

(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
2018年12月20日(20.12.2018)



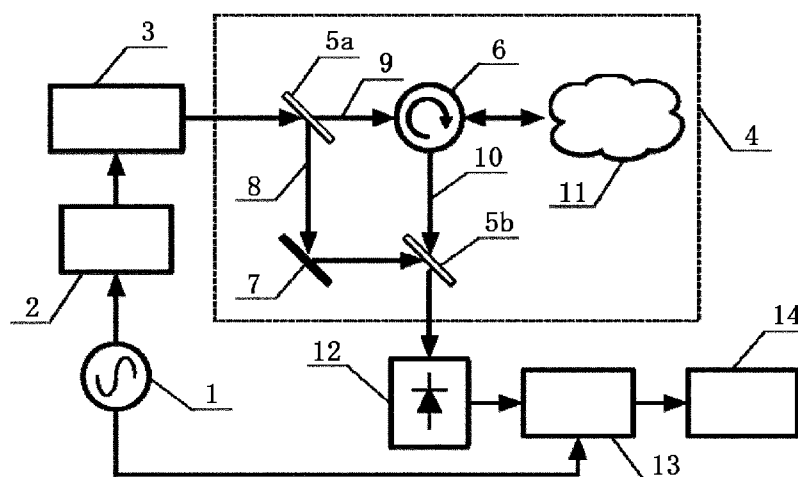
(10) 国際公開番号

WO 2018/230474 A1

- (51) 国際特許分類:
G01S 17/32 (2006.01) *G01C 3/06* (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2018/022077
- (22) 国際出願日: 2018年6月8日(08.06.2018)
- (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 2017-118503 2017年6月16日(16.06.2017) JP
- (71) 出願人: 国立研究開発法人産業技術総合研究所(NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY) [JP/JP]; 〒1008921 東京都千代田区霞が関 1丁目3番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 土田 英実 (TUCHIDA Hidemi); 〒3058560 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第1 国立研究開発法人産業技術総合研究所内 Ibaraki (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, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, 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,

(54) Title: OPTICAL DISTANCE MEASUREMENT DEVICE AND MEASUREMENT METHOD

(54) 発明の名称: 光学的距離測定装置及び測定方法



(57) **Abstract:** The present invention provides an optical distance measurement device and an optical distance measurement method using FMCW lidar, wherein effect of nonlinear chirping of laser is eliminated so as to enable accurate distance measurement. An output beam of a laser having a known frequency modulation waveform is split into two, one being used as reference light and the other being used as signal light. A target object is irradiated with the signal light, reflected light from the target object and the reference light are multiplexed and introduced into an optical detector. A beat signal generated by the optical detector is converted into a digital signal by using an AD converter. A beat frequency is derived from the digital signal using a digital signal processing device. Then, a regression analysis is performed on the temporal waveform of the beat frequency on the basis of the known frequency modulation waveform so as to determine the distance to the target object.



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: FMCWライダにおいて、レーザの非線形チャープの影響を除去して、正確な距離測定を可能とする光学的距離測定装置及び測定方法を提供する。周波数変調波形が既知のレーザの出力光を2分し、一方を参照光、他方を信号光とし、前記信号光を対象物に照射して、前記対象物からの反射光と、前記参照光を合波して光検出器に入射し、該光検出器から発生するビート信号をA/D変換器によりデジタル信号に変換し、デジタル信号処理装置を用いて、前記デジタル信号からビート周波数を求め、該ビート周波数の時間波形に対して、前記既知の周波数変調波形を基に回帰分析を行い、前記対象物までの距離を算出する。

明 細 書

発明の名称： 光学的距離測定装置及び測定方法

技術分野

[0001] 本発明は、自動車や自律ロボット等に用いられる環境認識センサ等に適する光学的距離測定装置、及び測定方法に関する。

背景技術

[0002] 自動車や自律ロボットの環境認識センサや、建設・土木現場における形状計測などへの応用を目的として、ライダ (L i d A R : L a s e r I m a g i n g D e t e c t i o n a n d R a n g i n g) の開発が進展している。すでに実用化されているTOF (T i m e o f F l i g h t) 方式のライダは、対象物に光パルスを照射して、反射して戻ってくるまでの時間から距離を測定し、照射する光パルスを空間的に走査して、3次元距離データを生成するものである。

[0003] TOF方式ライダでは、直接検波により対象物からの反射光を検出する。一方、コヒーレント検波を用いるFMCW (F r e q u e n c y M o d u l a t e d C o n t i n u o u s W a v e) 方式は、より高感度の反射光検出が可能であり、対象物までの距離に加えて、ドップラーシフトから運動速度も測定できる特徴を有している。ミリ波領域のFMCWレーダは、車載用の衝突防止センサとして実用化されている。FMCW方式を光波領域で実現できれば、空間分解能の格段の向上が期待できる。現状のFMCWライダは、装置の構成が複雑であり、高コヒーレンスのレーザ光源が要求されるため、応用分野は限定されている。

[0004] 図12 (a) (b) (c) は、FMCWライダの原理を説明する図である。図12 (a) のFMCWライダ装置は、変調信号発生器1と、注入電流源2と、半導体レーザ3と、ビームスプリッタ5a、5bと、光サーキュレータ6と、反射鏡7と、光検出器12を備える。次に、光源として半導体レーザ3を用いた場合について、FMCWライダの動作原理を説明する。三角波

を発生する変調信号発生器 1 の出力を、注入電流源 2 に入力し、半導体レーザ 3 の注入電流を変調する。半導体レーザ 3 の出力光を 2 分し、一方を信号光 9、他方を参照光 8 とする。参照光とは、信号光と位相が同期し、光学的遅延の基準となる光をいう。信号光 9 を対象物 11 に照射し、対象物 11 からの反射光 10 と参照光 8 を合波し、光検出器 12 に入力してビート信号を検出する。図 12 (b) に半導体レーザ 3 の光周波数の波形を示す。半導体レーザ 3 の光周波数は、変調信号発生器 1 から出力される三角波に対応して、アップ、ダウンチャープを周期的に繰り返す。参照光 8 と反射光 10 との間には時間差が発生し、光検出器 12 の出力には、時間差に比例した周波数を有するビート信号が発生する。図 12 (c) に、信号光と参照光の光周波数、およびビート信号波形を示す。図 12 (c) の上部に、信号光（点線）と参照光（実線）の光周波数を、ビート信号と対応させて示す。したがって、ビート信号の周波数（以下、ビート周波数という。）を測定すれば、時間差、すなわち対象物 11 までの距離を求めることができる。アップ、ダウンチャープの両方を使用するのは、対象物 11 が運動している場合に、ドップラシフトから運動速度を求めるためである。ここでは半導体レーザを用いた場合について説明したが、周波数変調機能を有するレーザであれば、同様の測定を行うことができる。

[0005] FMCW ライダにより測定されるビート周波数 f_B は、次式により表すことができる。

[0006] [数1]

$$f_B = \frac{\Delta\nu}{T_m/2} \cdot \frac{2L}{c}$$

[0007] ここで、 $\Delta\nu$ はチャープ帯域幅、 $T_m = 1/f_m$ は変調周期、 f_m は変調周波数、 L は対象物 11 までの距離、 c は光速度である。（数 1）式において、 $\Delta\nu / (T_m/2)$ は単位時間当たりの周波数変化、すなわち、チャープ率を表す。ビート周波数から距離を算出するためには、チャープ率を事前に求め

ておく必要がある。

[0008] FMCWライダにおける距離分解能 δL は、次式により表すことができる。

[0009] [数2]

$$\delta L = \frac{c}{2\Delta\nu}$$

[0010] (数2)式における分解能の意味は、近接する2つの反射点を分離して検出する能力である。反射点が1つの場合は、さらに高い精度で距離を測定することができる。距離分解能 δL はチャープ帯域幅 $\Delta\nu$ に反比例するので、高い分解能を得るためには、大きなチャープ帯域幅が必要である。例えば、分解能10cm、1cmを得るのに必要なチャープ帯域幅は、それぞれ1.5GHz、15GHzである。反射点が1つの場合においても、精度はチャープ帯域幅に反比例する。

[0011] チャープ帯域幅に加えて、チャープの直線性もFMCWライダの性能を決定する重要な特性である。(数1)式のビート周波数は、光周波数が時間に比例して増加(アップチャープ)、または減少(ダウンチャープ)することを前提にしている。光周波数変化が時間に対して非線形に変化する場合は、一定値であるはずのビート周波数が変化して、距離算出の誤差要因となる。

[0012] アイセーフ波長域で動作する半導体レーザは、注入電流変調により周波数を直接変調できることから、小型で低価格のFMCWライダ用の光源として期待されている。ところが、半導体レーザの周波数変調は熱効果に起因し、周波数応答特性が平坦ではないため、非線形チャープが顕著に現れることが知られている。三角波により周波数変調した場合は、非線形チャープに起因して、変調信号に含まれない周波数成分が現れることが報告されている(非特許文献1参照)。

