

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5363231号  
(P5363231)

(45) 発行日 平成25年12月11日(2013.12.11)

(24) 登録日 平成25年9月13日(2013.9.13)

(51) Int.Cl. F I  
**GO1H 9/00 (2006.01)** GO1H 9/00 C

請求項の数 7 (全 23 頁)

(21) 出願番号	特願2009-175886 (P2009-175886)	(73) 特許権者	503249810
(22) 出願日	平成21年7月28日 (2009.7.28)		株式会社 光コム
(65) 公開番号	特開2011-27648 (P2011-27648A)		東京都千代田区神田小川町三丁目1番2号
(43) 公開日	平成23年2月10日 (2011.2.10)	(74) 代理人	100067736
審査請求日	平成24年7月27日 (2012.7.27)		弁理士 小池 晃
		(74) 代理人	100096677
			弁理士 伊賀 誠司
		(74) 代理人	100106781
			弁理士 藤井 稔也
		(74) 代理人	100113424
			弁理士 野口 信博
		(72) 発明者	今井 一宏
			神奈川県横浜市緑区長津田みなみ台5-18-6

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 振動計測装置及び振動計測方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

所定の周波数間隔のスペクトルであり、互いに位相同期され干渉性のある基準光と測定光とを出射する光源部と、

上記光源部から出射された参照光と測定光を分割して参照光学系と測定光学系に入射し、上記参照光学系と測定光学系から戻ってくる参照光と測定光の干渉光を発生する干渉光学系と、

上記干渉光学系において分割された参照光が入射され、入射された参照光を上記干渉光学系に戻す参照光学系と、

上記干渉光学系において分割された測定光が入射され、入射された測定光をチャンネル毎に2つ以上の周波数成分を含む複数チャンネルの測定光に分離して、複数チャンネルの測定光を測定面の複数の測定点に照射し、上記測定面で反射されて戻ってきた複数チャンネルの測定光を1つに合わせる光分合波器を備え、上記測定面の複数の測定点で反射された測定光を上記光分合波器を介して上記干渉光学系に戻す測定光学系と、

上記干渉光学系により発生された干渉光に含まれる光スペクトルを分離する光スペクトル分離部と、上記光スペクトル分離部により分離された各光スペクトルを検出する複数の光検出器からなる検出部と、

上記検出部により検出した各スペクトル成分を解析し、各チャンネルの周波数成分の位相情報から上記測定面の複数の測定点における振動情報を得るとともに、各チャンネル内の各周波数成分の相対位相情報から上記測定面の複数の測定点における高さ情報を得る

10

20

信号処理部と

を備える振動計測装置。

【請求項 2】

上記光源部から出射される基準光又は測定光の周波数をシフトする周波数シフタをさらに備える請求項 1 記載の振動計測装置。

【請求項 3】

上記光源部から出射された基準光が上記干渉光学系を介して入射され、該入射した基準光を直線偏光から円偏光に変換して上記干渉光学系に戻す参照光学系と、

上記干渉光学系で発生した上記参照光学系から戻された基準光と上記分光光学系を介して入射された測定光との干渉光を、2つの直交成分に分離する偏光ビームスプリッタとをさらに備え、

上記光スペクトル分離部は、上記偏光ビームスプリッタにより分離した第 1 の直交成分に含まれる光スペクトル成分を分離する第 1 の分光素子と、上記偏光ビームスプリッタにより分離した第 2 の直交成分に含まれる光スペクトル成分を分離する第 2 の分光素子とからなり、

上記検出部は、上記第 1 の分光素子により分離した第 1 の直交成分に含まれる光スペクトル成分をそれぞれ検出する第 1 の複数の光検出器と、上記第 2 の分光素子により分離した第 2 の直交成分に含まれる光スペクトル成分をそれぞれ検出する第 2 の複数の光検出器とからなる請求項 1 記載の振動計測装置。

【請求項 4】

所定の周波数間隔のスペクトルであり、互いに変調周波数及び中心周波数が異なり、互いに位相同期され干渉性のある基準光と測定光とを出射する光源と、

上記光源部から出射された参照光と測定光を分割して参照光学系と測定光学系に入射し、上記参照光学系と測定光学系から戻ってくる参照光と測定光の干渉光を発生する干渉光学系と、

上記干渉光学系において分割された参照光が入射され、入射された参照光を上記干渉光学系に戻す参照光学系と、

上記干渉光学系において分割された測定光が入射され、入射された測定光をチャンネル毎に 2 つ以上の周波数成分を含む複数チャンネルの測定光に分離して、複数チャンネルの測定光を測定面の複数の測定点に照射し、上記測定面で反射されて戻ってきた複数チャンネルの測定光を 1 つに合わせる光分合波器を備え、上記測定面の複数の測定点で反射された測定光を上記光分合波器を介して上記干渉光学系に戻す測定光学系と、

上記干渉光学系で発生した干渉光を検出する検出部と、

上記検出部により検出した干渉光に基づいて、各チャンネルの周波数成分の位相情報から上記測定面の複数の測定点における振動情報を得るとともに、各チャンネル内の各周波数成分の相対位相情報から上記測定面の複数の測定点における高さ情報を得る信号処理部とを備える振動計測装置。

【請求項 5】

上記光源部は、第 1 の発振器により第 1 の変調周波数の変調信号でレーザ光を変調して第 1 の光周波数コムを生成する第 1 の光周波数コム発生器と、第 2 の発振器により上記第 1 の変調周波数とは異なる第 2 の変調周波数の変調信号で上記レーザ光を変調することにより、上記第 1 の光周波数コムとはモード周波数間隔が異なる第 2 の光周波数コムを生成する第 2 の光周波数コム発生器とからなる請求項 4 記載の振動計測装置。

【請求項 6】

所定の周波数間隔のスペクトルであり、互いに変調周波数及び中心周波数が異なり、互いに位相同期され干渉性のある基準光と測定光とを光源部から出射する出射工程と、

上記光源部から出射された測定光を光分合波器に入射する入射工程と、

上記光分合波器に入射された測定光をチャンネル毎に 2 つ以上の周波数成分を含む複数チャンネルの測定光に分離して、複数チャンネルの測定光を測定対象の測定面の複数の測定点に照射し、上記測定面で反射されて戻ってきた複数の測定光を上記光分合波器により

10

20

30

40

50

1つに合わせて干渉光学系に入射する照射工程と、

上記測定面で反射され、上記光分合波器を介して入射された測定光と上記光源部から出射された基準光とを干渉光学系により干渉させる干渉工程と、

上記干渉光学系により発生された干渉光に含まれる光スペクトルを分離して、各光スペクトルを検出する検出工程と、

上記検出工程において検出した各スペクトル成分を解析し、各チャンネルの周波数成分の位相情報から上記測定面の複数の測定点における振動情報を得るとともに、各チャンネル内の各周波数成分の相対位相情報から上記測定面の複数の測定点における高さ情報を得る解析工程と

を有する振動計測方法。

10

#### 【請求項7】

所定の周波数間隔のスペクトルであって、互いに位相同期され干渉性のある基準光と測定光とを光源部から出射する出射工程と、

上記出射工程において光源部から出射された測定光を光分合波器によりチャンネル毎に2つ以上の周波数成分を含む複数チャンネルの測定光に分離して、複数チャンネルの測定光を測定対象の測定面の複数の測定点に照射し、上記測定面で反射されて戻ってきた複数の測定光を上記光分合波器により1つに合わせて干渉光学系に入射する照射工程と、

上記光分合波器を介して入射された測定光と上記光源部から出射された基準光とを干渉光学系により干渉させる干渉工程と、

上記干渉光学系で発生した干渉光を検出する検出工程と、

20

上記検出工程において検出した干渉光に基づいて、各チャンネルの周波数成分の位相情報から上記測定面の複数の測定点における振動情報を得るとともに、各チャンネル内の各周波数成分の相対位相情報から上記測定面の複数の測定点における高さ情報を得る解析工程と

を有する振動計測方法。

#### 【発明の詳細な説明】

#### 【技術分野】

#### 【0001】

本発明は、光を用いて測定対象の振動情報と高さ情報を複数点同時に計測する振動計測装置及び振動計測方法に関する。

30

#### 【背景技術】

#### 【0002】

振動を検出して電気信号に変換して振動を測定する計測器として、振動計が用いられている。振動計には、接触式と非接触式のものがある。接触式の振動計は、センサを測定対象物に接続して振動の加速度を計測する。非接触式の振動計は、センサの取り付けによって振動の状態が変化する場合、測定対象が回転体であって信号の読み出しが難しい場合、寸法や材質のためにセンサの取り付けが難しい場合等に用いられる。

#### 【0003】

非接触式の振動計としては、渦電流型、静電容量型、レーザ型、レーザドップラ型等がある。例えば、レーザドップラ型の振動計は、振動体にレーザ光を照射して、ドップラ効果による反射光の周波数変化(ドップラシフト)を観測して振動の測定を行うものである。

40

#### 【0004】

従来の振動計測装置においては、接触式、非接触式によらず、1つのヘッドについて1箇所の振動を計測するものであり、装置によっては、ヘッドを増設することにより複数ポイントの振動測定に対応できるものもある。

#### 【先行技術文献】

#### 【特許文献】

#### 【0005】

【特許文献1】特開2008-101963号公報

50

**【発明の概要】****【発明が解決しようとする課題】****【0006】**

振動の発生原因や振動による負荷を調査するためには、測定対象の面内の振動分布の計測が求められる。例えば、定常的な振動であれば、振動の周期に合わせて場所をずらしながら振動計測を行うことによって、面内の振動分布を測ることができる。

**【0007】**

しかしながら、過渡的に変化する振動を実時間で計測したい場合、どのような周波数成分の振動が含まれているか予め分からない場合等、数点の振動情報を同時に必要とする場合には、数点の振動情報を同時に測定できる振動計測装置が必要となる。

10

**【0008】**

例えば、レーザドップラ振動計のような従来の装置においても多くのヘッドと干渉計を用い、装置間の同期をとりながら計測を行うことによって、多点の振動測定が可能であるが、多点のレーザ光線の光軸調整や測定時刻の同期をとるのは容易ではない。

**【0009】**

また、従来のレーザドップラ振動計では、振動の振幅を測定することができるが、静止状態の高さを得ることはできず、また、一般的に計測可能な速度レンジは、毎秒10m程度でしかない。

