

令和 5 年 6 月 18 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02158

研究課題名（和文）二光子吸収応答受光系を用いた多点光ファイバ型ベクトル曲げセンサ

研究課題名（英文）Multipoint fiber optic vector bending sensor with optical receiver based on two-photon absorption process

研究代表者

田中 洋介（Tanaka, Yosuke）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：20283343

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000 円

研究成果の概要（和文）：光ファイバに沿う複数点で曲げの大きさと向きが計測可能な光ファイバセンサを研究した。代表者研究室の技術である「受光素子の二光子吸収応答による光信号の強度相関計測」により、光信号処理系をシンプルにした。複数光路が一本にまとめられた「マルチコア光ファイバ」を用い、1点の曲げに対して生じるファイバ断面内の複数の歪みを各コアの光信号の変化から検出し、曲げの大きさと向きの同時計測を実現した。様々な計測高速化手法の検討した他、カテーテルの曲げ計測応用を手掛けた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では曲げの大きさと向きの多点計測が可能な光ファイバセンサの実現、計測の高速化、一応用として医療用カテーテルへの適用を行った。受光素子の二光子吸収応答で実現したシンプルな光信号処理とその高速化は、曲げ、変位、距離等を計測する様々な光システムの高速化への波及効果が期待できる。また、実現した曲げセンサは、橋梁、トンネル等に組み込めば構造物診断が可能な他、医療用カテーテル、ロボットアームの曲げ計測などへの応用も考えられる。これらのセンサデータが信頼性の高い1次データとしてネットワークに供給され、適切に運用されることで、安全で安心な社会の実現に貢献できると期待できる。

研究成果の概要（英文）：We studied an optical fiber sensor that can measure the magnitude and direction of bending at multiple points along the optical fiber. The optical signal processing system was simplified by intensity correlation measurement based on two-photon absorption process in a photodetector, a technique developed by our group. We used a multicore optical fiber, which consists of multiple cores to guide the light. Simultaneous measurement of bending magnitude and direction was realized by detecting the change in optical signal at each core to measure the bend-induced strains in the same cross section of the fiber. We investigated various kinds of techniques to speed up the measurement. We also demonstrated an application of the sensor to bending measurement of a catheter.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光ファイバセンサ 曲げセンサ FBGセンサ マルチコアファイバ 二光子吸収応答

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 橋梁、ビル等の大型構造物の健全性を監視し、災害につながる異常を早期発見する構造ヘルスマモニタリング(SHM)技術の向上が急務である中、目に見える表面部分の監視は、サーモグラフィや、カメラ映像の画像解析が有効であった。一方、隠れて見えない部分も含めると、一本の光ファイバに沿って構造物の複数個所の歪や温度が計測できる多点ファイバセンシングへの期待が高まっていた。

(2) 多点ファイバセンシングの研究・開発に関し研究代表者は、受光素子の二光子吸収 (TPA: two-photon absorption) 応答を利用した距離計測技術とファイバブラッグ回折格子 (FBG: Fiber Bragg Grating)との融合による多点 FBG センサを構築していた。この手法では、光信号処理が非常にシンプルになる上に、各 FBG の反射スペクトルに重なりがあってもそれらを距離の違いから分離して計測できる。

(3) 従来型の多点 FBG センサは、直線的な引っ張り歪は計測できるが、構造物診断で非常に重要な曲げの「向き」や「大きさ」の計測ができなかった。このことに関し、大容量光通信用に開発されたコアが複数あるマルチコア光ファイバに FBG を加工すると各コアの FBG が異なる反射スペクトルの変化を示すため、曲げ計測が可能となること分かってきた。

(4) しかし、マルチコア FBG を用いた多点曲げ計測をシンプルな系で構築し、かつ短時間で計測を行うための有効な手法はまだ検討が進んでいなかった。

2. 研究の目的

本研究では、一本のマルチコア光ファイバに沿って複数点で曲げを計測し、構造物の曲げ形状が、向きも含めて短時間で一括計測可能、かつシンプルな系のセンサを実現することを目的とした。このシステムは、橋梁、ビルなどの大型構造物の健全性診断、様々な器具の曲げ形状計測に応用できる。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、曲げセンサの実現のために、マルチコア光ファイバの隣り合うコアや長さ方向に FBG が加工されたマルチコア FBG を用いることとした。また、光信号強度相関をシンプルな系で実現するため、受光素子の二光子吸収応答を利用する系を検討することとした。

(2) 提案する曲げセンサにおいて、マルチコア FBG(MCFBG)からの反射スペクトルが互いに重なっていても、それらを光スイッチ等を使わずに反射点の位置情報から分離できるよう、受光素子の二光子吸収応答(TPA)を利用した強度相関計測による信号処理を検討することとした。

