

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2013～2016

課題番号：25220907

研究課題名(和文) 痛みの分る材料・構造の為の光相関領域法による光ファイバ神経網技術の学術基盤の確立

研究課題名(英文) Establishment of Scientific Basis for Fiber Optic Nerve Systems with Optical Correlation Domain Technique for Structures and Materials that can Feel Pain

研究代表者

保立 和夫 (Hotate, Kazuo)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：60126159

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 134,800,000円

研究成果の概要(和文)：光源の光周波数変調で干渉特性を合成して光ファイバ中の散乱等を分布測定する独自技術「光相関領域法」の学術基盤を確立した。航空機翼や橋に「光ファイバ神経網」を張り、歪や温度を分布測定し「痛みの分かる材料・構造」を実現する。本研究では、誘導および自然ブリルアン散乱を活用した両独自技術で、理論とシミュレーション法を拡充して機能制限要因の挙動を精査し、その対策を提案・実証した。分解能、測定長、測定速度、ランダムアクセス、雑音低減諸技術統合、システム簡素化、歪・温度同時計測等で成果をあげた。レンジ・分解能比134,000は自然散乱法の最高値である。航空や建設分野で構造物健全性診断への応用研究も進展させた。

研究成果の概要(英文)：Scientific basis has been established for our original "Optical Correlation Domain Techniques," which realize distributed sensing of scatterings along fibers by manipulating interference with laser FM. By embedding fibers on structures to measure the strain distribution, "structures that can feel pain" can be realized. Behaviors of factors to limit sensing functions have been studied in detail by establishing theories and simulations, and countermeasures have been proposed and confirmed in experiments, in the two systems based on spontaneous and stimulated Brillouin scattering. Progress has been made in resolution, range, speed, random accessibility, combination of schemes to reduce noises, system simplification, and strain/temperature discriminative sensing, etc. Range/resolution ratio of 134,000 in the spontaneous scattering based system is the best ever reported. Applications trials of structural health monitoring have been accumulated, in aircraft and civil engineering fields.

研究分野：工学

キーワード：計測システム 光ファイバセンサ スマート材料構造 分布型センシング

1. 研究開始当初の背景

光ファイバに沿う歪や温度の情報を分布測定する「光ファイバ神経網」を、橋や航空機翼等に張り「痛みの分かる材料・構造」とする研究が進展している。しかし、従来の分布計測原理の時間分解法では、空間分解能等が不十分であった。そこで、研究代表者らは光波の周波数や位相を変調し干渉特性を任意に合成する「光相関領域法」を発明し、従来技術を凌ぐ「光ファイバ神経網」を提案・実現した。学術創成研究(04-08)・基盤研究S(09-13)を得て、mm オーダ分解能、kHz 測定速度、ランダムアクセス機能等を実現し、歪と温度の同時・分離・分布計測や、動的分布情報測定等、高次機能も提案・実証した。

2. 研究の目的

本基盤研究Sでは、申請時に発案した新機能の実現手法を実証し、理論・シミュレーション研究も深めて、本独自センシング技術群の学術基盤を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

下記サブテーマをそれぞれ推進した。

- (1) 温度と歪の高精度・同時・分布計測での極限性能の実現
- (2) 分布情報全体の高速ダイナミック測定
- (3) BOCDA 法の総合機能の実現
- (4) S-BOCDA 法による温度と歪の分離・分布測定システム
- (5) 長尺FBG歪センシングの機能進化
- (6) BOCDA による PLC 光集積回路評価技術
- (7) 痛みの分かる材料・構造の実証研究

4. 研究成果

以下に、研究期間4年間での成果を纏める。

- (1) 温度と歪の高精度・同時・分布計測での極限性能の実現

偏波維持光ファイバの一偏波モードにポンプ光とプローブ光を伝搬させて誘導ブリルアン散乱を起すと、強い超音波回折格子が生じる。これは直交直線偏波もブラッグ反射させることを当グループが実証し、ブリルアンダイナミックグレーティング (BDG) と名付けた。BDG による反射周波数シフト (BDGシフト) と通常のブリルアン周波数シフト (BFS) とから、温度と歪の分布を同時に取得できる技術も提案・実証してきた。

