

論文の内容の要旨

論文題目 光波コヒーレンス関数の合成法による分布型長尺 FBG センサの多点化技術

氏名 梶原 康嗣

本研究は光エレクトロニクスの応用技術の一つである「光ファイバセンサ」に関する研究である。これまで多種多様な光ファイバセンサが提案・研究されてきているが、本研究では FBG と呼ばれる、特定の波長のみを反射する光ファイバをセンシングヘッドとして利用したシステムの研究を行う。FBG の反射波長はブラッグ波長と呼ばれ、FBG に印加された歪や温度変化に対して線形に変化することから、ブラッグ波長の測定により、これらの物理量を測定するセンサとして利用することができる。

一般的に FBG は全長数 mm 程度のものを点型のセンサとして利用し、1本の光ファイバ中に複数配置した多点型・準分布型のセンサとして利用される。この場合、FBG が配置されていない部分に印加された摂動は検知することができず、死角領域となってしまう。飛行機、橋、ビルといった建築物、構造物内部の破損しやすい部位には有限の幅があり、安全な構造物診断のためには、この領域の連続分布的にセンシングなセンシングが要求され、本研究では長尺 FBG によりこれを実現する。従来の多点型センサでは、各 FBG の反射スペクトラムを測定していたのに対し、長尺 FBG では、内部の局所的な区間の反射スペクトラムを測定する必要がある。本研究ではこれを、光波コヒーレンス関数の合成法 (SOCF) と呼ばれる位置分解技術により測定している。

SOCF は干渉計を利用し、参照光と FBG からの反射光である信号光の間の干渉特性を制御する技術である。光源であるレーザの光周波数を変調することで、デルタ関数形状の光波コヒーレンス関数（干渉のコヒーレンス度と光路差の関係）を合成することができる。このデルタ関数のピークは、コヒーレンスピークとよばれ、この地点から反射された光のみが参照光と干渉するため、光検出部における干渉信号を測定することで、ピークからの反射光を選択的に測定することができる。コヒーレンスピークの位置は光源の変調周波数により容易に制御することができ、さらに光源の中心光周波数をブラッグ波長の周囲で掃引することで測定位置の局所的な反射スペクトラムを取得することができるため、コヒーレンスピークを長尺 FBG 全体にわたって掃引することで、ブラッグ波長分布を測定することができる。SOCF により光波コヒーレンス関数を合成する際にはアポダイゼーションによりコヒーレンスピークの周りに生じるサイドローブを抑制しており、アポダイゼーション手法の最適化なども本研究の対象となる。

また本センシングシステムの理論的な検証に利用するシミュレーション手法も構築されており、光源の光周波数変調から合成される光パワースペクトラムを計算し、T-matrix 法により計算された長尺 FBG の反射スペクトラムとフーリエ変換によって、分布測定結果をシミュレーションすることができる。

本研究では長尺 FBG による比較的短い区間における連続分布型のセンサを任意の地点に配置し、多点化することにより、構造物内部の破損しやすい部位の重点的な診断が可能なセンシングシステムの構築を主目的としている。本論文では、長尺 FBG 内の分布測定の原理について概説した後、これまで提案されている長尺 FBG センサの高性能化に関する研究について述べる。そして長尺 FBG センサを多点化し各長尺 FBG 内の分布測定を行う。また、

多点化に際して必要となる課題について述べ、課題解決のための要素技術の提案および検証結果等について議論する。

まず、本センシングシステムの測定精度に関する評価を行う。提案するセンシングシステムにおいては、センサとなる FBG の反射率が測定の精度に大きく影響するものと考えられる。ここでは、センサとなる長尺 FBG の反射率と測定精度の関係を明らかにする。これは反射率が高すぎる場合、長尺 FBG 後方に到達する光のパワーが大幅に減衰してしまうため、正しく局所反射スペクトラムを測定できなくなってしまうことが予想されるためであり、逆に、反射率が低すぎると、測定の SN 比が低下することが予想されるためである。本研究ではこれらの関係についてシミュレーション等による評価を行う。

次に、本センシングシステムの性能向上に関する内容について述べる。はじめに測定速度に関する内容について記述する。SOCF では光源の変調周波数により測定位置を選択し、中心周波数の掃引により局所的な反射スペクトラムを測定している。そのため、干渉信号がそのまま局所スペクトラム形状を反映しているおり、高速かつランダムアクセス可能な測定を実現することができるという利点がある。高速測定の実証実験では、長尺 FBG 内を位置分解しながら 1 点当たり 1kHz のサンプリングレートで高速測定し、部分的に与えられた振動の測定に成功している。また長尺 FBG 全体のリアルタイム測定のためには、1ch の変調信号によるアポダイゼーションが必要とされるが、移送回路や増幅器の導入によりこれを実現している。

