下層の上面図、

【図 1 3 C】図 1 3 C は、位置と姿勢の全 6 パラメータを計測するための子機の構成を示す側面図、

【図 1 3 D】図 1 3 D は、位置と姿勢の全 6 パラメータを計測するための子機の後方を向く面を示す図、

【図 1 3 E】図 1 3 E は、位置と姿勢の全 6 パラメータを計測するための子機の前方を向く面を示す図、

【図 1 4】図 1 4 は、測量機が 1 個の場合の実施例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0010】

以下、図面を参照しながら本発明の実施形態について詳細に説明する。

(光波長掃引器)

図 1 A および図 1 B に、出射角度が光の波長の単調な関数として変わる扇状の掃引光を生成する光波長掃引器を示す。親機の波長可変光源から発した光の全部または一部を分岐し、光ファイバー 1 を用いて子機内に導く。一部の光を分岐した場合は、残りの光を、他の光ファイバーで更に下流の子機へ伝送する。光波長掃引器は、光ファイバー 1 の端部から発した拡散光を、コリメータレンズ 2 で平行光にした後、透過型回折格子 3 に入射する。回折格子 3 のグレーティングベクトルは図 1 において x z 平面内にある。

【0011】

回折格子 3 の平面の法線に対する入射角度を  $\theta$ 、グレーティングピッチを  $\Lambda$ 、光の波長を  $\lambda$  とすると、回折角  $\phi$  は、

【0012】

【数 1】

$$\phi = \sin^{-1} \left( \frac{\lambda}{\Lambda} - \sin \theta \right) \quad (\text{式 1})$$

【0013】

で表される。入射角  $\theta$ 、グレーティングピッチ  $\Lambda$  を固定しているため、回折(出射)角度  $\phi$  は、光の波長  $\lambda$  の単調な関数となり、 $\lambda$  が変わると図 1 において、x z 平面内で出射方向(ビーム掃引方向)が変更される。

【0014】

さらに、回折された光をシリンドリカル凹レンズ 4 により、x y 平面内で扇状に広げることにより、扇状掃引光 5 を生成する。扇状掃引光 5 は、扇状の広がり(y 軸方向)とは垂直方向(z 軸方向)に波長に応じて進行方向が変わり発出され、掃引される。ここで、シリンドリカル凹レンズ 4 は、図 1 の x y 平面の y 軸方向にレンズパワーを持つように設置する。なお、シリンドリカル凹レンズの代わりにシリンドリカル凸レンズを用いても良い。この場合、焦点位置で一度集光されるが、遠方では扇状の射出光となる。

【0015】

(測量機の光波長掃引器)

図 2 に、測量機の前方と後方の両方に扇状掃引光を発出する光波長掃引器を示す。図 1 A および図 1 B で示した回折格子 3 の後に、ハーフミラー 6 a とミラー 6 b を追加し、ハーフミラー 6 a で反射した光を、シリンドリカル凹レンズ 4 a を介して、前方射出光 5 a として前方に発出する。ハーフミラー 6 a を透過後にミラー 6 b で反射した光を、シリンドリカル凹レンズ 4 b を介して、後方射出光 5 b として後方に発出している。ハーフミラー 6 a を時計回りに 90°、ミラー 6 b を反時計回りに 90° 回転することで、ハーフミラー 6 a で反射した光を後方に、ハーフミラー 6 a を透過後にミラー 6 b で反射した光を前方に発出してもよい。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 1 6 】

なお、シリンダリカル凹レンズ 4 a を、y 軸の周りに 90° 回転させて、グレーティング 3 と ハーフミラー 6 との間に移動した構成としても良い。これにより、シリンダリカル凹レンズ 4 b を省略することができる。もちろん、シリンダリカル凹レンズの代りにシリンダリカル凸レンズを適用した場合も同様である。

## 【 0 0 1 7 】

(隣接する子機間の光ビームの関係)

図 3 に、光を発出する子機 (測量機) および前後に隣接する子機 (測量機) の間の光ビームの関係を示す。図 3 では、子機 B から前後に光ビームを発出するものとする。前方 (すなわち下流) の子機を子機 A、後方 (すなわち上流) の子機を子機 C と呼ぶことにする。すべての子機は、トンネル内に前後の子機が見渡せる範囲で配置されなければならない。ここで“見渡せる範囲”とは、任意の子機が発出する扇状の光が波長可変範囲内で掃引され、隣接する子機に届く範囲を意味する。図 3 において、子機 B から子機 A を見る前方視線において、前方視野角はシリンダリカル凹レンズで決定される“ビームの広がり角”と、回折格子と波長可変範囲で決定される“ビーム掃引角”により制限される。子機 A は、前方視野角内になければならない。子機 B から子機 C を見る後方視線も同様であり、子機 C は後方視野角内になければならない。

10

## 【 0 0 1 8 】

(子機の光発出口と受光部の配置)

図 4 A および図 4 B に、子機 (測量機) の最も簡単な光発出口と受光部の配置の一例を示す。子機 B が発光した光を受光するのは、子機 A の後方を向く面 1 1 (図 4 A) の受光部 1 2、および、子機 C の前方を向く面 2 1 (図 4 B) の受光部 2 2 である。親機の波長可変光源の発振波長を変えていったとき、それぞれの受光部の受光量が最大になる波長がわかれば、(式 1) を用いて、子機 B に対する子機 A の角度、および、子機 B に対する子機 C の角度を求めることができる。ここで、“子機 B に対する子機 C の角度”は、“子機 C に対する子機 B の姿勢”と読み替えることができる。その理由を、図 5 を用いて説明する。

20

## 【 0 0 1 9 】

(トンネル工事における測量機の配置)

図 5 に、トンネル工事における測量機の配置の一例を示す。親機 5 2 と光ファイバーおよび電気配線 5 4 により接続された基準機 5 3 が立抗 3 2 に設置され、地下の掘削機 5 1 により掘り進んで作られたトンネル 3 1 内に、光ファイバーおよび電気配線 5 4 により数珠繋ぎに接続された子機 (A ~ D) 5 5 a ~ 5 5 d が配置されている。親機 5 2 の波長掃引光源から光ファイバー経由で波長掃引光が基準機 5 3 および子機 5 5 a ~ 5 5 d に供給されている。立抗 3 2 におかれる基準機 5 3 は、トンネル工事すべての基準座標を決め、地表 3 3 での測量結果に基づき、掘削方向を決定する。波長掃引光源と制御システムとを備えた親機 5 2 と基準機 5 3 とを統合した測量機としてもよく、更に最も上流の子機 (D) 5 5 d と基準機 5 3 とを統合した測量機としても良い。

