

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14754

研究課題名（和文）波長掃引レーザを用いた光ファイバセンサの超高速実時間振動計測システムの開発

研究課題名（英文）Development of high-speed and real-time vibration measurement system for optical fiber sensor with wavelength-swept laser

研究代表者

山口 達也（YAMAGUCHI, Tatsuya）

日本大学・理工学部・助教

研究者番号：90822205

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では安全・安心な社会づくりに貢献するため、光ファイバセンサを用いた高速振動計測システムの開発を推進した。主な成果としては、(1)高性能レーザ光源（バッファ型波長掃引レーザ）の開発及びその動作特性の評価、(2)バッファ型波長掃引レーザによる300kHzの測定スピードの実現、(3)パルス変調を利用した距離レンジの拡大手法の開発、(4)高速デジタル演算回路に基づくシステムのリアルタイム化と多チャンネル化などである。また、本研究を発展させ、ガス成分分析に適用できる高速分光測定システムも開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光ファイバセンサは主成分がガラスで構成されているため、高い耐久性を備えており、社会インフラから極限環境に至るまで多様な応用が検討されている。本研究では光ファイバセンサの多点性能と高速性能の改善を図るため、バッファ型波長掃引レーザを用いた光ファイバセンサの計測に挑戦した。本成果は波長掃引レーザを用いる方法において世界最速のリアルタイム計測を実現した技術であり、学術的意義は大きい。本研究をさらに発展させることにより、物体内に伝わる高速振動を光ファイバセンサでとらえることで構造物の損傷評価システムの開発につながることから、社会的意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：This research promoted the development of a high-speed vibration measurement system using optical fiber sensors in order to contribute to the creation of a safe and secure society. Major achievements include: (1) development of a high-performance laser source (buffered wavelength-swept laser) and evaluation of its operational characteristics, (2) realization of a measurement speed of 300 kHz using a buffered wavelength-swept laser, (3) development of a distance range extension method using pulse modulation, and (4) realization of real-time and multi-channel operation of the system by high-speed digital arithmetic circuitry. By extending this research, a high-speed spectroscopy system for gas component analysis was also developed.

研究分野：光ファイバセンサ

キーワード：振動センサ 光ファイバセンサ ファイバブラッググレーティング 波長掃引レーザ 実時間計測システム

### 1. 研究開始当初の背景

光ファイバセンサのファイバブラッググレーティング (FBG) は防爆性や耐腐食性に優れており、センサ部に電源が不要になる特徴がある。FBG は特定の波長の光のみを反射し、その波長がひずみや振動に応じて変化する。そのため、社会インフラといわれる橋梁やパイプラインなどの老朽化の課題に対し、構造物を「長期的かつ安定的に監視できる」センサとして注目されている。近年では航空機等で使用される複合材料の損傷評価などにも応用が進展しており、FBG のさらなる多点性能と高速性能の改善が求められている。このような状況の中で、高速に発振波長を掃引する波長掃引レーザを用いた測定方法が精力的に研究され、数十 kHz を超える測定レートが報告されている。この波長掃引レーザは共振器内に組み込んだ波長フィルタの駆動周波数によってレーザの掃引周波数が決定する。ただし、一般的に用いられる波長フィルタが機械的動作のため、レーザの掃引周波数が数十 kHz に制限される問題があった。そこで、本研究においては、医療分野において高速イメージング用に開発されたバッファ光学系を用いた波長掃引レーザを FBG の計測に応用し、300kHz の測定レートにおいてリアルタイム計測に挑戦した。

