

審査の結果の要旨

氏名： 増田 秀征

本論文は、「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」と題するものであり、光コムパルスが持つ周期性に着目し、高精度な波長計測や周波数ロック機構を必要としないシンプルな系で高精度な長さ計測を実現する手法を開発することで、センシングへの応用を目指したものである。

本論文では全8章で構成される。

第1章では、本研究の背景を整理し、研究目的を示している。長さ計測を用いる温度や歪等のセンシングについての従来手法を整理した後、新しいセンシング手法の必要性とその意義について議論を行い、論文の構造を示している。また、特に長さ計測を用いたセンシングの目的として、1. 絶対長を計測可能であること、2. 高分解能（数百 mm に対して数 nm 以下（ 10^{-8} オーダ））であること、3. シンプルな測定系であること、4. 多点への拡張可能性を有することを挙げている。

第2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ている。まず、光コム及びそれによるパルス干渉の原理を明らかにし、次に、光コム特有のパラメタである繰り返し周波数の走査によって絶対長計測が可能であることを示している。

第3章では、本研究における中核的な提案である、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について議論を行っている。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ている。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ている。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に応じた高精度化が期待される。また、光コムの繰り返し周波数走査を行うことで、高精度な波長計測や周波数ロック機構を必要としないシンプルな系で測定系の構成が可能であることを示している。さらに、各パラメタを整理し、目標とする分解能を実現するための実装についての議論を行っている。

第4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ている。まず、モード同期機構について整理し、目標に適する機構として非線形偏波回転を用いた機構を採用している。次に、増幅機構である EDF について実験的に検討が行っている。さらに、実際に繰り返し周波数走査コムの製作が行われ、次章以降での測定に必要な仕様を満たすことを示している。

第5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ている。まず、空間エタロ

ンの実装を行い、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結果、干渉波形が得られ、提案手法の実現可能性が示されている。さらに、測定手法の繰り返しの評価が行われ、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 2σ で 3.0 nm、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ている。また、その絶対的な測定値を三次元測定機と、相対的な変位を He-Ne 干渉計と比較して評価し、それらの妥当性が示されている。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を実験的に検証した。

第 6 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ている。まず、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持ったファイバエタロンの開発を行っている。次に、繰り返し周波数走査コムと開発したファイバエタロンを用いて実験系を構成し、その絶対長の測定を行っている。結果として、217 mm 程度のファイバエタロンに対して 2σ で 3.8 nm 程度、相対精度にして 1.7×10^{-8} の繰り返しが得られ、これは原理検証と同等の値であり、目標とする分解能に対して十分な値が得られている。さらに、温度特性及び歪特性について測定・評価が行われ、それぞれで線形な応答を確認している。また、さらなる高精度化のために自己増幅ファイバエタロンの提案し、製作と実験を行った結果、従来見られなかった非常に多い回数の往復時（～数百回）の干渉が観測されており、高精度化の可能性が示されている。

第 7 章では、導波路長さセンシングの擾乱環境応用も見据えた展開可能性の検討として、ウォーターガイドレーザの加工位置のインプロセス計測について基礎的な検証を行っている。まず、100 mm 程度までのウォーターガイド中の距離を数 μm 程度の精度でインプロセス計測することを目的として、測定光をウォーター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、水によって導波路を構成するとき課題となる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ている。さらに、実機のウォーターガイドレーザの加工ヘッドへ第二高調波コム光を導入し、その反射光特性を評価している。その結果、粗面試料に対して加工レンジ内でパルス干渉での測定に十分な反射光強度が得られ、将来的な測定への実現可能性が示されている。

第 8 章では、全体を総括し、目標であった、「原理として多点への拡張性を持つシンプルな測定系で、 10^{-8} オーダの高分解能な測定が可能、絶対長計測に基づくセンシング」が達成されたことを示している。さらに、今後の展開として、エタロン測定 of のさらなる高精度化へ向けた検討を行っている。

以上のように、本研究は、光コムパルス干渉に基づき、新しい原理の、高精度長さ計測を基礎とした高感度センシング技術の開発を達成するとともに、光コムパルス干渉の広範な工学領域への適用可能性について示すことができたと認められる。

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。