

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 27 日現在

機関番号：82723

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820176

研究課題名(和文) 光周波数多重化とFBGを用いた多点同時振動センサの研究

研究課題名(英文) Multipoint vibration sensing using fiber Bragg gratings and optical frequency domain reflectometry

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・その他部局等・准教授)

研究者番号：40434021

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：複数の個所に生じた固体振動を光ファイバブラッググレーティングを用いて同時に測定する方法の研究を行った。実証実験では、3か所に発生させた、振幅  $30\ \mu$  (はひずみの単位)、周波数 3 kHz 程度の固体振動を  $10\ \mu$ s の測定時間で測定することに成功した。各測定において混入する単位周波数当たり雑音は  $6\ \text{n}/\text{Hz}$  と小さく、測定結果として得られた振動振幅の値も市販の測定器と同程度に正確であった。測定可能点数は実証用の試作品でも 100 点程度であり、測定時間を長めにとるか、測定機器をより高速な製品に置き換える事で更に多数の測定点を同時測定可能である。

研究成果の概要(英文)：Multipoint vibration sensing is demonstrated using fiber Bragg gratings and optical-frequency-domain reflectometry (OFDR). Using OFDR, a few thousand arrayed sensors can be monitored with a measurement time limited by the wavelength-scanning rate of the light source. Here, a laser diode serves as the source. Its wavelength can be modulated by varying the injection current at high frequency using a laser-diode controller, so that high-speed scanning can be achieved. It is experimentally demonstrated that the proposed sensor achieves vibration measurement with a noise density of  $6\ \text{n}/\text{Hz}$ , measurement time of  $10\ \mu$ s. In this experimental set up the maximum number of sensors that can be placed along a single fiber is 125. The maximum number can be increased by using slow wavelength-sweep or high-speed data acquisition.

研究分野：光応用計測

キーワード：光ファイバ センシング 振動センサ 干渉計測

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)は図 1 に示すように光ファイバのコア中に周期的な屈折率変化を書き込んだものであり、周期に応じた特定の波長の光を反射する。

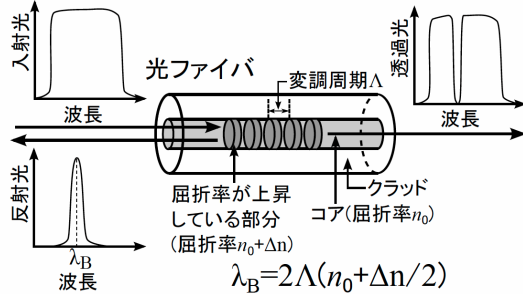


図 1: 光ファイバブラッググレーティング

図 2 に示すように、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。

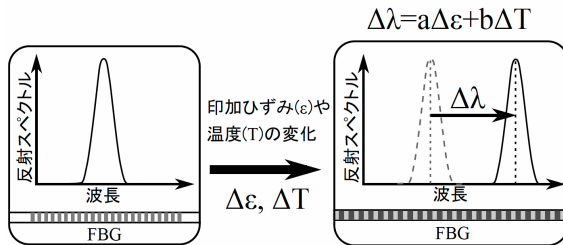


図 2: FBG センサの原理

FBG センサはセンサヘッドが省スペース、軽量で、電磁干渉を受けない等様々な利点があり、これを利用した、ひずみ、振動、圧力、音圧、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 FBG センサは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大きな魅力の一つである。

しかし、従来の FBG 多点センサ方式では、音響や固体振動のような高速な計測が要求されるセンシングにおいて、計測可能な点数が制限を受けると言う問題がある。

FBG 多点センサには、反射波長の異なる FBG を用いる波長多重化法(WDM)に基づく手法と、同一の反射波長をもつ FBG を複数用いる時間分割多重化法(TDM)と光周波数多重化法がある。

WDM では計測点数に比例して波長数が増加し、多重化できる波長の数が光源と検出器の帯域によって制限される為、計測可能点数が制限される。特に、音響など kHz オーダーの周波数を持つ振動計測に於いては、現実的な計測点数は数点程度となってしまう。

TDM は計測点数が増えると必要な計測時間が長くなり、高速な計測を多数の点に対して行う事は困難である。

光周波数多重化法は、波長可変レーザーを用いて光源の波長を掃引し、FBG の反射光と参照光の干渉信号を解析する事で各 FBG の信

号を分離する方法である。この方式では他の方法のような計測点数に対する制限はないが、波長可変レーザーの波長掃引速度によって計測時間が制限されており、高速な計測は不可能である。