### 2. 研究の目的

本研究ではバッファ光学系を用いた波長掃引レーザを構築し、300kHz の測定レートを持つ FBG 計測システムを開発する。その実現可能性を検討するため、第一段階としてバッファ光学系を用いた波長掃引レーザを開発し、その動作特性を明らかにする。そして、開発したレーザを計測システムに搭載することにより、300kHz の測定レートを実現する。第二段階としては、FBG の距離レンジの制限を克服するため、波長掃引レーザをパルス変調させる距離補正の方法を開発する。第三段階としてはセンサ数の増大に対応するため、計測システムの高チャンネル化を検討する。リアルタイム計測を実現するには、センサあたり 300,000 回/秒の反射信号のピーク検出に対応できる処理速度が必要になる。そこで、フィールド・プログラマブル・ゲート・アレイ (FPGA) を用いたデジタル信号処理によりリアルタイム計測を実現する。

### 3. 研究の方法

バッファ光学系を用いた波長掃引レーザによる FBG の計測システムの開発に関する下記項目について検討を行った。

#### (1) バッファ光学系による波長掃引レーザと計測システムの開発

使用する波長掃引レーザは波長フィルタを用いたリング型レーザであり、フーリエ・ドメイン・モード・ロック (FDML) 機能を有している。波長フィルタを正弦波信号で変調することにより、発振波長を正弦波状に掃引する。図 1 が開発した 2 光路型のバッファ光学系を用いた波長掃引レーザである。波長掃引レーザは中心波長が 1550nm、掃引帯域が 60nm、掃引周波数  $f_m=50.7\text{kHz}$  で動作する。波長掃引レーザからの射出光は光増幅器で増幅し、光スイッチに入射する。光スイッチはレーザの中心波長領域の光のみをパルス光として出力する。バッファ光学系は複数の光路に分岐した光学系であり、一方の光路には遅延ファイバを挿入している。そのため、光スイッチで抽出した光が各光路を伝搬して合波されると、伝搬時間の違いによって 2 重の掃引光が出力される。波長掃引レーザでは長波長方向への掃引及び短波長方向への掃引ごとに FBG の反射光を検出できる。このため、バッファ光学系を用いて掃引光を多重化することにより、FBG の測定レートを数倍に高めることができる。2 光路型のバッファ光学系を用いた 2 重掃引では  $202.8\text{kHz}(=4f_m)$ 、3 光路型のバッファ光学系を用いた 3 重掃引では  $304.2\text{kHz}(=6f_m)$  の測定レートにおいてリアルタイム計測を実現する。

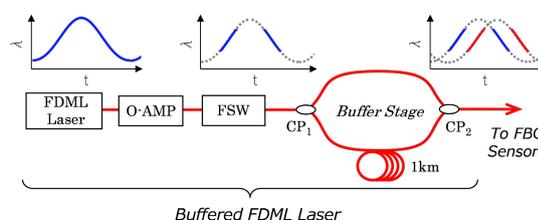


図 1 2 光路型のバッファ光学系を用いた波長掃引レーザ (文献 1)

#### (2) FBG の距離補正の検証

波長掃引レーザを用いた FBG 計測では、計測システムから FBG を設置する場所までに敷設する光ファイバで発生する伝搬時間 (遅延) が測定精度を低下させる問題がある。そこで、バッファ型波長掃引レーザをパルス変調させることにより、遅延を補正する方法を考案した。実験は FBG の設置を広範囲の距離で検証し、遅延補正方法の有効性を明らかにする。計測対象に応じて、さまざまな設置距離での計測が必要となることが容易に予想されるため、最大で長さ 5km の光ファイバを用いて FBG を多点に設置し、本システムが自由度の高い実時間計測システムであることを明らかにする。これにより、FBG の設置位置の自由度を高めた測定レート 300kHz の実時間振動計測を実証する。

### (3) 計測システムの多チャンネル化

センサ数の増大に対応するため、図2に示すFBGの多チャンネル計測システムを開発した。多チャンネル計測システムでは3光路型のバッファ光学系を用いた波長掃引レーザを組み込んでいる。レーザからの光は二つの光路に分岐させ、2チャンネルに拡張した合計6つのFBGセンサに照射する。ADC(サンプリング周波数250MHz)は各チャンネルのFBGの反射信号を取得し、FPGAへ転送する。FPGAにはデジタル回路を用いてピーク検出処理が実装されており、FBGセンサあたりの検出スピードは300,000回/秒を超える性能を有し、リアルタイム計測を実現する。

