光ファイバを用いた構造ヘルスモニタリングシステムの開発

Development of Structural Health Monitoring using Optical Fiber

篠田之孝¹ Yukitaka Shinoda¹

Abstract: Structural health monitoring systems have been researched and developed to ascertain the health of artificial structures such as bridges and dangerous terrains that are prone to bedrock collapse. Optical fiber sensor systems are particularly suitable for this purpose because their sensor units require no power supplies and they are immune to the effects of electromagnetic induction. Authors have proposed the multi-point installation of fiber Bragg gratings (FBGs) with different Bragg wavelengths and FBGs with the same Bragg wavelength at equally spaced positions along an optical fiber, and have constructed real-time measurement system performed by using an optical switch to multiplex multiple channels.

1. はじめに

近年,橋梁,高層ビル,堤防などの構造物の損傷に よる災害および地滑り,岩盤崩落などの自然災害から 人命を守るため,損傷の程度や危険度,その位置の把 握を目的に構造ヘルスモニタリングシステムの研 究・開発が行われている⁽¹⁾.光ファイバセンサは光フ ァイバの特徴である低損失性,無誘導性,軽量性など の利点から,大規模構造物や遠隔地の広域な計測に有 用である.特に,ファイバブラッググレーティング⁽²⁾ (fiber Bragg grating,以下,FBG と記す)は光ファイ バセンサとして注目されている.FBG は光ファイバ に紫外線で書き込んだ回折格子であり,光ファイバの 長さ方向のひずみにより,ブラッグ波長が変化する特 徴がある.このことから,FBG からの反射波長を測 定することにより,ひずみの測定が行える.

ここで、大規模構造物や遠隔地の広域な計測に適用 するには FBG を多点化することが不可欠である. 一 般に、FBG を用いた多点測定を行う場合、ブラッグ 波長が異なる FBG による多点のひずみ測定が行われ ている⁽³⁾. この方法は設置する位置と FBG のブラッ グ波長との関係を事前に対応させる. しかし、測定点 が増加するに従い、光源および光学系が広帯域化する 問題、さらに光の検出部に分光光学系が必要となる問 題がある. 一方、ブラッグ波長の等しい同一特性の FBG を用いた多点化を行う場合、どの位置の FBG か らの反射光であるかが不定となり、多点化が困難にな る. そこで、多点の反射位置を測定する方法として光 周波数領域反射測定法 OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry) を導入した^{(4)~(7)}. OFDR は 光周波数掃引を用いることで反射位置を測定できる ため,多点化した同一ブラッグ波長の FBG からの反 射波長を各々分離して測定することができる.

筆者はOFDRを用いて同一ブラッグ波長のFBGの 多点化並びに異なるブラッグ波長のFBGの多点化を 行い,その際に,設置位置を等しくすることにより, 等距離に設置したFBGの反射スペクトルを同時に測 定できることを示し,実時間の測定を行ってきた⁽⁸⁾. さらに,光MEMSスイッチを用いてチャンネルの多 重化を行うとともに,測定状況を把握しやすい,グラ フィカルな表示システムを有する実時間のモニタリ ングシステムの構築を行ってきた⁽⁹⁾.

2. 測定の原理

図1は同一ブラッグ波長のFBGの多点化の基本光学 系である.光学系は波長可変レーザTL,サーキュレー タ及び不等光路型マイケルソン干渉計で構成されてい る.TLからの光は光カップラで2分され,一方の光は 参照用光路のミラーで反射され,他方の光は測定用光 路の低反射率の同一ブラッグ波長のFBG_k (k=1,2,3)で 反射される.参照用光路及び測定用光路からの反射光 は光カップラ,サーキュレータを介して検出器に入射 する.測定用光路の各FBGは参照用光路の光ファイバ 長より ΔL_k(k=1,2,3)だけ長い位置に設置されている.こ こで,FBG はブラッグ波長 λ_Bの光を反射し,長さ方向 のひずみにより反射する光の波長がシフトする特性が あり,反射波長を測定することによりひずみを測定で きることになる^{(1),(2)}.

1:日大理工・教員・電気



いま,光源からの光周波数を時間に対して直線状に 掃引(掃引幅 Δv ,時間幅 ΔT)すると,干渉信号のビ ート周波数は光ファイバ長の差(以下,距離と記す) に比例する.TLの光周波数を掃引すると,検出器で得 られる干渉信号 g(t)のビート周波数 f_{bk}(k=1,2,3)は不等 光路型マイケルソン干渉計の距離 ΔL_k (k=1,2,3)に比例 する.そこで,各 FBG の反射スペクトルを算出するた め,得られた干渉信号はフーリエ変換により周波数領 域に変換され,各 FBG の反射光の成分を分離すること ができる.各ビート周波数成分 f_{bk}(k=1,2,3)のみを抽出 し,フーリエ逆変換により,各 FBG の反射光による解 析信号が得られる.各 FBG の反射スペクトルは解析信 号を用いて算出することができる.