**【0010】**

本件出願人は、上述の如き従来の問題点に鑑み、所定の周波数間隔のスペクトルであって、互いに位相同期され干渉性のある基準光と測定光とを光源から出射し、上記光源から出射された測定光を分光ヘッドに入射し、上記分光ヘッドに入射された測定光を周波数成分毎に分けて測定対象の測定面の複数の測定点に照射することにより、上記測定面で反射され、上記分光ヘッドを介して入射された測定光と上記光源から出射された基準光とを干渉光学系により干渉させ、上記干渉光に含まれる光スペクトル成分を回折格子により分離し、分離した各スペクトル成分をそれぞれ複数の光検出器により検出し、検出した各スペクトル成分に基づいて、上記測定面の複数の測定点における振動情報を信号処理部により解析することにより、複雑な光軸調整をすることがなく、測定対象の多点の振動情報を同時に測定可能とした振動計測装置及び振動計測方法を特願2009-048392として先に提案している。

20

30

**【0011】**

本発明の目的は、本件出願人が先にて提案した振動計測装置及び振動計測方法を改良し、測定対象の振動情報と高さ情報を複数点同時に計測できるようにした振動計測装置及び振動計測方法を提供することにある。

**【0012】**

本発明の他の目的、本発明によって得られる具体的な利点は、以下に説明される実施の形態の説明から一層明らかになる。

**【課題を解決するための手段】****【0013】**

本願発明では、光周波数コムを異なるチャンネル毎に2つ以上の周波数成分を含む複数チャンネルの測定光に分離して、複数チャンネルの測定光を測定対象に照射し、測定対象により反射された測定光と干渉光学系において基準光とを干渉させて干渉光を得て、上記干渉光に含まれる光スペクトル成分を分離し、分離した各スペクトル成分をそれぞれ複数の光検出器により検出し、検出した各スペクトル成分に基づいて、上記測定面の複数の測定点における振動情報を信号処理部により解析することにより、測定対象の振動情報と高さ情報を複数の測定点同時に計測する。

40

**【0014】**

すなわち、本発明に係る振動計測装置は、所定の周波数間隔のスペクトルであり、互いに位相同期され干渉性のある基準光と測定光とを出射する光源部と、上記光源部から出射された参照光と測定光を分割して参照光学系と測定光学系に入射し、上記参照光学系と測

50

定光学系から戻ってくる参照光と測定光の干渉光を発生する干渉光学系と、上記干渉光学系において分割された参照光が入射され、入射された参照光を上記干渉光学系に戻す参照光学系と、上記干渉光学系において分割された測定光が入射され、入射された測定光をチャンネル毎に2つ以上の周波数成分を含む複数チャンネルの測定光に分離して、複数チャンネルの測定光を測定面の複数の測定点に照射し、上記測定面で反射されて戻ってきた複数チャンネルの測定光を1つに合わせる光分合波器を備え、上記測定面の複数の測定点で反射された測定光を上記光分合波器を介して上記干渉光学系に戻す測定光学系と、上記干渉光学系により発生された干渉光に含まれる光スペクトルを分離する光スペクトル分離部と、上記光スペクトル分離部により分離された各光スペクトルを検出する複数の光検出器からなる光検出部と、上記検出部により検出した各スペクトル成分を解析し、各チャンネルの周波数成分の位相情報から上記測定面の複数の測定点における振動情報を得るとともに、各チャンネル内の各周波数成分の相対位相情報から上記測定面の複数の測定点における高さ情報を得る信号処理部とを備えることを特徴とする。

10

## 【0015】

また、本発明に係る振動計測装置は、所定の周波数間隔のスペクトルであり、互いに変調周波数及び中心周波数が異なり、互いに位相同期され干渉性のある基準光と測定光とを出射する光源と、上記光源部から出射された参照光と測定光を分割して参照光学系と測定光学系に入射し、上記参照光学系と測定光学系から戻ってくる参照光と測定光の干渉光を発生する干渉光学系と、上記干渉光学系において分割された参照光が入射され、入射された参照光を上記干渉光学系に戻す参照光学系と、上記干渉光学系において分割された測定光が入射され、入射された測定光をチャンネル毎に2つ以上の周波数成分を含む複数チャンネルの測定光に分離して、複数チャンネルの測定光を測定面の複数の測定点に照射し、上記測定面で反射されて戻ってきた複数チャンネルの測定光を1つに合わせる光分合波器を備え、上記測定面の複数の測定点で反射された測定光を上記光分合波器を介して上記干渉光学系に戻す測定光学系と、上記干渉光学系で発生した干渉光を検出する検出部と、上記検出部により検出した干渉光に基づいて、各チャンネルの周波数成分の位相情報から上記測定面の複数の測定点における振動情報を得るとともに、各チャンネル内の各周波数成分の相対位相情報から上記測定面の複数の測定点における高さ情報を得る信号処理部とを備えることを特徴とする。

20

## 【0016】

また、本発明に係る振動計測方法は、所定の周波数間隔のスペクトルであり、互いに変調周波数及び中心周波数が異なり、互いに位相同期され干渉性のある基準光と測定光とを光源部から出射する出射工程と、上記光源部から出射された測定光を光分合波器に入射する入射工程と、上記光分合波器に入射された測定光をチャンネル毎に2つ以上の周波数成分を含む複数チャンネルの測定光に分離して、複数チャンネルの測定光を測定対象の測定面の複数の測定点に照射し、上記測定面で反射されて戻ってきた複数の測定光を上記光分合波器により1つに合わせて干渉光学系に入射する照射工程と、上記測定面で反射され、上記光分合波器を介して入射された測定光と上記光源部から出射された基準光とを干渉光学系により干渉させる干渉工程と、上記干渉光学系により発生された干渉光に含まれる光スペクトルを分離して、各光スペクトルを検出する検出工程と、上記検出工程において検出した各スペクトル成分を解析し、各チャンネルの周波数成分の位相情報から上記測定面の複数の測定点における振動情報を得るとともに、各チャンネル内の各周波数成分の相対位相情報から上記測定面の複数の測定点における高さ情報を得る解析工程とを有することを特徴とする。

30

40

## 【0017】

さらに、本発明に係る振動計測方法は、所定の周波数間隔のスペクトルであって、互いに位相同期され干渉性のある基準光と測定光とを光源部から出射する出射工程と、上記出射工程において光源部から出射された測定光を光分合波器によりチャンネル毎に2つ以上の周波数成分を含む複数チャンネルの測定光に分離して、複数チャンネルの測定光を測定対象の測定面の複数の測定点に照射し、上記測定面で反射されて戻ってきた複数の測定光

50

を上記光分合波器により1つに合わせて干渉光学系に入射する照射工程と、上記光分合波器を介して入射された測定光と上記光源部から出射された基準光とを干渉光学系により干渉させる干渉工程と、上記干渉光学系で発生した干渉光を検出する検出工程と、上記検出工程において検出した干渉光に基づいて、各チャンネルの周波数成分の位相情報から上記測定面の複数の測定点における振動情報を得るとともに、各チャンネル内の各周波数成分の相対位相情報から上記測定面の複数の測定点における高さ情報を得る解析工程とを有することを特徴とする。

【発明の効果】

【0018】

本発明によれば、測定対象の振動情報と高さ情報を複数点同時に計測できる。

10

【図面の簡単な説明】

【0019】

【図1】本発明を適用した振動計測装置の一例を示すブロック図である。

【図2】上記振動計測装置に備えられた光周波数コムが発生器から出力される光周波数コムを周波数軸上で模式的に示す図である。

【図3】上記振動計測装置に備えられた光分合波器により分波された光周波数コムの周波数成分と各チャンネルとの関係を模式的に示す図である。

【図4】三角プリズム用いた上記光分合波器の構成例を模式的に示す図である。

【図5】アレイ導波路格子を用いた光分合波器の構成例を模式的に示す図である。

【図6】複数の波長分割多重フィルタを用いた上記光分合波器の構成例を模式的に示す図である。

20

【図7】上記振動計測装置の検出部において検出される複数の干渉信号の波形及び相対位相を模式的に示す図である。

【図8】上記振動計測装置において光分合波器により分波された複数のチャンネルの測定光を各チャンネルのヘッド部を介して測定面の長手方向(x方向)に沿った直線上に位置する複数の測定点に照射する状態を模式的に示す図である。

【図9】上記振動計測装置において、測定面について振動情報を2次元で計測するために、各チャンネルの測定光に含まれる複数の周波数の光を1周波数が1測定点に対応するように分離する光分離素子を各ヘッド部に設けて、各チャンネルのヘッド部でそれぞれy方向の3点の測定点に測定光を照射する状態を模式的に示す図である。

30

【図10】上記振動計測装置において、測定面の捻れを計測するために、2列に配置した各チャンネルのヘッド部を介して各チャンネルの測定光を照射する状態を模式的に示す図である。

【図11】本発明を適用した振動計測装置の他の構成例を示すブロック図である。

【図12】上記振動計測装置において干渉光学系に戻される測定光と基準光とを周波数軸上で模式的に示す図である。

【図13】本発明を適用した振動計測装置のさらに他の構成例を示すブロック図である。

【図14】上記振動計測装置において光源部から出射される2台の光周波数コム発生から参照光と測定光として出射される光周波数コムを周波数軸上で模式的に示す図である。

【発明を実施するための形態】

40

【0020】

以下、発明を実施するための形態について図面を参照して詳細に説明する。

【0021】

本発明は、例えば図1に示すような構成の振動計測装置100に適用される。

【0022】

この振動計測装置100は、参照光 $L_R$ と測定光 $L_M$ とを出射する光源部110、上記参照光 $L_R$ が入射される参照光学系120、上記測定光 $L_M$ が入射される測定光学系130、上記参照光学系120を介して上記参照光 $L_R$ が入射されるとともに上記測定光学系130を介して上記測定光 $L_M$ が入射される干渉光学系140、上記干渉光学系140で発生した干渉光 $L_X$ を検出する検出部150、上記検出部150により検出された干渉光

50

$L_x$  の検出出力を解析する信号処理部 160 などからなる。

【0023】

この振動計測装置 100 において、上記光源部 110 は、例えば、周波数が  $f_m$  のレーザー光を出射するレーザー光源 111 と、上記レーザー光源 111 からレーザーが入射される光周波数コム発生器 112 と、上記光周波数コム発生器 112 に所定周波数の変調信号を与える発振器 113 とからなり、上記光周波数コム発生器 112 により発生される光周波数コムを互いに位相同期され干渉性のある参照光  $L_R$  と測定光  $L_M$  として出射する。