(3) FBG の反射スペクトル計測に必要な波長掃引と反射スペクトル分離に必要な強度相関計測とを短時間で効率的に行うことが可能な光源制御の検討を行うこととした。

(4) 曲げの向きと大きさの同時計測の他、曲げに関連づけて測定可能な物理量計測への応用についても検討することとした。

4. 研究成果

(1) 各コア FBG の Bragg 波長が等しい MCFBG の全てのコアからの反射光を分離測定する手法として、Si-APD の二光子吸収応答による強度相関計測を利用した距離、スペクトル一括測定手法により、多点での曲げ計測の原理確認実験を行い、形状計測に成功した[1]。

この実験では、光源から各コアの FBG までの距離が全て異なるものになるように、マルチコアファイバの各コアと光源をつなぐ光ファイバの長さを異なるものとした。

図1に7コアから成るマルチコア FBG の長手方向3ヶ所、合計21箇所の FBG 反射スペクトルを距離によって分離した結果の

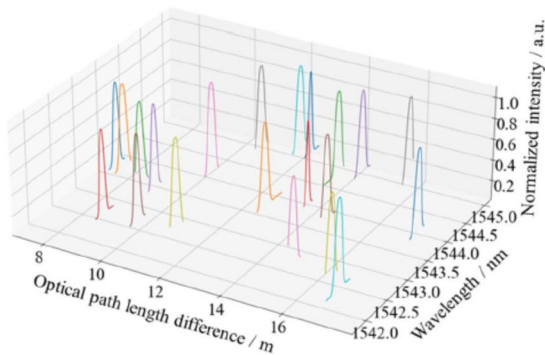


図1. 多点マルチコア FBG の各コアからの反射スペクトルの分離測定結果[1]

1例を示す。距離情報がなければ重なってしまうスペクトルが、距離情報によって分離されていることが分かる。

図2に形状計測の1例として、円筒に長手方向に3ヶ所のFBGを加工したマルチコアFBGを巻きつけて、その形状を計測した結果を示す。赤色で示したFBGの加工箇所の曲げと向きの情報から、円筒形状が再現されていることが分かる。

これらの計測は、従来は長手方向には異なる反射波長をもつFBGを用い、また、異なるコアのFBGからの反射光の識別には光路の切り替えや、各光路で別々の受光系を用いる等、複雑なシステムが必要であった。

今回の提案手法により、従来のような複雑な系は不要となり、得られた光信号から直ちに複数のFBGからの反射信号を分離することができるようになった。これは国内外を含めて初の成果である。

(2)マルチコアFBG各点のスペクトルをより高速に分離計測する手法として、新たに光信号の変調周波数を連続掃引し、FBGからの反射光信号の周波数情報から反射点を識別する手法[2]や、光信号のタイミング制御によって観測する反射点を任意に切換え可能な手法[3]を提案し、検討を行った。

図3に光源の変調周波数を掃引して分離計測したFBG反射スペクトルの1例を示す。ここでも、受光素子の二光子吸収応答を利用することで高速な回路を用いることなく信号処理が実現できている。

(3)提案する光ファイバ曲げセンサを医療用カテーテルに組み込むことで、カテーテルの曲げ計測が可能なることを示した。本手法では複数のFBGを利用することで、各FBGの温度変化による計測結果の変動を打ち消すことができることを確認した[4]。

図4に光ファイバ曲げセンサを組み込んだ医療用カテーテルで曲げ計測を行っている実験を示す。

図5にこの実験系を恒温器の中に入れ、温度を変えて曲げ計測を行った際の実験結果を示す。FBG単体での計測では、温度変化の影響により歪み計測は誤差を伴うが、提案する曲げセンサでは温度変化の影響を受けていないことが分かる。

更に、カテーテルの曲げが接触面に及ぼす力と関連付けられる可能性に思い至り、力覚センサとしての検証を行った[5]。図6から、光ファイバ曲げセンサからの信号がカテーテルが接触面に及ぼす力に比例しており、このセンサが力覚センサとなることが分かる。

(4)この他、計測時間の更なる短縮化に成功し、現段階でデータの整理とまとめを行っているところである。

以上、本研究ではマルチコア光ファイバ回折格子と受光素子の二光子吸収応答を用いた多点光ファイバ曲げセンサを提案し、その原理確認、および要素技術の新たな提案、更には応用について、幅広く検討した。本研究は、センシ

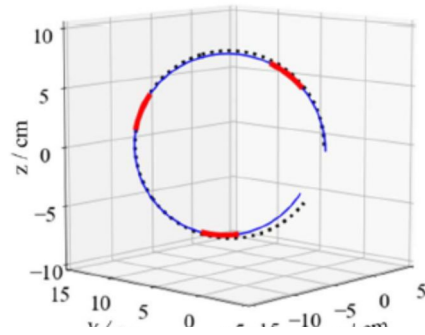


図2 提案する光ファイバ曲げセンサによる円筒形状の計測結果[1]