本研究では、上記独自技術の学術基盤を確立する為に、BDG からのブラッグ反射特性のシミュレーション法を創成した。時間周波数と空間周波数の双方を考慮してフーリエ変換を活用し、短時間に精度よく BDG スペクトラム形状が計算できるようになった。

図1は、シミュレーション対象とした BDG スペクトラムと BGS の同時測定システムである。図2は、独自分布測定原理であるブリルアン光相関領域解析法 (BOCDA 法) で選択す

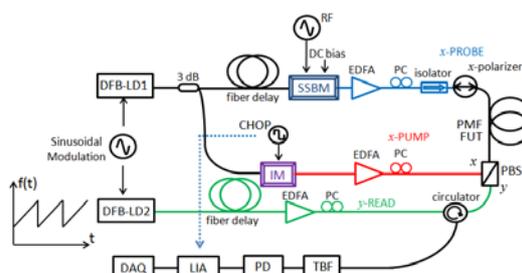


図1 シミュレーション対象としたBDG スペクトラムとBGSの同時測定システム

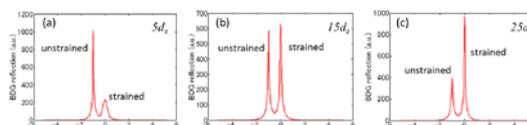


図2 BDG スペクトラム形状の計算結果

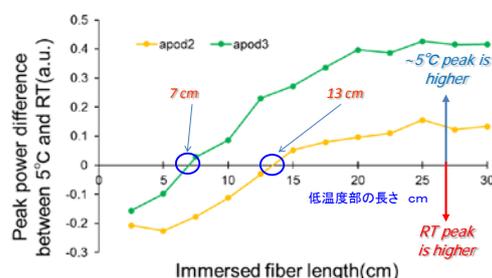


図3 強度変調法による空間分解能の改善

る測定位置 (相関ピーク) を歪印加部分の中央に設定し、歪長とブリルアンゲインスペクトラム (BGS) 測定における理論空間分解能 d_z の比率を変化させて計算した、BDG スペクトラムである。歪部と両側の無歪部とからの反射スペクトラムが等量となるのに $15d_z$ の歪長が必要なが示され (図(b))、実験で得ていた BDG 分布測定における分解能劣化が理論的に確認できた。

本研究では、BDG と BGS の空間分解能の違いが相関ピーク両側のサイドローブによることを考え、光源光周波数変調に同期したポンプ・プローブ光への強度変調で光スペクトラムを整形してサイドローブを低減し、BDG 空間分解能を改善する技術を提案・実証した。読み出し光にも強度変調を施すと、さらに分解能が向上することも提案・実証した。図3では、冷やした光ファイバ部長さを変えつつ、図2と同じデータを実測して両ピークが等しくなる低温部長を求めた。3 光の強度変調により2光に比べて約2倍、分解能が向上した。

BDG 測定のレンジ延伸技術も実現し、その最適パラメータ、BDG 書き込み・読み出し光間変調位相差による測定レンジ限界の検証等の性能向上法も理論と実験で明確化した。

- (2) 分布情報全体の高速ダイナミック測定

光ファイバに沿う分布情報全体を高速に測定する為に提案した「光軸方向掃引法」で

の速度向上を追求した。最終的に、測定速度を従来値の 1.5 倍である 30 分布/秒に向上できた。図 4 は、その実験結果である。

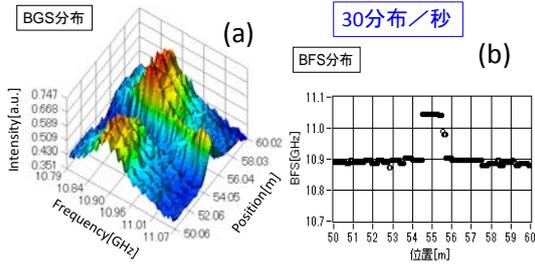


図 4 光軸方向掃引法による高速分布測定

光相関領域法に独特な測定モードである、光ファイバに沿う任意複数位置のみを選択して動的歪を高速に同時測定できる「ランダムにアクセス性」の機能向上も果たした。既存値を 25 倍凌ぐ 5,000 箇所/秒を達成した。1,000 箇所/秒の高速下で「テンポラルゲート法」を併用して、測定レンジを 20 倍延伸することにも成功した。図 5 は、5 測定点を選択し、それぞれ 1,000 回/秒で歪の時間分解測定を実現した結果である。着陸時の航空機脚部のみを選択的に多点・動的歪計測する等の要求に対応した機能実証である。