次に,図2は大規模な構造物への適用を考慮した FBGの多点化の概念図を示している.先ず,光スイッ チにより,チャンネル(1,2,・・・,p)を選択する.各チャ ンネルは距離方向に同一ブラッグ波長のFBGを多点 化し,同時に,異なるブラッグ波長のFBGを多点化す る.このとき,異なるブラッグ波長のFBGは図2のよ うに等距離に設置する.異なる反射波長のFBGを等距 離に設置する方法はビート周波数が等しくなり,1回 の信号処理で等距離に設置したブラッグ波長の異なる FBGの反射スペクトルが同時に算出できる.そのため, 計算時間の短縮化が行えるため,実時間の多点測定に 優れている.さらに,光スイッチは光周波数掃引の繰 り返し周期毎にチャンネルを順次,切り換えることに より,多重化したチャンネルのFBGの反射波長を全て 測定することができる.

3. 実験装置

図3は測定チャンネルを多重化した実験装置の一例 である.実験装置は光学系と測定系より構成されてい る. 光学系は波長可変レーザ TL, 参照用干渉計及び測 定用干渉計の2つの不等光路型マイケルソン干渉計か ら構成されている.参照用干渉計は一定の光周波数掃 引毎に測定用干渉計の干渉信号を取得するために用い ている. TL には外部共振器型半導体レーザを用いた. TL からの光は光カップラにより2分され、一方の光は サーキュレータを介して参照用干渉計に入射し, 他方 の光は測定用干渉計に入射する.参照用干渉計は2つ の FRM (Faraday Rotator Mirror)の距離 ΔL_rの不等光路 型マイケルソン干渉計であり,各 FRM からの反射光は 再びサーキュレータを介して検出器 D, に入射する. 測 定用干渉計は一方の光路が FRM_m,他方の光路が光 MEMS スイッチ (OMSW) とチャンネル A.B.C の3つ の測定チャンネルからなる. 各チャンネルは多点化し た低反射率の FBG で構成されている. チャンネル A はブラッグ波長が λ_{B1}=1550nm の FBG_{A1i}(i=1,2,3)およ び λ_{B3}=1555nm の FBG_{A3i}(i=1,2,3)の FBG であり, ブラ ッグ波長の異なる FBG_{Ali} と FBG_{A3i} は等しい距離 ΔL_i(i=1,2,3)に設置されている. チャンネル B はブラッ グ波長が λ_{B2}=1552.5nm の FBG_{B2i} (j=1~5), チャンネル



Figure 2. Multiplexing FBG



Figure 3. Experimental setup



Figure 4. Monitoring screenshot

C はブラッグ波長が λ_{B1} =1550nm の FBG_{Clj}(j=1~5)の FBG を設置した. チャンネル B,C の各 FBG の長さは 各々10mm, FBG の設置間隔は 30mm になっている. FBG_{A31} と FBG_{Clj}(j=1~5)には各々ステージ 1, 2 を取 り付け, ステージの移動量を制御することでひずみを 印加した.

測定系は参照用干渉計の干渉信号を AD 変換器 (ADC)のサンプリングクロック(CLK)に用い,測定用 干渉計の干渉信号 g(t)と TL の波長モニタ出力 V_λをコ ンピュータに取り込む.また,OMSW はコンピュータ に制御させたディジタル出力(DIO)を用いて光周波数 掃引の周期毎にチャンネルを選択することができる.

4. 結果

構築した実時間システムは光周波数の掃引周期毎に OMSW で順次チャンネルを切り換え、全チャンネルの 反射波長をモニタリングできる機能並びに各チャンネ ルの反射波長の測定状況を確認できる機能を有してい る.図4は構築した実時間システムのモニタ画面であ る. 図 4(a)はチャンネル A,B,C の時系列の反射波長を モニタリングしている画面である. 図 4(b)は測定チャ ンネルをチャンネルAに固定したときの反射波長をモ ニタリングしている画面である. 図 4(a)の左側の上段 は TL の波長モニタ出力であり, 左側の下段は画面表 示において各チャンネルの FBG の選択などの設定及 びデータの入出力などの各種設定が行える. 右側の最 上段のグラフは OMSW が選択しているチャンネルの FBG の反射スペクトルである.光周波数の掃引周期 2s 毎に OMSW が選択しているチャンネルを表示できる. 下の3つのグラフは各々チャンネルA,B,Cに設置して

ある FBG の反射波長の時系列波形である.次に,図 4(b)は右上段より,取得したチャンネルAの干渉信号, 周波数領域に変換したフーリエスペクトル,算出した FBG の反射スペクトルであり,最下段は測定した反射 波長の時系列の波形である.図中の反射スペクトルは 等距離に設置したブラッグ波長の異なる FBG が同時 に測定できていることがわかる.画面表示が光周波数 の掃引周期 2s 毎に更新され,実時間でのチャンネルA の測定状況のモニタリングが行える.この機能は各チ ャンネルに対して同様に行え,各チャンネルの測定動 作を確認することができる.