【0024】

上記光周波数コム発生器 112 は、例えば、レーザー外部で光の強度や位相を変調する電気光学変調器 (EOM) と、この EOM を挟むように対向して配設された反射鏡とからなり、電気光学変調器と反射鏡とで光発振器を構成してなるファブリペロー型電気光学変調方式のものが用いられる。なお、上記光周波数コム発生器 112 としては、この他にも、 $LiNbO_3$  結晶を使った位相変調器、強度変調器、半導体の吸収や位相の変化を利用する変調器等を用いてもよい。

上記光周波数コム発生器 112 は、上記レーザー光源 111 から出射されたレーザー光を上記発振器 113 から与えられる周波数  $f_m$  の変調信号で変調することにより、光周波数コムを発生する。光周波数コムは、例えば、図 2 に示すように、光周波数  $f_c$  を中心にマイクロ波周波数 (変調信号の周波数)  $f_m$  に一致する等周波数間隔で発生させた側波帯 (サイドバンド) を有する光であり、光周波数コムの中心周波数が入射されるレーザーの光周波数  $f_L$  に一致している。光周波数  $f_c$  は、数百 THz の領域であるため、光の位相情報を直接取り扱うことが難しいが、 $f_m$  は高くても数十 GHz の領域なので、従来の電子回路技術で位相情報を容易に扱うことができる。したがって、光周波数コムを用いることにより、相対的な光の周波数や位相の情報を、光周波数コムが存在している帯域内で電氣的に取り扱うことが可能となる。

【0025】

なお、上記光源部 110 には、それぞれ周期的に強度又は位相が変調され、かつ、キャリア周波数が安定化された 1 台の光源、例えばモード同期レーザーを用いてもよい。干渉性がよければ独立な 2 台の光源としてもよい。

【0026】

この振動計測装置 100 において、参照光学系 120 は、上記光源部 110 から参照光  $L_R$  と測定光  $L_M$  として出射された光周波数コムを上記干渉光学系 140 において上記ビームスプリッタ 141 により分割された参照光  $L_R$  が  $1/8$  波長 ( $\lambda/8$ ) 板 121 を介して入射される参照面 122 により、入射された参照光  $L_R$  を反射して上記  $1/8$  波長 ( $\lambda/8$ ) 板 121 を介して上記干渉光学系 140 に戻すようになっている。

【0027】

また、この振動計測装置 100 において、測定光学系 130 は、上記干渉光学系 140 において上記ビームスプリッタ 141 により分割された測定光  $L_M$  が入射され、入射された測定光  $L_M$  をチャンネル毎に 2 つ以上の周波数成分を含む複数チャンネルの測定光  $L_{CH1} \sim L_{CHn}$  に分離して、複数チャンネルの測定光  $L_{CH1} \sim L_{CHn}$  を測定面 10 上の対応する複数の測定点に照射し、上記測定面 10 で反射されて戻ってきた複数チャンネルの測定光  $L_{CH1}' \sim L_{CHn}'$  を 1 つに合わせる光分合波器 131 を備え、上記測定面 10 において複数の測定点で反射された測定光  $L_{CH1}' \sim L_{CHn}'$  を上記光分合波器 131 を介して上記干渉光学系 140 に戻すようになっている。

【0028】

上記光分合波器 131 は、入射された測定光  $L_M$  をチャンネル毎に 2 つ以上の周波数成分を含む複数チャンネルの測定光  $L_{CH1} \sim L_{CHn}$  に分離して、上記複数チャンネルの測定光  $L_{CH1} \sim L_{CHn}$  を測定面 10 上の複数の測定点に照射する分波機能と、上記測定面 10 で反射されて戻ってきた複数チャンネルの測定光  $L_{CH1}' \sim L_{CHn}'$  を 1 つに束ねて上記測定面 10 で反射されて戻ってきた測定光  $L_M'$  として上記干渉光学系 140 に入射する合波機能を有するもので、光を合波・分波するための部品としては、プリズ

10

20

30

40

50

ム、干渉膜フィルタ、あるいは回折格子等の分光素子が用いられる。

【0029】

上記光分合波器131は、図3に示すように、光周波数コムの周波数成分がチャンネル毎に2つ以上入るように、各チャンネルの出力バンド幅と中心周波数が設定される。

【0030】

上記光分合波器131は、例えば図4に示すように、集光レンズ131A、131Cを介して測定光 $L_M$ が入射される三角プリズム131Bからなり、上記三角プリズム131Bにより、入射された測定光 $L_M$ をチャンネル毎に2つ以上の周波数成分を含む複数チャンネルの測定光 $L_{CH1} \sim L_{CHn}$ に分波し、また、上記測定面10で反射されて戻ってきた複数チャンネルの測定光 $L_{CH1}' \sim L_{CHn}'$ を合波して1つに束ねることができる。

10

【0031】

また、上記光分合波器131には、例えば、図5に示すように、光導波路により上記三角プリズムの機能を果たすようにしたアレイ導波路格子131D(AWG: Arrayed Waveguide Grating)を用いることができる。

【0032】

さらに、上記光分合波器131は、例えば、図6に示すように、分割波長が少しずつ異なる複数の波長分割多重フィルタを縦接続して構成することもできる。

【0033】

この図6に示す光分合波器131は、9個の波長分割多重フィルタ131a~131iを縦接続してなる。9個の波長分割多重フィルタ131a~131iは、入射される測定光 $L_M$ 、すなわち、上記光源110から出射される所定の周波数間隔の光周波数コムの各スペクトラムの波長 $\lambda_{-n}, \lambda_{-n+1}, \dots, \lambda_{-5}, \lambda_{-4}, \lambda_{-3}, \lambda_{-2}, \lambda_{-1}, \lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \dots, \lambda_{n-1}, \lambda_n$ に対し、 $m = -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4$ の整数として、 $\lambda_{3m+1}$ 以下の波長の光は透過し、 $\lambda_{3m+2}$ 以上の波長の光は透過する光学特性を有する。

20

【0034】

この光分合波器131は、9個の波長分割多重フィルタ131a~131iにより、次のように波長分割を行う。

【0035】

第1の波長分割多重フィルタ131aは、入射される測定光 $L_M$ に含まれる波長 $\lambda_{-3}, \lambda_{-12}, \lambda_{-11}$ の光は透過して第1チャンネルの測定光 $L_{CH1}$ として出射し、 $\lambda_{-10}$ 以下の波長の光は反射して第2の波長分割多重フィルタ131bに入射する。

30

【0036】

また、第2の波長分割多重フィルタ131bは、入射される測定光 $L_M$ に含まれる波長 $\lambda_{-10}, \lambda_{-9}, \lambda_{-8}$ の光は透過して第2チャンネルの測定光 $L_{CH2}$ として出射し、 $\lambda_{-7}$ 以下の波長の光は反射して第3の波長分割多重フィルタ131cに入射する。

【0037】

また、第3の波長分割多重フィルタ131cは、波長 $\lambda_{-7}, \lambda_{-6}, \lambda_{-5}$ の光は透過して第3チャンネルの測定光 $L_{CH3}$ として出射し、 $\lambda_{-4}$ 以下の波長の光はして第4の波長分割多重フィルタ131dに入射する。

40

【0038】

また、第4の波長分割多重フィルタ131dは、波長 $\lambda_{-4}, \lambda_{-3}, \lambda_{-2}$ の光は透過して第4チャンネルの測定光 $L_{CH4}$ として出射し、 $\lambda_{-1}$ 以下の波長の光は反射して第5の波長分割多重フィルタ131eに入射する。

【0039】

また、第5の波長分割多重フィルタ131eは、波長 $\lambda_{-1}, \lambda_0, \lambda_1$ の光は透過して第5チャンネルの測定光 $L_{CH5}$ として出射し、 $\lambda_2$ 以下の波長の光は反射して第6の波長分割多重フィルタ131fに入射する。

【0040】

50

また、第6の波長分割多重フィルタ131fは、波長 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ 、 $\lambda_4$ の光は透過して第6チャンネルの測定光 $L_{CH6}$ として出射し、 $\lambda_5$ 以下の波長の光は反射して第7の波長分割多重フィルタ131gに入射する。

【0041】

また、第7の波長分割多重フィルタ131gは、波長 $\lambda_5$ 、 $\lambda_6$ 、 $\lambda_7$ の光は透過して第7チャンネルの測定光 $L_{CH7}$ として出射し、 $\lambda_8$ 以下の波長の光は反射して第8の波長分割多重フィルタ131hに入射する。

【0042】

また、第8の波長分割多重フィルタ131hは、波長 $\lambda_8$ 、 $\lambda_9$ 、 $\lambda_{10}$ の光は透過して第8チャンネルの測定光 $L_{CH8}$ として出射し、 $\lambda_{11}$ 以下の波長の光は反射して第9

10

の波長分割多重フィルタ131iに入射する。

【0043】

さらに、第9の波長分割多重フィルタ131iは、波長 $\lambda_{11}$ 、 $\lambda_{12}$ 、 $\lambda_{13}$ の光は透過して第9チャンネルの測定光 $L_{CH9}$ として出射する。

【0044】

すなわち、この光分合波器131は、入射された測定光 $L_M$ を上記9個の波長分割多重フィルタ131a~131iによりチャンネル毎に3つの周波数成分を含む9チャンネルの測定光 $L_{CH1}$ ~ $L_{CH9}$ に分波して、上記9チャンネルの測定光 $L_{CH1}$ ~ $L_{CH9}$ を測定面10上の複数の測定点に照射する。

【0045】

20

また、この光分合波器131は、上記測定面10で反射されて戻ってきた9チャンネルの測定光 $L_{CH1}'$ ~ $L_{CH9}'$ を上記9個の波長分割多重フィルタ131a~131iにより合波する。

【0046】

すなわち、上記測定面10で反射されて戻ってきた9チャンネルの測定光 $L_{CH1}'$ ~ $L_{CH9}'$ は、第1チャンネルの測定光 $L_{CH1}'$ に含まれる波長 $\lambda_{13}$ 、 $\lambda_{12}$ 、 $\lambda_{11}$ の光は第1の波長分割多重フィルタ131aを透過し、第2チャンネルの測定光 $L_{CH2}'$ に含まれる波長 $\lambda_{10}$ 、 $\lambda_9$ 、 $\lambda_8$ の光は第2の波長分割多重フィルタ131bを透過し、第3チャンネルの測定光 $L_{CH3}'$ に含まれる波長 $\lambda_7$ 、 $\lambda_6$ 、 $\lambda_5$ の光は第3の波長分割多重フィルタ131cを透過し、以下同様に、各チャンネル

