

痛みの分かる材料・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機能進化

Functional Evolution of Fiber Optic Nerve Systems
with Optical Correlation Domain Technique
for Structures and Materials that can Feel Pain

保立 和夫 (HOTATE KAZUO)

東京大学・大学院工学系研究科・教授



研究の概要

ビル、橋、航空機翼などにその痛みを感じる神経として光ファイバを張り巡らせて歪や温度を分布測定する手法として、当研究グループの独自技術である相関領域法を活用し、温度と歪の同時・分離・分布測定、分布量全体の時間分解高速測定などの高次機能を発現する研究を進めて、本独自技術の格段の機能進化を図る。これまでに当初目的を超える成果が得られている。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：計測工学

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伝搬光の属性から分布測定する「光ファイバ神経網」を、ビル、橋、航空機翼等に張り巡らせることで「痛みの分かる材料・構造」を実現する研究が活発である。しかし、従来開発されてきた時間領域法などでは、空間分解能や測定時間等が不十分であった。

これに対し研究代表者らは、光源の周波数や光波位相等を変調して干渉特性を任意に合成する「光相関領域法」を発明し、従来技術を凌ぐ性能を発現できる種々の「光ファイバ神経網」を提案・開発し、mm オーダの空間分解能、kHz のサンプリング速度、ランダムアクセス性等の機能を達成していた。

2. 研究の目的

本研究では、一本の光ファイバでの歪と温度の高精度・同時・分布計測や、分布情報全体の動的測定等、より高次の機能を独自の新手法にて実現し、「光ファイバ神経網」に「機能進化」をもたらすことを目的とする。

3. 研究の方法

以下の4サブテーマを併進させる。

1. BOCDA法の機能進化

- * 温度と歪の高精度・同時・分布計測技術
- * 分布情報全体のダイナミック測定

2. ブリルアン散乱センシング系の進化

- * BOCDR法の高機能化
- * S-BOCDA法の機能進化

3. 長尺FBG歪センサの多点化技術

4. 進化した痛みの分かる材料・構造の実現

4. これまでの成果

偏波維持光ファイバの一方の偏波モードで得られるブリルアン周波数シフト (BFS) と直交偏波モードで得られるブリルアンダイナミックグレーティング (BDG) のブラッグ反射周波数シフト (BDG シフト) を単一レーザーで安定に得るシステムを提案・構築し、2量の温度と歪依存性からこれらを分離・分布計測することに成功した。測定レンジ延伸技術も実現して500mを達成し、BDGスペクトルを光相関領域法 (BOCDA) で分布測定する際の空間分解能劣化の要因を突き止め、分解能を4.5倍改善することに成功した。

BOCDA法で分布情報全体を高速測定する新システム構成を提案した。位置選択的に誘導散乱を起すための光源周波数変調をポンプ・プローブ光に若干異なる周波数で加えることによって、測定位置 (相関ピーク位置)

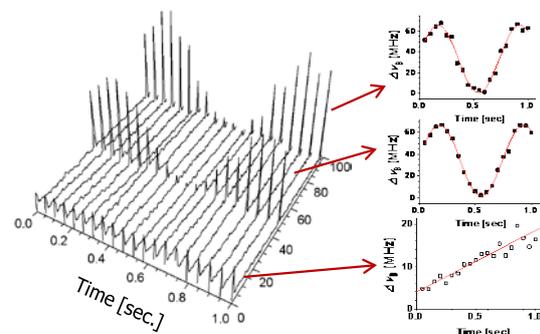


図1 相関ピーク自動掃引法による高速全分布情報測定 (20 トレース/秒を実現) [3]

を光ファイバに沿って自動掃引可能にした画期的な技術である。本掃引速度は自由に設定でき、電子機器に負荷を掛けずに十分な高速測定が可能となった。100m 測定レンジ・80cm 空間分解能の分布測定を20トレース/秒で実現した。これは、世界最速の全分布量高速測定と言える。

光ファイバの後方自然ブリルアン散乱を信号光とする干渉計において光源周波数を正弦波変調することで位置選択的にブリルアン散乱を測定する独自発明の BOCDR 法では、空間分解能向上 (6mm)、測定レンジ延伸 (1000m 超)、偏波特性安定化、光ファイバ複屈折評価法を実現し、本システム原理を表現する理論式も導出した。さらに、光源周波数変調に同期した強度変調を導入して不要出力スペクトル成分を抑圧し、空間分解能向上と歪測定でのダイナミックレンジ拡大を両立させる新機能を実証した。