[0013] FMCWライダにおいて、このような非線形チャープの影響を抑圧または低減する手法は、2つに大別できる。一つは、半導体レーザの変調を制御し

て、所望の線形チャープを得る方法である。もう一つは、検出したビート信号を処理して、非線形チャープの影響を除去する方法である。

[0014] レーザの周波数変調を光学的に検出して、基準信号との誤差をレーザに負帰還して制御する装置、及び方法が、次のように報告されている（特許文献1乃至3参照）。レーザの周波数変調を検出するためのホモダイン、またはヘテロダイン干渉計を用意し、周波数変調光を入力して、干渉計出力からビート周波数を検出する。ビート周波数は、本来一定値になるはずであるが、非線形チャープが存在する場合は変動する。検出したビート周波数を基準信号源の周波数と比較して誤差信号を生成し、レーザの注入電流を負帰還制御して、非線形成分の抑圧を行う。

[0015] 周波数変調信号、またはレーザ出力をモニタして、変調信号発生器を制御するとともに、検出したビート信号を補正して、距離を算出する方法が次のように報告されている（特許文献4参照）。レーザ出力光の位相を数学的にモデル化し、モニタ結果からモデルに含まれるパラメータを推定し、制御と信号処理を行い、距離を算出する。

[0016] ミリ波FMCWレーダにおいて、光学的にミリ波周波数を検出し、信号処理により、非線形チャープの影響を抑圧する装置が、以下のように報告されている（特許文献5参照）。送出するミリ波信号を光信号に変換し、ホモダイン干渉計によりビート信号を検出して、パルス信号に変換する。パルス信号には非線形チャープの情報が含まれており、このパルス信号をクロックとして、対象物からの反射により生成されるビート信号をAD変換することにより、非線形チャープの影響を抑圧することができる。

先行技術文献

特許文献

[0017] 特許文献1：特開2000-111312号公報

特許文献2：米国特許出願公開第2010/0085992号明細書

特許文献3：米国特許出願公開第2012/0106579号明細書

特許文献4：米国特許出願公開第2009/0135403号明細書

特許文献5：特表2008-514910号公報

非特許文献

- [0018] 非特許文献1：H. Tsuchida, “Waveform measurement technique for phase/frequency-modulated lights based on heterodyne interferometry,” Optics Express, vol. 25, no. 5, pp. 4793-4799 (2017年3月)

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0019] 現実のFMCWライダでは、光周波数変化が時間に対して非線形に変化することが原因で、距離算出の誤差要因となる問題がある。
- [0020] 前述した、非線形チャープの影響を抑圧または低減する方法（特許文献1乃至3参照）では、レーザの負帰還制御により非線形チャープを抑圧するため、誤差信号を実時間で生成する必要がある。このため、ホモダイン、またはヘテロダイン干渉計を備える必要がある。また、変調信号発生器の制御と検出信号の補正を行う方法（特許文献4参照）では、干渉計などの光学装置が必要である。また、特許文献5はミリ波レーダ装置に関する技術であるが、光領域のFMCWライダにも適用できる。しかし、AD変換器のクロックを実時間で生成する必要があるため、ホモダイン干渉計が必要である。
- [0021] このように、従来技術においては、距離測定用の干渉計とは別に、周波数変調を検出して制御するための装置が必要であり、装置の構成が複雑になる。光学的距離測定装置として、装置構成が複雑化せず、小型で低価格のライダシステムが実現できれば、車載用の衝突防止、歩行者検知センサなど、民生分野への展開が期待できる。
- [0022] 本発明は、FMCWライダにおける上述の問題を解決しようとするものであり、干渉計などの付加的な装置を用いることなく、レーザの非線形チャープの影響を除去して、正確な距離測定を可能とする、光学的距離測定装置、及び測定方法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

[0023] 本発明は、前記目的を達成するために、以下の特徴を有するものである。

[0024] (1) 周波数変調波形が既知のレーザと、光検出器と、前記レーザの出力光を2分し、一方を参照光、他方を信号光とし、前記信号光を対象物に照射して、前記対象物からの反射光と、前記参照光を合波して前記光検出器に入射する干渉計と、前記光検出器から発生するビート信号をデジタル信号に変換するA/D変換器と、前記デジタル信号からビート周波数を求め、該ビート周波数の時間波形に対して、前記既知の周波数変調波形を基に回帰分析を行い、前記対象物までの距離を算出するデジタル信号処理装置とを、備えることを特徴とする光学的距離測定装置。

(2) 前記デジタル信号処理装置は、前記デジタル信号から前記ビート信号の同相成分 $I(t)$ と直交成分 $Q(t)$ を求めて、逆正接 $\tan^{-1}\{Q(t)/I(t)\}$ から前記ビート信号の瞬時位相を計算し、該瞬時位相の時間微分から前記ビート周波数を求めることを特徴とする、(1)記載の光学的距離測定装置。

(3) 前記既知の周波数変調波形は、前記レーザの出力の瞬時周波数波形を測定し、該瞬時周波数波形をフーリエ級数展開したものであることを特徴とする(1)又は(2)記載の光学的距離測定装置。

(4) 前記レーザの周波数変調波形は三角波であることを特徴とする(1)乃至(3)のいずれか1項記載の光学的距離測定装置。

(5) 周波数変調波形が既知の変調されたレーザの出力光を2分し、一方を参照光、他方を信号光とし、前記信号光を対象物に照射して、前記対象物からの反射光と、前記参照光を合波して光検出器に入射し、該光検出器から発生するビート信号をA/D変換器によりデジタル信号に変換し、デジタル信号処理を用いて、前記デジタル信号からビート周波数を求め、該ビート周波数の時間波形に対して、前記既知の周波数変調波形を基に回帰分析を行い、前記対象物までの距離を算出することを特徴とする光学的距離測定方法。

(6) 前記デジタル信号処理は、前記デジタル信号から前記ビート信号の

同相成分 $I(t)$ と直交成分 $Q(t)$ を求めて、逆正接 $\tan^{-1} \{Q(t)/I(t)\}$ から前記ビート信号の瞬時位相を計算し、該瞬時位相の時間微分から前記ビート周波数を求めることを特徴とする、(5) 記載の光学的距離測定方法。

(7) 前記既知の周波数変調波形は、前記レーザの出力の瞬時周波数波形を測定し、該瞬時周波数波形をフーリエ級数展開したものであることを特徴とする(5)又は(6)記載の光学的距離測定方法。

(8) 前記レーザの周波数変調波形は三角波であることを特徴とする(5)乃至(7)のいずれか1項記載の光学的距離測定方法。

発明の効果

[0025] 本発明の光学的距離測定装置および測定方法においては、既知であるレーザの周波数変調波形と、検出したビート周波数波形を基にして、回帰分析により距離を算出する。このため、レーザの周波数変調をモニタする光学系と、周波数変調を制御する電子回路が不要である。その結果、装置構成を格段に簡素化することができて、小型化と低価格化を実現できる。

[0026] また、直接周波数変調により、非線形チャープが顕著に発生する半導体レーザを用いる場合は、信号処理だけで非線形チャープの影響を抑制できるため、より小型化で高精度の装置が実現できる。

図面の簡単な説明

[0027] [図1]第1の実施の形態に係る光学的距離測定装置を説明する図である。

[図2]第1の実施の形態に係る光学的距離測定装置を構成するデジタル信号処理装置が行う信号処理を表す図である。

[図3]第2の実施の形態に係る光学的距離測定装置を説明する図である。

[図4]第2の実施の形態に係る光学的距離測定装置の精度評価に用いた装置を説明する図である。

[図5]半導体レーザの瞬時周波数の測定値と、理想的な三角波の波形を表す図である。

[図6]図5に示した瞬時周波数の波形から予想される、ビート周波数の波形を

表す図である。

[図7]半導体レーザの瞬時周波数の測定値と、フーリエ級数による回帰曲線の波形を表す図である。

[図8]可変光遅延線を0、及び80.0mmに設定した場合のビート周波数を表す図である。(b)は(a)の一部(点線で囲んだ部分)の拡大図である。

[図9]可変光遅延線の遅延設定値と、距離の測定値の関係を表す図である。

[図10]光ファイバ長を0から10mまで、1m単位で変化させた場合のビート周波数の変化を表す図である。

[図11]光ファイバ長と距離の測定値の関係を表す図である。

[図12]FMCWライダの原理を説明する図である。(a)にFMCWライダ装置、(b)に半導体レーザの光周波数の波形、(c)に、信号光と参照光の光周波数、およびビート信号波形を示す。

