

令和 3 年 6 月 20 日現在

機関番号：33924

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14999

研究課題名（和文）光ファイバ中の誘導ブリルアン散乱を用いた温度と歪の分離・分布センシングの機能向上

研究課題名（英文）Performance improvement of discriminative distributed Brillouin fiber sensing of temperature/strain

研究代表者

大川 洋平（Okawa, Youhei）

豊田工業大学・工学（系）研究科（研究院）・ポストドクトラル研究員

研究者番号：90835737

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：光ファイバ中の誘導ブリルアン散乱で生じるブリルアンダイナミックグレーティング（BDG）は、光で高速に書き換えができるという特徴から、新しい計測技術や信号処理への応用が期待されている。本研究では、偏波保持ファイバ上のBDG反射スペクトルを利用した、温度と歪の分離・分布センシングの空間分解能向上を実現した。また本研究で用いた分布計測手法である光相関領域法の測定原理探究を通じて、ブリルアンゲインのコヒーレントな制御法やCTスキヤンの原理を利用した新しい分布計測手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「光ファイバ神経網」による構造物の健全性診断技術では、歪だけでなく温度変化があるのが普通であり、これらの分離は極めて重要である。本研究で扱う、偏波保持ファイバ中のブリルアンダイナミックグレーティングを利用する手法は、高い精度で温度と歪の分離が可能である。この手法の基礎現象から解析し性能向上する本研究は、先端光計測技術として重要であるだけでなく学術的にも意義が大きいと考える。

研究成果の概要（英文）：Brillouin dynamic gratings (BDGs) generated by stimulated Brillouin scattering in an optical fiber are expected to be used for optical sensing and signal processing because they can be rewritten at high speed by light. In this study, we have improved the spatial resolution of discriminative and distributed measurement of temperature/strain using BDG reflection along a polarization-maintaining fiber. In addition, by exploring the measurement principle of the optical correlation-domain method, which is the distributed measurement technique used in this study, we have developed a method of controlling Brillouin gain coherently and a new distributed measurement method based on computed tomography.

研究分野：非線形光学

キーワード：ブリルアン散乱 光ファイバ 分布計測 グレーティング

1. 研究開始当初の背景

持続可能な安全社会の構築に向けて、橋梁、トンネル、航空機、パイプラインなどの大型構造物の健全性診断技術 (Structural Health Monitoring, SHM技術) に大きな注目が集まっている。地震や台風などの自然災害が数多く発生する日本では、事故を未然に防ぐため危険性を定量的に計測するSHM技術の実現は大きく期待されている。ところがSHMには非常に多くの箇所で歪や温度計測が必要なため、従来利用されてきた金属抵抗歪みゲージなどの各測定箇所に配置が必要な多点型センサでは限界があり、質的に異なる新たな技術が求められていた。光ファイバをセンサとして構造物に神経網のように張り巡らせることで歪や温度の分布をモニタする「光ファイバ神経網」によるSHMは、メンテナンスにかかる労力・コストを削減できる上、入力光状態を工夫して任意箇所での動的計測も出来る“分布型”センシングを提供する。IoT技術との親和性や環境雑音耐性から見ても実現によるリターンが大きく、将来的な実用化が期待されている。

しかし、この光ファイバによる温度/歪の位置分布センシングでは、温度と歪の変化を区別・分離できないという大きな課題があった。我々のグループでは誘導ブリルアン散乱によって光ファイバ中で発生する音響波によるブリルアンダイナミックグレーティング (BDG) を初めて観測し、この反射スペクトルから温度と歪の変化を分離・分布測定できる技術を開発している。一方この新技術の空間分解能は先行する温度か歪の一方の計測手法 (BOCDA法) と比較して10倍以上悪く、この性能劣化要因などは不明な点が多かった。

2. 研究の目的

本研究では、理論と実験の両面から本方式 (BDG-BOCDA法) を徹底的に検証し、BDGのダイナミクスを理解を通じて、BOCDA法で実現されている高空間分解能 (<1cm) による温度/歪の分離・分布測定の実現を目指した。

3. 研究の方法

BDG-BOCDA法の基礎理論から精査し、数値シミュレーションを通じて空間分解能の劣化要因を探った。特に光源強度変調法 (アポダイズ法) の効果が先行実験で確認されているため、アポダイズ法の空間分解能の影響を中心に調べた。また、理論検討と並行してBDG-BOCDAシステムを一から構築し、より効果的と考えられる手法を実装して検証実験を行った。

4. 研究成果

- (i) アポダイズ法の効果を数値シミュレーションを通じて解析し、フォノンのファイバ方向分布を相関ピーク位置へ局在化することが重要であることがわかった。また、解析結果に基づいてより効果的なアポダイズ波形を提案した。(Opt. Express 28(5), 6981-6994 (2020).)
- (ii) (i)で考案した半分アポダイズ法を実験的に実証し、理論計算とよく一致する大幅な空間分解能改善効果を確認した。本手法により、分解能10cm程度の長さスケールでは空間分解能の劣化はほぼ解消され、BDG-BOCDA法における空間分解能などの性能指数の記録を更新した。また、更なる空間分解能の改善には、BDGの局在化に伴う反射スペクトル幅のブロードニングが問題になることが分かった。(Opt. Express 28(14) 21310-21317 (2020), “Editor’s Pick”)
- (iii) BDGの基礎的な考察から、直交する偏波で生成された音響波間の干渉効果を通じてコヒーレントにブリルアンゲインを制御する手法を考案・実証した。我々のBEFWM系は、誘導ブリルアン散乱を起こすポンプ・プローブ光に対し、これらを制御するために入射する光は偏光が直交しているため直接は相互作用しておらず、縦波である音響波を通じて相互作用している。そのため、各偏波光で駆動される音響波が干渉し合うことによってブリルアンゲインの増強・抑制が可能になっている。(Opt. Lett. 45(13),

3406-3409 (2020). “Editor’s Pick”)

- (iv) 相関領域法の位置分布計測では、相関ピーク位置と呼ばれる測定点を走査する必要がある。ところが半分アポダイズ法におけるBDG計測では、相関ピーク位置を動かす代わりにプローブの周波数走査で分布計測が可能であることを示した。(OSA continuum 4(3), 990-999 (2021).)
- (v) 相関領域法における出力スペクトルは、ブリルアンゲインスペクトル (BGS) 分布とビートスペクトル分布の二次元 (位置と周波数) 畳み込みで表されるため、ビートスペクトルが理想的なデルタ関数なら正しいBGS分布が得られる。より一般的には、相関領域法の目標は「既知のビートスペクトル分布」から「未知のBGS分布」を推定することにあるといえる。これまで開発されてきたBOCDA法では、デルタ関数状に整形したビートスペクトルを二次元走査することでBGS分布を推定していたが、任意の直線上での線積分の値から逆ラドン変換によって元の分布が再構成できることが知られている。このようなCTスキュアの技術を利用した分布計測手法を提案・実証した。本手法は従来のBOCDA法と異なりランダムアクセス性が失われている反面、光パワーの利用効率が低い、医療分野などで広く発展している逆ラドン変換が利用できるなど、興味深い点も多い。(第68回応用物理学会春季学術講演会 19p-Z05-10)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Okawa Youhei, Kendy Yamashita Rodrigo, Kishi Masato, Hotate Kazuo	4. 巻 28
2. 論文標題 Distributed measurement of Brillouin dynamic grating spectrum localized by an intensity-modulated correlation-domain technique	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 21310 ~ 21310
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.396811	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 Okawa Youhei, Hotate Kazuo	4. 巻 45
2. 論文標題 Optical coherent control of stimulated Brillouin scattering via acoustic wave interference	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 3406 ~ 3406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.390083	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 Okawa Youhei, Hotate Kazuo	4. 巻 4
2. 論文標題 Distributed measurement of the Brillouin dynamic grating spectrum using the correlation-domain method with a fixed correlation peak position	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 OSA Continuum	6. 最初と最後の頁 990 ~ 990
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OSAC.419270	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 Okawa Youhei, Yamashita Rodrigo Kendy, Kishi Masato, Hotate Kazuo	4. 巻 28
2. 論文標題 Analysis of Brillouin dynamic grating localized by intensity-modulated correlation-domain technique for distributed fiber sensing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 6981 ~ 6981
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.385561	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11件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 大川 洋平、保立 和夫
2. 発表標題 BDG-BOCDA歪/温度分離・分布測定系の機能向上に関する検討
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 大川 洋平、保立 和夫
2. 発表標題 偏波保持ファイバ中の音響波干渉を用いたブリルアン利得制御
3. 学会等名 第3回光ファイバ応用技術研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 大川 洋平、保立 和夫
2. 発表標題 逆ラドン変換を用いたブリルアン利得分布の再構築
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 伊東 直紀、大川 洋平、保立 和夫
2. 発表標題 ブリルアン光相関領域解析法における光源周波数変調波形の最適化による歪ダイナミックレンジの拡大
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 畔柳 景、大川 洋平、保立 和夫
2. 発表標題 光波コヒーレンス関数の合成における光強度変調波形の最適化によるサイドローブ抑圧法の研究
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 山本 留生、大川 洋平、保立 和夫
2. 発表標題 BOCDR 歪分布測定システムにおける二重光周波数変調法と光強度変調法の併用による性能向上
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Youhei Okawa, Rodrigo Kendy Yamashita, Masato Kishi, and Kazuo Hotate
2. 発表標題 Spatial Resolution Improvement of Discriminative and Distributed Measurement of Temperature/Strain with PMF using Intensity-Modulated Correlation-Domain Technique
3. 学会等名 Optical Sensors and Sensing Congress (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 大川 洋平、山下健二 ホドリゴ、岸 真人、保立 和夫
2. 発表標題 強度変調を用いた光相関領域法によるブリルアンダイナミックグレーティングの局在化
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 大川 洋平、山下健二 ホドリゴ、岸 真人、保立 和夫
2. 発表標題 強度変調を用いた光相関領域法により局在化された光ファイバ中のブリルアンダイナミックグレーティングの解析
3. 学会等名 第63回光波センシング技術研究会講演会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Youhei Okawa, Rodrigo Kendy Yamashita, Masato Kishi, and Kazuo Hotate
2. 発表標題 Effective localization of Brillouin dynamic grating for distributed fiber sensing by intensity modulated correlation-domain technique
3. 学会等名 MOC2019, 24th Microoptics Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 大川 洋平、保立 和夫
2. 発表標題 四光波混合を用いた誘導ブリルアン散乱のコヒーレント光制御
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年～2020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
研究協力者	保立 和夫 (Hotate Kazuo)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	岸 真人 (Kishi Masato)		
研究協力者	山下 健二ホドリゴ (Yamashita Rodrigo Kendy)		

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