30

の測定光 $L_{CH4}'$ ~ $L_{CH9}'$ に含まれる波長 $\lambda_4$ ~ $\lambda_{13}$ の光は各波長分割多重フィルタ131d~131iを透過することにより合波され1つに束ねられる。

【0047】

すなわち、上記9個の波長分割多重フィルタ131a~131iは、上記測定面10で反射されて戻ってきた9チャンネルの測定光に含まれる $\lambda_{13}$ ~ $\lambda_{13}$ の波長の光を合波して1つに束ねて、上記測定面10で反射されて戻ってきた測定光 $L_M'$ として上記干渉光学系140に戻す。

【0048】

ここで、1チャンネルに含まれる光の波長の数及びチャンネル数は、測定対象に応じて任意の数とすることができる。

40

【0049】

上記光分合波器131により空間的に分離された各チャンネルの測定光は、光周波数コムが周波数スペクトルの広がりに応じた形状、例えばシート状とされて測定対象の測定面10における各測定点に照射され、上記測定面10の各測定点において反射されて上記光分合波器131に戻り再び1本のビームに束ねられる。上記測定面10の測定点から上記光分合波器131に戻る戻り光の位相は、測定面10の位置に応じた位相のシフトを受ける。例えば、測定面10が動いている場合には、戻り光の周波数が測定面10の速度に比例したドップラシフトを受ける。ドップラシフトとは、ある一定の周波数成分を持つ音波、電波又は光波をある速度で移動している物体に当てると、移動物体の持つ速度成分に比例して周波数が変化する現象をいう。なお、測定対象は、滑らかに繋がった表面に限定さ

50

れず、例えば、光周波数コム各モードをそれぞれ独立に振動する物体に照射することも可能である。

【0050】

上記干渉光学系140には、上記測定光学系130において、上記測定面10に照射された各チャンネルの測定光が各測定点において反射されて上記光分合波器131に戻り再び1本のビームに束ねられて入射される。

【0051】

上記干渉光学系140は、上記測定面10に照射された各チャンネルの測定光測定光 $L_{CH1} \sim L_{CHn}$ が各測定点において反射されて上記光分合波器131に戻り再び1本のビームに束ねられた測定光 $L_M'$ が上記測定光学系130から入射され、上記参照光学系120に入射される参照光 $L_R'$ と上記測定光学系130から入射される測定光 $L_M'$ とを上記ビームスプリッタ141において重ね合わせることにより、上記参照光 $L_R'$ と測定光 $L_M'$ とを干渉させ、その干渉光 $L_X$ を検出部150に入射する。

10

【0052】

この振動計測装置100において、検出部150は、上記干渉光学系140から入射される干渉光 $L_X$ を直交する2つの偏光成分の光 $L_{X1}$ 、 $L_{X2}$ に分離する偏光ビームスプリッタ151と、上記偏光ビームスプリッタ151された直交する2つの偏光成分の光 $L_{X1}$ 、 $L_{X2}$ が入射される2つの光検出部152A、152Bからなる。2つの光検出部152A、152Bは、それぞれ回折格子などの分光素子152A1、152B1と、光検出器アレイ152A2、152B2を備える。

20

【0053】

この検出部150では、上記干渉光学系140から入射される干渉光 $L_X$ を偏光ビームスプリッタ151により直交する2つの偏光成分の光 $L_{X1}$ 、 $L_{X2}$ に分離し、光検出部152Aにおいて、一方の偏光成分の光 $L_{X1}$ に含まれる各光スペクトル成分を分光素子152A1により分離して光検出器アレイ152A2で検出し、また、光検出部152Bにおいて、他方の偏光成分の光 $L_{X2}$ に含まれる各光スペクトル成分を分光素子152B1により分離して光検出器アレイ152B2で検出する。

【0054】

上記分光素子152A1、152B1により分解された各光スペクトル成分は、光検出器アレイ152A2、152B2の1素子毎に、1本のサイドバンドが入射されるようになっている。光検出器アレイ152A2、152B2は、多数の検出器が並んだものであり、1つの検出器に干渉光の複数の周波数成分が入らないように、分光素子152A1、152B1として用いる回折格子の回折角や光学系の配置を調整する。

30

【0055】

ここで、この振動計測装置100では、直角位相ホモダイン干渉計を用いるので、上記光源部110から出射される光の偏光を上記検出部150に備えられた偏光ビームスプリッタ(PBS)151の出力偏光に対して45度になるように設定しておき、参照光学系120においては、参照面122により参照光 $L_R$ を反射して上記干渉光学系140に戻す経路に1/8波長( $\lambda/8$ )板121を挿入し、往復で2回1/8波長( $\lambda/8$ )板121を通過させることにより、入射した直線偏光の参照光 $L_R$ を円偏光の参照光 $L_R'$ として上記干渉光学系140に戻すようにしている。

40

【0056】

上記干渉光学系140により発生した干渉光 $L_X$ の周波数は、参照光 $L_R'$ と測定光 $L_M'$ との間の差の周波数に等しく、上記検出部150では、この干渉光 $L_X$ の強度を検出する。このように、上記検出部150において、干渉光学系140により発生した干渉光 $L_X$ に含まれる光スペクトル成分を分離して、分離した各スペクトル成分をそれぞれ検出することにより、測定面10上の複数の測定点における振動を分離して計測することができる。

【0057】

この振動計測装置100において、信号処理部150では、検出部150で検出した干

50

渉光  $L_x$  の各スペクトル成分に基づいて測定面 10 上の複数の測定点における振動情報を解析する。測定面 10 における 1 点毎の振動測定の実理については、従来のレーザドップラ振動計と同様である。具体的には、上述した測定面 10 で反射された測定光における周波数シフト、すなわち、ドップラシフトを利用して測定面 10 の速度成分を測定する。例えば、光の波長を  $\lambda$  としたとき、ドップラシフト分の周波数変化  $f_d$  と測定面 10 の振動速度  $V$  との間には、下記 (1) 式の関係が成立する。

【0058】

$$f_d = 2V / \lambda \quad (1)$$

したがって、振動計測装置 100 においては、ドップラシフト分の周波数変化  $f_d$  から、測定面 10 の振動情報、例えば、振動速度、移動距離、加速度等を解析することができる。

10

【0059】

そして、この振動計測装置 100 において、信号処理部 160 では、光源部 110 から出射される光周波数コムのコムモード次数を  $n$  とし、干渉信号の振幅を  $a_n$ 、干渉信号の位相を  $\phi_n$  とし、例えば、上記干渉光  $L_x$  の一方の偏光成分の光  $L_{x1}$  に含まれる光スペクトル成分の強度を検出する上記第 1 の光検出部 152 A により光検出器アレイ 152 A 2 による検出出力に基づいて、干渉信号の  $a_n \cos \phi_n$  成分の電圧値を算出するとともに、上記干渉光  $L_x$  の他方の偏光成分の光  $L_{x2}$  に含まれる光スペクトル成分の強度を検出する上記第 2 の光検出部 152 B により光検出器アレイ 152 B 2 による検出出力に基づいて、上記干渉信号の  $a_n \sin \phi_n$  成分の電圧値を算出し、算出した干渉信号の  $\sin$  成分と  $\cos$  成分の電圧値から、上記干渉光学系 140 を構成している上記ビームスプリッタ 41 から測定面 10 までの距離  $D_R$  を求める。

20

【0060】

ここで、この振動計測装置 100 では、光分合波器 131 を介して、チャンネル毎に 2 つ以上の周波数成分を含む複数チャンネルの測定光を測定面 10 の複数の測定点に照射し、上記測定面 10 で反射されて戻ってきた複数チャンネルの測定光を 1 つに束ねて干渉光学系 140 に入射するので、図 7 (A)、(B) に示すように、干渉信号の周波数成分の相対位相は距離  $m = c / \Delta f$  当たり 2 の割合で変化する。  $\Delta f$  は光周波数コムの周波数間隔であるから数 10 GHz 程度で、光の周波数よりもはるかに低い。  $\Delta f = 1 \text{ GHz} \sim 30 \text{ GHz}$  とすると、距離  $m$  は光の波長に比べればはるかに長い 300 mm ~ 10 m

30

である。したがって、相対位相を計測することにより静止状態の高さ情報を得ることができる。また、振動測定においても、1 つの周波数の干渉信号は光波長の半分 (数百 nm) の周期性を持つため、感度が高く、サンプリング周期内に半波長以上変位する場合は正しく測定できないが、相対位相は、変位に対する感度が低いので、1 測定時間内に  $m / 2$  以内での変位であれば正しく測定することができる。

【0061】

すなわち、この振動計測装置 100 では、光源部 110 から出射される所定の周波数間隔のスペクトルであり、互いに位相同期され干渉性のある基準光と測定光とを干渉光学系 140 により分割し、分割した参照光を参照光学系 120 に入射するとともに分割した測定光を測定光学系 130 に入射し、入射された測定光をチャンネル毎に 2 つ以上の周波数成分を含む複数チャンネルの測定光に分離して、複数チャンネルの測定光を測定面 10 の複数の測定点に照射し、上記測定面 10 で反射されて戻ってきた複数チャンネルの測定光を 1 つに合わせる光分合波器 131 を備える測定光学系 130 により、上記測定面 10 の複数の測定点で反射された測定光を上記光分合波器 131 を介して上記干渉光学系 140 に戻し、上記干渉光学系 140 において、測定面 10 で反射され光分合波器 131 を介して入射された測定光と、参照光学系 120 から入射された参照光とを干渉させ、上記干渉光学系 140 により発生された干渉光  $L_x$  に含まれる光スペクトルを光スペクトル分離部により分離して複数の光検出器からなる光検出部 150 で検出することにより、信号処理部 160 において、上記検出部 150 により検出した各スペクトル成分を解析し、各チャンネルの周波数成分の位相情報から上記測定面 10 の複数の測定点における振動情報を得ると

40

50

ともに、各チャンネル内の各周波数成分の相対位相情報から上記測定面10の複数の測定点における高さ情報を得る。

【0062】

これにより、複雑な光軸調整を個別の振動計測装置においてする必要がなく、測定点間の時刻の同期に配慮しなくても多点の同期を必要とする測定対象の測定面10の振動情報を計測することができ、また、各チャンネル内の各周波数成分の相対位相情報から上記測定面10の複数の測定点における高さ情報を得ることができる。