30

## 【 0 0 2 0 】

基準機 5 3 から子機 5 5 d に向けて発した光を子機 5 5 d が受光し、その受光した波長を知ることで、基準機 5 3 が決定した座標系において、子機 5 5 d の位置が求められる。次いで、子機 5 5 d が発光した光を基準機 5 3 が受光し、その受光した波長を知ることで、子機 5 5 d に対する基準機 5 3 の位置を求めることができる。しかし、基準機 5 3 の位置は変化しないのであるから、“子機に対する基準機的位置”とは、“基準機に対する子機の姿勢”に他ならない。

40

## 【 0 0 2 1 】

こうして、基準機 5 3 が決定した座標系において、子機 5 5 d の位置 (波長に応じて変化する角度のみ) と、子機 5 5 d の姿勢 (波長に応じて変化する角度のみ) が決定される。次に、子機 5 5 d からの光を子機 5 5 c が受光することにより子機 5 5 c の位置が分かり、子機 5 5 c からの光を子機 5 5 d が受光することにより子機 5 5 c の姿勢が分かる。

50

以下同様に、上流の子機から下流の子機に向けて、順次、位置と姿勢を決定する作業を繰り返し、各子機の位置と姿勢のパラメータを求める。

【0022】

(他のパラメータの決定)

上述した方法において、子機の位置と姿勢のパラメータは、波長に応じて変化する角度しかわからない。“波長に応じて変化する角度”は、その回転軸が重力に対して平行な方向(すなわち鉛直方向、角度の回転面は水平面となる)を採用するのが望ましい。鉛直方向に扇状に拡がった光を水平方向に回折させ、水平面内における位置(角度)、および、水平面内になる光軸に対する子機の姿勢(ヨーイング)を測定することができる。

【0023】

他のパラメータは別の方法で取得可能であり、例えば、子機間距離は、子機をトンネルに押し込むとき、押し込み距離を測定する事が可能である。高さは、とう道内にパイプを這わせ、各所での静水圧を測定する事で測定可能である。子機の姿勢のうちピッチングとローリングは、重力に対する角度を測定する水準器で代用することが可能である。

【0024】

一方、本実施形態によれば、受光部や光源を工夫すれば、他のパラメータも測れるようになり、測量機としての利便性は向上し、測量精度のみならず測量効率も向上することができる。以下にそのための構成を示す。

【0025】

(波長掃引光源による波長の決定と、三角法による距離測定)

図6に、複数の受光部を用いて三角法による子機間距離測定を可能にする子機の受光部の配置を示す。上流の子機から前方に発出された光ビームを、隣接する子機の後方を向く面61に、光ビームの掃引方向に距離Gだけ離間して設けられた二つの受光部62a, 62bで受光する。三角法による距離測定においては、一定周期で所定波長範囲を波長が往復変化する波長掃引光源を使用する。

【0026】

図7を参照して、波長掃引光源を使用して受光タイミングから受光波長を求める方法を説明する。図7は、光源の波長変化と受光側の子機の一つの受光部の受光信号を示している。(式1)により、波長と角度は1対1に対応するので、1周期内で波長が短波長から長波長への掃引時と、長波長から短波長への掃引時の2回、同じ波長の光を受光することになる。短波長から長波長への掃引時の受光時刻をT1、長波長から短波長への掃引時の受光時刻をT2とすると、その時間差  $T = T2 - T1$  は、波長の関数であるから、Tから、波長を求めることが可能となる。ただし、波長掃引光源において、波長の時間依存性を求めておくことが前提となる。

【0027】

T2およびT1を計測する手段として、特定の波長( $\lambda_B$ )のみ透過する狭帯域のバンドパスフィルタと、光路長差Lの干渉計を用いた方法を説明する。親機において、子機へ配分する大部分の光とは別に、1%程度の光を、バンドパスフィルタを経由したフォトディテクタ(PD<sub>B</sub>)および干渉計に入力し、それぞれから出力される電気信号をオシロスコープのチャンネル1(CH1)と、チャンネル2(CH2)に入力する。オシロスコープのトリガは、波長掃引光源の掃引開始信号から得ることにより、オシロスコープ上の信号が、短波長から長波長への掃引時の信号か、長波長から短波長への掃引時の信号かを区別することができる。短波長から長波長への掃引時、CH1のピーク時刻( $t_B$ )において、波長が $\lambda_B$ であり、CH2に現れる周期信号の1周期が $2/L$ 分の光の波数変化であることを用いて、時刻t( $t > t_B$ )の波長( $\lambda$ )は、

【0028】

【数2】

$$\lambda^{-1} = \frac{2\pi}{\lambda_B} + m \frac{2\pi}{L} + \frac{\xi}{L} \quad (\text{式2})$$

【0029】

10

20

30

40

50

で表される。mはtとt<sub>B</sub>の間のCh<sup>2</sup>のピーク数(0または正の整数)、は単位をラジアンとして残りの周期の長さ(0 < < 2)である。

【0030】

t < t<sub>B</sub>の時は、mは0または負の整数、-2 < < 0である。長波長から短波長への掃引時は、t > t<sub>B</sub>において、mは0または負の整数、-2 < < 0であり、t < t<sub>B</sub>において、mは0または正の整数、0 < < 2である。こうして得られた、短波長から長波長への掃引時の波長の時間依存性<sub>U</sub>(t)の逆関数T<sub>1</sub> = <sub>U</sub>( )、長波長から短波長への掃引時の波長の時間依存性<sub>D</sub>(t)の逆関数T<sub>2</sub> = <sub>D</sub>( )を作成する。次いで、

【0031】

【数3】

$$\delta t = \tau_D(\lambda) - \tau_U(\lambda) \quad (\text{式3})$$

【0032】

を作成し、最後に、その逆関数

【0033】

【数4】

$$\lambda = \lambda_G(\delta t) \quad (\text{式4})$$

【0034】

を作成する。これで、各子機の1掃引周期内での受光時間差から、受光波長を求めることが可能となる。このような波長掃引光源による波長の決定方法は、以下に述べる三角法による距離測定以外にも適用可能である。

【0035】

三角法による距離測定のためには、(式2)から、各波長における波長の掃引速度( / t)が求まるので、(式1)から、扇状ビームの掃引角速度( / t)が求められる事を利用する。