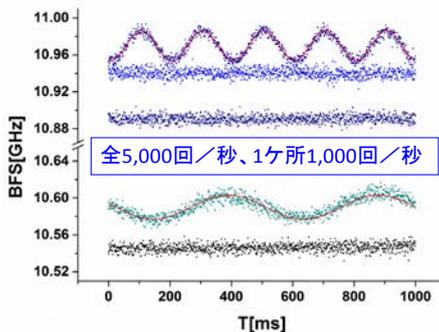


図 5 ランダムアクセス機能の高速化

(3) BOCDR 法の総合機能の実現

BOCDA 法では誘導ブリルアン散乱を位置選択的に励起するのに、光ファイバ両端からポンプ光とプローブ光を導入する。当グループは、自然ブリルアン散乱を位置選択的に測定できるブリルアン光相関領域反射測定法 (BOCDR 法) も提案・稼働させてきた。光ファイバ一端から光入射させればよく、破断が起きてもそこまで測定できる優位さを持つ。

本研究では、総合機能の向上を達成した。測定レンジ延伸法として独自「光周波数 2 重変調法」と「時間ゲート法」を、背景光雑音低減・歪レンジ拡大法として独自「光強度変調法」、および「参照光位相変調法」の 4 手法を併用する研究を、実験ならびに本研究で開発したシミュレーションにより展開した。

「参照光位相変調法」「光周波数 2 重変調

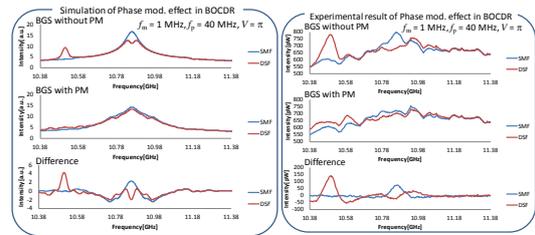


図 6 BOCDR 法での「参照光位相変調法」による背景光雑音の低減。左：シミュレーション、右：実験。上段：BOCDR 出力、中段：位相変調による信号スペクトラムの除去、下段：上中段の差分による背景光雑音の低減

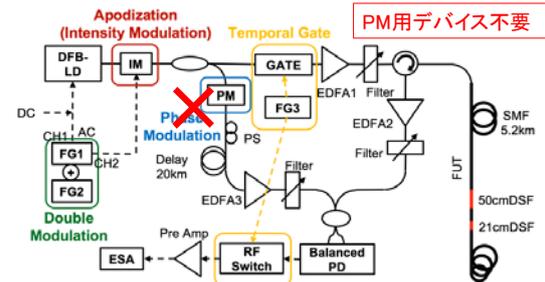


図 7 「計算位相変調法」と 3 手法の統合系

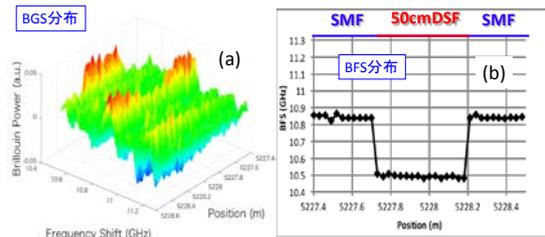


図 8 レンジ・分解能比 134,000 の達成

法」を統合して分解能 5.2cm で測定レンジ 1,250m を達成した。レンジ・分解能比 24,038 は、光相関領域法での当時の最高値である。図 6 は、「参照光位相変調法」による背景光雑音の低減を示すシミュレーション (左) と実験 (右) である。大きな歪でも、そのスペクトラムのピークが富士山状雑音より大きくなり、歪レンジ拡大が果せたことが分る。

