

論文の内容の要旨

論文題目 光コムパルス干渉を用いた高精度長さセンシング技術に関する研究

氏 名 増田 秀征

緒言

近年、インフラや各種設備の監視，高精度な加工や地質学的研究のための簡単で高精度なセンシング技術が強く求められている．特に，光ファイバセンサは小型計量・長寿命・高い環境耐性等の特徴を持っており，橋梁，航空機，加速器などの大型構造物の監視や，高温や遠隔地等の特殊な環境下での温度や歪，圧力等のモニタリングに多く用いられている．中でもファイバの長さ変化から外界の環境を測定するものは，高精度な測定に向き，その長さを測定する方法が多く提案されている．代表的なものは，エタロンの自由スペクトラム間隔を測定する方法や白色干渉により測定する方法である．前者では数 nm 以下で高分解能な測定が可能であるものの，高精度なテラヘルツオーダの光周波数計測を必要とし，複雑な機構がデメリットとなる．後者では，比較的シンプルな系で構成可能であるものの，分解能で劣り，一般的には数十 nm-数百 nm 程度の分解能に留まる．このように測定分解能と測定機構の複雑さはトレードオフの関係にある．一方で，微小な地殻変動のモニタリングのような課題では，低コストでシンプルな構成で，高分解能な測定を実現できるものが望ましい．

そこで本研究では光コムパルス干渉を用いて，以下のような性能を持つファイバエタロンセンサの開発を目的とする．

1. 絶対長を計測可能
2. 高分解能（数百 nm に対して数 nm 以下（ 10^{-8} オーダ）, 温度で 0.01K 程度）
3. シンプルな測定系（テラヘルツオーダの光周波数計測に依らない）
4. 多点への拡張可能性を有する

1 は断続的なセンシングを可能とするために重要である. 2 は高精度な波長計測によるエタロン測定との精度と同程度を目標としている. 3 はセンサとして利用する際にコストや保守の面で重要である. 4 はファイバセンサとしての実用性に直結する.

これらを実現するためには新しい手法を開発する必要がある. そこで本研究では, 新しく提案するエタロンによる多重反射と光コムパルス干渉を利用したエタロン絶対長測定手法を用いて, ファイバエタロンセンサを開発し, その評価を行う. また, このような導波路長さセンシング技術の応用として, ウォータガイドレーザ加工のインプロセス計測のように, より複雑な計測対象のセンシングについても取り組む.

本論文では全 8 章で構成される. まず第 2 章では, 光コムパルス干渉の原理を説明し, これによる絶対距離計測について整理する. 第 3 章では, 新しい手法である, 光コムパルス干渉とエタロン多重反射によるエタロン絶対長計測手法を提案する. そしてこのときのパラメタについて整理する. 第 4 章では, 提案手法の実現に必要な繰り返し周波数走査コムの設計・開発を行う. 第 5 章では, 提案手法の原理検証を行う. 空間エタロンを構成し, 開発した光コム光源を用いて測定を行い, 提案手法の評価を行う. 第 6 章では, 実際にファイバエタロンセンサを製作し, その性能を試験する. さらに, 精度向上のための自己増幅ファイバエタロンを提案し, 評価する. 第 7 章では, 応用的なセンシング課題であるウォータガイドレーザ加工のガイド長のインプロセス計測に取り組む. 最後に第 8 章で, 本研究を総括する.

第 2 章

本章では, 光コムの基礎的事項及びパルス干渉による絶対計測の理論を説明した.

まず, 単色光の干渉や白色干渉と合わせて光コムパルス干渉の原理を明らかにした. 次に, 光コムの特有のパラメタである繰り返し周波数の走査によっても干渉が得られることを示した. さらに, 干渉波形のピーク位置の決定手法について, 2 つの手法を説明し, 実装した.

第 3 章

本章では, 本研究における提案である, 光コムパルス干渉とエタロン多重反射によるエタロン絶対長計測手法を説明し, その特性とパラメタを整理した.

まず, 基礎となるエタロンの原理と特性について整理し, これを用いたファイバセンシング手法について述べた. 次に, 光コムパルス干渉とエタロンによる多重反射を用いた新しいエタロン長計測手法を提案した. これはエタロン長と光コム共振器長がハーモニック

な関係になるときに干渉が発生する現象を利用するものであり、通常の白色干渉と比べたときに、エタロン長と光コム共振器長の比の分、高精度化が望める。さらに、この手法に関するパラメタを整理し、目標とする分解能を実現するための実装について検討した。

