

令和 4 年 8 月 30 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04190

研究課題名（和文）低反射率FBG-FPIを用いた光ファイバ型多点振動センサ

研究課題名（英文）Fiber optic multipoint vibration sensor using Fabry-Perot interferometer consisting of Low-reflective Fiber Bragg Gratings

研究代表者

和田 篤（Wada, Atsushi）

防衛大学校（総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群）・電気情報学群
・教授

研究者番号：40434021

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：光ファイバ・ブラッグ・グレーティング(FBG)は特定の光を反射する光ファイバ型デバイスである。振動測定用のセンサ素子として低反射率FBGで構成したファブリペロー干渉計を導入する事でセンサの設置位置への制限を緩和した。半導体レーザーの電流を変調する事によって得られる高速な波長掃引を用いてセンサを読み出す事で、高速な測定を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来のFBG多点センサ方式では、測定時間、測定可能な計測点数、計測部配置の自由度のいずれかに大きな制限が存在している。本手法を用いれば、計測部の配置の自由度を確保しつつ、一本のファイバ上に設置した多数の測定点における振動を同時に測定可能なFBG 多点振動センシングを実現可能である。

研究成果の概要（英文）：Fiber Bragg grating (FBG) is a fiber optic type device that reflects a specific type of light. A Fabry-Perot interferometer consisting of a low reflectance FBG is introduced as the sensor element for vibration measurement, thereby relaxing the restrictions on the sensor installation position. The sensor is read out using a high-speed wavelength sweep obtained by modulating the current of a laser diode, resulting in a high-speed measurement.

研究分野：光応用計測

キーワード：光ファイバ 振動測定 干渉計 フーリエ変換 波長掃引 半導体レーザー

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

光ファイバ・ブラッググレーティング(FBG)とは特定の波長の光を反射する光ファイバ型デバイスである。FBGの反射波長は印加されたひずみや温度に対して線形に変化するため、反射波長の変化を読みとる事でひずみや温度を計測できる。FBGセンサは軽量で電磁干渉を受けない等の様々な利点があり、これを利用した、ひずみ、固体振動、音響、温度といった物理量のセンサが数多く提案されている。特に、同一ファイバ上に複数のFBGを設置し、一本のファイバだけで多点センシングが可能な点がFBGセンサの大きな魅力の一つである。

FBG多点センシングの手法は波長分割多重化方式(WDM)、時間分割多重化方式(TDM)、光周波数多重反射測定方式(OFDR)の3種に大別される。WDMでは、異なる反射波長のFBGを用いて、反射光の波長を鍵として計測部毎の信号を区別している。その為、各FBGの反射波長の差を十分大きくする必要があり、多重化できるFBGの数は光源の波長帯域幅で制限され、現実的な計測可能点数は20点程度である。一方、TDM及びOFDRではファイバ上におけるFBGの設置位置を鍵として計測部毎の信号を区別する。この二つの手法では、100点を超える計測点を同時に測定可能である。

また、実際に一本のファイバによるFBG多点センシングを行う場合、重要となるのがFBGの配置の自由度である。WDMではFBGの配置に制限はなく、ファイバ上のどの位置にでも自由にFBGを配置できる。一方、TDM及びOFDRではFBGの配置に制限があり、システムが発揮できる最大の同時測定可能点で測定を行うためには、FBGをファイバ上に等間隔に設置する必要がある。

つまり、100点以上の同時測定が可能なTDM及びOFDRにはFBGの配置に制限があり、制限のないWDMでは20点程度が限界である。FBGを用いた多点センシングに期待される用途として、航空機などの構造物の健全性監視がある。航空機への適用を例にとると、翼の先端、根元、可動部の周辺部等、ある程度離れた位置にある場所に数点から数十点ずつセンシング部位を設置したいという要望がある。しかし、そのような設置と振動測定を両立するFBG多点センシングはまだ実現されていない。

2. 研究の目的

本研究は、計測部の配置の自由度を確保しつつ、一本のファイバ上に設置した100点を超える測定点における振動を同時に測定可能なFBG多点振動センサを実現する事を目的とする。センシング素子として、低反射率FBGを用いて構成したファブリ・ペロー干渉計(FBG-FPI)を導入する。計測部からの信号は低反射率FBG-FPIの長さを鍵として区別される。