図 5 は OMSW をチャンネル C に固定し,反射波長 を測定した結果である.ステージ2を用いて FBG_{Clj}(j=1 ~5)に 1 分毎に移動量を増加,減少させて,ひずみを 印加した.各々の FBG の反射波長が約 1.2×10²nm シフ トしていることが測定できている.本システムは 30mm 間隔に多点化した同一ブラッグ波長の FBG に印 加したひずみが各々独立して実時間で測定できること



Figure 5. Real-time measurement results for channel C



Figure 6. 24-hour measurement results

を示している.

図 6 は長時間測定の一例である.実験はチャンネル を OMSW で 2 分毎に切り換えて測定した.図 6(a)はブ ラッグ波長 1555nm であるチャンネル A の FBG_{A3i} (i=1,2,3)であり,図 6(b)はブラッグ波長 1550nm のチャ ンネル A の FBG_{A11}及びチャンネル C の距離が最も長 い FBG_{C15}の結果である.チャンネル A の FBG_{A31} 及び チャンネル C の FBG_{C1j}(j=1~5)は 1 時間毎にステージ 1,2 を用い,ひずみを印加した.このことから,構築し たシステムは長時間の反射波長のモニタリングができ, 静的ひずみ分布の測定が行えることがわかる.

5. まとめ

光ファイバを用いた構造ヘルスモニタリングシステ ムの開発を目的に、FBG を用いたひずみの多点測定シ ステムを構築した.同一ブラッグ波長のFBG の多点化 を行い、さらに等距離に異なるブラッグ波長のFBG を 設置する方法を提案し、等距離に設置したブラッグ波 長の異なる FBG の反射スペクトルを同時に測定でき ることを示した.さらに、大規模構造物の劣化とその 位置をモニタリングするために測定するチャンネルを 多重化するとともに、グラフィカルなインターフェー スを有する実時間のひずみ測定システムを開発した.

今後,本システムの一層のFBGの多点化と構造物への設置を考慮したモニタリングシステムの検証を行う. さらに、本システムを実構造物に適用し、モニタリン グの有効性と構造物の診断予測に取り組んでいく予定 である. 謝辞

日頃お世話になっております電気工学科の先生方に 感謝申し上げます.また,実験に協力してくれました 光エレクトロニクス研究室の卒業生並びに在校生に感 謝致します.

本研究の一部は文部科学省学術フロンティア推進事 業,文部科学省科学研究費補助金(課題番号:15560365) および(財)天野工業技術研究所奨励研究寄付金の助 成を受けた.

参考文献

[1] J.M.Lopez-Higuera ed., Handbook of Optical Fibre Sensing Technology, Wiley (2002)

[2] A.Othonos, K.Kalli, Fiber Bragg Grating, Artech House (1999)

[3] A.D.Kersey et al., "Fiber Grating Sensors", J.Lightwave Technol., Vol. 15, pp. 1442-1463 (1997)

[4] S.A.Kingsley, D.E.N.Davies, "OFDR diagnostics for fibre and integrated-optic systems", Electron. Lett., Vol. 21, No. 10, pp. 434-435 (1985)

[5]M.Suematsu,M.Takeda,"Wavelength-shift interferometry for distance measurements using Fourier transform technique for fringe analysis", Appl.Opt., Vol. 30, No. 28, pp. 4046-4055 (1991)

[6] M.Froggatt, J.Moore, "Distributed measurement of static strain in an optical fiber with multiple Bragg gratings at nominally equal wavelengths", Appl. Opt., Vol. 37, No. 10, pp. 1741-1746 (1998)

[7] Y.Shinoda, T.Higo, "Real-time Calculation of Distance and Displacement by FTT Signal Analysis with Optical Frequency Sweeping", IEEJ Trans. FM, Vol. 126, No. 6, pp. 403-408 (2006)

[8] Y.Shinoda, K.Nagai, T.Higo, "Fundamental Experiment in Real-time Strain Measurement of Multipoint Fiber Bragg Grating using Optical Frequency Sweeping", IEEJ Trans. SM, Vol. 130, No. 12, pp 570-574 (2010)

[9] Y.Shinoda, Y.Sasaki, D.Miyata, T.Higo, "Monitoring System of Static Strain by using Fiber Bragg Gratings with Optical Frequency Domain Reflectometry", IEEJ Trans. FM, Vol. 131, No. 4, pp. 251-256 (2011)