

令和元年6月6日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K06130

研究課題名(和文) 多光源波長掃引による高速分布型光ファイバセンサの研究

研究課題名(英文) Fast distributed optical fiber sensor using multiple wavelength-swept sources

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
・准教授

研究者番号：40434021

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：光の干渉と光源波長の掃引による高速な光ファイバ分布センシングを実現する為に、読み出し用の光源として複数の半導体レーザを同時に使用する事を提案し、実際にこの手法によって読み出しが可能である事を実験的に実証した。この種の手法では、波長の掃引周期を単に短縮すると、測定のダイナミックレンジが分解能を犠牲にする必要に迫られる。複数の光源を使用し、必要な掃引幅を光源毎に分担する事で、1光源当たりに必要な波長掃引幅を狭くし、掃引周期、即ち測定に要する時間が短縮できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光ファイバセンサは一般的な電気式のセンサに比べて、細径・軽量で可とう性に富んでおり、高強度で耐久性と耐食性も高い。また、情報を伝達する信号が電気信号ではなく光信号であるため、電気抵抗等による加熱や引火の恐れがなく、更に耐電圧性、耐電磁誘導性も備えている。本研究は光ファイバセンサにおいてこれまで実現されてこなかった高速な分布センシングを可能とするものである。

研究成果の概要(英文)：By using the optical frequency reflectometry method and modulated laser diode, it is possible to achieve distributed optical fiber sensors at high speed. In this method, the measurement range by the sensor is limited by the wavelength sweep range of the light source. In order to overcome this limitation, we are considering using multiple modulated laser diodes at the same time. Light beams from multiple modulated laser diodes modulated with different frequencies are superimposed and used for sensor reading. Signals for each light source can be separated by using frequency analysis. In experiments, light of multiple laser diodes was superimposed and made incident on the sensor, and frequency analysis of the reflected light from the sensor was successfully performed to separate the signals for each light source.

研究分野：光計測

キーワード：光ファイバ センシング 分布測定 干渉計測

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

分布型光ファイバセンサは、橋梁・道路の変形測定や車両・航空機の機体変形測定のような、構造物の健全性監視への利用等が期待されており、センシング手法として、光時間領域反射測定法(OTDR)、光相関測定法、ブリルアン散乱光時間領域反射測定法等が提案されている。近年、最も高い位置分解能と測定感度を両立する手法として注目されているのが、長尺の光ファイバ・ブラッグ・グレーティング(FBG)を用いた手法である。

FBGは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。FBGの反射波長は印加されたひずみや温度の変化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。

長尺のFBGに対し、OTDRや光周波数多重化反射測定法(OFDR)を適用すると、FBG中の任意の位置における反射波長を読み取る事ができ、ひずみや温度の分布測定が可能となる。FBGとOTDRを組み合わせた手法では、光信号の取得に長い時間を要する為、動的な測定には不向きである。一方、FBGとOFDRを組み合わせた分布型光ファイバセンサは比較的高速な測定手法ではあるが、更なる高速化が望まれている。

2. 研究の目的

本研究は、FBGとOFDRを組み合わせた分布型光ファイバセンサにおいて、読み出し用の光源として複数の半導体レーザを同時に使用する事で測定時間を短縮し、高速分布型光ファイバセンサを実現する事を目的とする。

OFDRでは光源の波長を掃引し、センサ部位からの反射光と参照光の干渉信号を解析する。この時、波長の掃引周期が測定時間となる。FBGと組み合わせたOFDRでは、波長掃引の範囲が計測のダイナミックレンジを決定し、光信号のサンプリング間隔当たりの波長変化量が計測の分解能を決定する。サンプリング間隔は使用するアナログ・デジタル(AD)コンバータの性能で決まっており、そのため、掃引周期を単に短縮すると、測定のダイナミックレンジか分解能を犠牲にする必要に迫られる。

そこで、本研究では、複数の光源を使用し、必要な掃引幅を光源毎に分担する事で、1光源当たりに必要な波長掃引幅を狭くし、掃引周期、即ち測定に要する時間、を短縮する。この時、掃引の周期を各光源の間で適切に調整すれば、干渉信号の周波数領域で各光源の信号を分離できる。

3. 研究の方法

まず、変調下における半導体レーザの発振波長の変化を測定する手段を確立した。半導体レーザは電流を注入する事でレーザ光を発振させるが、この注入電流を増減させると、レーザ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、半導体レーザ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、まず半導体レーザ一台を用いた基礎実験を行い、その後複数の半導体レーザを使用した実証実験を行った。