低反射率FBG-FPIは2つの低反射率FBGを間隔を空けてファイバ上に書き込むことで構成され、その反射スペクトルはFBGの反射スペクトルに正弦波状の構造を乗算した構造を有する。この正弦波の周期は2つのFBG間の間隔で決まっている。同一ファイバ上に間隔の異なる低反射率FBG-FPIを複数配置すると、ファイバ全体の反射スペクトルは異なる周波数の正弦波を重ね合わせた構造を有する。ここでファイバ全体の反射スペクトルをフーリエ変換すると、FPIを構成しているFBG間の間隔に一意に対応した周波数にピークをもつ周波数スペクトルを得られ、各FBG-FPI毎の信号を分離できる。

反射スペクトルの取得は半導体レーザーの直接変調を利用した波長掃引によって行う。半導体レーザーの発振波長は注入電流に依存して変化する。この電流変調による波長掃引は市販の波長可変レーザーよりもはるかに高速であり、これによって高速な計測を実現する。

3. 研究の方法

高速な多点測定を実現する上で必要となるのは、半導体レーザーの変調特性の把握である。半導体レーザーは注入電流の変化量が微小で低速であれば注入電流に対して線形に波長が変化するが、変調量が大きく高速な場合、その依存性は非線形である。波長変化参照用の干渉計をセンサシステムに追加し、参照用干渉計の信号と同期させて計測用の干渉信号を取り込み、信号処理の段階で補正を適用した。

半導体レーザーの注入電流変調による波長掃引範囲は1nm以下と狭い。この狭い範囲内でも各センサの応答が分離可能である事については、理論的な検討は完了しており、また、低い掃引周波数の条件下においては実験的に確認されている。掃引周波数を上げて振動測定を行い、都度判明する課題を解消していった。

4. 研究成果

(1) 波長掃引の高速化に伴う側帯波の影響とその抑制

半導体レーザーの電流変調による波長掃引速度を上げていくと掃引範囲が狭くなっていく。この際、読み出されたセンサ素子の反射スペクトルをそのままフーリエ変換すると、側帯波の影響による雑音が確認された。一方、この影響は一般的な窓関数を適よって用する事で取り除くことができた。

(2) センサ素子の高機能化

センサ素子の母材を通常のシングルモードファイバから偏波保持ファイバに変更する事で、ひずみと温度を同時に特定できる。試作した新たなセンサ素子を用いてひずみと温度の同時多点測定システムを構築し、実際に温度とひずみの多点同時測定が可能である事を実験的に確認した。

(3) 変調波形の条件の検討と測定的高速化

電流変調の条件を変更して測定的高速化を試みた。候補として採用した波形は鋸歯状波、三角波、正弦波である。検討の結果、正弦波が高速な測定には最も向いている事がわかった。また、正弦波で半導体レーザを電流変調した場合、得られる波長変化の波形は正弦波に近い波形であるが、正弦波とは異なる波形である事が実験的に確認できた。また、波長変化の波形は電流変調の振幅と周波数の変化に応じて変化する事がわかった。

(4) センサ信号の時間遅延による影響と補正

正弦波を変調波形として変調周波数を 500 kHz とする場合、測定のサンプリングレートは 1 MHz となる。このとき、一回の測定における解析時間区間幅は 1 μ s である。この条件下において FBG センサからの反射信号と波長参照用の干渉信号との間に 20 ~ 60 ns 程度の時間遅延がある場合、測定対象となっている振動の信号自体は解析によって取り出す事が可能である。しかし、取り出した測定に混入する雑音の量がこの時間遅延によって変化している事がわかった。

解析アルゴリズム内で時間遅延の補正を組み込んだ所、補正を導入する前の雑音のスペクトル密度が 30 ~ 90 $\text{p}\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$ であったのに対し、補正導入後の雑音のスペクトル密度は 20 ~ 40 $\text{p}\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$ となり、時間遅延の補正によって雑音を抑制する事が可能である事がわかった。

(5) 実現した測定速度と精度

現時点で実験的に実証されている測定速度と雑音は 1 MHz および 20 ~ 40 $\text{p}\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$ である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Bui Quoc Hung, Wada Atsushi, Fukushima Koken, Nakaya Koki, Soares Manuel Guterres, Tanaka Satoshi	4. 巻 28
2. 論文標題 Simultaneous multi-point measurement of strain and temperature utilizing Fabry-Perot interferometric sensors composed of low reflective fiber Bragg gratings in a polarization-maintaining fiber	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 13104 ~ 13104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.389844	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Wada Atsushi, Tanaka Satoshi, Takahashi Nobuaki	4. 巻 25
2. 論文標題 Partial scanning frequency division multiplexing for interrogation of low-reflective fiber Bragg grating-based sensor array	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optical Review	6. 最初と最後の頁 615 ~ 624
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10043-018-0455-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 仲矢 光希, 福嶋 匡謙, マヌエル グテレス ソアレス, 和田 篤, 田中 哲
2. 発表標題 電流変調半導体レーザを用いた低反射率FBG-FPI多点振動センシングにおける変調波形の検討
3. 学会等名 2020年秋季第81回応用物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三角波を変調波形に用いた電流変調半導体レーザによる低反射率FBG-FPI多点振動センシングの試み
2. 発表標題 仲矢 光希, 福嶋 匡謙, マヌエル グテレス ソアレス, 和田 篤, 田中 哲
3. 学会等名 2020年度第3回光ファイバ応用技術研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 ブイ クォック ハン, 和田 篤, 田中 哲
2. 発表標題 低反射率偏波保持型ファイバブラッググレーティングで構成したファブリ・ペロー干渉計による温度とひずみの同時測定
3. 学会等名 第44回光学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 ブイ クォック ハン, 和田 篤, 仲矢 光希, 田中 哲
2. 発表標題 低反射率偏波保持ファイバブラッググレーティングで構成したファブリ・ペロー干渉計センサによる温度とひずみの多点同時測定
3. 学会等名 2019年秋季第80回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 仲矢 光希, ブイ クォック ハン, 福嶋 匡謙, マヌエル グテレス ソアレス, 和田 篤, 田中 哲
2. 発表標題 電流変調半導体レーザを読み取りに用いた低反射率FBG-FPIひずみセンサの測定分解能の評価
3. 学会等名 2019年秋季第80回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 仲矢 光希, ブイ クォック ハン, 福嶋 匡謙, マヌエル グテレス ソアレス, 和田 篤, 田中 哲
2. 発表標題 電流変調半導体レーザを読み取りに用いた低反射率FBG-FPI多点振動センサの試み
3. 学会等名 2020年第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 和田 篤, ブイ クォック ハン, 仲矢 光希, 田中 哲
2. 発表標題 低反射率光ファイバ・ブラッグ・グレーティングで構成したファブリ・ペロー干渉計による多点固体振動計測
3. 学会等名 2019年度第6回光ファイバ応用技術研究会,
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Bui Quoc Hung, Atsushi Wada, Koken Fukushima, Koki Nakaya, Manuel Guterres Soares, Satoshi Tanaka
2. 発表標題 Simultaneous multipoint sensing of strain and temperature using Fabry-Perot interferometers consisting of low reflective FBGs written in polarization maintaining fiber
3. 学会等名 8th Asia Pacific Optical Sensors Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 ブイ クォック ハン, 和田 篤, 田中 哲
2. 発表標題 低反射率FBG-FPIを用いたひずみセンサの測定分解能の評価
3. 学会等名 2018年秋季第79回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 ブイ クォック ハン, 和田 篤, 田中 哲, 竹山 隼人, 福嶋 匡謙
2. 発表標題 低反射率偏波保持型ファイバブラッググレーティングで構成したファブリ・ペロー干渉計を用いた多点ひずみセンシング
3. 学会等名 2018年日本光学会年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 ブイ クォック ハン, 和田 篤, 田中 哲
2. 発表標題 偏波保持ファイバに書き込まれた低反射率ファイバブラッググレーティングを用いたファブリ・ペロー干渉計型ひずみセンサ
3. 学会等名 第3回フォトニクス研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 ブイ クォック ハン, 和田 篤, 田中 哲
2. 発表標題 低反射率偏波保持型ファイバブラッググレーティングで構成したファブリ・ペロー干渉計の温度依存性測定
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関