発明を実施するための形態

[0028] 以下、本発明の実施の形態を詳細に説明する。本発明では、周波数変調波形が既知のレーザと、干渉計と、光検出器と、AD変換器と、デジタル信号処理装置とを具備する装置を用いて、対象物までの距離を測定する。

[0029] (第1の実施の形態)

第1の実施の形態を図1と図2を参照して、以下説明する。

[0030] 図1は、本実施の形態に係る光学的距離測定装置を説明する図である。図1の光学的距離測定装置は、変調信号発生器1と、注入電流源2と、半導体レーザ3と、干渉計4と、光検出器12と、AD変換器13と、デジタル信号処理装置14とを備える。図1では、周波数変調波形が既知のレーザとして、周波数変調波形が既知の直接変調半導体レーザを例に示している。干渉計4は、ビームスプリッタ5aとサーキュレータ6とビームスプリッタ5bと反射鏡7とで、主に構成する。図1に示すように、変調信号発生器1の出力を、注入電流源2を介して、半導体レーザ3に入力し、出力光の周波数を変調する。半導体レーザ3の出力光をビームスプリッタ5aにより2分し、

一方を参照光 8、他方を信号光 9 とする。信号光 9 を光サーキュレータ 6 を介して、対象物 11 に照射する。対象物 11 からの反射光を、光サーキュレータ 6 を介して、ビームスプリッタ 5 b に導き、該反射光 10 と参照光 8 とを合波して、光検出器 12 により受光する。周波数変調された参照光 8 と反射光 10 との間には、対象物 11 までの距離に応じた時間差が存在するため、周波数差が生じる。光検出器 12 の出力には、周波数差に対応したビート信号が発生する。光検出器 12 の出力を A/D 変換器 13 によりデジタル信号に変換した後、デジタル信号処理装置 14 に入力する。デジタル信号処理装置 14 には、半導体レーザ 3 の周波数変調波形が記録されている。該周波数変調波形を用いて、デジタル信号処理装置 14 において、デジタル信号に変換されたビート信号に対して、対象物 11 までの光の往復時間を未知数として、回帰分析を行うことにより、光の往復時間、すなわち対象物 11 までの距離を求める。

[0031] 数式を用いて、以下詳しく説明する。図 1 において参照光 8 の電場 $E_R(t)$ は次式により表すことができる。

[0032] [数3]

$$E_R(t) = A_R \exp\{i2\pi\nu_0 t + i\phi(t)\}$$

[0033] 一方、反射光 10 の電場 $E_S(t)$ は次式により表すことができる。

[0034] [数4]

$$E_S(t) = A_S \exp\{i2\pi\nu_0(t - \tau_d) + i\phi(t - \tau_d)\}$$

[0035] ここで、 A_R と A_S は電場の振幅、 ν_0 は中心周波数、 $\phi(t)$ は半導体レーザ 3 の周波数変調に起因する瞬時位相、 τ_d は対象物 11 までの光の往復時間を表す。 $\phi(t)$ は、半導体レーザ 3 の瞬時周波数 $\nu(t)$ と次式により関係づけられる。

[0036]

[数5]

$$\nu(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt}$$

[0037] 周波数変調に起因する瞬時周波数 $\nu(t)$ は事前に測定して、デジタル信号処理装置14に記録されているものとする。FMCWライダにおいては、周波数変調信号として、三角波または鋸波を用いることが一般的であるが、後述するように、瞬時周波数 $\nu(t)$ が既知であれば、これらの波形に限定されるものではない。

[0038] 光検出器12から出力されるビート信号 $V_B(t)$ は、次式により表すことができる。

[0039] [数6]

$$V_B(t) = \eta A_R A_S \cos \{ 2\pi \nu_0 \tau_d + \phi(t) - \phi(t - \tau_d) \}$$

[0040] ここで、 η は光検出器12の感度などにより決まる定数である。AD変換器13を用いて、(数6)式により表されるビート信号をデジタル信号に変換する。

[0041] 図2は、デジタル信号処理装置14において行う信号処理を表す図である。デジタル信号処理装置14に入力したビート信号を2分し、ミキサ17aとミキサ17bにそれぞれ入力する。ミキサ17aの局発信号として、周波数が f_c の局部発振器15の出力を、ミキサ17bの局発信号として、局部発振器15の出力を位相シフタ16により $\pi/2$ の位相シフトを与えた後、それぞれ入力する。ミキサ17aの出力と、ミキサ17bの出力を、それぞれローパスフィルタ18aとローパスフィルタ18bに入力し、高周波成分を除去して、ビート信号と局発信号の差周波成分を出力する。ローパスフィルタ18aの出力には、次式で表されるビート信号の同相成分19($I(t)$)が出力される。

[0042]

[数7]

$$I(t) = \frac{\eta A_R A_S}{2} \cos \{ \Phi(t) \}$$

[0043] 一方、ローパスフィルタ 18b の出力には、次式で表されるビート信号の直交成分 20 (Q (t)) が出力される。

[0044] [数8]

$$Q(t) = \frac{\eta A_R A_S}{2} \sin \{ \Phi(t) \}$$

[0045] (数7) 式と(数8) 式における $\Phi(t)$ は次式で表される。 $\Phi(t)$ はビート信号の瞬時位相である。

[0046] [数9]

$$\Phi(t) = 2\pi\nu_0\tau_d + \phi(t) - \phi(t - \tau_d) - 2\pi f_c t$$

[0047] 演算処理部 21 において、同相成分 I (t) と直交成分 Q (t) とからビート周波数 $f_B(t)$ を求め、ビート周波数の時間波形と既知の周波数変調波形を基に回帰分析を行って、光の往復時間 τ_d 、すなわち、対象物 11 までの距離を求める。(数10) (数11) (数12) を用いて具体的に説明する。

[0048] まず、演算処理部 21 において、上述のようにして求めた同相成分 I (t) と、直交成分 Q (t) と、次式を用いて、(数9) 式の $\Phi(t)$ を計算する。

[0049] [数10]

$$\Phi(t) = \tan^{-1} \{ Q(t)/I(t) \}$$

[0050] 注入電流を変調した半導体レーザでは、周波数だけでなく、光強度も同時

に変調される。ビート信号には、光強度変調に起因する成分も含まれるが、
(数 10) 式の処理により除去できる。

[0051] 次に、演算処理部 21 において、 $\pm \pi$ を越える位相変化を検出するため、
(数 10) 式により求めた位相に対して、アンラッピング処理を行う。アンラッピング処理とは、不連続な位相変化に対して、 2π の整数倍の位相を付加して、連続的な位相変化にする処理をいう。アンラッピング処理した位相 $\Phi(t)$ を時間微分して、局部発振器 15 の周波数 f_c を加えることにより、次式で表されるビート周波数 $f_B(t)$ を求めることができる。

[0052] [数11]

$$f_B(t) = \left| \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi(t)}{dt} \right| + f_c = |\nu(t) - \nu(t - \tau_d)|$$

[0053] (数 11) 式において、 $\nu(t)$ は周波数変調に起因する瞬時周波数を表しており、事前の測定により既知である。演算処理部 21 において、測定したビート周波数 $f_B(t)$ に対して、対象物 11 までの光の往復時間 τ_d を未知数として、回帰分析を行うことにより、光の往復時間 τ_d 、すなわち、対象物 11 までの距離を求める。

[0054] FMCW ライダでは変調信号として三角波、または鋸波を用いることが一般的であるが、瞬時周波数 $\nu(t)$ が既知であれば、他の波形を用いた場合でも、同様にして距離を求めることができる。

[0055] (数 11) 式はビート周波数の時間波形を表しているが、実際の測定では時間軸の原点を正確に設定することが困難である。この問題は時間軸の原点も未知数として、回帰分析を行うことにより解決できる。すなわち、次式で表される二つの遅延時間 τ_{d1} と τ_{d2} を設定して回帰分析を行い、 τ_{d2} と τ_{d1} の差から、光の往復時間 $\tau_d = \tau_{d2} - \tau_{d1}$ を求めることができる。

[0056] [数12]

$$f_B(t) = |\nu(t - \tau_{d1}) - \nu(t - \tau_{d2})|$$

[0057] 本実施の形態の光学的距離測定装置及び方法では、レーザの周波数変調に起因する瞬時周波数の波形を事前に測定しておくため、従来の周波数変調を制御するための干渉計などの付加的な光学系や、レーザの負帰還制御のための電子回路を必要としない。これにより、FMCWライダ装置が簡素化され、システムの小型化と低価格化を図ることができる。

[0058] (第2の実施の形態)