次に、4 手法の統合システムも構築し、レンジ・分解能比の最高値、134,000 を達成した。「参照光位相変調法」では、変調有・無の 2 状態間の差を計算する。本研究では、1 回の通常測定のみで、取得データの計算により背景光雑音低減ができる「計算位相変調法」も着想して、実証実験に成功した。図 7 は、「計算位相変調法」を含む 4 手法を統合した BOCDR 系である。図 8 は、5,280m 測定レンジ遠端部の 50cm 長歪部を分解能 3.95cm で分布測定した結果である。レンジ・分解能比は、BOCDR で世界最高の 134,000 である。

BOCDR 系に同期検波機能を導入する方法も提案・実証した。図 9 がシステム構成である。本系では「参照光位相変調法」の変調をオ

ン・オフさせ、その周波数で同期検波することも可能で、2回のスペクトル測定と除算という煩雑さを回避する方法を提供した。図10は短く大きな(20 cm、7,000 $\mu\epsilon$)歪部をPMオン・オフ同期検波で測定できたことを示す。

通常BOCDR系では参照光とブリルアン散乱光の干渉ビートスペクトラムを電気スペアナ(ESA)で測定する。本研究では光周波数を掃引することで高価なESAを省いたシステム構成も提案・稼働させた。

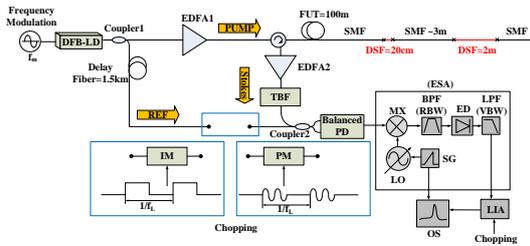


図9 同期検波機能を導入したBOCDR系

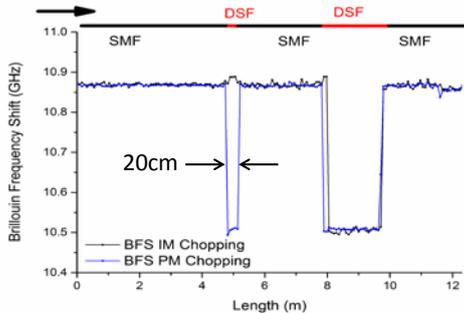


図10 PMオン・オフ同期検波による20cm長・7,000 $\mu\epsilon$ 歪部の検出

(4) S-BOCDA法による温度と歪の分離・分布測定システム

S-BOCDA法は、ポンプ光とプローブ光に与える約10GHzの周波数差をLDの直接周波数変調特性により注入電流変化で時分割発生させる独自技術である。矩形電流波形では矩形周波数変化は実現できず、入力波形を補償する。本研究では、BGSとBDGを偏波維持光ファイバにて同時取得して温度と歪の同時計測を行うために、ポンプ、プローブ、BDG反射読み出し光の3つを時分割発生させる手法を提案・稼働させた。

構築したS-BOCDA系を図11(a)に示す。LDへの注入電流波形と周波数変化波形からLD系伝達関数を求め、補償3段階注入電流波形の合成技術を開発した。図11(b)が補償電流波形である。温度と歪の同時・分離・分布測定にも成功した(図12)。温度変化部分で大きな誤差がある(○印)。BGS測定とBDG測定での空間分解能の相違によるもので、上記の第1テーマで、既にその解決法の提案・実証に成功している。

電流波形を時間軸上で逐次補償する技術

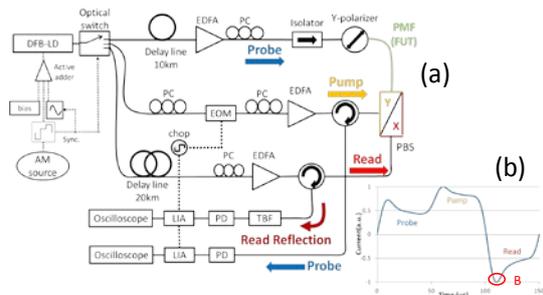


図11 温度と歪の同時・分離・分布測定用に提案・開発したS-BOCDA系(a)。LD伝達関数測定により補償された注入電流波形(b)