また、本システムの空間分解能向上に関する研究を行う。SOCF を利用した分布測定においては、空間分解能が光源の変調振幅に反比例しているため、レーザにかけられる最大変調振幅により空間分解能が制限されてしまう。本システムで利用している DFB-LD では最大変調振幅が 10GHz 程度であり、これに相当する空間分解能は 10mm 程度である。ここでは、同じ DFB-LD により空間分解能を向上させる手法として、外部光位相変調を導入する。光源からの出射光の光パワースペクトラム帯域を外部位相変調により拡大し、空間分解能の向上を実現する。この提案手法により合成される光波コヒーレンス関数は、従来の周波数変調により合成される光波コヒーレンス関数と、光位相変調のみにより合成される関数の積の形状で表されることがわかっており、空間分解能は従来手法の 10 mm から 4 mm 程度にまで向上されている。長尺 FBG センサに適用した際には、これまで検出不可能であった 5 mm の局所的なブラッグ波長シフトの検出に成功している。

次に、本研究の主目的である、「任意地点における分布型センシング」のための、長尺 FBG センサの多点化に関する研究を行う。高速測定時においては、光源の中心周波数高速掃引に伴い、ヘテロダインビート周波数が FBG の位置に応じてシフトしてしまうことがわかっている。これは信号光と参照光の間の遅延により PD における両者の中心周波数が異なるためであり、本システムではこれを AOM における周波数シフト量を変化させることで補正し、多点化を実現している。実験では 3 本の長尺 FBG による多点センシングを行い、各 FBG 内部の分布測定を行っており、各 FBG に与えられたブラッグ波長シフトを正しく測定している。また、シミュレーションにより最適な FBG 反射率を求め、5%以下により十分な精度が得られることを確認している。

さらに、多点化の際には測定レンジが重要な指標となる。従来 SOCF を利用した分布測定では周期的に合成されるコヒーレンスピークの間隔で測定範囲が制限されていた。しかし、本システムでは反射スペクトラム測定のために、光源の中心周波数を高速掃引していることから、上記で述べたように、位置ごとにヘテロダイン検波のビート信号が異っている。これを利用することで、複数のコヒーレンスピークをビート信号の周波数領域で分離

することが可能となる。実験では実際に長尺 FBG を 1 次ピーク、2 次ピーク付近に配置した状態で、分離測定を行い、-30dB 程度分離されていることを確認している。また、シミュレーションにより、他のコヒーレンスピークのクロストークや雑音要因に関する考察も行う。

多点化により測定レンジが長くなる場合、合成される光波コヒーレンス関数において、コヒーレンスピーク以外のサイドローブによる雑音の影響が大きくなっていくため、サイドローブやダイナミックレンジに関する議論も非常に重要になってくる。既に述べたように、本センシングシステムでは、SOCF においてコヒーレンスピーク周辺のサイドローブを抑制するために、アポダイゼーションをかけている。しかし、コヒーレンスピーク周辺のサイドローブの抑制量が大きくなるほど、コヒーレンスピーク間におけるサイドローブが上昇し、高いノイズフロアが形成されるため、ダイナミックレンジや S/N 比を劣化させるというトレードオフの問題があった。そこで、本研究では光強度変調によるアポダイゼーションにおいて、従来の変調波形の半分を切り捨てた波形による変調手法を提案する。これにより従来と同様にコヒーレンスピーク周辺のサイドローブを抑制しつつ、中間領域のノイズフロアも抑制しており、従来に比べて 10dB 以上ダイナミックレンジを向上している。実験ではシミュレーションにより得られたダイナミックレンジを実現することはできないが、これは強度変調器の消光比や変調波形オフセットの厳密な調整が要求されるためであり、これらのずれとノイズレベルの関係に関する考察も行う。

最後に、光源のコヒーレンス長（可干渉長）外における分布測定について議論する。本センシングシステムの応用を考えた場合、構造物の診断区間長は数百メートルオーダーであると考えられる。SOCF はコヒーレンス長内を対象とした技術であるが、既にコヒーレンス長外においても有効な位置分解技術であることが確認されており、本研究の長尺 FBG センサについても同様にコヒーレンス長外における有効性を確認する。また、これまで提案してきた手法についてもコヒーレンス長外において有効であるかを確認する。