

審査の結果の要旨

氏名 梶原 康嗣

本論文は、「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」と題し、8章よりなる。光波の干渉特性を光源の光周波数変調により制御する「光波コヒーレンス関数の合成法 (SOCF)」を分布測定原理とし、長尺光ファイバブラッググレーティング (FBG) 内のブラッグ波長分布測定技術およびその多点化技術についての独自手法を提案・実証した論文である。

第1章「序論」では、まず本研究で提案する多点型の長尺 FBG センサを、従来の分布型センサと多点型センサのいわば中間的存在として位置付ける。測定対象となる構造物内部における接合部や素材の境界部分など、負荷のかかりやすい部位を重点的に分布測定するためのセンシングシステムの実現が目的であり、測定部位の有限長区間を連続的に分布測定する長尺 FBG センサを、任意の地点に多点配置するための複数の技術の提案と検証を行う。

第2章「光波コヒーレンス関数合成法による長尺 FBG 分布型センサ」においては、まず筆者がこれまで修士課程の研究テーマとして取り組んできた SOCF による長尺 FBG 内ブラッグ波長分布測定手法の原理と、シミュレーションおよび実験結果が説明されている。本測定システムでは、信号光である長尺 FBG からの反射光と参照光の干渉をヘテロダイン検波により観測し、SOCF により測定位置を掃引し、光源の中心光周波数掃引により長尺 FBG 内部の反射スペクトラム形状を測定している。つづいて、本研究で対象とする具体的研究課題を述べている。まず第一に、1つの分布型長尺 FBG センサの性能に関する研究として、低反射率 FBG の導入による測定精度および SNR の評価、高速分布測定およびリアルタイム分布測定の実現、空間分解能の向上が実施される。つづいて、長尺 FBG センサの多点化技術を提案して、多点化された長尺 FBG センサ内の分布測定を実施し、測定レンジの拡大が図られる。さらに、多点化システムでのダイナミックレンジの向上、光源レーザのコヒーレンス長を超えた領域における分布測定が検討される。

第3章「長尺 FBG センサの分布測定精度評価」では、長尺 FBG の反射率と分布測定精度の関係、ならびに反射率と分布測定の SNR の関係が評価される。反射率を低下させることにより長尺 FBG の後方部分へ到達する信号光のパワーが高くなり、正確な分布測定が実現できる。一方、反射率が低下すると受光器で検出される信号光強度が低下するが、SNR の計算により全長 100 mm で反射率 1% に相当する弱いグレーティングであっても、30 dB 以上の SNR が得られることを確認している。

第4章「分布型長尺 FBG センシングシステムの高性能化」では、センシングシステムの性能向上として、測定速度の高速化と空間分解能の向上に関する研究が展開される。高速測定の実証実験として、長尺 FBG に印加された振動を測定し、kHz オーダのサンプリングレートを実現した。その際、反射スペクトラム測定のための高速な光源中心光周波数掃引に伴うビート周波数シフトを補償する手法を導入した。さらに、ア

ポダイゼーションのための光強度変調法を工夫して、長尺 FBG 全長にわたるリアルタイム分布測定も実現した。また、光源レーザからの出射光に外部位相変調をかけ、光パワースペクトラムの帯域を広げることで、これまでの空間分解能 10 mm を、4 mm にまで高めることに成功した。

第 5 章「分布型長尺 FBG センサの多点化技術の提案と性能評価」では、長尺 FBG の多点化手法を提案している。はじめに、シミュレーションにより利用する長尺 FBG の反射率を見積もった。次に、検証実験として 3 本の長尺 FBG を多点化し、各 FBG 内部のブラッグ波長分布の測定に成功した。その際、高速測定による FBG ごとのビート周波数シフトを光周波数シフタの駆動周波数を制御することにより補償した。また、SOCF で周期的に合成されるコヒーレンスピーク間隔により制限される測定レンジを拡大する手法として、測定位置ごとにビート周波数が変化することを活用した手法を提案・実証した。

第 6 章「分布型長尺 FBG センサの多点化システムにおけるクロストークの低減」では、ダイナミックレンジの拡大として、新たなアポダイゼーション手法を提案した。従来のアポダイゼーション手法では、コヒーレンスピーク周辺のサイドローブ抑制効果はあるものの、周期的コヒーレンスピークの中間の領域においてサイドローブが高くなるという問題があった。本研究では、光強度変調に基づいたアポダイゼーション手法において、従来の変調波形と異なる半波形状波形を用いた新たな光強度変調によるアポダイゼーション手法を提案し、従来の -7 dB のノイズフロアを -20 dB にまで低減させることに成功した。

第 7 章「分布型長尺 FBG センサの多点化システムにおけるコヒーレンス長外への測定レンジの延伸」では、より広範囲な測定レンジを考える際に問題となる、光源レーザのコヒーレンス長を超えた領域について研究した。コヒーレンス長を超えた領域における長尺 FBG 内分布測定をはじめ、第 6 章までに議論した SNR の評価、コヒーレンスピーク間の分離測定、ノイズフロア抑制のためのアポダイゼーション手法についても同様に検討している。光源レーザ光の位相雑音によりビート信号のパワースペクトラムが広がるものの、コヒーレンス長内と比較して SNR が大きく低下することはない。第 5 章で提案したコヒーレンスピーク間の分離測定については、高次ピーク周辺のクロストークが大きく、コヒーレンス長を超えた領域においては適用は不適切であることが示された。半波形状強度変調によるアポダイゼーション手法は、コヒーレンス長内と同様に有効である。

第 8 章は「結論」であり、本研究により、分布型長尺 FBG センサを多点化するために必要な基礎技術として得られた成果をまとめている。

以上のように、本論文では、分布型長尺 FBG センサを光ファイバに沿って多点配置するというセンサ構成を実現するために必要な技術課題を抽出し、これらを実現するための独自手法を提案して、シミュレーションにより機能評価を行うとともに実証実験も行うことにより、本センサ構成のための基礎技術を固めたものであって、電子工学、特に構造物ヘルスマonitoring 技術の発展に大きく貢献するものである。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。