【0036】

図6において、二つの受光部(C, D) 62a, 62bの中心間距離をGとする。受光部C, Dの受光波長をそれぞれ<sub>C</sub>, <sub>D</sub>、受光時刻をそれぞれt<sub>C</sub>, t<sub>D</sub>として、その平均波長<sub>m</sub>( = ( <sub>C</sub> + <sub>D</sub> ) / 2)における、扇状ビームの掃引角速度( <sub>m</sub> / t)から、子機間距離(L<sub>D</sub>)は、

【0037】

【数5】

$$L_D = \frac{G}{(t_D - t_C) \frac{\partial \theta_m}{\partial t}}$$

(式5)

【0038】

で求められる。測定精度を向上させるため、測定を繰り返し、測定回数(N)を大きくすることができ、計測された距離の平均をとれば、測定回数の平方根に反比例して測定誤差の標準偏差が小さくなり、測定精度を向上することができる。

【0039】

(飛行時間法による距離測定)

図8Aに、飛行時間法による測量機間の距離測定を可能とする子機の受光部の配置を示す。上流の子機から前方に発出された光ビームを、隣接する子機の後方を向く面71に設けられたレトロリフレクタR(コーナーキューブプリズムなどの入射光を常に入射方向に反射する光学反射素子)72によって後方に反射し、上流の子機の前方向を向く面81に設けられた光発出口83付近に隣接する受光部82で受光させる(図8B)。飛行時間法で

10

20

30

40

50

の距離測定を実施するためには、光源の強度を何らかの方法で変調しなければならない。

【0040】

図9に、波長掃引光源の強度を高周波で変調する装置を示す。波長掃引光源91からの出射光を、半導体光アンプ(SOA: Semiconductor Optical Amplifier)などの光アンプ94に入射し、光アンプ94の増幅率を、電流アンプ95を経由した高周波発生器92で変調することで光強度変調を行う。波長掃引と同時に、波長掃引の繰り返し周波数(通常、数kHzの程度)よりはるかに高い周波数(例えば1~100MHzの程度)で強度変調された光が光ファイバー93を経由して子機に供給される。

【0041】

図10に、飛行時間法で測量機間距離を測定する際の光波長掃引器を示す。参照信号として用いるために、上流側の子機内の光波長掃引器にフォトディテクタの内蔵が必要である。図2に示した光波長掃引器における回折格子3において、僅かながら発生する反射光または0次透過光を、フォトディテクタPDで受光し、参照信号を得る。この反射光は、理想的には存在しない光であるが、実際には表面の無反射コートが完全ではありえないために存在する光である。なお、回折格子3の反射光や0次透過光を参照信号として用いるのではなく、子機内の光ファイバー1にファイバカップラ等を入射光の一部を分岐し、分岐した光を参照光としてフォトディテクタPDに入力しても良い。

10

【0042】

図11Aに、強度変調されたレトロリフレクタからの反射光を受光した反射信号を示し、図11Bに、参照信号を例示する。反射信号は、発出光が隣接する子機のレトロリフレクタを照射する角度(波長)でなければ、受光しない。波長掃引光源を用いる場合には、図7のPD出力に示されるように、特定の時刻のみに反射信号がパルス状に発生する。ただし、光強度が変調されているために、受光角度において受光したパルス状の反射信号は、強度変調されている。一方、参照信号は強度変調の周期で常に振動を繰り返す信号として現れている。強度変調された光を用いることは、単に飛行時間法による測距が可能になることだけでなく、受光角度を求める際、光の変調周期と同程度の周波数成分のみ抜き出すバンドパスフィルタを用いることにより、ノイズ耐性が高くなるという利点がある。

20

【0043】

光速を $c$ として、子機間距離の二倍の距離( $2L_D$ )を飛行するのに、 $2L_D/c$ の飛行時間を要する。強度変調の周波数を $f$ (Hz)として、子機の内部で計測した参照信号とレトロリフレクタからの反射信号は、位相差( )

30

【0044】

【数6】

$$\zeta = \frac{4\pi L_D f}{c} \quad (\text{式6})$$

【0045】

を持つ。例えば、 $f = 20 \text{ MHz}$ とき、 $\zeta = 2 L_D \times 0.13333$ となり、子機間距離が7.5mの整数倍で、位相差は $2\pi M$ となる。位相差( )が与えられたとき、 $M$ を0または正の整数として、子機間距離 $L_D$ は、

【0046】

40

【数7】

$$L_D = \frac{\zeta c}{4\pi f} + M \frac{c}{2f} \quad (\text{式7})$$

【0047】

となる。未知の値 $M$ は、別の周波数( $f_1$ )での位相差( $\zeta_1$ )を求めたとき、(式7)同様の式(式8)が整数 $M_1$ で成立するという条件から、求めることができる。

【0048】

【数8】

$$L_D = \frac{\zeta_1 c}{4\pi f_1} + M_1 \frac{c}{2f_1} \quad (\text{式8})$$

50

## 【 0 0 4 9 】

ここで、反射信号と参照信号との間で、強度変調の位相差を求めるためには、図 1 1 の様に、反射信号内に複数サイクルの強度変調が含まれなければならない。そのためには、強度変調の周波数は、波長掃引の周波数に比べて、圧倒的に大きな値である必要がある。

## 【 0 0 5 0 】

また、三角法で用いたのと同様に、波長掃引の周波数×計測時間で与えられる回数だけ、距離計測を繰り返すことが可能であり、計測された距離の平均をとれば、計測回数の平方根に反比例して、測定誤差が小さくなる。このようにして、水平面内の位置（角度）およびヨーイングに加えて、子機間距離を測定する方法として、三角法と飛行時間計測法とを適用することができる。

10

## 【 0 0 5 1 】

（鉛直方向位置と測量機の姿勢情報の取得）

水平（横）方向の光掃引に加え、垂直（縦）方向の光掃引パターンで光ビームを発出することにより、鉛直方向の位置（角度）を求めることができる。

## 【 0 0 5 2 】

図 1 2 は、位置と姿勢の全 6 パラメータを計測するための 2 つの光掃引パターンを示している。測量機から発出した扇状掃引発出光は二種類あり、縦方向に扇形に伸びた光を横方向に掃引するパターンと、横方向に扇形に伸びた光を縦方向に掃引するパターンである。さらに測量機の隣接する子機に向けた面に複数の受光部を設けることにより、横方向位置（角度）、ヨーイング、測量機間距離、鉛直方向位置（角度）に加えて、ピッチング、および、ローリングの姿勢情報を求めることが可能である。

