

## 論文の内容の要旨

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

近年、橋梁、トンネルなどの社会基盤構造物の老朽化などによる災害あるいは地震や地滑りなどの自然災害への安全対策が重要な課題になっている。また、航空機では、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、稼働中の構造物を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、構造物の健全度の把握を目的としたひずみの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いる。このような状況から、構造物の状態をモニタリングするためにひずみセンサの情報を高速に収集する実時間計測システムが求められる。

ファイバセンサは軽量かつ小型であり、無誘導性、防爆性に優れ、さらに、センサ部に電源を必要としない特徴がある。ファイバセンサにはブリルアン散乱を用いる方法、ファイバ干渉計を用いる方法、FBG (Fiber Bragg Grating) センサを用いる方法がある。特に、FBG センサを用いる方法は多重化が容易に行え、他の方式に比べて、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。FBG を用いて高速な振動を測定する方法として波長掃引法がある。この方法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多重化が容易に行える。しかし、FBG を多重化する場合には、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必要となる。そのため、高速波長掃引を用いた長時間測定において、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、Fourier Domain Mode Locking (FDML) を用いた波長掃引レーザが提案され、波長掃引のさらなる高速化が可能になっている。FDML レーザを用いた FBG 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、報告されていない状況である。

本研究の目的は構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 を用いた実時間振動計測システムを構築することである。そこで、以下の計測システムについて開発を行った。

- (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
- (2) 温度制御した FDML レーザを用いた FPGA の信号処理による実時間振動計測システム

(1) ではリング共振器型波長掃引レーザを構築し、実時間振動計測システムを開発した。本システムは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た。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た。

(2) では実時間計測システムのさらなる高速化を実現するため、FDML を用いた波長掃引レーザを導入し、FDML レーザの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) レーザを構築した。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た。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た。

本論文は 5 章から構成されている。以下が各章の概要である。

「第 1 章 緒言」では、本研究の背景および目的について述べた。

「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、ファイバセンサである FBG の特性について述べ、波長掃引レーザを用いた FBG センサの反射波長測定の原理、さらに、重心法を用いた測定時間の高分解能化の方法を示した。

「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が掃引周波数に依存することを示した。次に、リング共振器型波長掃引レーザの掃引周波数を 20 kHz で駆動した FBG の計測システムを構築した。本システムは PC を用い、ADC のサンプリング周波数を 40 MHz とし、50  $\mu$ s の時間分解能を実現した。本システムは瞬時的なひずみが印加された区間を容易に抽出するため、2 種類のアラート機能を実装し、長時間の測定を実現するために、データベースを用いたデータ管理システムを導入した。データ管理システムのユーザインターフェースを構築し、データベースシステムに接続することにより、高速かつ長時間のセンサデータから任意の区間を抽出することができる。

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  $2 \times 10^{-3}$  nm 以下であり、ひずみに換算すると、約 2.4  $\mu$  $\epsilon$  となる。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た。

「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するため、TC-FDML レーザは 2km のファイバを用いて、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ている。TC-FDML レーザの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 2 km のファイバを恒温器により温度制御を行った。これにより、TC-FDML レーザは掃引周波数が 50.7 kHz で駆動でき、順掃引と逆掃引の双方向の波長掃引を可能にした。サンプリング周波数 250 MHz の実時間測定を行うため、FPGA は FBG の反射信号を抽出し、重心法の信号処理を行った。この一連の処理を順掃引と逆掃引において、FBG の反射信号ごとに行い、FPGA は TC-FDML レーザの掃引周期以内で出力するため、パイプライン処理を用いた並列処理の実装により高速化した。

また、FBG までのファイバ長の伝搬時間の影響が無視できなくなる場合、計測システムにおける FBG までのファイバ長による遅延時間の影響を受け、遅延時間を除去する必要がある。そこで、TC-FDML レーザの順掃引と逆掃引の双方向の掃引光を利用し、遅延時間を算出する方法を提案し、遅延時間の影響が除去できることを示した。

本システムを用いた振動測定において、反射波長の標準偏差の値が  $1.3 \times 10^{-2}$  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た。

「第5章 結言」では、本研究で得られた成果を総括し、今後の展望について述べた。

第2章においては、ファイバセンサである FBG の基本特性について述べ、ブラッグ波長の光のみを反射する性質を有すること、ブラッグ波長がひずみに比例して変化することから、FBG の反射波長を測定することにより、ひずみが測定できることを述べた。波長掃引レーザを用いた FBG の反射波長測定の基本構成について述べ、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た。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た。

第3章においては、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 とした動作が行えることを示した。リング共振器型波長掃引レーザによる FBG の実時間振動計測システムは PC を用い、ADC のサンプリング周波数を 40 MHz とした信号処理により、FBG の実時間測定が行える。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  $\mu$ 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  $2 \times 10^{-3}$  nm 以下であり、ひずみに換算すると、約 2.4  $\mu$  $\epsilon$  となるこのことから、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。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た。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る。

第4章においては、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が行える。TC-FDML レーザを用いた FBG の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た。本システムは提案した FBG までのファイバ長による遅延時間の算出処理を組み込んでおり、

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、TC-FDML レーザの双方向の掃引光を用いることにより測定時間分解能が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た。本システムは反射波長の標準偏差の値が  $1.3 \times 10^{-2} \text{ nm}$  以下であり、本システムは  $16 \mu\text{e}$  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た。