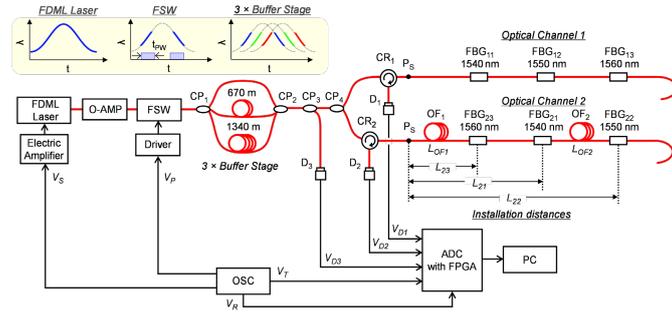


図2 3光路型のバッファ光学系を用いたFBGの多チャンネル計測システム 文献2)

## 4. 研究成果

### (1) バッファ光学系による波長掃引レーザと計測システムの開発

2光路型のバッファ光学系を用いた波長掃引レーザの動作特性を評価した(図3)。波長掃引レーザは中心波長1550nm、掃引帯域60nm、掃引周波数 $f_m=50.7\text{kHz}$ で動作させた。2光路に分岐したバッファ光学系では、設置する遅延ファイバの長さを1kmに調整し、2光路型のバッファの遅延時間を $4.9\mu\text{s}(=1/4f_m)$ に制御した。2光路型のバッファ光学系を用いた波長掃引レーザでは、長波長方向及び短波長方向の掃引を2重化できることが実験的に明らかになった。

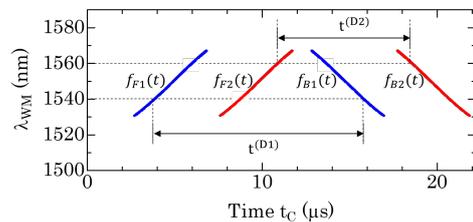


図3 レーザの出力特性 文献1)

次に、2光路型のバッファ光学系を用いた波長掃引レーザを計測システムに組み込み、FBGによる振動測定を実施した。FBGには圧電振動子(振動周波数20kHz)を設置した。図4は振動によるFBGの反射波長測定の結果である。振動によるFBGの反射波長の変化を明瞭に観測できている。さらに、2重化した掃引光を用いることにより、測定レート $202.8\text{kHz}(=4f_m)$ 、測定時間分解能 $4.9\mu\text{s}(=1/4f_m)$ を実現できることが明らかになった。さらに、3光路型のバッファ光学系を用いて掃引光を3重化することにより、 $304.2\text{kHz}(=6f_m)$ の測定レートにおいてリアルタイム計測を実現した。

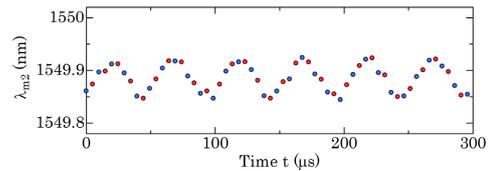


図4 FBGを用いた振動測定 文献1)

### (2) FBGの距離補正の検証

図5は3光路型のバッファ光学系による長距離FBGを用いたひずみ測定の結果である。FBGには、 $0\sim 1000\mu\text{e}$ の引張りひずみを印加した。FBGの設置距離は $0\sim 5050\text{m}$ の範囲で変更した。設置距離による遅延は波長掃引レーザをパルス変調させる方法により補正した。FBGの反射波長は設置距離の影響を受けることなく、ひずみに対して同一の反射波長応答( $1.2\times 10^{-3}\text{nm}/\mu\text{e}$ )を示した。このことから、提案手法がFBGの長距離計測に有効であり、FBGの距離レンジを数kmに拡大できることが明らかになった。