第2の実施の形態では、周波数変調のための変調信号として三角波を用いた場合の距離測定について、図3～図11を参照して説明する。

[0059] 図3は、第2の実施の形態に係る光学的距離測定装置を説明する図である。図3の光学的距離測定装置は、変調信号発生器1と、注入電流源2と、半導体レーザ3と、干渉計に対応する光学系と、バランス型光検出器25と、AD変換器13と、デジタル信号処理装置14とを備える。図1の干渉計4に対応する光学系は、光ファイバで構成され、光方向性結合器22a、22bと、送受信光学系23と、偏波コントローラ24と、サーキュレータ6とを備える。変調信号発生器1の出力を、注入電流源2を介して、半導体レーザ3に入力し、出力光の周波数を変調する。半導体レーザ3の出力光を、光方向性結合器22aにより二分し、一方を参照光として、偏波コントローラ24を介して、光方向性結合器22bに導く。もう一方は信号光として、光サーキュレータ6に入力し、送受信光学系23を介して、対象物11に照射する。対象物11で反射した光を、光サーキュレータ6を介して光方向性結合器22bに導き、参照光と合波した後、バランス型光検出器25により受光して、ビート信号として出力する。ビート信号をAD変換器13によりデジタル信号に変換し、デジタル信号処理装置14を用いて、(数11)式により表されるビート周波数の計算と、(数12)式に基づく回帰分析を行う。

[0060] 図4～11を参照して、本実施の形態に係る装置の精度について以下検討する。図4は、図3の光学的距離測定装置の精度評価に用いた装置を説明する図であり、詳細は後述する。

[0061] 第1の実施の形態で説明したように、周波数変調に起因する瞬時周波数 $\nu(t)$ を事前に測定しておく必要がある。図5は、ヘテロダイン干渉（非特許文献1参照）を利用して測定した、半導体レーザ3の瞬時周波数を表す図である。半導体レーザ3は、波長1552.1nm、出力5mWの離散モード半導体レーザである。変調信号として、周波数5kHzの三角波を用い、変調電流振幅は60mA_{pp}である。実線は測定値、破線は理想的な三角波の時間波形を表す。理想的な三角波は、次式のフーリエ級数展開で表すことができる。

[0062] [数13]

$$\nu(t) = \frac{4\Delta\nu}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k-1}}{(2k-1)^2} \sin\{2\pi(2k-1)f_m t\}$$

[0063] ここで、 $\Delta\nu$ はチャープ帯域幅、 f_m は変調周波数である。（数13）式が示すように、理想的な三角波は、基本波と奇数次の高調波により展開できる。図5の破線は、85次高調波まで考慮して計算したものである。測定した半導体レーザ3の瞬時周波数は、15GHzのチャープ帯域幅を有しているが、理想的な三角波から誤差を生じている。両者を比較すると、三角波の頂点付近だけでなく、チャープ領域でも誤差を生じていることがわかる。図5の一点鎖線は両者の差を表しており、誤差は-0.903~+0.433GHz（-6.02~+2.89%）であり、距離測定における大きな誤差要因となる。

[0064] 図6は、図5に示した瞬時周波数の波形から予想される、ビート周波数の波形を表す図である。対象物11までの距離を16.74mとして、図5の波形から計算した結果である。破線は理想的な三角波を用いた場合に対応し、三角波の頂点付近以外では、一定値の17.68MHzになる。実線は半導体レーザ3を用いた場合の結果を表し、一定であるはずのビート周波数が大きく変化する。このような変化の原因は、図5に示した理想的な三角波からの誤差であり、時間に対して非線形チャープを生じていることが原因であ

る。図6の右側の縦軸は対応する距離を表しており、距離4 mから22 mに相当するビート周波数変化を生じている。ビート周波数の変化が大きい半周期は、三角波のアップチャープ部分、比較的小さい半周期はダウンチャープ部分に対応する。

[0065] (数13)式が示すように、理想的な三角波は基本波と奇数次の高調波により展開できる。図6に示すようなアップチャープ、ダウンチャープ部分で、ビート周波数変化が異なる原因は、チャープの非線形性により、半導体レーザー3の瞬時周波数に偶数次の高調波成分が含まれているためである（非特許文献1参照）。

[0066] (数12)式に基づいて回帰分析を行うためには、測定した半導体レーザー3の瞬時周波数 $\nu(t)$ を解析的な形で表現することが望ましい。ここでは、瞬時周波数 $\nu(t)$ をフーリエ級数展開し、基本波と奇数次高調波だけでなく、偶数次高調波も含めて、次式のように各成分の振幅と位相を考慮することがより好ましい。

[0067] [数14]

$$\begin{aligned} \nu(t) = & \sum_{k=1}^N \frac{C_k \sin\{\pi(2k-1)/2\}}{(2k-1)^2} \sin\{2\pi(2k-1)f_m t + \psi_k\} \\ & + \sum_{k=1}^M \frac{D_k}{(2k)^2} \sin\{2\pi(2k)f_m t + \theta_k\} \end{aligned}$$

[0068] (数14)式におけるフーリエ係数の振幅 C_k 、 D_k と位相 ϕ_k 、 θ_k は、図5に示した瞬時周波数の測定値を、回帰分析することにより求めることができ、デジタル信号処理装置14に記録しておく。AD変換器によりデジタル信号に変換したビート信号から、ビート周波数 $f_B(t)$ を求めて、(数12)式と(数14)式を用いて、回帰分析を行うことにより、光の往復時間 τ_d を求めて、対象物11までの距離を算出することができる。

[0069] 図4は、第2の実施の形態に係る光学的距離測定装置の精度評価のための

装置であるので、対象物 11 からの反射光を検出する代わりに、光サーキュレータ 6 に可変光遅延線 26 を接続し、可変光遅延線 26 の出力端面でフレネル反射を受けた光を検出するようにした。バランス型光検出器 25 から出力されるビート信号を、ベクトル信号解析装置 27 に入力して、デジタル信号への変換と、ビート周波数 $f_B(t)$ の計算を実行する。(数 12) 式に基づく回帰分析は、演算処理装置 28 を用いて、オフライン処理により実行する。

[0070] 図 7 は、半導体レーザ 3 の瞬時周波数の測定値と、(数 14) 式のフーリエ級数による回帰曲線の波形を表す図である。高調波次数は、奇数次は 85 まで、偶数次は 35 まで考慮した。実線は測定値、破線は回帰曲線を表すが、図 7 のスケールでは、両者は完全に重なって区別できない。図 7 の一点鎖線は両者の差を表しており、誤差は $-1.546 \sim +3.091 \text{ MHz}$ であり、周波数偏移の 0.031% に相当する。図 7 より、半導体レーザ 3 の瞬時周波数が、(数 14) 式により忠実に表現できることが確認できる。

[0071] 図 4 の可変光遅延線 26 として、光路長を精密に設定できる手動式の可変光遅延線を用いて、距離測定の精度評価を行った。可変光遅延線の最小目盛は 0.08 mm である。距離測定の精度評価においては、光路長を 8.0 m 単位で変化させて、ビート周波数の測定と距離の算出を行った。図 8 は、可変光遅延線の設定が 0、及び 80.0 mm の場合のビート周波数を表す図である。両者はほぼ重なっているように見える。(b) は (a) の一部 (点線で囲んだ部分) の拡大図である。拡大するとわずかな差を生じていることがわかる。

[0072] 図 9 は、可変光遅延線の設定値と、距離の測定値の関係を表す図である。黒丸は距離の測定値、白丸は設定値からの誤差を表す。距離算出には、(数 12) 式と (数 14) 式を用いて回帰分析を行い、求めた遅延時間 τ_{d1} と τ_{d2} の差から距離を計算した。可変光遅延線 26 の遅延を 0 に設定した場合、距離の測定値は 11.150 m であり、これは光ファイバ干渉計と可変光遅延線 26 が有する光路差に相当する。図 9 の測定値は、遅延 0 からの相対的な

変化を表す。測定値は8.0 mm単位の光路長変化を十分に分解して測定できており、誤差は $-0.50 \sim +0.15$ mmである。チャープ帯域15 GHzから計算される分解能は1 cmであるが、図9の測定結果では、1 cm以下の分解能が得られている。上述したように、分解能は近接した2つの反射点を分解する能力であり、反射点が1つの場合は、さらに高い精度で測定できる。

[0073] 図4の可変光遅延線26として、光ファイバパッチコードを利用して、光路長を0から10 mまで1 m単位で変化させて、距離測定を行った。長さ1、2、3、5、10 mのパッチコードを組み合わせて使用した。パッチコードは、仕様よりも最大で+5 cm程度長く製作されている。図10は、光ファイバ長を0から10 mまで、1 m単位で変化させた場合のビート周波数の変化を表す図である。光ファイバ長に対応して、ビート周波数が増加していることがわかる。

