

論文審査の結果の要旨

氏名：山口 達也

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：高速波長掃引レーザを用いたFBG センサによる実時間振動計測システムに関する研究

審査委員：（主査） 教授 篠田 之孝

（副査） 教授 小野 隆 教授 古川 慎一

教授 大谷 昭仁

近年、社会基盤である橋梁、トンネルなどの人工建造物の老朽化などによる災害への対策のための構造ヘルスマニタリング技術が重要な課題になっている。また、航空機などでは、機械的なストレスによる損傷、あるいは燃費性能改善のための複合材料による軽量化にともない、稼働中の常時監視するモニタリングシステムが要求されている。そのため、建造物の健全度の把握を目的とした高速モニタリングシステムによる構造ヘルスマニタリングシステムの研究が行われており、建造物の状態をモニタリングするために広帯域な振動の実時間計測システムが要求されている。

FBG (Fiber Bragg Grating) センサはブラッグ波長（反射波長）がひずみに比例する特性を有し、ブラッグ波長の異なるFBGによる多重化が容易であり、ひずみに対する感度が高く、時間分解能を高くできる利点がある。波長掃引法を用いたFBGセンサの測定は波長掃引レーザの掃引周波数の高速化により、FBGの反射波長を高速に測定できる。しかし、FBGセンサを多重化することにより、FBGによる光の反射時間を複数回にわたり算出する必要があり、実時間測定には信号処理の高速化が課題となっている。さらに、高速波長掃引レーザを用いた長時間測定においては膨大なデータ管理を含めた実時間計測システムが必要であるが、これらに対する報告はほとんどない。

また、波長掃引のさらなる高速化ができるFourier Domain Mode Locking (FDML) レーザを用いたFBGセンサの実時間計測システムはより一層の信号処理の高速化が求められているが、まだ報告がされていない状況である。

本論文では建造物の常時モニタリングを行うため、高速波長掃引レーザと高速な信号処理システムを組み合わせ、FBGを用いた実時間の広帯域な振動計測システムを構築している。そこで、以下の計測システムについて検討されている。

(1) リング共振器型波長掃引レーザを用いた実時間振動計測システム

データベースを用いたデータ管理システムを組み合わせることにより、高速かつ長時間の連続測定を可能にしている。さらに、ひずみにより発生するアラート機能を実装し、長時間の測定データより瞬時的なひずみを簡便に検出できることを示している。

(2) 温度制御したFDMLレーザを用いた実時間振動計測システム

波長掃引の安定化を図るために、温度制御したTemperature-Controlled FDML (TC-FDML) レーザを構築している。さらに、高速な実時間処理を実現するために、任意のデジタル演算を実装できるField Programmable Gate Array (FPGA) を用いたハードウェア処理を導入している。これにより、本システムは高速な並列処理が可能になり、FBGを用いた高速かつ実時間の振動測定を実現している。

本論文は5章から構成されており、各章で得られた成果を述べている。

「第1章 緒言」では本研究の背景として、ファイバセンサの現状、FBGの測定方法の現状、そして本研究の目的が述べられている。

「第2章 波長掃引レーザを用いたFBGの反射波長測定の基本構成」では波長掃引レーザを用いたFBGの反射波長測定の基本構成、FBGの反射信号の時間から反射波長を算出する方法について述べている。さらに、FBGの反射波長の高分解能化を図るために、重心法を用いたピーク位置検出の方法を示している。

「第3章 リング共振器型波長掃引レーザを用いた実時間振動計測システム」では構築したリング共振器型波長掃引レーザの光出力特性を示し、掃引周波数を20kHzで駆動したFBGの計測システムを構築

している。本システムはパーソナルコンピュータ（PC）をベースにサンプリング周波数を 40MHz とし、 $50\mu\text{s}$ の時間分解能を実現している。

本システムは長時間の測定における瞬時的なひずみの検知とデータ抽出を容易にするため、2 種類のアラート機能を実装し、データベースを用いたデータ管理システムを導入し、実現している。構築したデータ管理システムのユーザインターフェースはデータベースシステムに接続することにより、高速かつ長時間の FBG センサデータからアラート機能を用いて、瞬時的なひずみの印加の区間を抽出することができることを示している。