ポンプ光とプローブ光の周波数差を半導体レーザの直接 FM 特性によって矩形電流波形注入により時分割発生させる S-BOCDA 法により、高速なランダムアクセス測定を目指して新たな系を構築し、200 サンプル/秒でのランダムアクセスを実現して任意4ヶ所で同時・動的歪計測にも成功した。S-BOCDA による温度と歪の分離測定系も考案・実証した。価格を抑えつつ高次機能が発現できる。

複数の長尺 (10cm) FBG を多点配置できるシステム構成を提案した。相関領域法により FBG 反射光と参照光との干渉を制御し、一つの長尺 FBG 内のある点からの反射スペクトルを空間分解能 10 mm で分布測定でき、准分布型センシングを提供する。高速測定化 (1000 サンプル/秒)、測定レンジ延伸、FBG 間クロストーク低減、空間分解能向上法 (6mm の達成) 等の機能進化も果たした。

本研究費にて機能進化を図っている独自の技術を企業等との共同研究によって実用化する努力も続けている。BOCDA の航空機ヘルスマニタリングへの応用を目的に、航空機メーカ、計測器メーカと共同研究を進め、温度と歪の同時測定系の試作や機体への実装研究等が進んでいる。本学航空学科とは、航空機用 CFRP 材料のボルト接合部分の引っ張りによる劣化を、BOCDA の mm オーダの空間分解能を活かして診断することにも成功した。プラント診断に BOCDA を適用する基礎研究も実施している。BOCDA の高空間分解能性を活用してガラス系 PLC 光集積回路の診断にも成功した。

以上のように当初計画は順調に進展し、新技術発案・新機能発現も果たせて、目標を超える進展が図られている。本研究期間中に、27 編の査読付論文、18 件の国際会議招待講演、8 編の解説記事を発表し、代表者および担当院生は、複数の賞を受けている。特許の申請・公開・登録数は8件である。

5. 今後の計画

光相関領域法による光ファイバ神経網技術の進化を加速させる。BDG 測定分解能を BFS 測定と同等の値 (数 cm) まで高め測定速度の向上も図り、温度と歪の同時測定系の総合機能を進化させる。全分布量高速測定系を基本 BOCDA 系で実現し、速度と精度の向上を両立させる。BOCDR 法の測定レンジ拡大も果たして機能進化を図る。ランダムアクセスの高速化でも測定レンジ向上を図る。S-BOCDA 法による温度と歪の分離・分布測定系では単一レーザで全機能を実現する。長尺 FBG の多点化には相関ピーク掃引に新技術を導入して機能進化を図る。航空機、プラントから光導波路まで、実用化の展開も図る。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

[主な学会誌論文]

1. R. K. Yamashita, W. Zou, Z. He, and K. Hotate: "Measurement range elongation based on temporal gating in Brillouin optical correlation domain distributed simultaneous sensing of strain and temperature," IEEE Photonics Technology Letters, 24, 2012 in Press.
2. K. Kajiwara and K. Hotate: "Multiplexing of long-length fiber Bragg grating distributed sensors based on synthesis of optical coherence function," IEEE Photonics Technology Letters, 23(21), pp.1555-1557, 2011.
3. K.-Y. Song, M. Kishi, Z. He and K. Hotate: "High-repetition-rate distributed Brillouin sensor based on optical correlation-domain analysis with differential frequency modulation," OSA Optics Express, 36(11), PP. 2062-2064, May 2011.
4. W. Zou, Z. He, and K. Hotate: "One-laser-based generation/detection of Brillouin dynamic grating and its application to distributed discrimination of strain and temperature," OSA Optics Express, 19(3), pp.2363-2370, 2011.
5. Y. Mizuno, W. Zou, Z. He, and K. Hotate: "Operation of Brillouin optical correlation-domain reflectometry: theoretical analysis and experimental validation" IEEE/OSA Jour. of Lightwave Technology, 28(22), pp.3300-3306, 2010.

[受賞]

1. Kazuo Hotate, SPIE DSS Lifetime Achievement Award, "Fiber Optic Nerve Systems for Safety and Security," 米国 SPIE学会より受賞, 2009年4月15日.

ホームページ等

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