[0074] 図11は、光ファイバ長と距離の測定値の関係を表す図である。距離の測定値は、屈折率(1.467)を考慮して、ファイバ長に換算した値である。光ファイバパッチコードを接続しない場合の距離の測定値は4.695 mであり、光ファイバ干渉計自体が有する光路差に相当する。図11の測定値は、干渉計に接続した光ファイバパッチコードの正確な長さを表している。図11中の各点の値(光ファイバ長[m]、測定値[m])は、(1、1.0399)(2、2.0707)(3、3.0701)(4、4.1095)(5、5.0041)(6、6.0443)(7、7.0742)(8、8.0738)(9、9.1130)(10、10.0520)である。図11の結果は、直線性を示しており、1 m単位の光路長変化に対しても、高精度の距離測定が可能であることを示している。

[0075] 第2の実施の形態の評価は、自律ロボットに搭載する環境認識センサを想定して、最大測定距離10 m、分解能1 cmに対応する変調条件で行ったものである。車載用センサとして用いる場合は、最大測定距離200 m、分解能10 cmの仕様が要求されるが、チャープ帯域や変調周波数を最適化して

、同様に実施することが可能である。

[0076] 第1と第2の実施の形態においては、光源として半導体レーザを用いた場合について説明したが、周波数変調機能を有するレーザであれば、同様にして実施できる。

[0077] 上記実施の形態等で示した例は、発明を理解しやすくするために記載したものであり、この形態に限定されるものではない。

産業上の利用可能性

[0078] 本発明の光学的距離測定装置および方法は、レーザの周波数変調を制御するための付加的な装置が不要であるので、小型でかつ高精度で低価格のFM CWライダシステムとして産業上有用である。自動車、自律ロボットなどの環境認識センサとして利用を含め、民生機器への利用可能性を大とするものである。

符号の説明

- [0079]
- 1 変調信号発生器
 - 2 注入電流源
 - 3 半導体レーザ
 - 4 干渉計
 - 5 a、5 b ビームスプリッタ
 - 6 光サーキュレータ
 - 7 反射鏡
 - 8 参照光
 - 9 信号光
 - 10 反射光
 - 11 対象物
 - 12 光検出器
 - 13 AD変換器
 - 14 デジタル信号処理装置
 - 15 局部発振器

- 1 6 位相シフタ
- 1 7 a、1 7 b ミキサ
- 1 8 a、1 8 b ローパスフィルタ
- 1 9 同相成分
- 2 0 直交成分
- 2 1 演算処理部
- 2 2 a、2 2 b 光方向性結合器
- 2 3 送受信光学系
- 2 4 偏波コントローラ
- 2 5 バランス型光検出器
- 2 6 可変光遅延線
- 2 7 ベクトル信号解析装置
- 2 8 演算処理装置

請求の範囲

- [請求項1] 周波数変調波形が既知のレーザと、
光検出器と、
前記レーザの出力光を2分し、一方を参照光、他方を信号光とし、
前記信号光を対象物に照射して、前記対象物からの反射光と、前記参照光を合波して前記光検出器に入射する干渉計と、
前記光検出器から発生するビート信号をデジタル信号に変換するA/D変換器と、
前記デジタル信号からビート周波数を求め、該ビート周波数の時間波形に対して、前記既知の周波数変調波形を基に回帰分析を行い、前記対象物までの距離を算出するデジタル信号処理装置とを、
備えることを特徴とする光学的距離測定装置。
- [請求項2] 前記デジタル信号処理装置は、前記デジタル信号から前記ビート信号の同相成分 $I(t)$ と直交成分 $Q(t)$ を求めて、逆正接 $\tan^{-1}\{Q(t)/I(t)\}$ から前記ビート信号の瞬時位相を計算し、
該瞬時位相の時間微分から前記ビート周波数を求めることを特徴とする、請求項1記載の光学的距離測定装置。
- [請求項3] 前記既知の周波数変調波形は、前記レーザの出力の瞬時周波数波形を測定し、該瞬時周波数波形をフーリエ級数展開したものであることを特徴とする請求項1又は2記載の光学的距離測定装置。
- [請求項4] 前記レーザの周波数変調波形は三角波であることを特徴とする請求項1乃至3のいずれか1項記載の光学的距離測定装置。
- [請求項5] 周波数変調波形が既知の変調されたレーザの出力光を2分し、一方を参照光、他方を信号光とし、
前記信号光を対象物に照射して、前記対象物からの反射光と、前記参照光を合波して光検出器に入射し、
該光検出器から発生するビート信号をA/D変換器によりデジタル信号に変換し、

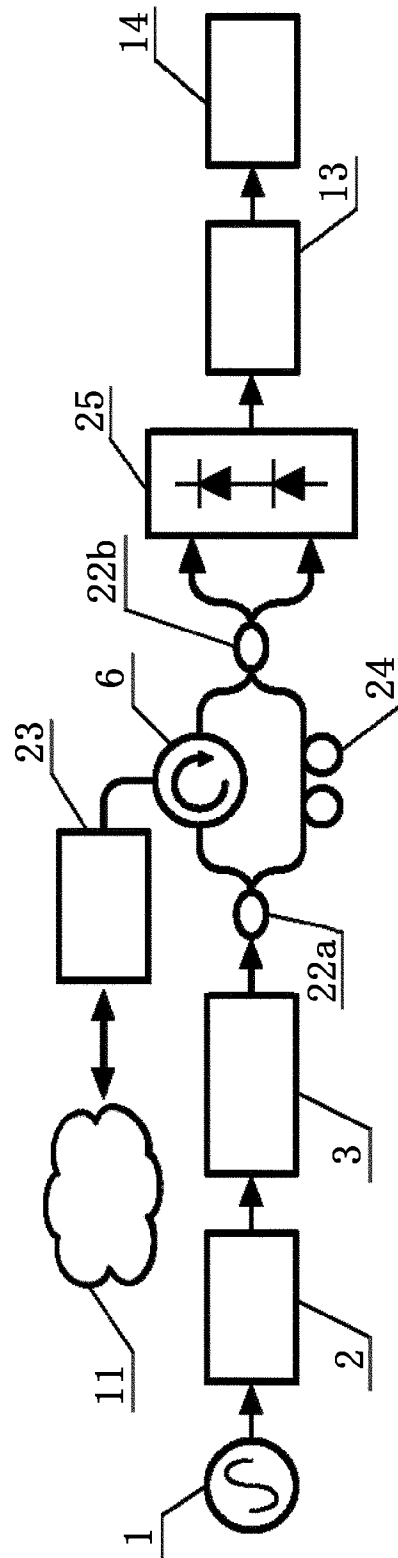
デジタル信号処理を用いて、前記デジタル信号からビート周波数を求め、該ビート周波数の時間波形に対して、前記既知の周波数変調波形を基に回帰分析を行い、前記対象物までの距離を算出することを特徴とする光学的距離測定方法。

[請求項6] 前記デジタル信号処理は、前記デジタル信号から前記ビート信号の同相成分 $I(t)$ と直交成分 $Q(t)$ を求めて、逆正接 $\tan^{-1} \{ Q(t) / I(t) \}$ から前記ビート信号の瞬時位相を計算し、該瞬時位相の時間微分から前記ビート周波数を求めることを特徴とする、請求項5記載の光学的距離測定方法。

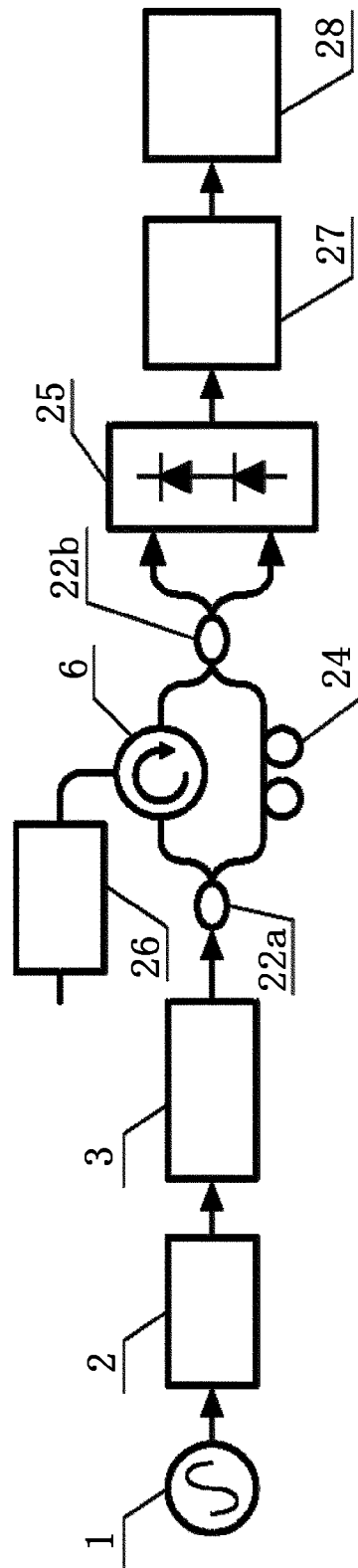
[請求項7] 前記既知の周波数変調波形は、前記レーザの出力の瞬時周波数波形を測定し、該瞬時周波数波形をフーリエ級数展開したものであることを特徴とする請求項5又は6記載の光学的距離測定方法。