20

## 【 0 0 5 3 】

図 1 3 A ~ 図 1 3 E に、全 6 パラメータを測量可能な測量機（子機）の構成を示す。図 1 3 B および図 1 3 D にあるように、光ファイバー接続部 F i n から入力された光をコリメータで平行光にした後、ハーフミラー H M 1 で横方向掃引用と縦方向掃引用の二つに分離する。ハーフミラー H M 1 で反射した光は横方向掃引用として、透過型回折格子 G 1 によって横方向に回折されたのち、ハーフミラー H M 2 で前後二つに分離される。

## 【 0 0 5 4 】

ハーフミラー H M 2 の透過光は、縦方向にレンズパワーを持つシリンダリカル凹レンズまたはシリンダリカル凸レンズによって縦方向に扇状に広げられ、前方に発出される横掃引光となる。ハーフミラー H M 2 の反射光は、さらにミラー M 1 によって反射され、縦方向にレンズパワーを持つシリンダリカル凹レンズまたはシリンダリカル凸レンズによって縦方向に扇状に広げられ、後方に発出される後方横掃引光となる。なお、シリンダリカル凸レンズを用いた場合には、一度、焦点位置で一度集光された後、扇状の射出光となる。

30

## 【 0 0 5 5 】

ハーフミラー H M 1 で分離された光のうち、透過光は縦方向掃引用として、ミラー M 2 によって、上方に跳ね上げられ、図 1 3 A および図 1 3 D にあるように、透過型回折格子 G 2 によって縦方向に回折される。回折された光はハーフミラー H M 3 によって前後二つに分離される。ハーフミラー H M 3 の透過光は、横方向にレンズパワーを持つシリンダリカル凹レンズによって横方向に扇状に広げられ、後方に発出される後方縦掃引光となる。ハーフミラー H M 3 の反射光は、ミラー M 3 によって反射され、横方向にレンズパワーを持つシリンダリカル凹レンズによって横方向に扇状に広げられ、前方に発出される前方縦掃引光となる。

40

## 【 0 0 5 6 】

図 3 と同様に、光を発出する子機を子機 B、前方の子機を子機 A、後方の子機を子機 C とすると、子機 B から前方に発出する前方横掃引光を子機 A の P D 1 と P D 2 が受光する時刻差から、子機 B に対する子機 A のローリングを得ることができる。子機 A の P D 1 で受光する子機 B の前方縦掃引光の時刻から、子機 B に対する子機 A の上下方向位置（角度）を知ることができる。さらに、子機 B から後方に発出する後方縦掃引光を子機 C の P D 5 が受光する時刻から、子機 C に対する子機 B の姿勢（ピッチング）を知ることができる

50

## 【 0 0 5 7 】

前述のように、横方向角度、および、ヨーイングは横掃引光を使って求めることが可能である。距離についても、三角法による距離測定を適用して、横掃引光を P D 1 と P D 3 が受光する時刻差から求めることができる。また、強度変調による距離測定の使用も可能である。この様にして、位置と姿勢の全 6 パラメータの値を、一度にすべて精度よく測定する測量機を実現する事が可能となり、従来に比べてトンネルなどの測量における測量精度と測量効率を大幅に向上した測量システムを実現することができる。

## 【 0 0 5 8 】

本実施形態によれば、トンネル工事において、トンネル内に測量機を配置し、測量機の相対位置や姿勢などの複数のパラメータを求めることで、トンネルの軌跡を求めることができる。従来方式に比べ、測量機の相対位置だけではなく、姿勢などの他のパラメータも求めることができるため、測量の精度と効率を大幅に向上させることが可能となる。

## 【 0 0 5 9 】

( 具体的実施例 )

以下、本発明の具体的実施例について詳細に説明する。

## 【 0 0 6 0 】

( 実施例 1 )

図 2 において、透過型回折格子 3 として、1200 本 / mm のグレーティングを選択する。光源は、波長を 1260 nm から 1360 nm まで変えられる波長可変光源を用いる。波長可変光源の光は、各子機に備えられた光スイッチにより、その光スイッチが内蔵された子機内で発出されるか、下流の子機に供給されるかを選択できるようにする。NA = 0.14 のシングルモード光ファイバー 1 からの出射光を、焦点距離 13.86 mm の非球面レンズであるコリメータレンズ 2 を用いて 4 mm のコリメート光を作成する。図 2 には表示されていないが、コリメータレンズ 2 と透過型回折格子 3 との間に、面内でビーム径を 2 倍にするアナモルフィックプリズムペアを挿入し、4 × 8 mm の楕円型コリメート光を透過型回折格子に入射する。

## 【 0 0 6 1 】

回折格子 3 の法線と、入射光のなす角度は、55° とする。このとき、中心波長である 1310 nm における回折角度は 48.8° であるから、回折光の断面は 4 × 9.2 mm の楕円となっている。波長を 1260 nm とすると回折角度は 43.8°、波長を 1360 nm とすると回折角度は 54.4° であり、10° 以上の角度をカバー可能である。前方、および後方に発出される際に通過するシリンドリカル凹レンズ 4 の焦点距離は、-55 mm に設定し、出射光を上下に ± 2° の広がり角で扇状に広げている。

## 【 0 0 6 2 】

受光部は図 6 の配置を選択する。前方、および後方を向く面の断面は 50 × 50 mm であり、受光部 62 a , 62 b は 12 mm の円形である。光発出口 63 は、縦 5 mm × 横 15 mm の長方形とする。後方を向く面の受光部 62 a , 62 b の中心は、水平方向に距離 G = 30 mm 離れている。

## 【 0 0 6 3 】

図 3 を参照して、子機 B の前方を向く面から光を発出し、波長掃引光源の発振波長を徐々に変え、子機 A の後方を向く面に備えられた受光部が最大光量を受け取る波長を求める。その波長を  $\lambda_1$  ,  $\lambda_2$  としたとき、その平均波長  $\lambda_0 = (\lambda_1 + \lambda_2) / 2$  を ( 式 1 ) に代入し、

## 【 0 0 6 4 】

## 【 数 9 】

$$\phi = \sin^{-1}(0.83333\lambda_0 - 0.81915) \quad (式 9)$$

## 【 0 0 6 5 】

から、子機 B に対する子機 A の横方向の角度が求められる。ここで、波長は単位 nm で入

10

20

30

40

50

力する。また、子機 A と子機 B の距離 ( $L_D$ ) は、

【 0 0 6 6 】

【 数 1 0 】

$$L_D = \frac{0.03}{|\sin^{-1}(0.83333\lambda_1 - 0.81915) - \sin^{-1}(0.83333\lambda_2 - 0.81915)|} \quad (\text{式 } 10)$$