4. 研究成果

分布帰還型半導体レーザ(DFB-LD)の電流変調特性を実測した。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、半導体レーザ1台での準分布センシングの実証実験を行った。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。その後、半導体レーザを複数使用したセンシングシステムを構築し、固体振動測定の実証実験を行った。この時、電流の変調周波数を異なる周波数にし、光検出器から得られた信号を周波数空間上で分離する事で各光源に対応する信号を得られる事を確認した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計7件)

- 1) Atsushi Wada, Satoshi Tanaka and Nobuaki Takahashi, "Fast interrogation using sinusoidally current modulated laser diodes for fiber Fabry-Perot interferometric sensor consisting of fiber Bragg gratings," *Optical Review*, Vol. 25, pp. 533-539, 2018, 査読有, DOI:10.1007/s10043-018-0444-1
- 2) Atsushi Wada, Satoshi Tanaka and Nobuaki Takahashi, "Fast and accurate full-spectrum interrogation for fiber Fabry-Perot interferometric sensor consisting of Bragg gratings in polarization maintaining fiber," *Japanese Journal of Applied*

- Physics, Vol 57, 102501, 2018, 査読有, DOI: 10.7567/JJAP.57.10250
- 3) Atsushi Wada, Satoshi Tanaka and Nobuaki Takahashi, "Fast and High-Resolution Simultaneous Measurement of Temperature and Strain Using a Fabry-Perot Interferometer in Polarization-Maintaining Fiber With Laser Diodes, Journal of Lightwave Technology, Vol. 36, pp. 1011-1017, 2018, 査読有, DOI: 10.1109/JLT.2017.2771748
 - 4) Atsushi Wada, Satoshi Tanaka and Nobuaki Takahashi, "Multi-point strain measurement using Fabry-Perot interferometer consisting of low-reflective fiber Bragg grating," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 56, 112502, 2017, 査読有, DOI: 10.7567/JJAP.56.112502
 - 5) Atsushi Wada, Satoshi Tanaka and Nobuaki Takahashi, "Simultaneous measurement of vibration and temperature using a Fabry-Perot interferometer in polarization maintaining fiber and laser diodes," Proceedings of SPIE, Vol. 10323, 1032326, 2017, 査読有, DOI: 10.1117/12.2263200
 - 6) Mayumi Nagatsuka, Masayoshi Koizumi, Satoshi Tanaka, Atsushi Wada, and Nobuaki Takahashi, "Precise measurement technique of long period fiber grating sensors using Fourier transform method," Proceedings of SPIE, Vol. 10323, 1032340, 2017, DOI: 10.1117/12.2265809
 - 7) Atsushi Wada, Satoshi Tanaka and Nobuaki Takahashi, "Simultaneous measurement of strain and temperature using a Fabry-Perot interferometer consisting of Bragg gratings in polarization-maintaining fiber and current-modulated laser diodes," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 56, 32502, 2015, 査読有, DOI: 10.7567/JJAP.56.032502

[学会発表](計 19 件)