[請求項8] 前記レーザの周波数変調波形は三角波であることを特徴とする請求項5乃至7のいずれか1項記載の光学的距離測定方法。

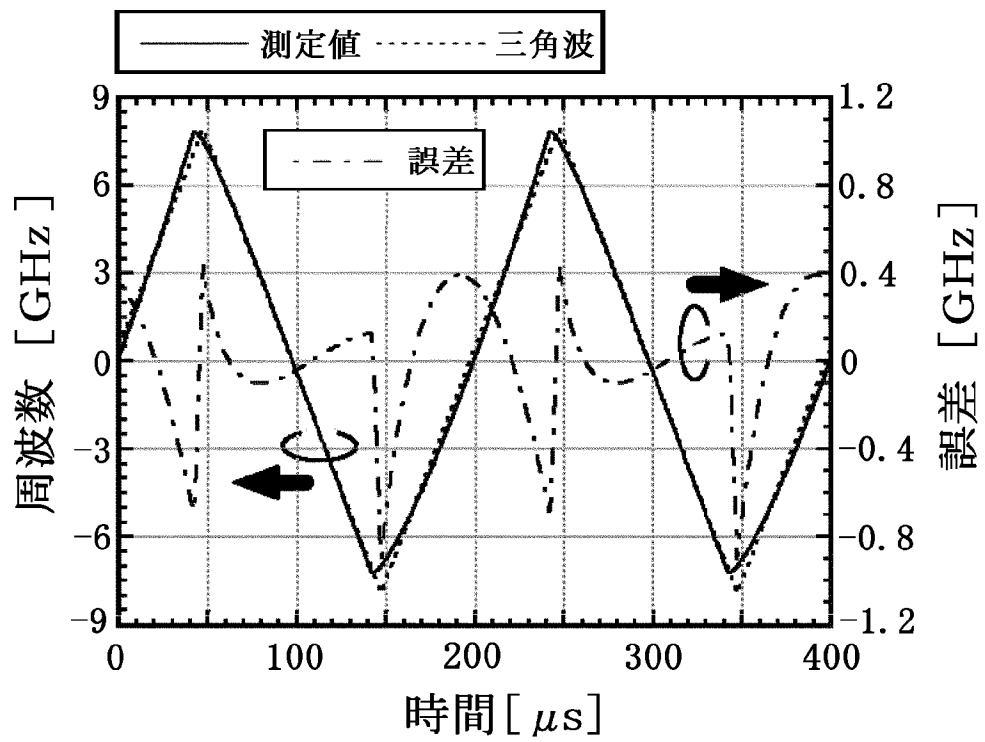
[図3]



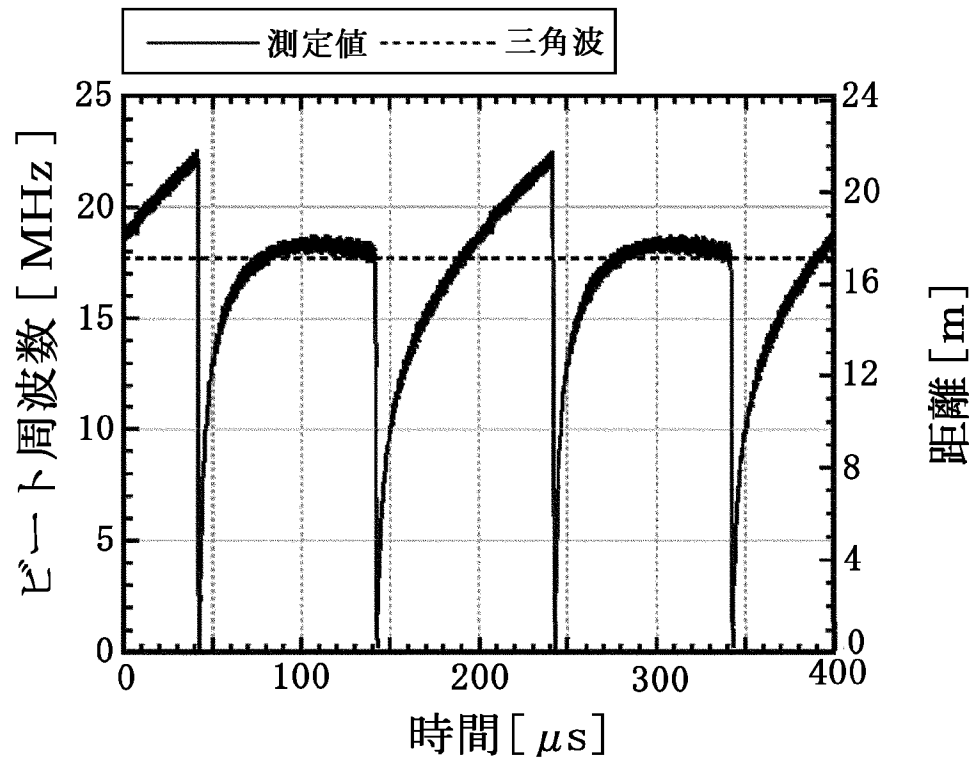
[図4]



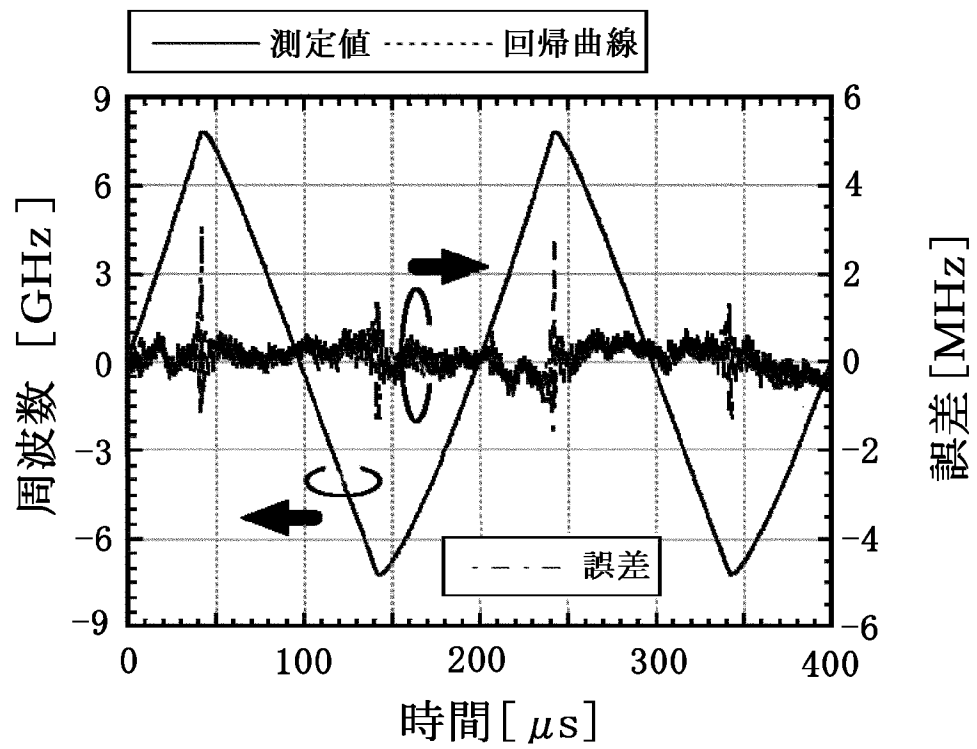
[図5]