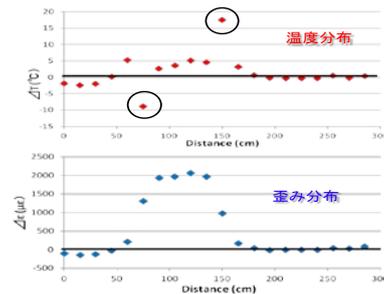


図12 図11の系による温度と歪の同時・分離・分布測定結果

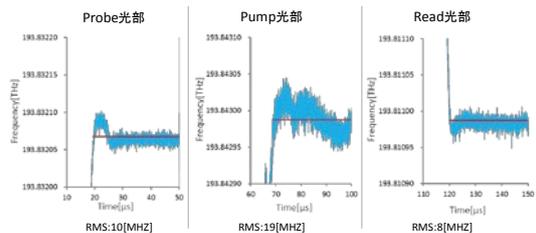


図13 時間波形逐次補償法での精度向上

も新たに提案し、図13に示すように、ポンプ部、プローブ部、読み出し光部の全てで、周波数幅~40GHzの変調下で誤差20MHz(RMS)以下の3段階波形の合成に成功した。

(5) 長尺FBG歪センシングの機能進化

長尺光ファイバグレーティング中のブラッグ波長を光相関領域法で分布測定し歪や温度分布を得る独自技術では、相関ピーク前後のサイドローブを低減する必要がある。光源への変調を工夫し、時間平均スペクトラム中央部のパワーが大きく周辺に向かって徐々に強度ゼロに向かう所謂アポダイズドスペクトラムの合成が重要である。正弦波周波数変調波形に同期した強度変調で実現してきたが、両波形の周波数を変えて相関ピークを移動する際に問題があった。

本研究では、周波数変調波形自体を工夫してスペクトラム形状を合成し、合わせて周波数変調波形の周波数ではなく、相似形の位相変調波形を参照光に加えてその波形振幅を変えるだけで相関ピーク掃引を実現する独

自技術を進展させた。図 14(a)は、アポダイズの為に考案した周波数変調波形である。開発したシミュレーションで、アポダイズの導入によって相関ピーク前後のサイドローブが抑圧されることが確認された(図 14(b))。図 15 は、サイドローブ抑圧状態で、相似位相変調波形振幅を変えて、相関ピーク掃引に成功した実験結果である。波形に含まれる種々の誤差が与える影響についても、シミュレーションにより明確化できた。

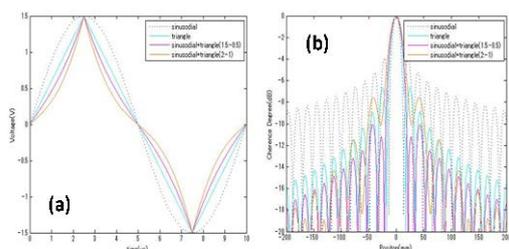


図 14 アポダイズを実現する光源への FM 波形 (a) とサイドローブの抑圧効果 (b)

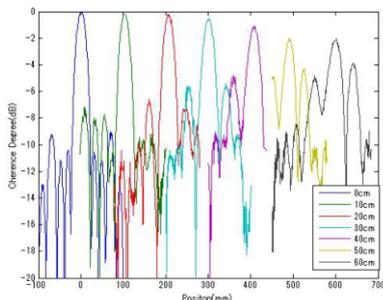


図 15 サイドローブ抑圧下での相似位相変調による相関ピークの掃引実験

(6) BOCDA による PLC 光集積回路評価技術
BOCDA 法の高い空間分解能を生かして、光路長が 1,000mm 程度のガラス光集積導波路 (Planer Lightwave Circuit: PLC) の導波路に沿う BFS 分布計測法の研究も展開した。PLC には作成過程で歪が残存し、その測定はデバイス作成過程の改善に繋がる。PLC とピグテイル光ファイバとの境界では、ポンプ光とプローブ光の伝搬方向を反対にすると異なる BFS 分布となり、両者の平均が良好な分布を与えることを基礎実験が示していた。