【 0 0 6 7 】

で与えられる。

【 0 0 6 8 】

次に、光スイッチを切り替え、波長可変光源からの光ファイバー経由の光を、子機 A に入力し、子機 A の後方を向く面からの発出光を子機 B の前方を向く面の受光部で受光する。受光部が最大光量を受け取る波長を求める。その波長を  $\lambda_3$  としたとき、子機 B に対して、子機 A は、 $\sin^{-1}(0.83333\lambda_3 - 0.81915)$  だけ水平面内で傾いていると計測される。

10

【 0 0 6 9 】

( 実施例 2 )

光源として、2 kHz の周波数で、1260 nm から 1360 nm の波長を往復する、波長掃引光源を用いる。子機の光学系は実施例 1 と同じである。実施例 1 との違いは、同一の受光部が、短波長から長波長への掃引時に最大光量を受光する時刻と、長波長から短波長への掃引時に最大光量を受光する時刻との差から、受光波長を求めることである。2 kHz の周波数なので、40 秒間で 80000 回の計測が可能であり、測定値を平均することにより、誤差が  $1/283$  に低下する。受光部の直径が 1.2 mm なので、最大光量を受光するタイミングを位置に変換すると、直径の  $1/10$ 、即ち 1.2 mm 程度の誤差は避けられない。しかし、40 秒の連続計測により、誤差は 4.2  $\mu$ m 程度に軽減される。

20

【 0 0 7 0 】

三角法による距離計測では、受光部 62a, 62b の中心間の距離  $G = 30$  mm で 50 m 先の距離を測定するとき、中心間距離  $G$  の誤差は、 $50 \text{ m} \div 30 \text{ mm}$ 、即ち 1666 倍に強調される。中心間距離  $G$  が 1.2 mm 揺らぐと、誤差は 2 m となる。中心間距離  $G$  の誤差が 4.2  $\mu$ m であれば、50 m の距離計測での誤差は 7 mm に減少する。

【 0 0 7 1 】

( 実施例 3 )

光源は実施例 2 と同じであるが、光源と子機の間、SOA を挿入し、20 MHz、または、15 MHz で強度変調をかけられるようにしておく。子機は、図 8A および図 8B に示した受光部を使う。子機内の光ファイバーから発出までは、実施例 1 と同じである。さらに、図 10 に示されるように透過型回折格子 3 の反射光をフォトディテクタ PD で受光する。子機の後方を向く面 71 には直径 1 インチのレトロリフレクタ R72 を配置する。レトロリフレクタ R72 の 3 枚ミラーは、図 8A に示されるように 0 時、4 時、8 時の方向にミラー境界が来るように設置される。子機の前方を向く面 81 の光発出口 83 の直上に受光部 82 があり、光発出口 83 中心と受光部 82 中心の距離は 12 mm である。角度計測時には、SOA の電流変調は不要である。

30

【 0 0 7 2 】

図 3 を参照して、子機 B から発した光は、子機 A のレトロリフレクタ R によって反射され、子機 B の前方を向く面にある受光部で受光される。受光タイミングから受光波長を求める方法は実施例 2 と同じである。受光波長から、子機 A の子機 B に対する横方向角度が求められ、子機 A の後方を向く面から発光した光を子機 B の前方を向く面の受光器が受光することにより、子機 B に対する子機 A のヨーイングが求められる。

40

【 0 0 7 3 】

角度測定により、レトロリフレクタ R から、どの波長、タイミングで光が受けられるかわかっている。そこで、波長掃引光源の掃引信号をトリガとして、光を受けられるようオシロスコープのトリガ遅延を決定し、サンプリング速度を 250 MSPS にして、1024 サンプルを取得する。これは、4  $\mu$ s のデータ取得時間に相当する。前方を向く面に設置された受光部の信号 ( $S_i : 0 \leq i < 1024$ ) と、子機内のフォトディテクタの信号

50

( $R_i : 0 \leq i < 1024$ ) の相互相関をとる。

【0074】

具体的には、それぞれの信号を離散フーリエ変換し、子機内のフォトディテクタ信号のみ複素共役をとったのち、両者を通じ、逆フーリエ変換を行う。次に、最大値を与える指標近傍で、二次関数フィットを行い、最大値を与える指標を整数ではなく実数で求める。求めた実数に  $2 / 1024$  を乗じた値 ( $\zeta$ ) が、(式7)における位相差である。同様の作業を  $15 \text{ MHz}$  の変調周波数でも行って  $\zeta_1$  を求め、(式7)および、(式8)を使って距離を求める。実用上の問題点として、内蔵のフォトディテクタが受光する光量に比べて、前方を向く面に設けられた受光部が受け取る光量が圧倒的に小さく、アンプで増幅しなければならない。従って、アンプによる遅延があるので、変調周波数に関係ない遅延時間 ( $t_D$ ) が  $R_i$  に対して  $S_i$  には生じている。

10

【0075】

これを補正するためには、

【0076】

【数11】

$$\zeta \rightarrow \zeta - 2\pi t_D \times 20 \times 10^6 \quad (\text{式11})$$

【0077】

【数12】

$$\zeta_1 \rightarrow \zeta_1 - 2\pi t_D \times 15 \times 10^6 \quad (\text{式12})$$

20

【0078】

のように、補正が必要である。遅延時間は、各子機に内蔵されたアンプの個性があるために、既知の距離での測距を行い、子機ごとに固有の  $t_D$  を求めておく必要がある。

【0079】

(実施例4)

子機が1台の場合の最小単位の実施例である。前述のように、親機と子機を兼ねた測量機、または親機、基準機および子機を兼ねた測量機としても良い。基準機内に波長可変(掃引)光源を内蔵しても良い。

【0080】

30

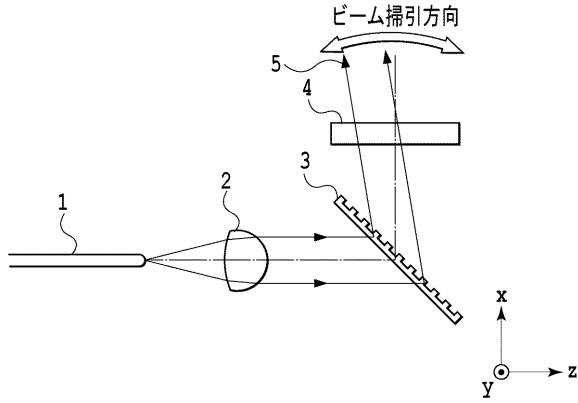
図14に、測量機が1台の場合の実施例を示す。トンネル31外の立坑32に子機55が1台配置される。この子機55は、トンネル31を向く方向に、図4Bで示した「前方を向く面21」が向いている。トンネル31の先頭にある掘削機51の後ろには、レトロリフレクタR56が設置されている。