2. 研究の目的

本研究は、同一反射波長の FBG を複数設置した一本のファイバを用いた、kHz オーダーの周波数を持つ振動を多点同時計測可能な光ファイバセンサを実現する事を目的とした。各 FBG からの信号抽出方式は光周波数多重化法を採用した。

ただし、光源には波長可変光源ではなく、半導体レーザーを用いた。半導体レーザーの発振波長が注入電流に依存して変化する事を利用し、波長の掃引を行う。

電流変調による波長掃引は波長可変レーザーよりもはるかに高速であり、これによって従来の光周波数多重化法を用いた FBG センサでは不可能であった高速な測定を実現する。

3. 研究の方法

まず、変調下における半導体レーザーの発振波長の変化を測定する手段を確立した。

半導体レーザーは電流を注入する事でレーザー光を発振させるが、この注入電流を増減させると、レーザー光の出力強度だけでなく、発振波長も僅かに変化する。この波長変化は静的に電流を変化させた場合には、増減させた電流の変化量にほぼ比例する。

一方、正弦波信号や鋸歯状波信号を用いて電流を変調した場合においては、波長変化量と電流変化量は線形に対応しなくなる。本研究では所与の電流変調信号に対して得られる波長変化信号を把握する事が必須である。

波長の測定手段を確立した後、図 3 に示すような半導体レーザーによる光周波数多重化センシングを構成し、実証実験を行った。その際、まず FBG 一個を用いた基礎実験を行い、その後複数の FBG 多点センシングの実証実験を行った。

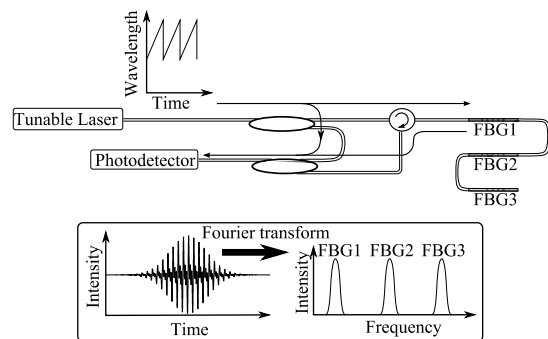


図 3: センシングシステム概念図

4. 研究成果

分布帰還型半導体レーザー (DFB-LD) の電流変調特性を実測した。まず、ファイバ型ファ

ブリ・ペロー干渉計(FFPI)を用いて離散的に瞬時波長を測定した。また、この手法を用いて測定した瞬時波長を用いて掃引波長の非線形性補正を試み、補正を達成した。更に高分解能な波長測定を行う為、FFPI に代わって不等光路長マッハツェンダー干渉計を導入し、瞬時波長の高分解能な測定手段を確立した。

波長の測定手段を確立した後、DFB-LD を光源に用いた光周波数多重化方式による FBG センシングシステムを構成し、固体振動計測の実証実験を行った。その際、波長の掃引周波数は 10 kHz とし、周波数数百 Hz の固体振動を検出した。

このシステムにおいては、レーザ波長の変調における非線形性を補正するために、不等光路長マッハツェンダー干渉計をシステム内に組み込み、波長掃引下における瞬時波長の測定を振動計測と同時にを行った。測定によって得られた時間の関数としての瞬時波長から、逆関数を算出し、センサ出力として得られた干渉信号を波長変化に対して線形な関数として補正した。

このように、システムの基本的動作を確認した後、波長参照用の干渉計の最適化を行い、更に、使用する電流変調に用いる波形を正弦波にする事でより高速な波長掃引を可能とした。

改良したセンサシステムを用いて、複数の最大反射率 1 % の FBG を用いた固体振動計測の実証実験を行った。

この時、波長掃引周波数は 100 kHz とし、振幅 30  $\mu\text{e}$  程度、周波数 3 kHz 程度の固体振動を 10  $\mu\text{s}$  の測定時間で測定することに成功した。各測定において混入する単位周波数当たり雑音は 6 n / Hz と小さく、測定結果として得られた振動振幅の値も測定確度は市販のレーザドップラー振動計の保証確度である 5 % 以内で一致していた。

測同時測定可能な FBG の個数は最大で 100 程度であるが、これは波長の掃引周波数を下げるか、測定に用いたデジタルアナログコンバータのサンプリングレートを上昇させることで更に増加可能である。また、波長掃引の掃引周波数は 1 Mhz 程度までは容易に上昇させることができ、さらに高速な振動を計測することも可能である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 6 件)