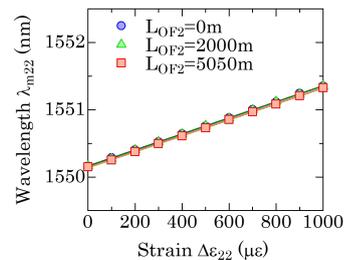


図5 長距離FBGの測定 文献2)

### (3) 計測システムの多チャンネル化

図6は図2に示した3光路型のバッファ光学系を用いた多チャンネル計測システムのモニタ画面である。計測システムでは波長掃引レーザをパルス変調し、各チャンネルの各FBGの反射信号を識別することにより、遅延補正を行っている。計測シ

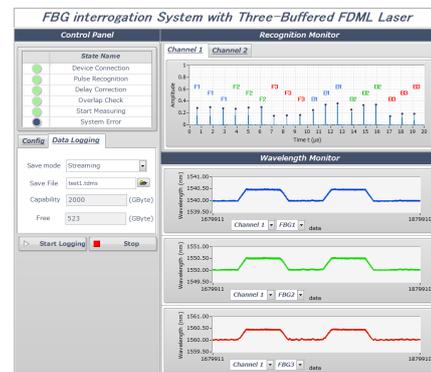


図6 多チャンネル計測システムのモニタ画面 文献2)

テムでは 3 光路型のバッファ光学系を用いた波長掃引レーザを構築している。そのため、多チャンネルの任意の距離に設置された FBG を測定レート 304.2kHz (=6f<sub>m</sub>) でリアルタイム計測できることを明らかにした。

#### (4) 分光測定システムへの応用

バッファ光学系を用いた波長掃引レーザが構築できたことにより、波長 1550nm 領域における高速な分光測定システムが開発できる新たな知見が得られた。この研究ではバッファ光学系が複数の光路に分岐する点に着目し、各光路に測定光と参照光を伝搬させることにより、時間分解能 20μs のリアルタイム分光測定を実現した<sup>文献3)</sup>。

#### (5) 機械学習による波長分割多重の限界を克服した FBG の多点化

FBG に関する多くの研究では波長分割多重に基づく多点化が採用されている。そのため、光源の波長帯域によって設置できるセンサ数が制限される問題があり、本研究の多点化でも大きな障害になることが実験的に明らかになった。この問題の突破口として、図 7 に示すように、波長分割多重の限界を超えて重なり合った FBG の反射スペクトルを解析する手法の開発を推進した。実験では、一般的な広

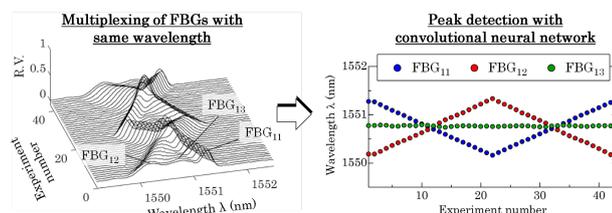


図 7 機械学習を用いた FBG の多重化<sup>文献 4)</sup>

帯域光源と光スペクトラムアナライザを用いて観測している。我々は畳み込みニューラルネットワークを用いた解析モデルが問題解決に有効であることを明らかにした。考案した解析モデルは 3 つ FBG が複雑に重なり合うスペクトルの解析に世界で初めて成功し、波長分解能 2.8pm を実現した。

以上の成果より、波長掃引レーザを用いた測定方法において、測定レート 300kHz を持つ世界最速のリアルタイム計測システムを実現した。さらに本研究遂行によって、計画以上の分光測定システムの開発及び波長分割多重の限界を克服した FBG の多点化などの新たな知見が得られた。

