

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350448

研究課題名(和文) 斜面およびのり面等における新しい光ファイバ計測システムの研究

研究課題名(英文) Research of new optical fiber measurement system in slope

研究代表者

佐藤 信也 (SATO, Shinya)

室蘭工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00300963

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：土木・建築構造物の管理の高度化のための光ファイバセンサ技術を普及レベルに押し上げるための新しい歪みセンサシステムを開発する。円形に巻いた光ファイバはインバー線と接続され、その伸縮が角度変化に変換される。歪みによってセンサの角度が変化した時、ファイバ中を通る光の偏光の変化をストークスパラメータで測定し、それを歪み量に換算する全く新しいセンサを開発する。測定したストークスパラメータに関数フィッティングを行い近似曲線を用いた方法では、十分なサンプリング速度とが得られ、且つ実際のセンサ角度と算出した角度を比較しても非常に高い精度での測定を行うことができた。

研究成果の概要(英文)：We will develop a novel strain sensor system to boost optical fiber sensor technology for sophistication of civil engineering / construction structure management to popularization level.

An optical fiber wound in a circle is connected to an invar line, and its expansion and contraction is converted into an angle change. We develop a completely new sensor that measures the change in polarization of light passing through the fiber with the Stokes parameter when the sensor angle changes due to strain and converts it into the amount of strain. In the method using function fitting to the measured Stokes parameters and using the approximate curve, a sufficient sampling speed, and very accurate was obtained even when comparing the actual sensor angle and the calculated angle.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光ファイバ 歪みセンサ 防災

1. 研究開始当初の背景

平成16年10月に発生した台風23号の例のように、豪雨等により河川構造物や道路のり面及び斜面の変状に伴う多くの災害が発生している。また、近年のトンネル等の崩落事故を教訓に、土木・建築分野における構造物の管理の高度化による安心、安全な暮らしの実現が求められている。土木・建築構造物の管理の高度化において、光ファイバセンサによる線的及び面的な歪み計測が注目されており、多くの技術開発がなされてきた。

これら防災用光ファイバセンサシステムは、光ファイバ自体をセンサとして使用しなおかつそれが低損失な信号伝送路を兼ねるため、システムをシンプルに構成できるという特徴を持つ。またガラスでできた光ファイバは金属ケーブルよりも遙かに軽量であるため、道路などが整備されていない場所に設置する際にも資材搬入等における労力が軽減され、容易に設置ができるという利点がある。

これらの建築構造物等の歪測定のための一つの手法としてFBG歪センサが注目され研究され、一部では実用化に近づいている。しかし、これまで研究されているFBG歪センサは広帯域光源と光スペクトラムアナライザを用いてFBGの反射スペクトルを測定し、その中心波長の変化を測定する方法が一般的であり、測定システムが大型且つ高価になる。また、FBGの反射スペクトルは歪のみならず温度によっても変化するため、純粋な歪量を測定するためには温度変化による影響を補償する必要があるが、従来の方法ではこれを補償するのは困難である。また光ファイバの歪みによって後方散乱光の周波数変化を検出するBOTDR法による歪み測定技術が開発されているが、計測器が高価であるのに加え、センサ設置時に光ファイバの張力調整が必要となり、修復時には足場の悪い山中で光ファイバ融着接続の精密な作業が必要となる。

上述したように、これまでの技術は実用レベルにあるものの、高コストであることや施工性および拡張性が低いという問題があり、普及レベルに達していないのが現状である。このため新技術の普及にあたり、これらの課題を解決する必要があると考えられる。

2. 研究の目的

本申請では上に述べた課題を解決し、土木・建築構造物の管理の高度化のための光ファイバセンサ技術を普及レベルに押し上げるための新しい歪みセンサシステムを開発する。光ファイバに歪みが増えられたときに、ファイバ中を通る光の偏光の変化を捕らえて、それを歪み量に換算する全く新しいセンサを開発することである。これまでに光ファイバ中の偏光の変化を検出する手法の振動センサなどは開発されているが、偏光の変化から光ファイバに加わる歪みを定量的に測

定する技術は皆無である。

この方法はセンサを複数縦続接続する際にも融着接続を行う必要が無く、コネクタ接続で良いため、設置および修復時における施工性を大幅に向上でき、またセンシング範囲を拡張することも容易に行える。測定に必要な機器は、パルスレーザ光源と偏光測定器およびオシロスコープとPCがあれば可能であり、従来のFBG法やBOTDR法と比較してコスト面でも大幅に有利である。

3. 研究の方法

光ファイバを円形に巻くことによって、内部に複屈折が生じ、 m 分の1波長板と同様の働きをする(図1)。ここで m は

$$m = \frac{\lambda}{2\pi ar^2} N \quad (1)$$

で与えられ、 a はファイバの材質や構造による定数、 r はファイバ断面の半径、 R はファイバの巻き半径、 N は巻き数である。

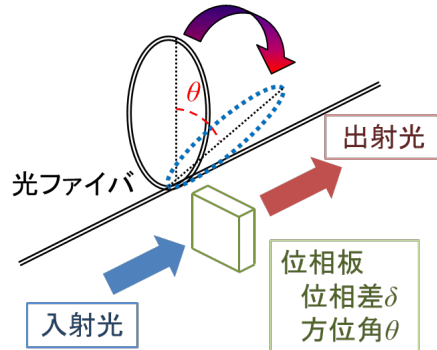


図1

この円形に巻いた光ファイバの傾きに対してファイバ中を通る光の偏光状態の変化を測定する。これは以下のような $S_0 \sim S_3$ のストークスパラメータで測定される。

$$\begin{aligned} S_0 &= E_x E_x^* + E_y E_y^* = A_x^2 + A_y^2 \\ S_1 &= E_x E_x^* - E_y E_y^* = A_x^2 - A_y^2 \\ S_2 &= E_x E_y^* + E_y E_x^* = 2A_x A_y \cos \delta \\ S_3 &= E_x E_y^* - E_y E_x^* = 2A_x A_y \sin \delta \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 z をファイバの長手方向(光の進行方向)とし、それに直交する電界の x および y 成分は

$$\begin{aligned} E_x &= A_x e^{i(\omega t - kz + \delta_x)} \\ E_y &= A_y e^{i(\omega t - kz + \delta_y)} \\ \delta &= \delta_x - \delta_y \end{aligned} \quad (3)$$

で与えられ、 A_x 、 A_y は電界の振幅、 ω は角周波数、 k は波数、 δ_x 、 δ_y はそれぞれの成分の位相差である。

4. 研究成果

(1)センサ本体機械構造の設計および試作を

行った。センサはインバー線と接続され、その伸縮がセンサの回転角度に変換される。また次の(2)において偏光検出器に GPIC 経由で PC を接続し、ストークスパラメータの取得、および近似曲線からセンサに加えられる歪みを算出するプログラムの作製を行った。

(2) 図 2 のような実験系でセンサの回転角を $0^\circ \sim 180^\circ$ の範囲で 5° 刻みに回転しストークスパラメータの測定を行う。光源には波長 $1.55\mu\text{m}$ 、パルス幅 $3\mu\text{s}$ 、繰り返し周波数 20kHz のパルス LD 光源を使用し、偏光コントローラ、サーキュレータを介してセンサに入射する。センサの射出光は偏光検出器によって測定を行う。

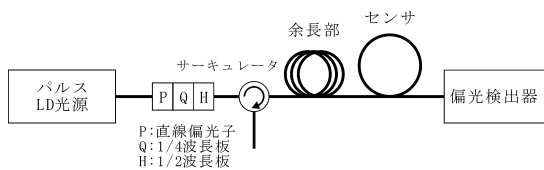


図 2

測定したストークスパラメータ $S_1 \sim S_3$ を S_0 で規格化し、関数フィッティングにより近似曲線 (図 3 中の実線) を求める。

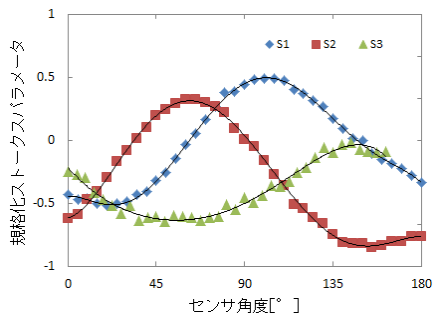


図 3

求めた近似曲線からセンサの回転角度を求める。その際には(1)で作製したプログラムを用い、自動計測が可能となるようにしている。実際のセンサの回転角と、近似曲線から算出した角度の比較を図 4 に示す。

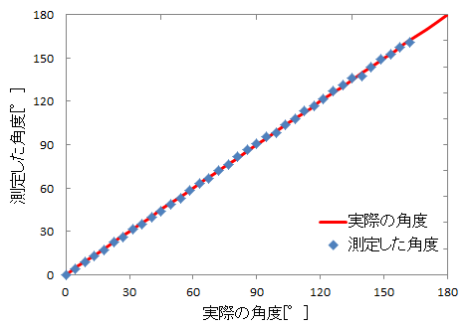


図 4

(3) 偏光の測定に使用しているストークスパラメータは(2)および(3)式より電界の x 、 y 成分 (ジョーンズベクトル) と相互に変換が可能である。センサを含む光路中の素子をそ

れぞれ 2×2 のジョーンズ行列で表すことにより、センサ中を通る光のシミュレートが可能となる。

$$\begin{bmatrix} E_x' \\ E_y' \end{bmatrix} = \dots \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}$$

E_x 、 E_y は入射成分、 E_x' 、 E_y' は出射光成分で複数の光学素子がある場合には 2×2 の行列を右から掛け合わせることで出射光を計算する。

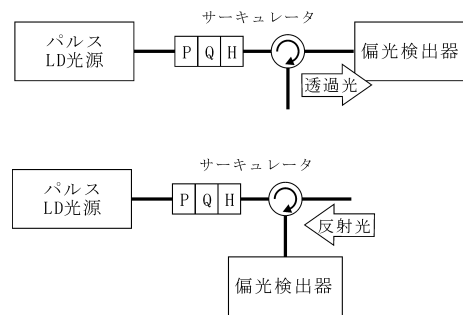


図 5

サーキュレータの偏光特性を確認するため、位相補償器の $1/4$ 波長板を固定し、 $1/2$ 波長板を回転させてサーキュレータへの入射光を変化させ、その透過光および反射光を測定した。サーキュレータを任意の方位角の回転波長板とし、測定値との誤差が最小になるパラメータを決定した。そのパラメータを用いることによって反射光の測定値から透過光の計算、あるいは同じパラメータを用いて透過光の測定値から反射光の計算が可能となる。図 6 は反射光の測定値から計算した透過光と、透過光の実測値との比較である。左上が S_1 が、右上が S_2 、左下が S_3 の結果である。

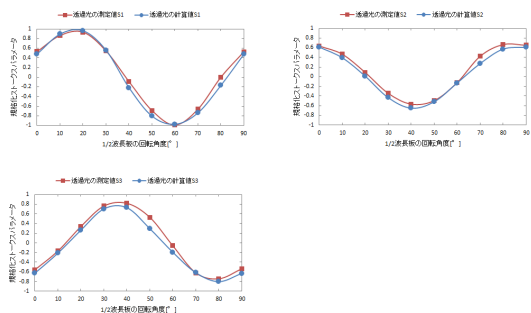


図 6

しかし、この後にセンサを接続し、それが回転した時の偏光変化のシミュレートを試みたが誤差が大きく、複数のセンサを多段に接続した場合には、現時点では実用的ではない。今後可能であれば、ニューラルネットワーク等を用いた関数近似を試みたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

Lili Yuan, Yao Zhao, and Shinya Sato,
Development of a low-cost and
miniaturized fiber Bragg grating strain
sensor system, Japanese Journal of
Applied Physics, 査読有, Vol.56, 2015.
DOI: 10.7567/JJAP.56.052502

〔学会発表〕(計3件)

菊地幸希、趙耀、袁莉莉、佐藤紘一、佐藤
信也、「偏光を用いた歪みセンサの光ファ
イバ中の誤差の研究」, 第52回応用物理学
会北海道支部学術講演会(2017.1.7)、北
海道・北見.

Yao Zhao, Koki Kikuchi, and Shinya Sato,
“Development of a Polarization
Detection Multipoint Fiber-optical
Strain Sensor System,” The 37th PIERS
(Progress In Electromagnetics Research
Symposium) (2016.8.8)、中国・上海.

女ヶ沢 大亮、佐藤信也、「偏光検出式光フ
アイバ歪みセンサに生じる誤差の定量化」,
第50回応用物理学会北海道支部学術講演
会(2015.1.9)北海道・旭川.

6. 研究組織

(1)研究代表者

佐藤 信也 (SATO, Shinya)
室蘭工業大学・工学研究科・准教授
研究者番号：00300963