【0063】

ここで、この振動計測装置100では、上記光分合波器131により分波された複数のチャンネルの測定光を測定面10に照射するに当たり、図8に示すように、測定面10の長手方向(x方向)に沿った直線上に配置した各チャンネルのヘッド部 $H_1 \sim H_n$ を介して各チャンネルの測定光 $L_{CH1} \sim L_{CHn}$ を照射することにより、測定面10の直線上に位置する複数の測定点における振動情報と高さ情報を複数点同時に計測することができる。また、上記測定面10の長手方向(x方向)に沿った直線上に配置した各チャンネルのヘッド部 $H_1 \sim H_n$ をx方向に直交するy方向に移動させる走査手段を設けることにより、測定面10について振動情報と高さ情報を2次元で計測することもできる。

【0064】

なお、高さ情報は失われてしまうが、例えば、図9(A)に示すように、各チャンネルの測定光 $L_{CH1} \sim L_{CHn}$ に含まれる複数の周波数の光を1周波数が1測定点に対応するように分離する光分散素子135を各ヘッド部 $H_{CH1} \sim H_{CHn}$ に設け、図9(B)に示すように、各チャンネルのヘッド部 $H_{CH1} \sim H_{CHn}$ でそれぞれy方向の3点の測定点に測定光を照射することにより、測定面10について振動情報を2次元で計測することもできる。

【0065】

さらに、この振動計測装置100では、例えば、図10に示すように、2列に配置した各チャンネルのヘッド部 $H_{CH1} \sim H_{CHn}$ を介して各チャンネルの測定光 $L_{CH1} \sim L_{CHn}$ を照射することにより、測定面10の捻れも計測することができる。

【0066】

以上説明した実施の形態では、検出部150において、上記干渉光学系140から入射される干渉光 $L_x$ を偏光ビームスプリッタ151により直交する2つの偏光成分の光 $L_{x1}$ 、 $L_{x2}$ に分離して2つの光検出部152A、152Bで検出する波長分割直交移相ホモダイン検波を行うようにした振動計測装置100に本発明を適用したが、本発明は、例えば図11に示すように、検出部250において、波長分割ヘテロダイン検波を行う振動計測装置200に適用することもできる。

【0067】

この振動計測装置200において、上記振動計測装置100と共通する構成要素については、その詳細な説明を省略する。

【0068】

この振動計測装置200は、参照光 $L_R$ と測定光 $L_M$ とを出射する光源部210、上記参照光 $L_R$ が入射される参照光学系220、上記測定光 $L_M$ が入射される測定光学系測定光学系230、上記参照光学系220を介して上記参照光 $L_R$ が入射されるとともに上記測定光学系230を介して上記測定光 $L_M$ が入射される干渉光学系240、上記干渉光学系240で発生した干渉光 $L_x$ を検出する検出部250、上記検出部250により検出された干渉光 $L_x$ の検出出力を解析する信号処理部260などからなる。

【0069】

この振動計測装置200において、参照光学系220は、干渉光学系240を構成しているビームスプリッタ241により分離された参照光 $L_R$ が周波数シフタ121を介して参照面222に入射され、上記参照面222で反射した参照光 $L_R'$ が上記周波数シフタ222を介して上記干渉光学系240に戻るようになっている。

【0070】

10

20

30

40

50

上記周波数シフタ 222 は、発振器 223 の出力により動作し、上記干渉光学系 240 から入射された参照光  $L_R$  の周波数を  $f_a$  だけシフトさせ、この周波数をシフトさせた基準光を出射する。上記周波数シフタ 222 は、例えば内部に発生した超音波により音響光学相互作用で参照光の位相を変化させる音響光学変調器 (AOM: acoustooptic modulator) からなる。

【0071】

また、検出部 250 は、上記干渉光学系 240 において、上記参照光学系 220 と測定光学系 230 から戻される参照光  $L_R'$  と測定光  $L_M'$  を上記ビームスプリッタ 241 で重ね合わせ、干渉させることにより発生される干渉光  $L_X$  を分光素子 251 により各光スペクトル成分に分解して光検出器アレイ 252 により検出するようになっている。

10

【0072】

この振動計測装置 200 において、光源部 210 のレーザ光源 211 から出射されるレーザ光の周波数を、光周波数コム発生器 212 に発振器 213 から与えられる変調信号の周波数を  $f_m$  とすると、図 12 の (A) に示すように、中心 (0 次) 周波数が  $\nu$  で、 $n$  次コムモード周波数が  $\nu + n f_m$  の測定光  $L_M'$  が上記測定光学系 230 を介して上記干渉光学系 240 に戻され、図 12 の (B) に示すように、中心 (0 次) 周波数が  $\nu + f_a$  で、 $n$  次コムモード周波数が  $\nu + f_a + n f_m$  の参照光  $L_R'$  が上記参照系 230 を介して上記干渉光学系 240 に戻される。

【0073】

したがって、上記干渉光学系 240 において発生される干渉光  $L_X$  のビート周波数は、0 次の周波数が  $(\nu + f_a) - \nu = f_a$  で、 $n$  次周波数が  $\{\nu + f_a + n f_m\} - (\nu + n f_m) = f_a$  (ここで、 $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ )、すなわち、すべて  $f_a$  になる。

20

【0074】

すなわち、上記検出部 250 の光検出器アレイ 252 の各素子では、すべてビート周波数が  $f_a$  の各光スペクトル成分が検出される。

【0075】

ここで、 $n$  次モードの干渉波の電界  $e_n(t)$  は、次の (2) 式にて示される。

【0076】

【数 1】

30

$$e_n(t) = E_{Tn} e^{j\{2\pi(\nu + n f_m)t + \theta_n\}} + E_{Rn} e^{j\{2\pi(\nu + f_a + n f_m)t\}} \dots (2) \text{式}$$

測定光
位相
参照光

【0077】

この (2) 式において、 $\nu$  はレーザ周波数、 $f_a$  はシフト周波数、 $n$  はコムモード次数、 $f_m$  は変調周波数、 $E_{Tn}$  は測定光の電界、 $E_{Rn}$  は参照光の電界である。さらに、 $\theta_n$  は、参照光パルスの  $n$  次モードの位相に対する測定光パルスの相対位相である。

40

【0078】

そして、上記光検出器アレイ 252 による検出出力電流  $i_n(t)$  は、次の (3) 式にて示される。

【0079】

【数2】

$$i_n(t) = a \left[ E_{Tn}^2 + E_{Rn}^2 + \underbrace{2E_{Tn}E_{Rn} \cos(2\pi f_a t - \theta_n)}_{\substack{\text{ビート信号} \\ \text{振幅}(E_{Tn})\text{と位相}\theta_n\text{の情報を含む。}}} \right] \dots (3) \text{式}$$

【0080】

この(3)式において、aは比例定数である。

10

【0081】

したがって、信号処理部260では、光検出器アレイ252で同時に検出された交流信号 $i_n(t)$ の位相と振幅を比較することによりサイドバンド間の相対位相・振幅をリアルタイムに知ることができる。

【0082】

干渉信号 $L_x$ の直流成分を測る場合、測定された電圧値から測定光の振幅と隣接サイドバンド間の位相差を求めることは容易でないが、この振動計測装置200のように参照光 $L_R$ の経路に周波数シフタ222を挿入することにより、光検出器アレイ252で観測される信号がシフト周波数 $f_a$ になるため、信号処理部260における信号処理による位相比較が行いやすくなり、また、交流成分を観測しているので1モードあたり1個の検出器で干渉信号の位相と振幅を知ることができる。

20

【0083】

この振動計測装置200では、光源部210から出射される所定の周波数間隔のスペクトルであり、互いに位相同期され干渉性のある基準光 $L_R$ と測定光 $L_M$ とを干渉光学系240により分割し、分割した参照光 $L_R$ を参照光学系220に入射するとともに分割した測定光 $L_M$ を測定光学系230に入射し、入射された測定光 $L_M$ をチャンネル毎に2つ以上の周波数成分を含む複数チャンネルの測定光 $L_{CH1} \sim L_{CHn}$ に分離して、複数チャンネルの測定光 $L_{CH1} \sim L_{CHn}$ を測定面20の複数の測定点に照射し、上記測定面20で反射されて戻ってきた複数チャンネルの測定光 $L_{CH1}' \sim L_{CHn}'$ を1つに合わせる光分合波器231を備える測定光学系230により、上記測定面20の複数の測定点で反射された測定光 $L_{CH1}' \sim L_{CHn}'$ を上記光分合波器231を介して上記干渉光学系240に戻し、上記干渉光学系240において、測定面20で反射され光分合波器231を介して入射された測定光 $L_M'$ と、参照光学系220から入射された参照光 $L_R'$ とを干渉させ、上記干渉光学系240により発生された干渉光 $L_x$ に含まれる光スペクトルを分光素子251により分離して光検出器アレイ252からなる光検出部250で検出することにより、信号処理部260において、上記検出部250により検出した各スペクトル成分を解析し、各チャンネルの周波数成分の位相情報から上記測定面20の複数の測定点における振動情報を得るとともに、各チャンネル内の各周波数成分の相対位相情報から上記測定面20の複数の測定点における高さ情報を得る。

30

【0084】

これにより、複雑な光軸調整を個別の振動計測装置においてする必要がなく、測定点間の時刻の同期に配慮しなくても多点の同期を必要とする測定対象の測定面20の振動情報を計測することができ、また、各チャンネル内の各周波数成分の相対位相情報から上記測定面20の複数の測定点における高さ情報を得ることができる。

40

【0085】

また、上述の振動計測装置100、200では、光源部110、210においてそれぞれ1つの光周波数コム発生器112、212により発生される光周波数コムを参照光 $L_R$ と測定光 $L_M$ として用いて振動計測を行うようにしたが、本発明は、例えば、図13に示すように、参照光 $L_R$ と測定光 $L_M$ を2つの光周波数コム発生器313A、313Bにより発生される光周波数コムを参照光 $L_R$ と測定光 $L_M$ として用いて振動計測を行う振動計

50

測装置 300 に適用することもできる。

【0086】

この振動計測装置 300 は、参照光  $L_R$  と測定光  $L_M$  とを出射する光源部 310、上記参照光  $L_R$  が入射される参照光学系 320、上記測定光  $L_M$  が入射される測定光学系 330、上記参照光学系 320 を介して上記参照光  $L_R$  が入射されるとともに上記測定光学系 330 を介して上記測定光  $L_M$  が入射される干渉光学系 340、上記干渉光学系 340 で発生した干渉光  $L_X$  を検出する検出部 350、上記検出部 350 により検出された干渉光  $L_X$  の検出力を解析する信号処理部 360 などからなる。