- 1) Atsushi Wada, Satoshi Tanaka and Nobuaki Takahashi, "Fiber Bragg Grating Array Interrogation Using Multiple Modulated Laser Diodes," The 26th International Conference on Optical Fiber Sensors (国際学会), Lausanne, Switzerland, 2018年9月24日~2018年9月28日
- 2) Atsushi Wada, Satoshi Tanaka and Nobuaki Takahashi, "Characteristics of wavelength modulation of a laser diode for optical fiber sensing using wavelength sweep," The 7th Asia Pacific Optical Sensors Conference, (国際学会), Matsue, Japan, 2018年5月28日~2018年5月31日
- 3) 竹山 隼人, 田中 哲, 和田 篤, 高橋 信明「カスケード型チャープ長周期光ファイバグレーティングを用いた水中音響センシング(1)」第65回応用物理学会春季学術講演会, 早稲田, 2018年3月17日~2018年3月20日
- 4) 和田 篤, 田中 哲, 高橋 信明「半導体レーザーの直接変調と偏波保持ファイバ型 FBG ファブリ・ペロー干渉計を用いた固体振動と温度の同時計測」第60回光波センシング技術研究会, 東京, 2017年12月5日~2017年12月6日
- 5) 竹山 隼人, 田中 哲, 和田 篤, 高橋 信明「カスケード型チャープ長周期光ファイバグレーティングによる高感度振動センサの検討」2017年度レーザー学研究会: レーザー計測とその応用, 横浜, 2017年12月1日
- 6) 竹山 隼人, 田中 哲, 和田 篤, 高橋 信明「カスケード型チャープ長周期光ファイバグレーティングのチャンネルスペクトルを利用した音響検出の基礎実験」2017年度第4回光ファイバ応用技術研究会, 大阪, 2017年11月23日~2017年11月24日
- 7) 竹山 隼人, 田中 哲, 和田 篤, 高橋 信明「カスケード型チャープ長周期光ファイバグレーティングを用いた機械的振動の高感度検出」2017年日本光学会年次学術講演会, 東京, 2017年9月5日~2017年9月8日
- 8) 和田 篤, 田中 哲, 高橋 信明「偏波保持型 FBG ファブリ・ペロー干渉計を用いた温度とひずみの同時測定精度の検討」2017年秋季第78回応用物理学会学術講演会講演予稿集, 福岡, 2017年10月31日~2017年11月2日
- 9) 竹山 隼人, 萩原 啓司, 田中 哲, 和田 篤, 高橋 信明「カスケード型チャープ長周期光ファイバグレーティングを用いた振動センシング」2017年秋季第78回応用物理学会学術講演会講演予稿集, 福岡, 2017年9月5日~2017年9月8日
- 10) 和田 篤, 田中 哲, 高橋 信明「低反射率 FBG ファブリ・ペロー干渉計を用いた多点ひずみ測定」第64回応用物理学会春季学術講演会, 横浜, 2017年03月14日~2017年03月17日
- 11) 永塚 真弓, 小泉 雅佳, 齋藤 隼輝, 田中 哲, 和田 篤, 高橋 信明「カスケード型チャープ長周期光ファイバグレーティングを用いたひずみと温度の同時計測の多点化」第58回光波センシング技術研究会, 東京, 2016年12月08日~2016年12月09日
- 12) 和田 篤, 田中 哲, 高橋 信明「偏波保持ファイバ型 FBG ファブリ・ペロー干渉計と半導体レーザーの直接変調を用いた温度とひずみの同時計測」日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2016, 東京, 2016年10月30日~2016年11月02日

- 13) 永塚 真弓, 小泉 雅佳, 齋藤 隼輝, 田中 哲, 和田 篤, 高橋 信明「カスケード型チャープ長周期光ファイバグレーティングを用いたひずみ・温度同時計測センサの多重化動作」日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2016, 東京, 2016年10月30日~2016年11月02日
- 14) Mayumi Nagatsuka, Masayoshi Koizumi, Thanh Tung Ngo, Atsushi Wada, Satoshi Tanaka and Nobuaki Takahashi, "Simultaneous strain and temperature measurement using cascaded chirp long period fiber grating," The 6th Asia Pacific Optical Sensors Conference (国際学会), Shanghai, China, 2016年10月11日~2016年10月14日
- 15) 永塚 真弓, 小泉 雅佳, 齋藤 隼輝, 田中 哲, 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ひずみと温度の同時測定の多重化の検討」2016年秋季第77回応用物理学会学術講演会, 名古屋, 2016年09月13日~2016年09月16日
- 16) 和田 篤, 田中 哲, 高橋 信明「偏波保持型 FBG ファブリ・ペロー干渉計による温度変化と振動の分離計測の試み」2016年秋季第77回応用物理学会学術講演会, 名古屋, 2016年09月13日~2016年09月16日
- 17) 永塚 真弓, 小泉 雅佳, ゴタン トウン, 齋藤 隼輝, 田中 哲, 和田 篤, 高橋 信明「カスケード型チャープ長周期光ファイバグレーティングを用いたひずみと温度の同時分離測定」第57回光波センシング技術研究会, 東京, 2016年06月14日~2016年06月15日
- 18) 齋藤 隼輝, 和田 篤, 永塚 真弓, 田中 哲, 高橋 信明「低反射率チャープ型 FBG ファブリ・ペロー干渉計を用いたひずみセンサの検討」第57回光波センシング技術研究会, 東京, 2016年06月14日~2016年06月15日
- 19) 和田 篤, 田中 哲, 高橋 信明「波長掃引型光ファイバセンシングのための分布帰還型半導体レーザの波長変調特性の測定」日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2015, 東京, 2015年10月28日~2015年10月30日

6. 研究組織

(1)研究分担者

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

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。