本研究では、従来値 6mm であった分解能を 3.6mm に向上させた PLC 導波路に沿う BFS 分布測定系を構築した。上記現象は、分解能を変化させても生じること、異種導波路の接合部では常に起こることを、明らかにした。

(7) 痛みの分かる材料・構造の実証研究

本研究の成果を「痛みの分かる材料・構造の為に光ファイバ神経網」として実用化する目的で、複数の委託研究や共同研究を展開した。経済産業省・NEDO 研究費で、航空機メーカ、計測機メーカと本グループは、航空機健全性

モニタリング技術 (SHM) の開発を展開した。温度と歪の同時・分離・分布測定機能を含む BOCDA 系と、航空機搭載用に特化したスペックの BOCDA 系の試作機を完成させた。3 cm 分解能、500m 測定レンジ、170 箇所/秒のランダムアクセス速度を達成した。小型ビジネスジェットに本試作機を搭載して、飛行条件下で温度と歪の同時・分離・分布測定ができ、航空機 SHM 機能の実証に成功した。計測機メーカ、土木・建設会社、特殊光ファイバメーカと当グループは、JST の A-STEP に採択されて、BOCDR の実用化研究を展開している。測定器の試作機もでき、土木・建設分野等での SHM 実用化研究も進展している。材料メーカとの BOCDA の応用研究も展開した。

このように、本研究において、当研究グループの独自技術である BOCDA 法ならびに BOCDR 法の機能向上が図られ、理論と実験を並走させた研究によって、本技術群の学術基盤を構築した。他手法の追随を許さない本技術のユニークな機能は世界的に注目され、研究代表者は、国際的な賞も受け、国際会議で 13 回の招待講演・基調講演を行い、英文論文誌での招待論文も 3 件ある。6 件の解説を著し、期間内に 5 件の特許を申請している。

研究代表者の受賞は下記 2 件であり、本研究に参画した院生にも他に 2 件の受賞がある。

- ① 応用物理学会第 15 回光・量子エレクトロニクス業績賞 (宅間 宏賞), 保立和夫, "光ファイバーセンシングに関する先駆的・独創的研究," 2014 年 3 月 17 日。
- ② OFS Lifetime Achievement Award, Kazuo Hotate, "Achievement in Optical Fiber Sensing," 2015 年 9 月 28 日。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 16 件: 全件査読付き論文)

- ① R. K. Yamashita, M. Kishi and K. Hotate: "Theoretical evaluation of Brillouin dynamic grating length localized by optical correlation domain technique through reflection spectrum simulation", Applied Physics Express, 10(4), pp. 042501-1-042501-4, 2017. DOI:10.7567/APEX.10.042501
- ② K. Y. Song, K. Hotate, W. Zou, and Z. He: "Applications of Brillouin dynamic grating to distributed fiber sensors," IEEE/OSA Jour. of Lightwave Technology, Oct. 2016. <Invited> DOI:10.1109/JLT.2016.2617313
- ③ Y. Yao, M. Kishi and K. Hotate: "Brillouin optical correlation domain reflectometry with lock-in detection scheme," Applied Physics Express, 9(7), pp. 072501-1-042501-4, 2016. DOI:10.7567/APEX.9.072501