【0087】

この振動計測装置 300 において、光源部 310 は、2 台の光周波数コム発生器 313 A, 313 B を用いて、互いに変調周波数及び中心周波数が異なり、互いに位相同期され干渉性のある参照光と測定光と発生するものであって、周波数が  $f_0$  のレーザ光を出射するレーザ光源 311、このレーザ光源 311 から出射されたレーザ光がビームスプリッタ 312 により分割されて入射される 2 台の光周波数コム発生器 313 A, 313 B、上記 2 台の光周波数コム発生器 313 A, 313 B により個別に発生された光周波数コムを参照光と測定光として重ね合わせて出射する偏光ビームスプリッタ (PBS) 318 等からなる。

10

【0088】

この光源部 310 において、レーザ光源 311 から出射される周波数が  $f_0$  のレーザ光は、ビームスプリッタ 312 により分割され、分割された一方のレーザ光が光周波数コム発生器 313 A に直接入射され、分割された他方のレーザ光が周波数シフタ (AOF S) 314 を介して光周波数コム発生器 313 B に入射される。

20

【0089】

上記周波数シフタ 314 は、発振器 315 により与えられる発振信号により駆動され、上記光周波数コム発生器 313 B に入射するレーザ光の周波数を  $f_{a.o.m}$  だけシフトする。上記周波数シフタ 317 は、例えば内部に発生した超音波により音響光学相互作用で入射光の位相を変化させる音響光学変調器 (AOM: acoustooptic modulator) で構成される。

【0090】

上記光周波数コム発生器 313 A は、上記ビームスプリッタ 312 により分割された一方のレーザ光を発振器 316 A により与えられる周波数が  $f_m$  の変調信号で変調することにより、光周波数コムを発生する。この光周波数コム発生器 313 A により発生された光周波数コムは、測定光  $L_M$  として偏光ビームスプリッタ 318 に入射される。

30

【0091】

また、上記光周波数コム発生器 313 B は、上記ビームスプリッタ 312 により分割され、上記周波数シフタ 314 により周波数シフトされたレーザ光を発振器 316 B により与えられる周波数が  $f_m + f_m$  の変調信号で変調することにより、光周波数コムを発生する、この光周波数コム発生器 313 B により発生された光周波数コムは、半波長 ( $\lambda/2$ ) 板 317 を介して参照光  $L_R$  として上記偏光ビームスプリッタ 318 に入射される。

【0092】

ここで、上記 2 台の光周波数コム発生器 313 A, 313 B に変調信号を与える発振器 316 A, 316 B は、図示しない共通の基準発振器により位相同期されることで、 $f_m + f_m$  と  $f_m$  との相対周波数が安定化されている。

40

【0093】

光周波数コム発生器 313 A, 313 B には、例えばレーザ外部で光の強度や位相を変調する電気光学変調器 (EOM) と、この EOM を挟むように対向して配設された反射鏡とからなり、電気光学変調器と反射鏡とで光発振器を構成するファブリペロー型電気光学変調方式のものや、 $LiNbO_3$  結晶を使用した位相変調器、強度変調器、半導体の吸収や位相の変化を利用する変調器等が用いられる。

【0094】

50

上記光源部 310 として 2 台の光周波数コム発生器 313A, 313B を用いることにより、測定光  $L_M$  と参照光  $L_R$  との間で光周波数コムの周波数をモード毎にずらすことが可能となる。これにより、干渉信号の周波数をモードによって違った値にできるため、光検出の際に波長分割しなくても、干渉信号の周波数解析により各モードの位相情報を分離することが可能となる。

【0095】

上記光源部 310 は、光周波数コム発生器 313A, 313B により、例えば図 14 (A)、(B) に示すような周波数の光周波数コム (OFC1、OFC2) を出射する。図 14 (A) は、光周波数コム発生器 313A から出射された測定光としての光周波数コム (OFC1) を表している。また、図 14 (B) は、周波数シフタ 314 で周波数がシフトされた参照光としての光周波数コム (OFC2) を表している。図 14 に示す光周波数コムは、光パルスの繰り返し周波数に一致したコム状のモードを持っており、図 14 (A) に示す測定光のモード間隔が  $f_m$  であり、図 14 (B) に示す参照光のモード間隔が  $f_m + f_m$  である。

10

【0096】

図 14 に示す光周波数コムの例は、スペクトル中央のモードを中心にモード番号を付け、 $N = 0$  のモード間の干渉信号の周波数を  $f_a$  と仮定している。図 14 に示す光周波数コムの例において、中心周波数成分を 0 番目として数えてモードにつけた番号を  $N$  とすると、 $N$  番目のビート周波数  $= f_a + N f_m$  となり、 $N$  番目のビート周波数が光周波数コムのモードによって異なる周波数に出る。

20

【0097】

上記偏光ビームスプリッタ 318 は、光周波数コム発生器 313A から入射された測定光  $L_M$  と半波長 ( $\lambda/2$ ) 板 317 を介して光周波数コム発生器 213B から入射された参照光  $L_R$  とを混合して、参照光  $L_R$  と測定光  $L_M$  を直交する偏光で重ね合わせた光を出射する。

【0098】

以上説明したように、上記光源部 310 は、単一レーザ光を入力とし、駆動周波数がそれぞれ異なる 2 台の光周波数コム発生器 313A, 313B を備えることにより、同じビート周波数に複数の光周波数コムの情報が重ならないようにする。

【0099】

なお、上記光源部 310 には、それぞれ周期的に強度又は位相が変調され、かつ、キャリア周波数が安定化された 2 台の光源、例えばモード同期レーザを用いてもよい。

30

【0100】

この振動計測装置 300 において、干渉光学系 340 には、上記光源部 310 から出射される上記偏光ビームスプリッタ 318 により参照光  $L_R$  と測定光  $L_M$  を直交する偏光で重ね合わせた光が入射される。

【0101】

干渉光学系 340 は、上記光源部 310 から参照光  $L_R$  と測定光  $L_M$  を直交する偏光で重ね合わせた光が入射され、入射された光を分割するビームスプリッタ 341 と、このビームスプリッタ 341 により分割された一方の光が入射される第 1 の偏光子 344A と、このビームスプリッタ 341 により分割された他方の光が光ファイバ 342 を介して入射される偏光ビームスプリッタ 343 と、上記偏光ビームスプリッタ 343 から上記光ファイバ 243 を介して戻されてくる光が上記ビームスプリッタ 341 を介して入射される第 2 の偏光子 344B を備える。

40

【0102】

この干渉光学系 340 において、上記ビームスプリッタ 341 は、上記光源部 310 から入射される参照光  $L_R$  と測定光  $L_M$  を直交する偏光で重ね合わせた光を分割する。上記ビームスプリッタ 341 により分割された一方の光は、第 1 の偏光子 344A を介して参照光  $L_R$  と測定光  $L_M$  の干渉光  $S_1$  として検出部 350 の第 1 の光検出器 351A に入射される。また、上記ビームスプリッタ 341 により分割された他方の光は、上記光ファイ

50

バ 3 4 2 を介して偏光ビームスプリッタ 3 4 3 に入射される。

【 0 1 0 3 】

また、偏光ビームスプリッタ 3 4 3 は、上記光ファイバ 3 4 2 を介して入射される参照光  $L_R$  と測定光  $L_M$  を直交する偏光で重ね合わせた光に含まれる参照光  $L_R$  と測定光  $L_M$  を分割する。そして、この偏光ビームスプリッタ 3 4 3 により分割された参照光  $L_R$  は、参照光学系 3 2 0 に入射され、また、分割され測定光  $L_M$  は測定光学系 3 3 0 に入射される。

【 0 1 0 4 】

また、上記偏光ビームスプリッタ 3 4 3 には、上記参照光学系 3 2 0 から戻されてくる参照光  $L_R'$  が入射されるとともに、上記測定光学系 3 3 0 から戻されてくる測定光  $L_M'$  が入射される。そして、上記偏光ビームスプリッタ 3 4 3 は、上記参照光  $L_R'$  を測定光  $L_M'$  を重ね合わせる。この上記光ファイバ 3 4 2 を介して上記ビームスプリッタ 3 4 1 に戻す。上記偏光ビームスプリッタ 3 4 2 から上記光ファイバ 3 4 2 を介してビームスプリッタ 3 4 1 に戻されてくる光は、上記ビームスプリッタ 3 4 1 から第 2 の偏光子 3 4 4 B を介して、上記参照光  $L_R'$  を測定光  $L_M'$  の干渉光  $S_2$  として上記検出部 3 5 0 の第 2 の光検出器 3 5 1 B に入射される。

【 0 1 0 5 】

ここで、この振動計測装置 3 0 0 において、上記光源部 3 1 0 から上記干渉光学系 3 4 0 に入射される参照光  $L_R$  と測定光  $L_M$  が重ね合わされた光は、参照光  $L_R$  と測定光  $L_M$  の偏光が直交しており、そのままでは干渉光として検出することができないので、上記干渉光学系 3 4 0 では、上記第 1 の偏光子 3 4 4 A の透過成分として参照光  $L_R$  と測定光  $L_M$  の干渉光  $S_1$  を出射し、また、上記第 2 の偏光子 3 4 4 B の透過成分として参照光  $L_R'$  と測定光  $L_M'$  の干渉光  $S_2$  を出射する。上記干渉光学系 3 4 0 の第 1 の偏光子 3 4 4 A は、参照光  $L_R$  と測定光  $L_M$  の偏光に対して斜めになるように偏光の向きを調整されている。また、上記干渉光学系 3 4 0 の第 2 の偏光子 3 4 4 B は、参照光  $L_R'$  と測定光  $L_M'$  の偏光に対して斜めになるように偏光の向きを調整されている。

【 0 1 0 6 】

また、この振動計測装置 3 0 0 において、参照光学系 3 2 0 は、上記干渉光学系 3 4 0 から上記偏光ビームスプリッタ 3 4 3 を介して入射される参照光  $L_R$  を反射する参照面 3 2 1 を備え、上記参照面 3 2 1 により反射した参照光  $L_R'$  を上記参照光学系 3 2 0 に戻すようになっている。