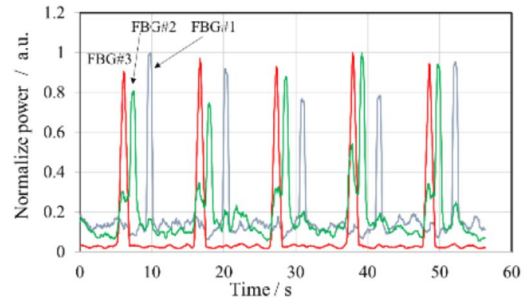


図3 光源変調周波数掃引と受光素子の二光子吸収応答を用いたFBG反射スペクトルの分離計測[2]



図4 提案する光ファイバセンサを組み込んだ医療用カテーテルによる曲げ計測実験[4]

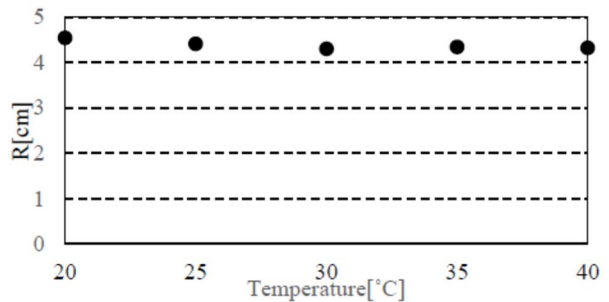


図5 温度無依存曲げ計測の検証実験結果[4]

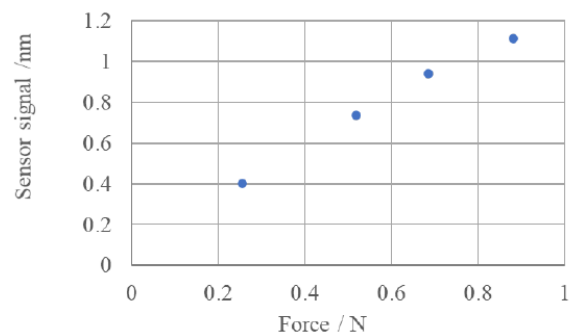


図6 力覚センサ応用の検証実験結果[5]

ングヘッドとなる光ファイバだけに注目するのではなく、受光系から信号処理も含めた系全体としての検討を行った数少ない研究の一つとして、システム構築の点で重要な知見を提供するものとする。また、医療用カテーテルの曲げ計測や、力覚センサ応用が検証できたことで、関連する様々な分野との融合を含めて、今後の更なる発展の可能性が考えられる。

<引用文献>

Naohiro Sonoda, Reina Takagi, Itsuki Saito, Tetsuya Abe, Shihua Zhao, Yosuke Tanaka, “Multipoint bending measurement using multicore fiber Bragg grating and two-photon absorption process in Si-APD,” IEEE Sensors Journal, vol. 21, no. 22, pp. 25736-25742, Nov.15 (2021).

Ryosuke Sato, Reina Takagi, Itsuki Saito, Naohiro Sonoda, Shihua Zhao, Yosuke Tanaka, “Multipoint FBG sensing using incoherent OFDR and two-photon absorption process in Si-APD,” Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2022, paper JW3B.94, May 18 (2022).

Itsuki Saito, Yosuke Tanaka, “Distance measurement to multiple reflection points using intensity correlation signal produced by two-photon absorption process in Si-APD,” Optical Fiber Sensors Conference 2022 (OFS2022), paper Th4.66, Sept.2 (2022).

Shihua Zhao, Naohiro Sonoda, Reina Takagi, Itsuki Saito, Tetsuya Abe, Toshitaka Wakayama, Yosuke Tanaka, “Basic study of temperature independent fiber bending sensor for catheters using multicore fiber Bragg grating and two-photon absorption process in Si-APD,” SPIE Conf 11914. on Future Sensing Technologies, Digital Forum, Paper 11914-27, Nov.15 (2021).

Reina Takagi, Naohiro Sonoda, Toshitaka Wakayama, Yosuke Tanaka, “Force measurement using 3-D curvature sensing based on multicore FBG inside catheter and two-photon absorption process in Si-APD,” Optical Fiber Sensors Conference 2022 (OFS2022), paper Th4.38, Sept.2 (2022).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sonoda Naohiro, Takagi Reina, Saito Itsuki, Abe Tetsuya, Zhao Shihua, Tanaka Yosuke	4. 巻 21
2. 論文標題 Multipoint Bending Measurement Using Multicore Fiber Bragg Grating and Two-Photon Absorption Process in Si-APD	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Sensors Journal	6. 最初と最後の頁 25736 ~ 25742
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JSEN.2021.3117858	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sonoda Naohiro, Abe Tetsuya, Tanaka Yosuke	4. 巻 11523
2. 論文標題 Experimental investigation of multicore fiber Bragg grating's crosstalk for curvature sensing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SPIE 11523, Optical Technology and Measurement for Industrial Applications 2020	6. 最初と最後の頁 1152304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2574772	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Abe Tetsuya, Sonoda Naohiro, Tanaka Yosuke	4. 巻 11525
2. 論文標題 Distance measurement based on two-photon absorption process in Si-avalanche photodiode with pulsed reference light	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SPIE 11525, SPIE Future Sensing Technologies	6. 最初と最後の頁 1152504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2580487	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 田中洋介	4. 巻 58
2. 論文標題 光ファイバ曲げセンサ	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 光技術コンタクト	6. 最初と最後の頁 13-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 田中洋介	4. 巻 31
2. 論文標題 光ファイバによるベクトル曲げセンシング	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 光アライアンス	6. 最初と最後の頁 18-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takagi Reina, Sekiguchi Runa, Sonoda Naohiro, Wakayama Toshitaka, Tanaka Yosuke	4. 巻 -
2. 論文標題 Force Measurement Using 3-D Curvature Sensing Based on Multicore FBG inside Catheter and Two-Photon Absorption Process in Si-APD	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 27th International Conference on Optical Fiber Sensors, Technical Digest Series	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OFS.2022.Th4.38	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Saito Itsuki, Tanaka Yosuke	4. 巻 -
2. 論文標題 Distance Measurement to Multiple Reflection Points Using Intensity Correlation Signal Produced by Two-Photon Absorption Process in Si-APD	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 27th International Conference on Optical Fiber Sensors, Technical Digest Series	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OFS.2022.Th4.66	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Yosuke Tanaka, Toshitaka Wakayama
2. 発表標題 MCFBG curvature sensor using two-photon absorption process in Si-APD and its application to medical use
3. 学会等名 Optics and Photonics International Congress 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 Ryosuke Sato, Reina Takagi, Itsuki Saito, Naohiro Sonoda, Shihua Zhao, Yosuke. Tanaka
2 . 発表標題 Multipoint FBG sensing using incoherent OFDR and two-photon absorption process in Si-APD
3 . 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2022 (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Yosuke Tanaka
2 . 発表標題 Distributed and multipoint fiber optic sensors for structural health monitoring and medical use
3 . 学会等名 IEEE 9th International Conference on Photonics 2022 (ICP 2022) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Yosuke Tanaka, Naofumi Sonoda, and Tetsuya Abe
2 . 発表標題 Multipoint curvature sensing with multicore fiber Bragg gratings and two-photon absorption process in Si-APD
3 . 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2021 (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Shihua Zhao, Naohiro Sonoda, Reina Takagi, Itsuki Saito, Tetsuya Abe, Toshitaka Wakayama, Yosuke Tanaka
2 . 発表標題 Basic study of temperature independent fiber bending sensor for catheters using multicore fiber Bragg grating and two-photon absorption process in Si-APD Basic study of temperature independent fiber bending sensor for catheters using multicore fiber Bragg grating and two-photon absorption process in Si-APD
3 . 学会等名 SPIE Conf 11914. on Future Sensing Technologies (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 趙世華, 園田直弘, 高木伶菜, 齋藤樹, 阿部哲也, 若山俊隆, 田中洋介
2. 発表標題 マルチコア光ファイバ回折格子と受光素子の二光子吸収応答による曲げ計測システムと医療機器への応用
3. 学会等名 第 26 回知能メカトロニクスワークショップ(26th Intelligent Mechatronics Workshop) IMEC2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 園田直弘、高木伶菜、齋藤樹、阿部哲也、趙世華、田中洋介
2. 発表標題 マルチコアFBG と Si APD 二光子吸収応答を利用した多点曲げ計測
3. 学会等名 第65回光波センシング技術研究会LST65-9
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤 凌介、高木 伶菜、齋藤 樹、園田 直弘、趙 世華、田中 洋介
2. 発表標題 Si-APD二光子吸収応答による Incoherent OFDR法とFBG計測応用
3. 学会等名 2022年第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 趙 世華、田中 洋介
2. 発表標題 Si-APD二光子吸収応答による速度測定
3. 学会等名 2022年第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阿部哲也、園田直弘、田中洋介
2. 発表標題 受光素子の二光子吸収応答を用いた距離測定 パルス参照光の導入
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高木 伶菜、園田 直弘、阿部 哲也、趙 世華、田中 洋介
2. 発表標題 マルチコアFBGとSi-APD二光子吸収応答を用いた多点曲げ計測
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中洋介
2. 発表標題 光ファイバシステムによる変位計測
3. 学会等名 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	塩田 達俊 (Shioda Tatsutoshi) (10376858)	埼玉大学・理工学研究科・准教授 (12401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------