- ④C. Zhang, M. Kishi and K. Hotate: “5,000 points/s high speed random accessibility for dynamic strain measurement at arbitrary multiple points along a fiber by Brillouin optical correlation domain analysis,” *Applied Physics Express*, 8(4), pp.042501-1-042501-3, 2015.
DOI:10.7567/APEX.8.042501
- ⑤R. K. Yamashita, Z. He and K. Hotate: “Spatial resolution improvement in correlation domain distributed measurement of Brillouin grating,” *IEEE Photonics Technology Letters*, 26(5), pp. 473-476, 2014.
DOI:10.1109/LPT.2013.2297168
- ⑥W. Zou, Z. He and K. Hotate: “Range elongation of distributed discrimination of strain and temperature in Brillouin optical correlation domain analysis based on dual frequency modulations,” *IEEE Sensors Journal*, 14(1), pp.244-248, 2014.
DOI:10.1109/JSEN.2013.2282639
- ⑦ K. Hotate: “Fiber distributed Brillouin sensing with optical correlation domain techniques,” *Optical Fiber Technology* (Elsevier Inc.), 19(6), Part B, pp. 700-719, 2013. <Invited>
DOI:10.1016/j.yofte.2013.08.008
- ⑧K. Hotate, W. Zou, R. K. Yamashita and Z. He: “Distributed discrimination of strain and temperature based on Brillouin dynamic grating in an optical fiber,” *Photonic Sensors*, 3(4), pp. 332-344, 2013. <Invited>
DOI:10.1007/s13320-013-0130-7
- [学会発表] (計 72 件 : うち国際会議 33 件)
(うち国際会議招待講演 : 13 件)
- ①K. Hotate: “Fiber optic nerve systems based on Brillouin scattering for structural health monitoring,” *Photonics Conference 2016, Pyeongchang (Korea)*, Dec.1, 2016 <Invited, Plenary>.
- ②K. Hotate: “Fiber optic nerve systems for structural health monitoring with Brillouin optical correlation domain techniques,” *OSA Advanced Photon. Cong., Specialty Opt. Fibers, SoM2G.2, Vancouver (Canada)*, July18, 2016 <Invited>.
- ③K. Hotate: “Distributed strain and/or temperature sensing based on fiber Brillouin optical correlation domain techniques - performances and applications,” *Asia Communication & Photonics Conference 2015 (ACP2015), Workshop on Recent Advances in Optical Fibre Sensors, Hong Kong*, Nov.20, 2015 <Invited>.
- ④ K. Hotate: “Recent achievements in BOCDA/BOCDR,” *IEEE Sensors 2014, A2L-A*,

- Valencia (Spain)*, Nov.3, 2014 <Invited>.
- ⑤K. Hotate: “High performance distributed optical fiber sensors for smart structures and environmental monitoring,” *Optical Instrumentation for Energy and Environmental Applications (E2)*, Tucson (U.S.A.), Nov. 5, 2013 <Invited>.
- ⑥K. Hotate: “Fiber Brillouin distributed sensing as fiber optic nerve systems,” *4th Asia-Pacific Optical Sensors Conference 2013 (APOS2013)*, Wuhan (China), Oct.17, 2013 <Keynote/Invited>.
- ⑦K. Hotate: “Brillouin optical correlation domain Distributed fiber sensors,” *OSA 97th Annual Meeting, Frontiers in Optics (FIO/LS2013), FW11.1*, Orlando (U.S.A.), Oct. 9, 2013 <Invited>.
- ⑧K. Hotate: “Fiber Optic nerve systems for smart structures and smart materials with optical correlation domain technologies,” *The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, ThF1*, Kyoto (Japan), July 4, 2013 <Invited>.

[図書] (計 1 件)

- ① 保立和夫: “構造物モニタリング技術の開発と応用 (板生 清 監修): 第 2 章 センサ技術 2 光ファイバによる構造物センシング,” pp. 62-73, 株式会社シーエムシー出版, Oct. 2013.

[産業財産権]

- 出願状況 (計 5 件)
名称: 光ファイバ特性測定装置及び光ファイバ特性測定方法
発明者: 保立和夫、岸 真人、姚 雨果
権利者: 国立大学法人東京大学
種類: 特許
番号: 特許願 2015-024815
出願年月日: 2015 年 2 月 10 日
国内外の別: 国内

[その他] ホームページ等

<http://www.sagnac.t.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

保立 和夫 (HOTATE, Kazuo)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 6 0 1 2 6 1 5 9

(2) 連携研究者

山下 真司 (YAMASHITA, Shinji)
東京大学・先端科学技術研究センター教授
研究者番号: 4 0 2 3 9 9 6 8
岸 真人 (KISHI, Masato)
東京大学・大学院工学系研究科・助教
平成 28 年 4 月より、同学術支援専門職員
研究者番号: 0 0 1 5 0 2 8 5