- 1) Ryotaro Uchimura, Atsushi Wada, Shingo Tekuramori, Makoto Takeuchi Osamu TUKida, Satoshi Tanaka, and Nobuaki Takahashi, " Simultaneous measurement of temperature and static strain using FBG Fabry-Perot interferometer in polarization

maintaining fiber," Proceedings of SPIE, Vol. 9157, 2014, pp. 91570U-1-4, 査読有, DOI:10.1117/12.2058842

- 2) Shingo Tekuramori, Keisuke Ikuma, Atsushi Wada, Satoshi Tanaka, Nobuaki Takahashi, " Performance of chirped-FBG Fabry-Perot interferometer sensor in pulse-position modulation scheme: large-signal operation," Proceedings of SPIE, Vol. 9157, 2014, pp. 91571B-1-4, 査読有, DOI:10.1117/12.2059405
- 3) Ryotaro Uchimura, Atsushi Wada, Satoshi Tanaka, and N. Takahashi, " Fiber Fabry-Perot Interferometric sensor using Bragg grating in polarization maintaining fiber," Journal of Lightwave Technology, Vol. 33, No. 12, 2015, pp. 2499-2503. 査読有 DOI: 10.1109/JLT.2014.2382675
- 4) Atsushi Wada, Satoshi Tanaka, and Nobuaki Takahashi, " Multipoint vibration sensing using fiber Bragg gratings and optical frequency domain reflectometry," Proceedings of SPIE, Vol. 9634, 2015, pp. 96341F-1-4, 査読有, DOI:10.1117/12.2194688
- 5) Atsushi Wada, Satoshi Tanaka, and Nobuaki Takahashi, " Optical frequency domain reflectometry based fiber Bragg grating vibration sensor array using sinusoidal current modulation of laser diodes," Proceedings of SPIE, Vol. 9655, 2015, pp. 96550U-1-4, 査読有, DOI:10.1117/12.2185268
- 6) Atsushi Wada, Satoshi Tanaka, and Nobuaki Takahashi, " Multipoint vibration sensing using fiber Bragg gratings and current modulated laser diodes," Journal of Lightwave Technology, 論文採択済, 査読有 DOI: 10.1109/JLT.2016.2551279

〔学会発表〕(計 6 件)

- 1) 和田 篤, 田中 哲, 高橋 信明「半導体レーザの電流変調を用いた FBG ファブリ・ペロー干渉計型振動センサにおける最適な変調波形の検討」第 52 回光波センシング技術研究会, 東京, 2013 年 12 月 3 日~12 月 4 日
- 2) Osamu Tsukida, Thanh Tung Ngo, Satoshi Tanaka, Ryotaro Uchimura, Atsushi Wada, and Nobuaki Takahashi, "Application of cascaded long period fiber gratings to measurement of strain and temperature," The 14th Asia-Pacific Conference on

Fundamental Problems of Opto-and  
Microelectronics, Tokyo, Japan, 2014  
年 8 月 24 日 ~ 2014 年 8 月 27 日

- 3) 月田 統,ゴ タン トウン,田中 哲,内  
村 良太郎,和田 篤,高橋 信明「カス  
ケード型長周期光ファイバグレーテ  
ィングを用いた多点ひずみ計測の基礎実  
験」2014 年秋季第 75 回応用物理学会学  
術講演会,北海道,2014 年 9 月 17 日 ~  
2014 年 9 月 20 日
- 4) 月田 統,ゴ タン トウン,内村 良太郎,  
和田 篤,田中 哲,高橋 信明「カスケ  
ード型長周期光ファイバグレーティン  
グを用いたひずみの多点同時計測」2014  
年日本光学会年次学術講演会,東京,  
2014 年 11 月 5 日 ~ 2014 年 11 月 7 日
- 5) 和田 篤,田中 哲,高橋 信明「光周波  
数多重化方式による光ファイバ・ブラッ  
ググレーティング多点振動センサの試  
み」光ファイバ応用技術研究会,北海道,  
2015 年 8 月 23 日 ~ 2015 年 8 月 28 日
- 6) 和田 篤,田中 哲,高橋 信明「正弦波  
状波長変調による光周波数空間多重化  
型 FBG 多点振動センシング」2015 年秋  
季第 76 回応用物理学会学術講演会,名  
古屋,2015 年 9 月 13 日 ~ 2015 年 9 月  
16 日

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

和田 篤 (WADA ASTUSHI)

防衛大学校・電気情報学群・准教授

研究者番号: 40434021