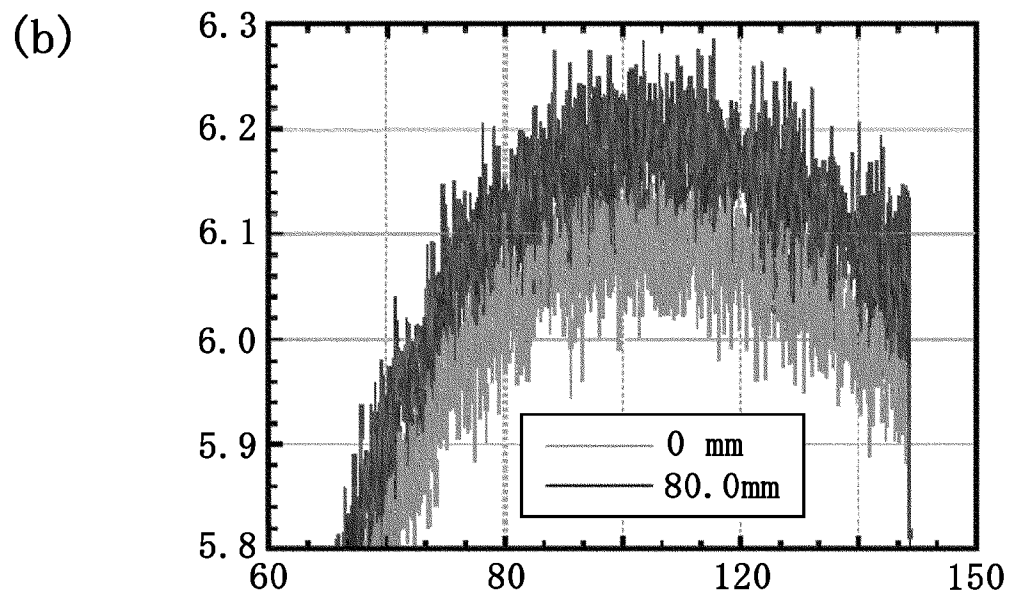
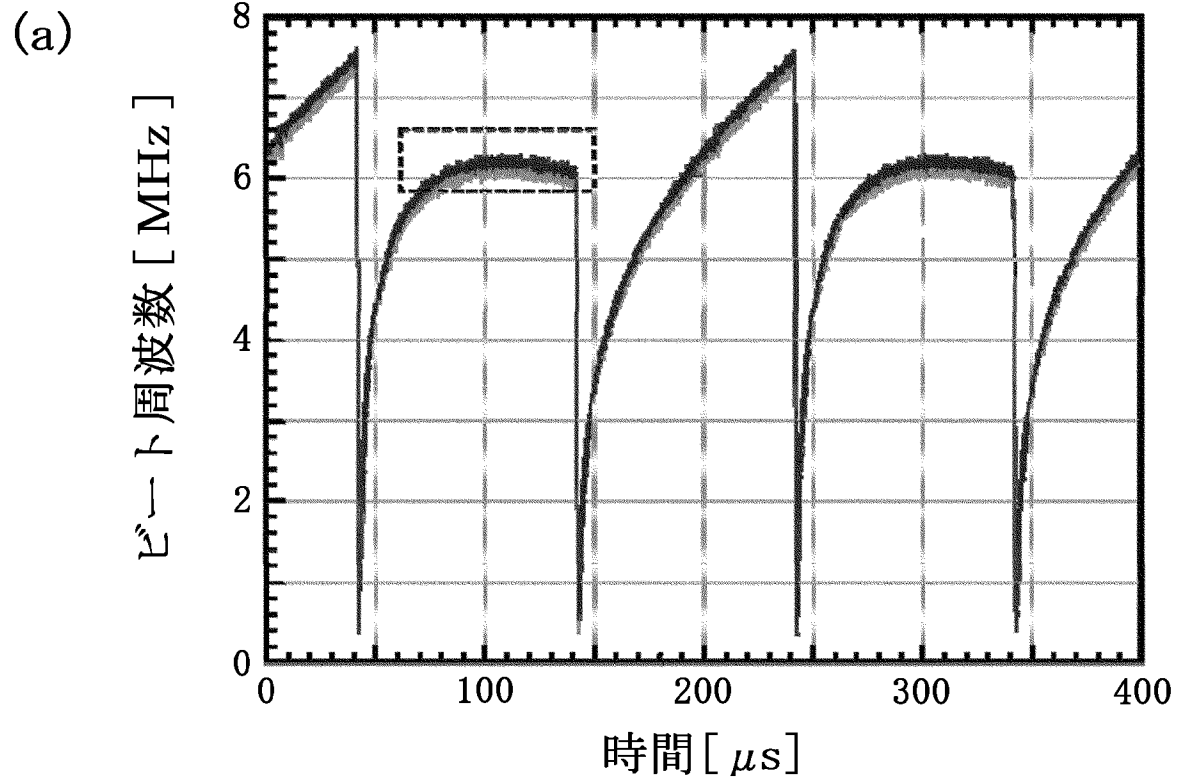
[図6]



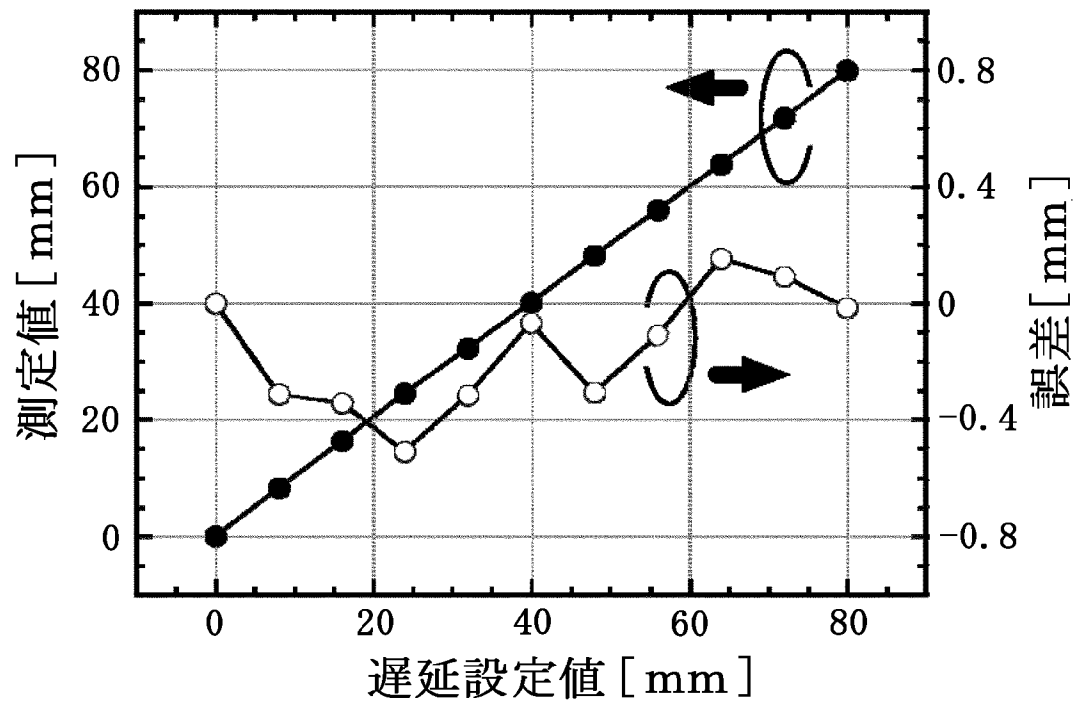
[図7]



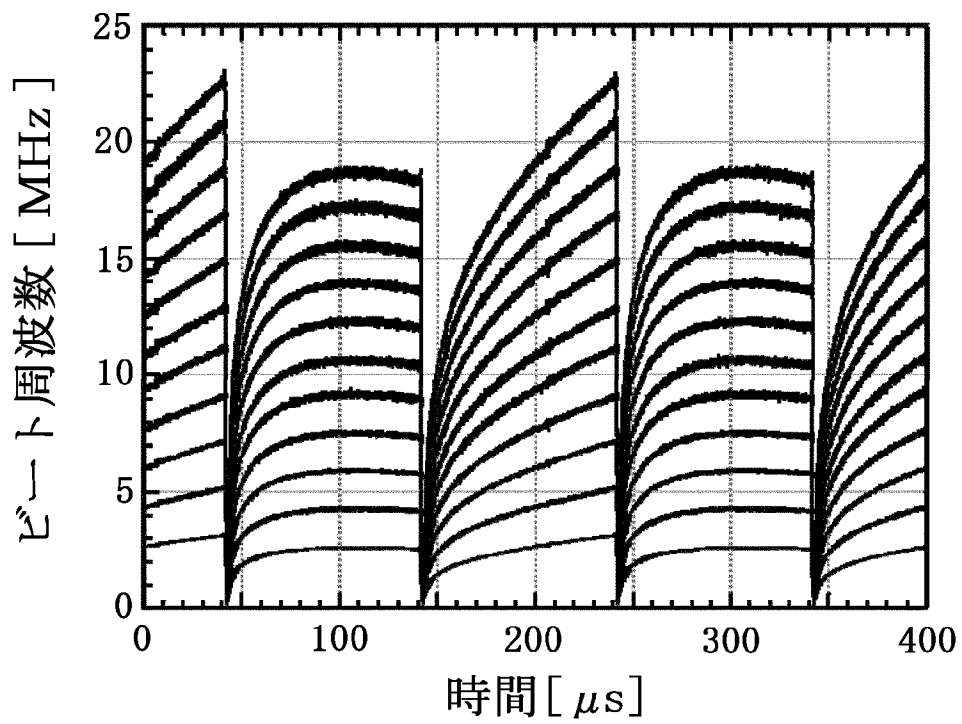
[図8]