【0081】

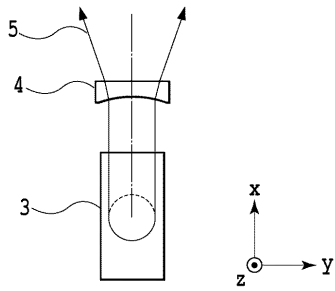
子機から発した光は、「掃引範囲」で示される角度で光の進行方向が振動している。その掃引角度範囲内にレトロリフレクタRが存在すると、レトロリフレクタRを向く方向の光が反射され、子機に戻ってくる。光の角度掃引の往復の時間差から、図7を用いて説明した方法で、レトロリフレクタRの位置に相当する波長とその出射角度が求められる。さらに、出力光に強度変調をかけ、実施例2に倣い、子機からレトロリフレクタRまでの距離を計測することが可能である。

40

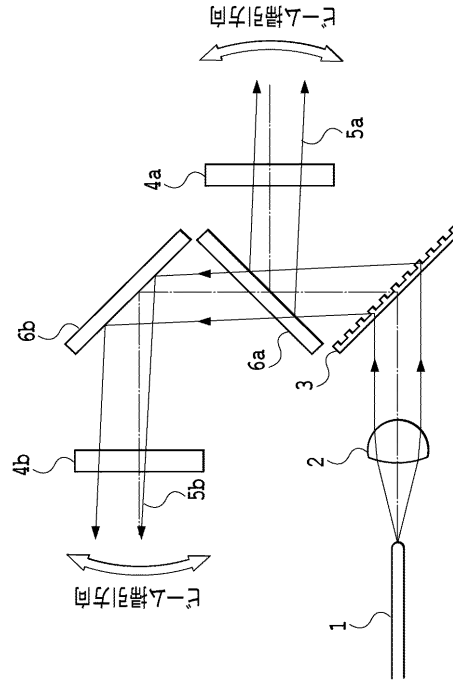
【図1A】



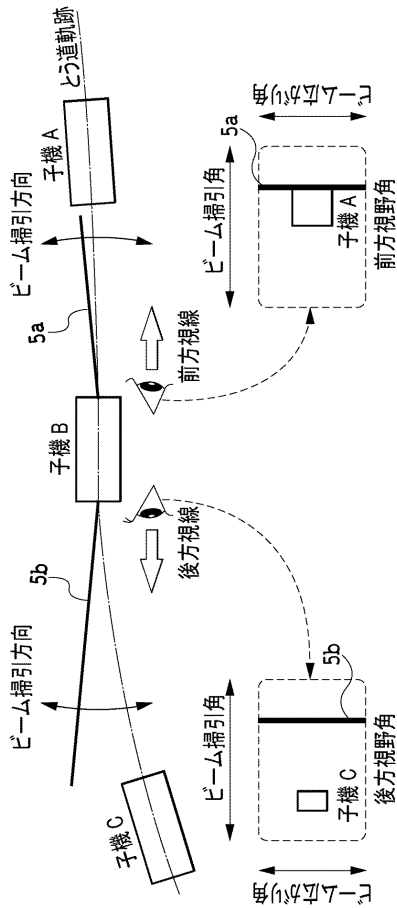
【図1B】



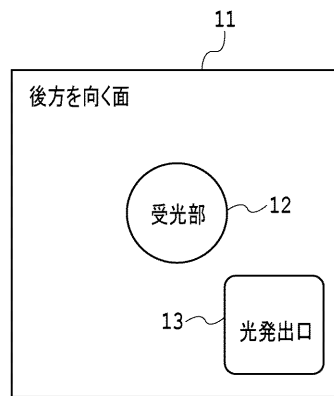
【図2】



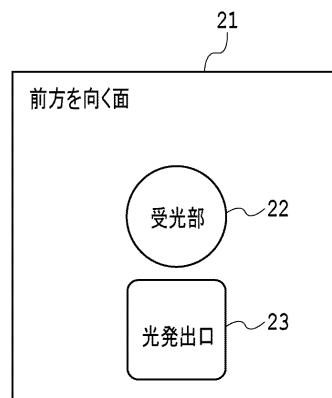
【図3】



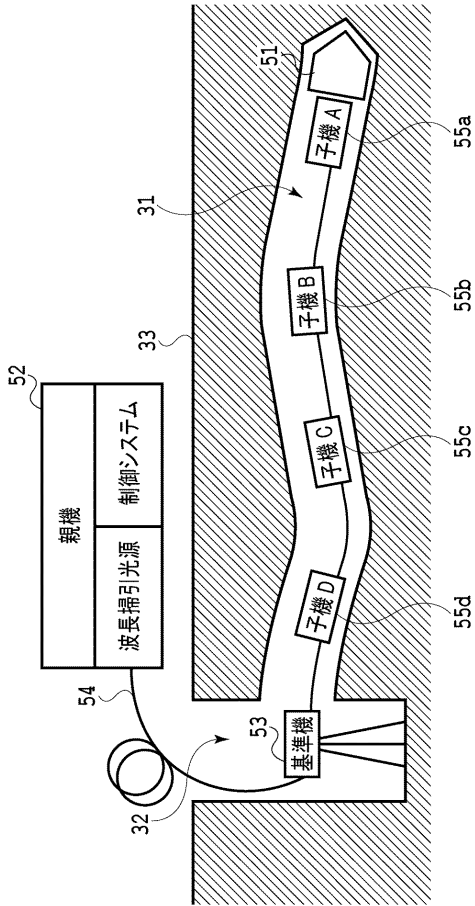
【図4A】



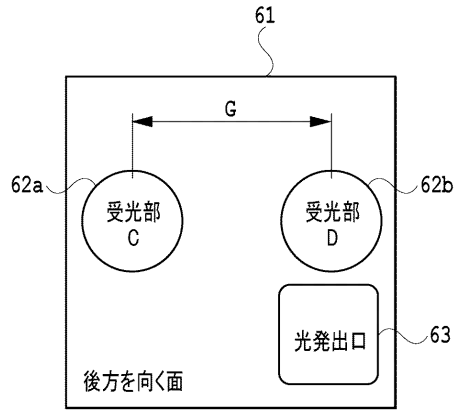
【図4B】



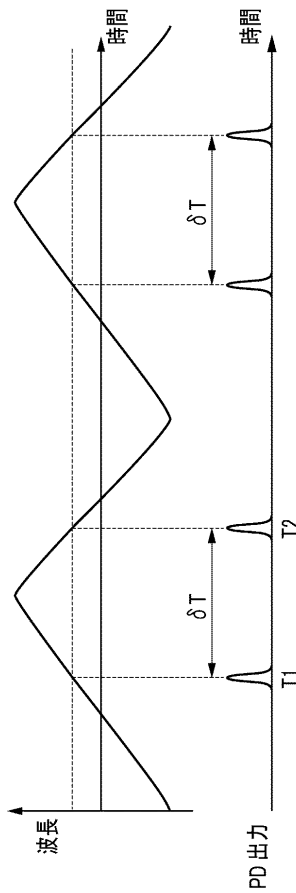
【図5】



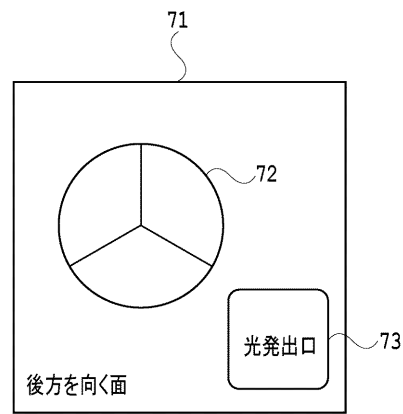
【図6】



