

温度制御した FDML レーザによる FBG センサを用いた振動計測システムの構築

Construction of Vibration Measurement System by FBG Sensors with a temperature-controlled FDML Laser

○山口達也¹, 篠田之孝²*Tatsuya Yamaguchi¹, Yukitaka Shinoda²

Abstract: We demonstrate a real-time vibration measurement system by fiber Bragg gratings (FBGs) with a temperature-controlled Fourier domain mode locking (FDML) laser. The laser was performed with a sweep rate of 50.7 kHz. Real-time processing was achieved by a field programmable gate array (FPGA).

1. はじめに

本研究の目的は高速な波長掃引レーザを構築し、ファイバブラッググレーティング (FBG) を用いた振動計測システムを開発することである^[1]。リング共振器を用いた波長掃引レーザは掃引周波数が数十 kHz を超えた場合、光出力強度が著しく低下する問題があった。そのため、フーリエ・ドメイン・モード・ロックング (FDML) を用いた波長掃引レーザが提案された^[2]。そこで、筆者らは FDML レーザの波長掃引を安定化させるため、温度制御した FDML レーザを構築した^[3, 4]。本文は温度制御した FDML レーザと高速な信号処理ができる FPGA を組み合わせ、FBG センサを用いた実時間振動計測システムを構築した報告である。

2. 実験装置

2.1 温度制御した FDML レーザの構成

図 1 に示す温度制御した FDML レーザは半導体光増幅器 SOA, ファブリペローチューナブルフィルタ FFP-TF, 二つのアイソレータ, サークュレータとカップラからなるリング共振器により構成している。FDML の制御は光がリング共振器内を周回する時間と波長掃引の周期を同期させるため、遅延ファイバを挿入する。本実験では遅延ファイバの長さは 2 km とした。FDML レーザの波長掃引はドライバの制御信号を用いて FFP-TF の透過波長を制御する。FFP-TF ならびに遅延ファイバは 2 台の恒温槽 (CI) を用いて温度を一定に制御した。FDML レーザは制御信号の掃引周波数 f_m が 50.7 kHz の正弦波波形を制御信号として駆動した。

2.2 振動計測システム

図 2 は FBG センサを用いた振動計測システムである。光学系は FDML レーザ, サークュレータ, 5 つの FBG と検出器からなる。FBG_k (k=1~5) の各々のブラッグ波長 λ_B は 1530, 1540, 1550, 1560, 1565 nm, 反射率は約 80%, 半値幅は約 0.2 nm である。FDML レーザの射出光はサーキュレータを介し、FBG に入射する。各々

の FBG の反射波長で反射された光は再び光サーキュレータを介し、検出器に入射する。

測定系はデータ収録装置 DAQ と PC からなる。ドライバは制御信号に同期したトリガ信号と基準クロックを DAQ に供給する。DAQ はアナログデジタルコンバータ (ADC) と FPGA を内蔵している。ADC はサンプリング周波数 f_s を 250 MHz とし、検出器信号を取得する。取得された信号は FPGA により信号処理され、PC に転送される。実験は FDML レーザの短波長から長波長の掃引と長波長から短波長の掃引の双方向の掃引を用いて、時間分解能 $t_r (=1/2f_m)$ が 9.9 μ s ごとに FBG の反射波長を測定する。