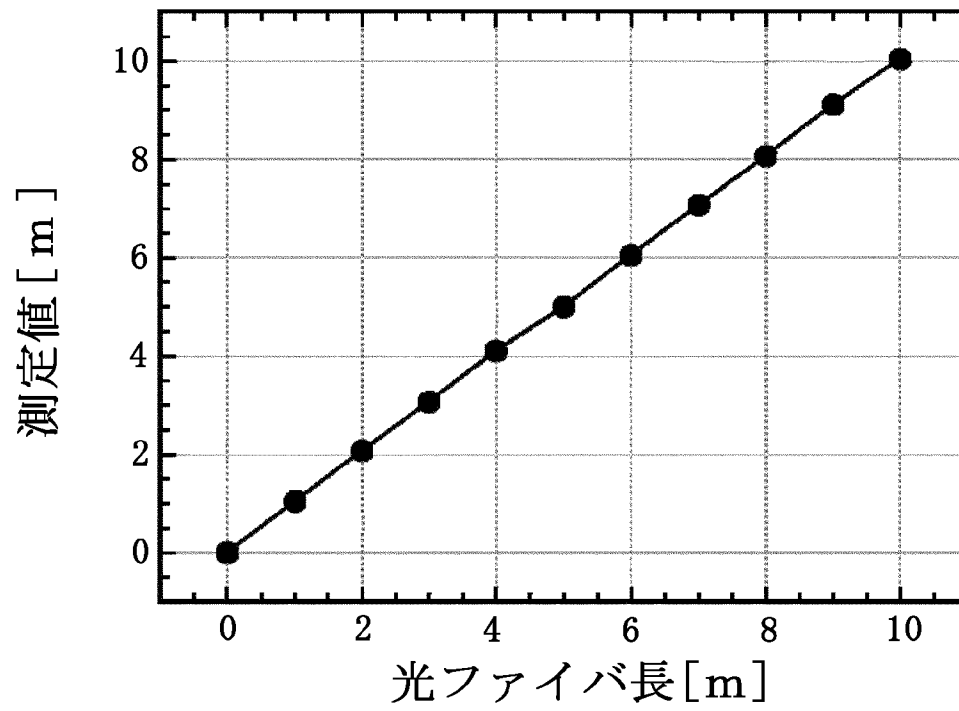
[図9]



[図10]

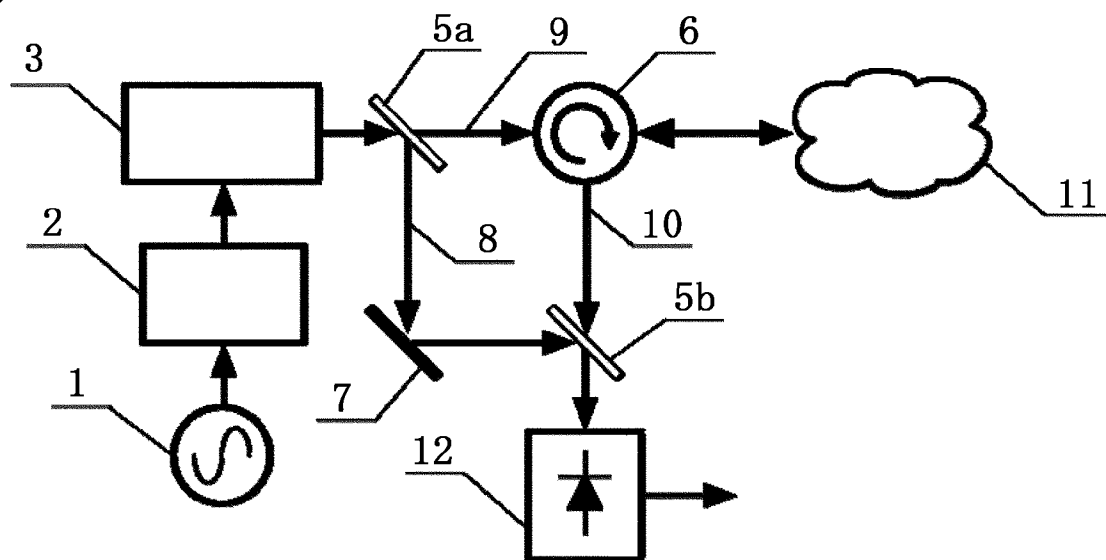


[図11]

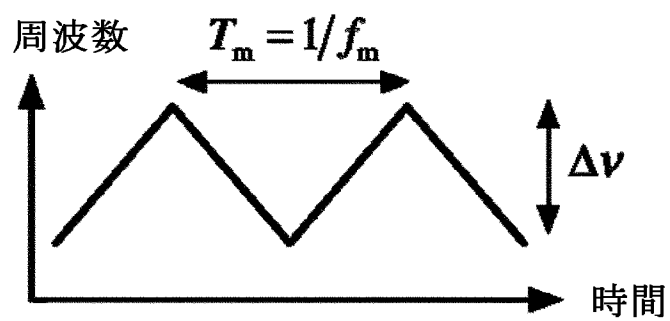


[図12]

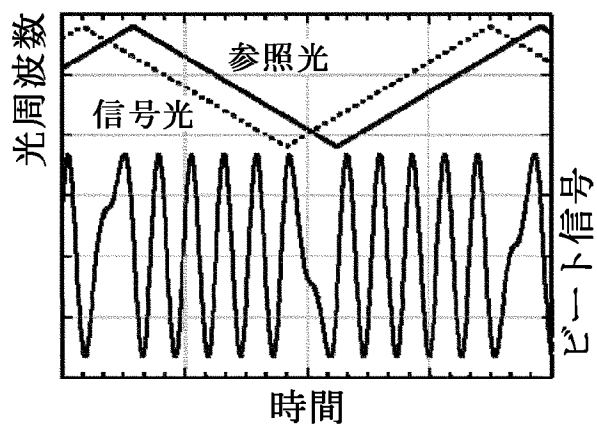
(a)



(b)



(c)



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2018/022077

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl. G01S17/32 (2006.01) i, G01C3/06 (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)

Int.Cl. G01S7/00-7/64, G01S13/00-17/95, G01C3/00-3/32

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 1971-2018

Registered utility model specifications of Japan 1996-2018

Published registered utility model applications of Japan 1994-2018

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.
A	CN 103837870 A (HUAQIAO UNIVERSITY) 04 June 2014, entire text, all drawings (Family: none)	1-8
A	CN 103928835 A (HUAQIAO UNIVERSITY) 16 July 2014, entire text, all drawings (Family: none)	1-8
A	JP 2014-202716 A (HITACHI HIGH TECH CORPORATION) 27 October 2014, entire text, all drawings (Family: none)	1-8

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"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
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"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
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"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
"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)	"&" document member of the same patent family
"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	

Date of the actual completion of the international search
31.07.2018

Date of mailing of the international search report
21.08.2018

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

International application No.

PCT/JP2018/022077

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 11-508046 A (MROSIK, J, M. et al.) 13 July 1999, entire text, all drawings & US 6040898 A & WO 1997/001107 A1 & DE 19521771 A1 & CN 1187882 A	1-8
A	JP 2001-174548 A (FUJITSU LIMITED) 29 June 2001, entire text, all drawings (Family: none)	1-8
A	HIDEMI TSUCHIDA, Waveform measurement technique for phase/frequency-modulated lights based on self-heterodyne interferometry, Optics Express, 06 March 2017, vol. 25, no. 5, pp. 4793-4789	1-8

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G01S17/32(2006.01)i, G01C3/06(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G01S7/00-7/64, G01S13/00-17/95, G01C3/00-3/32

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	1971-2018年
日本国実用新案登録公報	1996-2018年
日本国登録実用新案公報	1994-2018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
A	CN 103837870 A (HUAQIAO UNIVERSITY) 2014.06.04, 全文, 全図（ファミリーなし）	1-8
A	CN 103928835 A (HUAQIAO UNIVERSITY) 2014.07.16, 全文, 全図（ファミリーなし）	1-8
A	JP 2014-202716 A (株式会社日立ハイテクノロジーズ) 2014.10.27, 全文, 全図（ファミリーなし）	1-8

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

31.07.2018

国際調査報告の発送日

21.08.2018

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（ISA/J P）

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

櫻井 健太

2S

3307

電話番号 03-3581-1101 内線 3216

C (続き) . 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
A	JP 11-508046 A (ムロージク ヤン ミヒャエル ほか) 1999.07.13, 全文, 全図 & US 6040898 A & WO 1997/001107 A1 & DE 19521771 A1 & CN 1187882 A	1-8
A	JP 2001-174548 A (富士通株式会社) 2001.06.29, 全文, 全図 (フ ァミリーなし)	1-8
A	HIDEMI TSUCHIDA, Waveform measurement technique for phase/frequency-modulated lights based on self-heterodyne interferometry, Optics Express, 2017.03.06, Vol.25, No.5, pp. 4793-4789	1-8