第4章

本章では、提案手法を実現するために必要な繰り返し周波数走査コムの開発を行った。

まず、モード同期機構を整理し、目標に適する機構として非線形偏波回転を用いたモード同期機構を採用した。次に、増幅機構である EDF について検討した。本研究では、ノイズフィギュアに優れる前方励起型を採用した。また、実験的検討の結果、ER30-4 を 2500 mm 用いるときに製作する光コムに最適であることを示した。さらに、実際に繰り返し周波数走査光コムの製作を行った。この結果、以下のような光コムが得られ、これは必要な仕様を満たすことが分かった。

1. 最大 33.4 ± 1.1 MHz の繰り返し周波数走査範囲（繰り返し周波数の 6.4%程度）
2. 40 nm 以上の波長帯域
3. 一週間以上連続してモード同期

第5章

本章では空間エタロンを用いて、提案手法の原理検証を行った。

まず、空間エタロンの実装を行った。空間エタロンはその長さや変位を捕捉することが容易であるために、原理検証に適する。空間エタロンはピエゾミラーを用いて実装し高精度なアライメントが実現された。次に、この空間エタロンに対し、第4章で開発された繰り返し周波数走査コムを用いてエタロン長の測定系を構成した。このときターゲットの干渉波形を得ることができ、提案手法の実現可能性が示された。さらに、測定手法の評価を行った。約 175 mm のエタロンを安定環境下に設置した際の繰り返し精度は $2.98 \text{ nm} (\sigma=2)$ 、相対精度にして 1.7×10^{-8} であり、目標とする分解能に対し、十分な値が得られた。また、その測定絶対値を CMM と比較して評価したところ両者の差は $< 1 \text{ }\mu\text{m}$ 以下であり、絶対値の妥当性が示された。17.5 μm 程度の微小な変位を与え、He-Ne 干渉計の測定値と比較したときには、両者の差は 1 nm 以下であり、こちらにおいても測定値の妥当性を示された。以上により、提案された測定手法の原理は実現可能であることが示された。

第6章

本章では提案手法によるファイバセンサの開発と検証を行った。

まず、ファイバエタロンの製作を行った。構造として多層膜コーティングされたファイバコネクタ端でファイバを挟み込む構造を採用した。これにより一組の多層膜コーティング端でも挟むファイバを変更することで、エタロン長を自由に変更することができる。また、分散補正を二種のファイバを融着することでこれを実現した。次に、繰り返し周波数

走査コムとゼロ分散ファイバエタロンを用いて実験系を構成し、ファイバエタロン絶対長の測定を行った。また、温度特性及び歪特性について測定・評価を行った。実験の結果、217 mm 程度のファイバエタロンに対して繰り返し精度は、3.4 nm 程度 ($\sigma=2$)、相対精度にして 1.6×10^{-8} であり、目標とする分解能に対して十分な値が示された。温度特性についての実験より、良好な線形性が確認され、1 mK 程度の分解能で計測が実現された。また、歪特性についても実験より良好な線形性が得られた。また、さらなる高精度化のための自己増幅ファイバエタロンを提案した。この製作を行い、従来見られなかった非常に多い回数の往復時（～数百回）の干渉が観測された。また、繰り返し精度 0.84 nm ($\sigma=2$) で測定が可能であった。

第 7 章

本章では、導波路長さセンシングの応用として、ウォータガイドレーザの加工位置のインプロセス計測に取り組んだ。このとき 100 mm 程度のウォータガイド中の距離を数 mm 程度の精度でインプロセス計測することを目的とした。

まず、測定光をウォータガイド中に加工ビームと同軸で導入することで、加工位置をインプロセス計測する手法を提案した。次に、水による光吸収を避けるため、光コムの第二高調波発生系を構築した。さらに、実機のウォータガイドレーザの加工ヘッドへの第二高調波コム光の導入を行い、その反射光特性を評価した。その結果、Ra:0.2 の粗面試料に対しても加工レンジ内(<70 mm)で 1 %以上の反射光が得られ、パルス干渉によって測定に十分な量が得られることが示された。

第 8 章

本論文では、光コムパルス干渉とエタロンによる多重反射を用いた新しいエタロン絶対長計測手法を提案し、これを用いたファイバエタロンセンサの開発を行った。

提案手法は高精度な波長計測や複雑なロック機構に頼らず、数 nm オーダで数百 mm の絶対長計測を可能とし、これを用いたファイバエタロンセンサでは、 10^{-8} オーダの高い分解能での計測を実現できた。さらに、提案手法による計測では、ファイバエタロンを並列に接続することで、一括してエタロン長を計測することが可能であり、多点計測への拡張可能性を有する。また、新たな機構である自己増幅ファイバエタロンによって、さらなる高分解能化も期待される。

以上から提案手法及び開発したセンサは当初の目標を十分に満足するものであり、新しい特徴を備えたファイバセンシング技術として有用である。また、これらの長さセンシング技術に関する研究は、産業用途、研究用途問わず、高精度なセンシングの高度化・普及に寄与できるものである。