2.3 FPGA による信号処理

波長掃引レーザを用いて FBG の反射波長を測定するには、検出器の信号から FBG の反射スペクトルの時間を算出する必要がある。ここで、反射スペクトルの

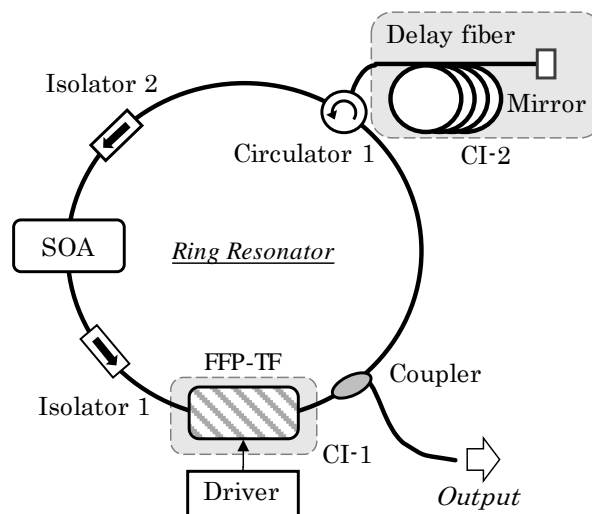


Figure 1. Temperature-controlled FDML laser

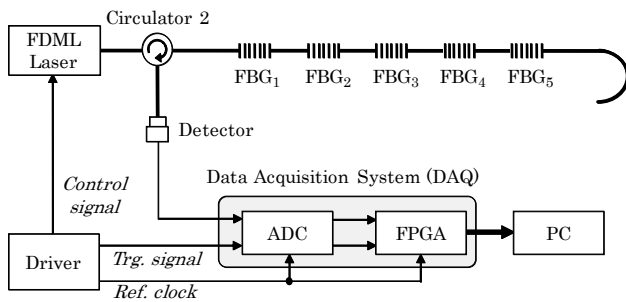


Figure 2. Real-time vibration measurement system

ピーク位置検出の分解能は ADC のサンプリング周波数に依存する問題がある．そこで，重心法を用いたピーク位置検出を導入した^[4]．この処理を FPGA 上に実装することで，実時間処理を行った（図 3）．FPGA は FBG の反射スペクトルの振幅値がピークとなった位置を検出する．さらに，ピーク位置とその前後のデータを保持する．保持したデータから重心位置を算出する．算出結果を PC に転送し，反射波長に換算している．

3. 実験の結果

本システムを用いて高速振動による反射波長を測定した．振動を印加するため，FBG₁，FBG₂ センサの側面に圧電振動子を取り付けた．また，それぞれの FBG に取り付けた圧電振動子の駆動信号は振動周波数 f_v を 4.65 kHz とし，位相差を π とした．図 4 は振動による反射波長を測定した結果であり，図 4 (a)，(b)，(c) は各々 FBG₁，FBG₂，FBG₃ の結果である．FBG₁，FBG₂ の反射波長の値は圧電振動子の振動周波数である 4.65 kHz で変動しており，位相差がおおよそ π だけずれている．また，その反射波長の変化量は約 12×10^{-2} nm となっている．振動を印加していない FBG₃ の反射波長はほぼ一定となっており，各々の FBG が独立に計測できていることがわかる．なお，すべての FBG において，振動を印加していない場合の反射波長の標準偏差を算出した結果， 1.1×10^{-2} nm 未満となった．

4. まとめ

- (1) 温度制御した FDML レーザを構築し，FBG センサを用いた実時間振動計測システムを開発した．
- (2) 本システムは信号処理システムに FPGA を導入し，多点化した FBG の反射波長を時間分解能 9.9 μ s で実時間計測することができる．

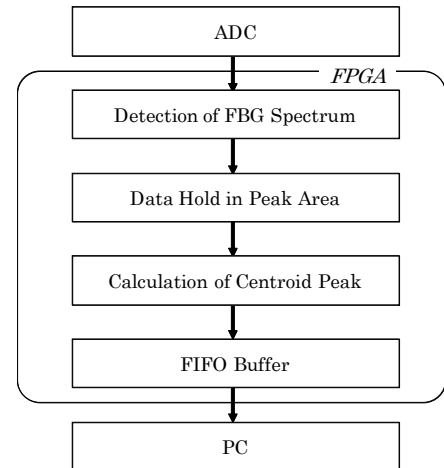


Figure 3. Signal processing of FPGA

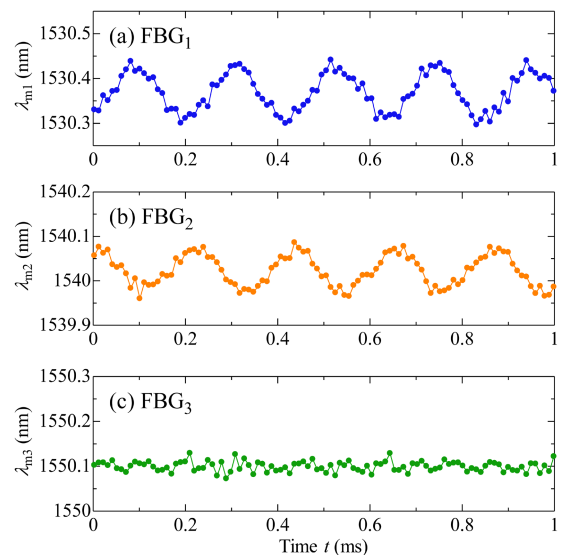


Figure 4. Measurement results of response to high-speed vibration

参考文献

- [1] J.M.Lopez-Higuera ed.: *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*, Wiley, 2002.
- [2] R.Huber et al.: Fourier Domain Mode Locking (FDML): A new laser operating regime and applications for optical coherence tomography, *Opt. Express*, Vol.14, No.8, pp.3225-3237, 2006.
- [3] T.Yamaguchi, Y.Shinoda: High-speed vibration measurement by fiber Bragg gratings with Fourier domain mode locking laser, *Optical Fiber Sensors Conference (OFS)*, 2017 25th. *IEEE*, 2017.
- [4] T.Yamaguchi, Y.Shinoda: Real-time fiber Bragg grating measurement system using temperature-controlled Fourier domain mode locking laser, *Opt. Eng.*, Vol.56, No.6, 066112, 2017.