#### <引用文献>

- ① Tatsuya Yamaguchi, Wataru Endo, and Yukitaka Shinoda, “High-speed interrogation system for fiber Bragg gratings with buffered Fourier domain mode-locked laser,” *IEEE Sensors Journal*, Vol. 21, No. 15, pp. 16659-16669 (2021).
- ② Tatsuya Yamaguchi, Akira Nakamoto, and Yukitaka Shinoda, “Real-time measurement system for overlapping reflection signals of fiber Bragg gratings using high-speed wavelength-swept laser,” *Optical Engineering*, Vol. 61, No. 7, Art.no. 076114 (2022).
- ③ Tatsuya Yamaguchi, Wataru Endo, and Yukitaka Shinoda, “Real-time spectroscopy system for continuous measurement with Fourier-domain mode-locked Laser at 1550 nm,” *IEEE Sensors Letters*, Vol. 5, No. 8, Art.no. 5000204 (2021).
- ④ Tatsuya Yamaguchi, Hiroto Kawashima, Hiroki Matsuda, and Yukitaka Shinoda, “Experimental demonstration of peak wavelength measurement of multiplexing fiber Bragg gratings using convolutional neural network,” *IEEE Sensors Journal*, Vol. 23, No. 9, pp. 9343-9352 (2023).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6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 5件）

1. 著者名 Yamaguchi Tatsuya, Endo Wataru, Shinoda Yukitaka	4. 巻 21
2. 論文標題 High-Speed Interrogation System for Fiber Bragg Gratings With Buffered Fourier Domain Mode-Locked Laser	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Sensors Journal	6. 最初と最後の頁 16659 ~ 16669
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JSEN.2021.3079191	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 Yamaguchi Tatsuya, Endo Wataru, Shinoda Yukitaka	4. 巻 5
2. 論文標題 Real-Time Spectroscopy System for Continuous Measurement With Fourier-Domain Mode-Locked Laser at 1550 nm	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Sensors Letters	6. 最初と最後の頁 1 ~ 4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LSENS.2021.3096608	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 Yamaguchi Tatsuya, Akira Nakamoto, Shinoda Yukitaka	4. 巻 61
2. 論文標題 Real-time measurement system for overlapping reflection signals of fiber Bragg gratings using high-speed wavelength-swept laser	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optical Engineering	6. 最初と最後の頁 076114 ~ 076114
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/1.OE.61.7.076114	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 草場光博、山口達也	4. 巻 141
2. 論文標題 光応用・視覚技術分野の研究開発動向	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気学会論文誌A	6. 最初と最後の頁 12 ~ 13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejfms.142.12	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 Yamaguchi Tatsuya, Akira Nakamoto, Shinoda Yukitaka	4. 巻 62
2. 論文標題 Consideration of spectroscopic measurements with broadband Fourier domain mode-locked laser with two semiconductor optical amplifiers at ~ 1550 nm	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optical Engineering	6. 最初と最後の頁 036101 ~ 036101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.OE.62.3.036101	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 Yamaguchi Tatsuya, Hiroto Kawashima, Hiroki Matsuda, Shinoda Yukitaka	4. 巻 23
2. 論文標題 Experimental demonstration of peak wavelength measurement of multiplexing fiber Bragg gratings using convolutional neural network	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Sensors Journal	6. 最初と最後の頁 9343 ~ 9352
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JSEN.2023.3262494	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 -

〔学会発表〕 計22件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 山口達也, 遠藤亘, 篠田之孝
2. 発表標題 パフファステージを用いた波長掃引レーザによるファイバブラッググレーティングの反射測定の検討
3. 学会等名 電気学会 光応用・視覚研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 遠藤亘, 山口達也, 篠田之孝
2. 発表標題 波長掃引ファイバレーザを用いたリアルタイム分光測定システムの検討
3. 学会等名 電気学会 光応用・視覚 / 計測合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口達也, 中本瑛, 篠田之孝
2. 発表標題 パルファ型順方向波長掃引レーザの光出力特性の検討
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 遠藤亘, 山口達也, 篠田之孝
2. 発表標題 波長掃引レーザを用いたファイバブラッググレーティングの実時間分光測定 of 検討
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口達也, 遠藤亘, 篠田之孝
2. 発表標題 3パルファステージを用いた波長掃引レーザによるファイバブラッググレーティングの反射信号測定 of 検討
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口達也, 中本瑛, 篠田之孝
2. 発表標題 広帯域波長掃引レーザを用いたファイバブラッググレーティングによる振動測定
3. 学会等名 電気学会 光応用・視覚研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中本瑛, 山口達也, 篠田之孝
2. 発表標題 広帯域波長掃引レーザを用いた動的な透過スペクトル測定の基礎検討
3. 学会等名 電気学会 光応用・視覚 / 計測合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山口達也, 川島裕人, 松田 裕貴, 篠田之孝
2. 発表標題 機械学習を用いたオーバーラップしたファイバブラッググレーティングによるひずみ測定の基礎検討
3. 学会等名 電気学会 光応用・視覚研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山口達也, 篠田之孝
2. 発表標題 多チャンネル計測システムを用いたファイバブラッググレーティングによるひずみ測定の基礎検討
3. 学会等名 電気学会 光応用・視覚 / 計測合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山口達也, 遠藤亘, 篠田之孝
2. 発表標題 パルファ型波長掃引レーザを用いたファイバブラッググレーティングの動的な反射波長測定
3. 学会等名 令和3年電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口達也, 中本瑛, 篠田之孝
2. 発表標題 高速・広帯域波長掃引レーザを用いたファイバブラッググレーティングによるひずみ測定
3. 学会等名 令和3年電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中本瑛, 山口達也, 篠田之孝
2. 発表標題 広帯域化した波長掃引レーザによる透過スペクトル測定の基礎実験
3. 学会等名 令和3年電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久世卓郎, 中本瑛, 山口達也, 篠田之孝
2. 発表標題 広帯域波長掃引レーザを用いたファイバブラッググレーティングの反射光測定の検討
3. 学会等名 計測自動制御学会 第38回センシングフォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口達也, 中本瑛, 篠田之孝
2. 発表標題 3バッファ型波長掃引レーザを用いたファイバブラッググレーティングによるひずみ測定の検討
3. 学会等名 計測自動制御学会 第38回センシングフォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口達也, 篠田之孝
2. 発表標題 パルファ型波長掃引レーザを用いたファイバブラッググレーティング計測の時間分解能に関する検討
3. 学会等名 令和4年電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川島裕人, 松田 裕貴, 山口達也, 篠田之孝
2. 発表標題 波長掃引光を用いた低反射率のファイバブラッググレーティングアレイによるひずみ測定 of 検討
3. 学会等名 計測自動制御学会 第39回センシングフォーラム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松田 裕貴, 川島裕人, 山口達也, 篠田之孝
2. 発表標題 多点ひずみ測定のための低反射率ファイバブラッググレーティングのアレイ化の基礎検討
3. 学会等名 令和4年電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久世卓郎, 山口達也, 篠田之孝
2. 発表標題 広帯域化した波長掃引レーザを用いたファイバブラッググレーティングによる振動測定 of 検討
3. 学会等名 令和4年電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山口達也, 川島裕人, 松田 裕貴, 篠田之孝
2. 発表標題 機械学習を用いたオーバーラップしたファイバブラッググレーティングの反射波長測定の基本検討
3. 学会等名 令和4年電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川島裕人, 山口達也, 松田 裕貴, 篠田之孝
2. 発表標題 2つの低反射率ファイバブラッググレーティングアレイを用いた動的ひずみの実時間計測の検討
3. 学会等名 IEEE Instrumentation & Society Japan Chapter主催 2022年度「学生研究発表会」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山口達也, 篠田之孝
2. 発表標題 3パツファ型波長掃引レーザを用いたファイバブラッググレーティングの多チャンネル計測の検討
3. 学会等名 令和5年電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松田 裕貴, 川島裕人, 山口達也, 篠田之孝
2. 発表標題 二つのファイバブラッググレーティングアレイによる振動の実時間測定 of 検討
3. 学会等名 令和5年電気学会全国大会
4. 発表年 2023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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------