【 0 1 0 7 】

また、この振動計測装置 3 0 0 において、測定光学系 3 3 0 は、上記干渉光学系 3 4 0 から上記偏光ビームスプリッタ 3 4 3 を介して測定光が  $L_M$  入射され、入射された測定光  $L_M$  をチャンネル毎に 2 つ以上の周波数成分を含む複数チャンネルの測定光  $L_{CH1} \sim L_{CHn}$  に分離して、複数チャンネルの測定光  $L_{CH1} \sim L_{CHn}$  を測定面 3 0 上の対応する複数の測定点に照射し、上記測定面 3 0 で反射されて戻ってきた複数チャンネルの測定光  $L_{CH1}' \sim L_{CHn}'$  を 1 つに合わせる光分合波器 3 3 1 を備え、上記測定面 3 0 において複数の測定点で反射された測定光  $L_{CH1}' \sim L_{CHn}'$  を上記光分合波器 3 3 1 を介して上記干渉光学系 3 4 0 に戻すようになっている。

【 0 1 0 8 】

上記光分合波器 3 3 1 は、入射された測定光  $L_M$  をチャンネル毎に 2 つ以上の周波数成分を含む複数チャンネルの測定光  $L_{CH1} \sim L_{CHn}$  に分離して、上記複数チャンネルの測定光  $L_{CH1} \sim L_{CHn}$  を測定面 3 0 上の複数の測定点に照射する分波機能と、上記測定面 3 0 で反射されて戻ってきた複数チャンネルの測定光  $L_{CH1}' \sim L_{CHn}'$  を 1 つに束ねて上記測定面 3 0 で反射されて戻ってきた測定光  $L_M'$  として上記干渉光学系 3 4 0 に入射する合波機能を有するもので、光を合波・分波するための部品としては、プリズム、干渉膜フィルタ、あるいは回折格子などの分光素子が用いられる。

【 0 1 0 9 】

また、この振動計測装置 3 0 0 において、検出部 3 5 0 は、上記干渉光学系 3 4 0 を

10

20

30

40

50

介して戻されてくる上記参照光  $L_R$  と測定光  $L_M$  との干渉光  $S_1$  の光強度と、上記干渉光学系 340 を介して戻されてくる上記参照光  $L_{R'}$  と測定光  $L_{M'}$  との干渉光  $L_X$  の光強度を個別に検出する第 1 の光検出器 351A と第 2 の光検出器 351B からなる。

【0110】

この検出部 350 は、上記参照光  $L_R$  と測定光  $L_M$  との干渉光  $S_1$  の光強度を上記第 1 の光検出器 351A により検出するとともに、上記参照光  $L_{R'}$  と測定光  $L_{M'}$  との干渉光  $S_2$  の光強度を第 2 の光検出器 351B により検出して、上記第 1 の光検出器 351A と上記第 2 の光検出器 351B の各検出出力を信号処理部 360 に入力する。

【0111】

この振動計測装置 300 では、光源部 310 において、レーザ光源 311 が出射するレーザ光に基づいて 2 台の光周波数コム発生器 313A, 313B により参照光  $L_R$  と測定光  $L_M$  を個別の光周波数コムとして発生する過程、すなわち、ビームスプリッタ 312 で分岐してから偏光ビームスプリッタ 318 で重ねるまでの間で遅延時間に差が生じてしまう可能性があるため、上記干渉光学系 340 から上記第 1 の偏光子 344A を介して入射される上記参照光  $L_R$  と測定光  $L_M$  との干渉光  $S_1$  の光強度を第 1 の光検出器 351A により検出し、この第 1 の光検出器 351A による上記干渉光  $S_1$  の検出出力を信号処理部 360 において周波数解析して、上記光周波数コムを発生する過程での時間差を計測する。また、上記干渉光学系 340 から第 2 の偏光子 344B を介して入射される上記参照光  $L_{R'}$  と測定光  $L_{M'}$  との干渉光  $S_2$  の光強度を第 2 の光検出器 351B により検出し、この第 2 の光検出器 351B による上記干渉光  $S_2$  の検出出力を上記信号処理部 360 において周波数解析して、上記参照光学系 320 から戻されてくる上記参照光  $L_{R'}$  と上記測定光学系 320 から戻されてくる上記測定光  $L_{M'}$  の時間差を計測する。

【0112】

そして、上記信号処理部 360 では、上記第 2 の光検出器 351B の検出出力を周波数解析することにより計測される上記参照光  $L_{R'}$  と上記測定光  $L_{M'}$  の時間差から、上記第 1 の光検出器 351A の検出出力を周波数解析することにより計測される上記参照光  $L_R$  と上記測定光  $L_M$  の時間差を引くことで、参照面 321 までの距離と測定面 30 までの距離との差を光が伝搬する時間を求め、求めた時間に光速をかけた値を測定波長における屈折率で割ることにより、上記測定面 30 までの絶対距離を求めることができる。

【0113】

この振動計測装置 300 では、所定の周波数間隔のスペクトルであり、互いに変調周波数及び中心周波数が異なり、互いに位相同期され干渉性のある基準光  $L_R$  と測定光  $L_M$  とを出射する光源 310 と、光源部 310 から出射される所定の周波数間隔のスペクトルであり、互いに位相同期され干渉性のある基準光  $L_R$  と測定光  $L_M$  とを干渉光学系 340 により分割し、分割した参照光  $L_R$  を参照光学系 320 に入射するとともに分割した測定光  $L_M$  を測定光学系 330 に入射し、入射された測定光  $L_M$  をチャンネル毎に 2 つ以上の周波数成分を含む複数チャンネルの測定光  $L_{CH1} \sim L_{CHn}$  に分離して、複数チャンネルの測定光  $L_{CH1} \sim L_{CHn}$  を測定面 30 の複数の測定点に照射し、上記測定面 30 で反射されて戻ってきた複数チャンネルの測定光  $L_{CH1}' \sim L_{CHn}'$  を 1 つに合わせる光分合波器 331 を備える測定光学系 320 により、上記測定面 30 の複数の測定点で反射された測定光  $L_{CH1}' \sim L_{CHn}'$  を上記光分合波器 331 を介して上記干渉光学系 340 に戻し、上記干渉光学系 340 において、測定面 30 で反射され光分合波器 331 を介して入射された測定光  $L_{M'}$  と、参照光学系 320 から入射された参照光  $L_{R'}$  とを干渉させ、上記干渉光学系 340 により発生された干渉光に含まれる光スペクトルを光スペクトル分離部により分離して光検出部 350 で検出し、信号処理部 360 において、上記検出部 350 による検出出力を周波数解析することにより、各チャンネルの周波数成分の位相情報から上記測定面 30 の複数の測定点における振動情報を得るとともに、各チャンネル内の各周波数成分の相対位相情報から上記測定面 30 の複数の測定点における高さ情報を得ることができる。

【符号の説明】

10

20

30

40

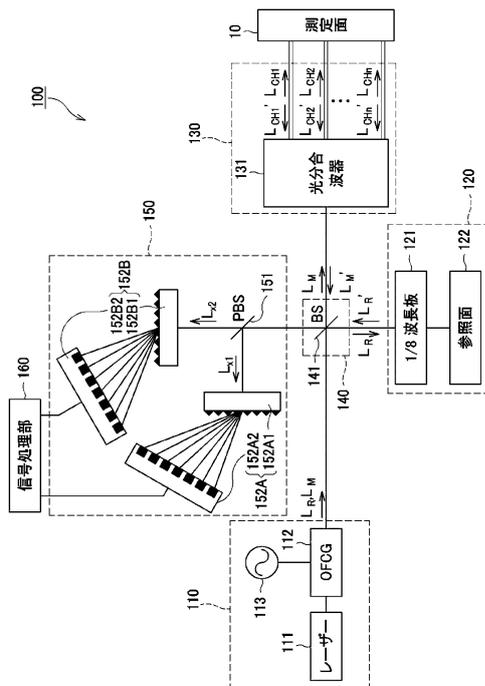
50

【 0 1 1 4 】

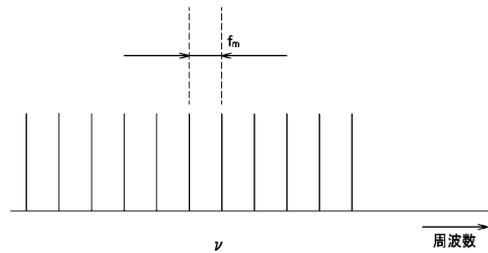
1 0 , 2 0 , 3 0 測定面、1 0 0 , 2 0 0 , 3 0 0 振動計測装置、1 1 0 , 2 1 0 , 3 1 0 光源部、1 1 1 , 2 1 1 , 3 1 1 レーザ光源、1 1 2、2 1 2、3 1 3 A、3 1 3 B 光周波数コム発生器、1 1 3、2 1 3、2 2 3、3 1 5、3 1 6 A、3 1 6 B 発振器、1 2 0、2 2 0、3 2 0 参照光学系、1 2 1 1 / 8 波長 ( / 8 ) 板、1 2 2、2 2 2、3 2 1 参照面、1 3 0、2 3 0、3 3 0 測定光学系、1 3 1、2 3 1、3 3 1 光分合波器、1 4 0、2 4 0、3 4 0 干渉光学系、1 4 1、2 4 1、3 4 1、3 1 2 ビームスプリッタ、1 5 0、2 5 0、3 5 0 検出部、1 5 1 偏光ビームスプリッタ、1 5 2 A、1 5 2 B 光検出部、1 6 0、2 6 0、3 6 0 信号処理部、2 5 1、1 5 2 A 1、1 5 2 B 1 分光素子、1 5 2 A 2、1 5 2 B 2、2 5 2 光検出器アレイ、2 2 1、3 1 4 周波数シフタ、3 1 7 半波長 ( / 2 ) 板、3 1 8、3 4 3 偏光ビームスプリッタ、3 4 2 光ファイバ、3 4 4 A、3 4 4 B 偏光子、3 5 1 A、3 5 1 B 第1の光検出器