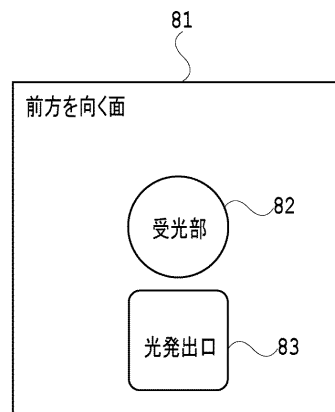
【図7】



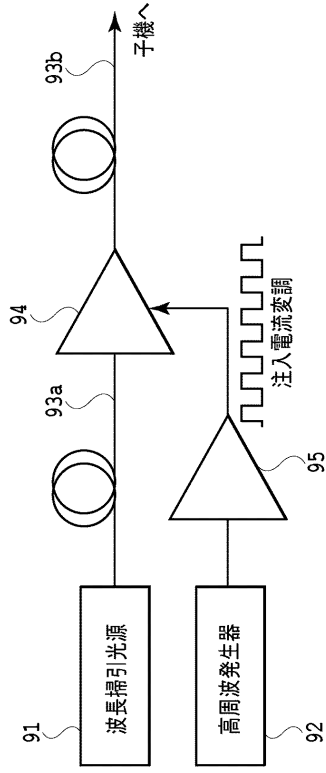
【図8A】



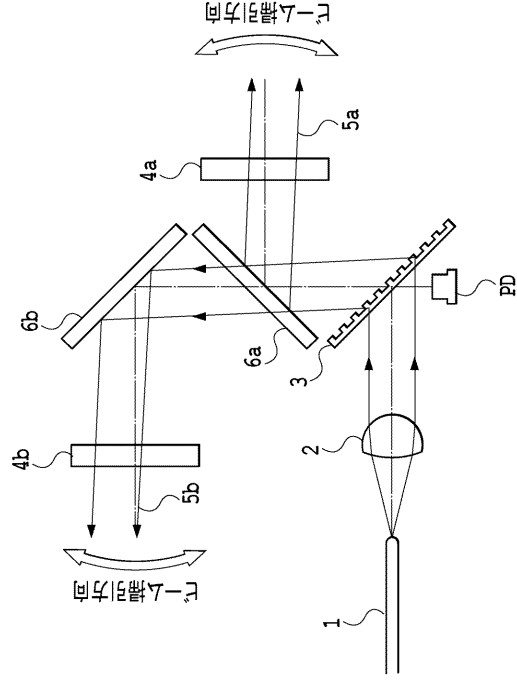
【図8B】



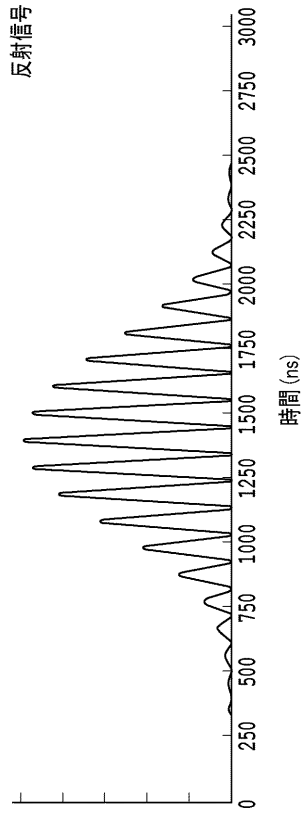
【 図 9 】



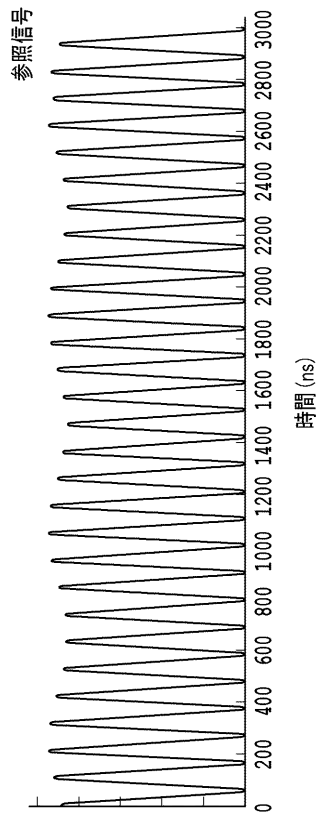
【 図 10 】



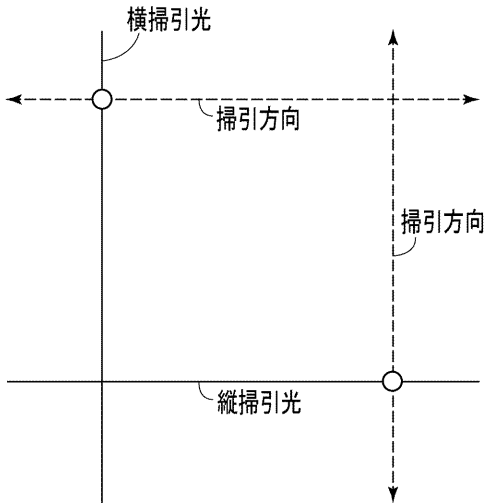
【 図 11 A 】



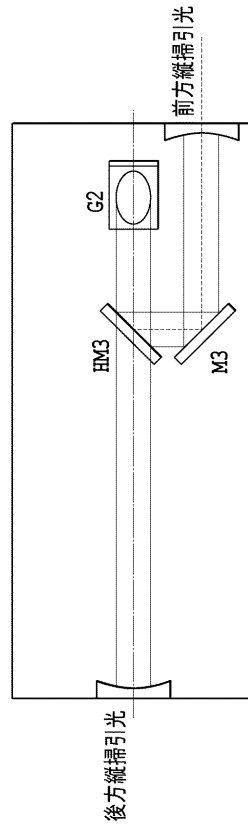
【 図 11 B 】



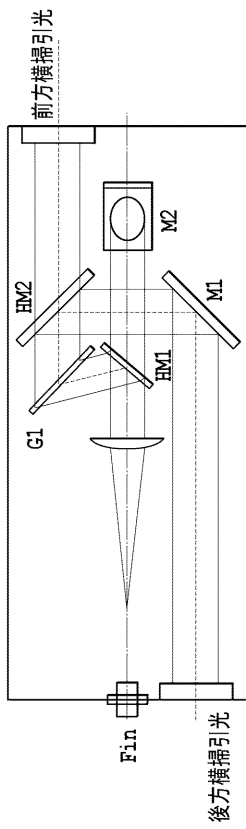
【圖 1 2】



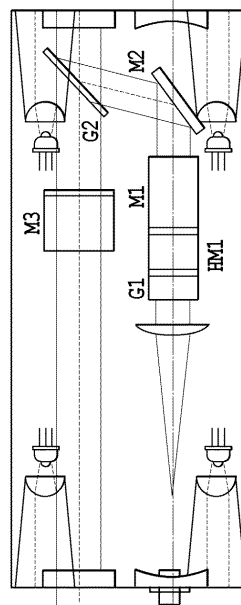
【圖 1 3 A】



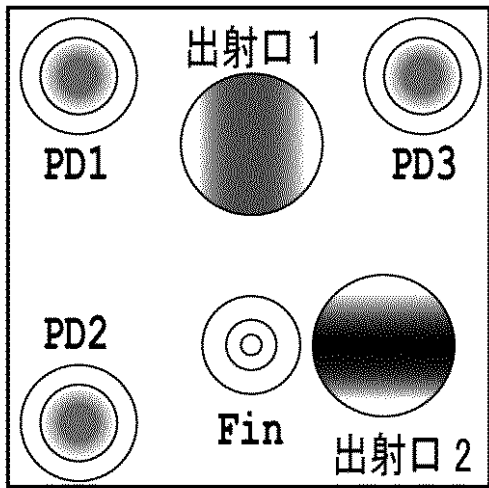
【圖 1 3 B】



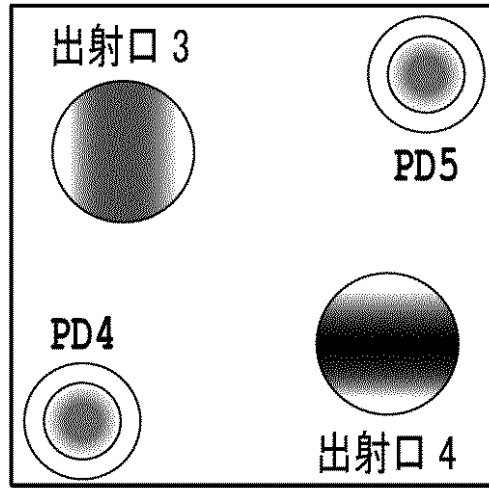
【圖 1 3 C】



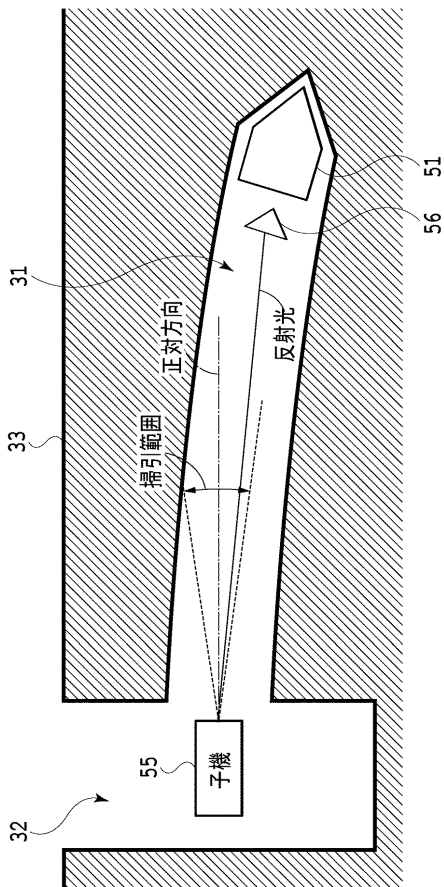
【図13D】



【図13E】



【図14】



## フロントページの続き

- (72)発明者 齋藤 文雄  
神奈川県川崎市幸区大宮町1310番地 エヌ・ティ・ティ・アドバンステクノロジー株式会社内
- (72)発明者 長沼 和則  
神奈川県川崎市幸区大宮町1310番地 エヌ・ティ・ティ・アドバンステクノロジー株式会社内
- (72)発明者 菅井 栄一  
神奈川県川崎市幸区大宮町1310番地 エヌ・ティ・ティ・アドバンステクノロジー株式会社内
- (72)発明者 小平 徹  
神奈川県川崎市幸区大宮町1310番地 エヌ・ティ・ティ・アドバンステクノロジー株式会社内
- (72)発明者 澤口 明  
東京都台東区雷門1-4-4 ネクストサイト浅草ビルアイレック技建株式会社内
- (72)発明者 萩野 日出輝  
東京都台東区雷門1-4-4 ネクストサイト浅草ビルアイレック技建株式会社内
- (72)発明者 渡邊 武士  
東京都台東区雷門1-4-4 ネクストサイト浅草ビルアイレック技建株式会社内
- (72)発明者 石津 紀行  
東京都台東区雷門1-4-4 ネクストサイト浅草ビルアイレック技建株式会社内
- (72)発明者 武村 秀  
東京都台東区雷門1-4-4 ネクストサイト浅草ビルアイレック技建株式会社内

審査官 梶田 真也

- (56)参考文献 特開2002-090142(JP, A)  
特開2005-172586(JP, A)  
米国特許出願公開第2010/0302557(US, A1)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)  
G01C 15/00