本システムを用いた振動測定では、数百 Hz の振動が測定でき、反射波長の標準偏差の値は $2\times 10^{-3}\text{nm}$ 以下であり、ひずみに換算すると、約 $2.4\mu\epsilon$ となっている。また、データ管理システムにより、12 時間を超える FBG の高速な反射波長測定が行えることを示し、アラート機能により瞬時的なひずみや振動が印加された区間を抽出することを示している。

「第 4 章 TC-FDML レーザを用いた FPGA による実時間振動計測システム」では実時間計測システムのさらなる高速化を実現させている。光源である TC-FDML レーザは 2km のファイバの往復の伝搬を用いて、波長フィルタの掃引周期とリング共振器内の光の周回時間を一致させることにより、掃引周波数を 50.7kHz で駆動させ、順掃引と逆掃引の双方向の高速波長掃引を達成させている。さらに、TC-FDML レーザは波長掃引の安定化を図るために、ファイバ・ファブリペロー・チューナブル・フィルタならびに 2km のファイバを恒温器により温度制御している。また、本システムの信号処理部の FPGA はサンプリング周波数 250MHz において実時間測定を行うため、FBG の反射信号を抽出し、重心法の信号処理を行っている。TC-FDML レーザの掃引周期以内に順掃引と逆掃引における FBG の反射信号を重心法による信号処理を行うため、本システムは FPGA のパイプライン処理を用いた並列処理により、実時間化を実現している。

また、波長掃引レーザの掃引周波数が高く、FBG センサまでのファイバ長の伝搬時間の影響が無視できない場合、FBG までのファイバ長による遅延時間の影響を示し、その影響を除去する方法を提案している。TC-FDML レーザの順掃引と逆掃引の双方向の掃引光を用いた遅延時間を算出する提案方法により、遅延時間の影響が除去できることを実証している。

本システムを用いた振動測定において、測定時間分解能が TC-FDML レーザの双方向の掃引光を用いることにより、掃引周期の半分の $9.9\mu\text{s}$ であり、反射波長の標準偏差の値が $1.3\times 10^{-2}\text{nm}$ 以下であり、 $16\mu\epsilon$ に相当するひずみの測定分解能を有しており、数 kHz の高速な振動測定が行え、1 時間の連続測定ができることを示している。

「第 5 章 結言」では本研究の成果と今後の展望について述べられている。

開発された実時間振動計測システムの成果は次のように要約できる。

「リング共振器型波長掃引レーザを用いた実時間振動計測システム」では

- (1) 構築したリング共振器型波長掃引レーザは掃引波長の帯域幅が約 15 nm において掃引周波数を 20 kHz とした動作が行え、本システムはサンプリング周波数を 40 MHz とした信号処理により、実時間測定を実現している。
- (2) 本システムはリング共振器型波長掃引レーザの掃引周波数を 20 kHz で駆動し、複数の FBG の反射波長を時間分解能が $50\mu\text{s}$ において測定できる。振動測定では、数百 Hz の振動が測定でき、反射波長の標準偏差の値は $2\times 10^{-3}\text{nm}$ 以下であり、ひずみに換算すると、約 $2.4\mu\epsilon$ となることから、本システムは $2.4\mu\epsilon$ に相当するひずみの測定分解能を有している。
- (3) 本システムは 2 種類のアラートの発生機能を実装し、おのおののアラートにより瞬時的なひずみが発生した区間を検出でき、データベースを用いたデータ管理システムを導入し、12 時間を超える FBG の高速な反射波長測定が行えることを示している。

「TC-FDML レーザを用いた FPGA による実時間振動計測システム」では

- (1) 構築した TC-FDML レーザは掃引周波数が 50.7 kHz において、約 60 nm の掃引波長の帯域幅を有し、順掃引と逆掃引の双方向の波長掃引に行え、実時間計測システムはサンプリング周波数を 250 MHz とし、FPGA を用いた信号処理により、実時間測定を実現している。
- (2) FBG までのファイバ長による遅延時間の除去方法を提案し、本システムに組み込み遅延時間を除去した反射波長の測定が行えることを明らかにした。また、本システムの測定時間分解能が TC-FDML レーザの双方向の掃引光を用いることにより、掃引周期の半分である $9.9\mu\text{s}$ の性能を有していることを明らかにしている。

(3)本システムは反射波長の標準偏差の値が 1.3×10^{-2} nm以下であり、 $16 \mu \epsilon$ に相当するひずみの測定分解能を有しており、数 kHz の高速振動の測定が行え、1 時間の連続測定ができることを示している。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

平成30年2月15日