10

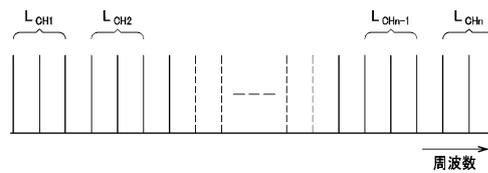
【 図 1 】



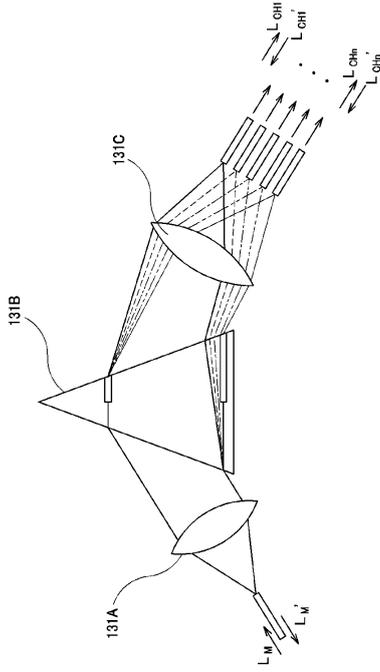
【 図 2 】



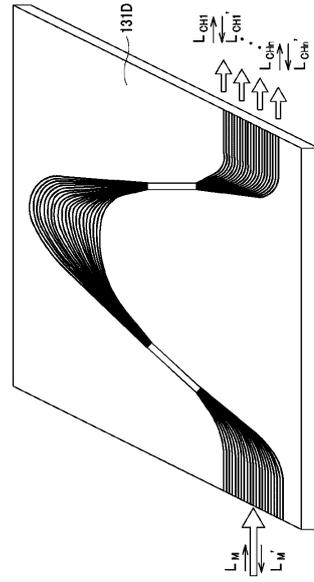
【 図 3 】



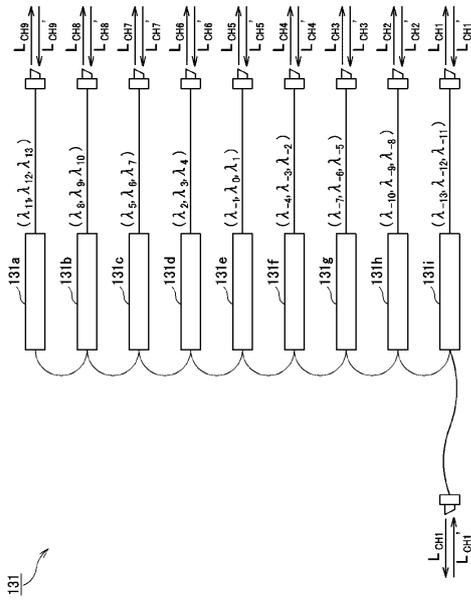
【 図 4 】



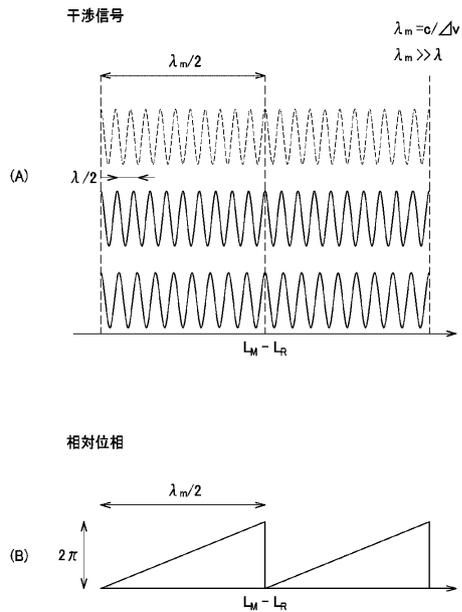
【 図 5 】



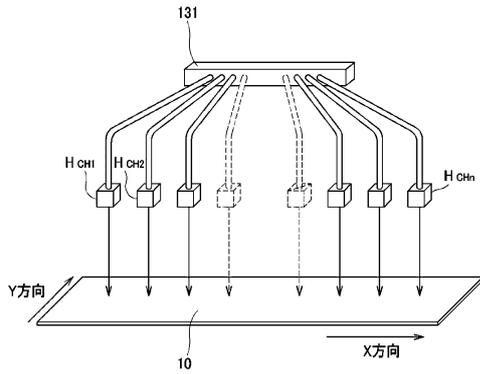
【 図 6 】



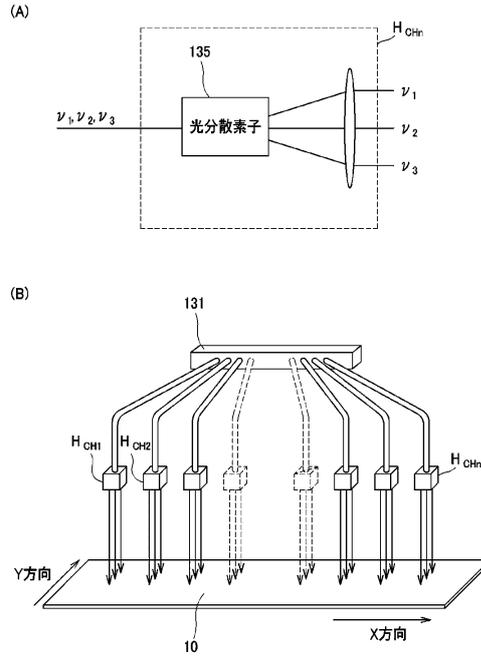
【 図 7 】



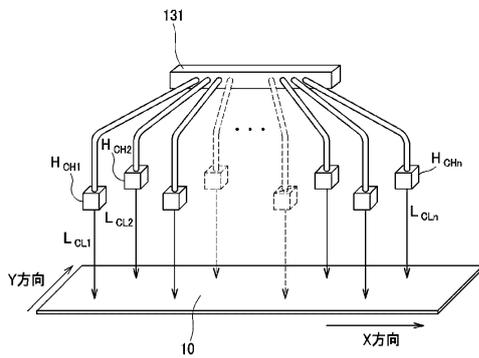
【図8】



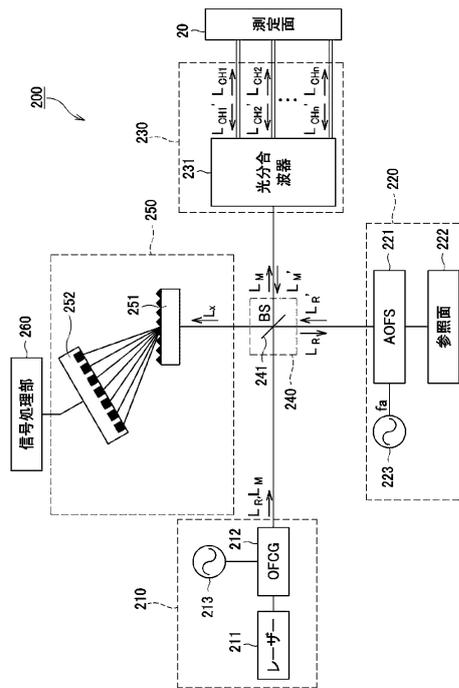
【図9】



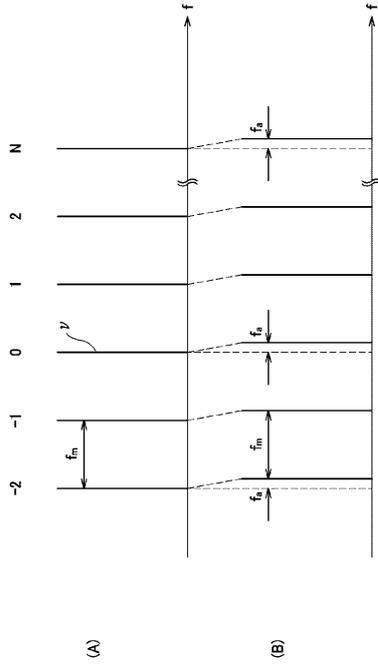
【図10】



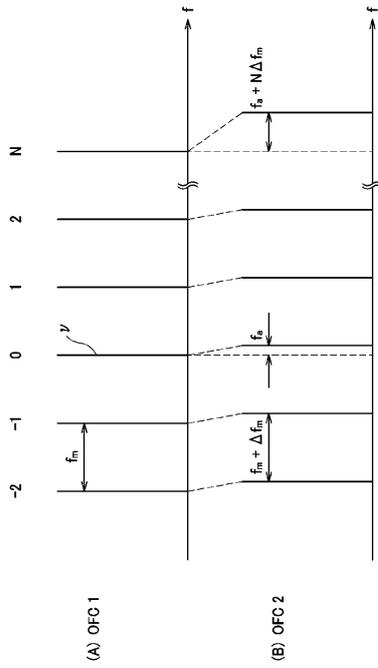
【図11】



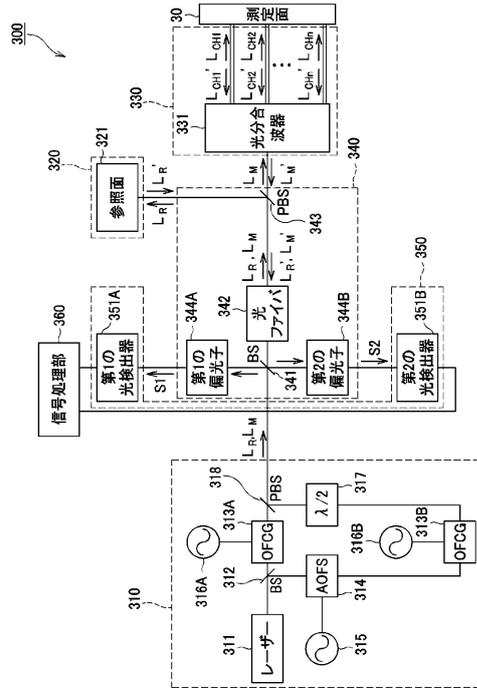
【図 1 2】



【図 1 4】



【図 1 3】



## フロントページの続き

- (72)発明者 興梠 元伸  
神奈川県横浜市旭区若葉台4-28-905
- (72)発明者 太田 和哉  
神奈川県鎌倉市植木233-10

審査官 高見 重雄

- (56)参考文献 特開2004-226093(JP,A)  
特開2005-321376(JP,A)  
特開2009-025245(JP,A)  
特開2008-202959(JP,A)  
特開2001-227911(JP,A)  
特開2005-069916(JP,A)  
特開2005-283155(JP,A)  
特開2008-101963(JP,A)  
特開2010-203860(JP,A)  
特開2008-157759(JP,A)  
特開2010-261911(JP,A)  
特開2006-138862(JP,A)  
特開平10-318827(JP,A)  
特開2003-207660(JP,A)  
特開昭59-024219(JP,A)  
特開2002-148110(JP,A)  
今井一宏, 太田和哉, 興梠元伸, 光コム干渉法による絶対距離測定, 応用物理学会学術講演会講演予稿集, 日本, 2008年 9月 2日, Vol.69th, No.3, Page.871  
今井一宏, 高精度リアルタイム測長(長さ, 形状計測)を可能とした光コム技術, 防衛技術ジャーナル, 日本, 2009年 5月 1日, Vol.29, No.5, Page.10-17

## (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01H 1/00 - 17/00  
G01N 21/17 - 21/61  
G01D 5/26 - 5/40  
JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamIII)