

審査の結果の要旨

氏名 王 希 晶

本論文は、“Studies toward the Realization of Resonator Fiber Optic Gyro with All Digital Signal Processing (全デジタル信号処理を指向した共振型光ファイバジャイロの実装法と性能向上)” と題し、英文で書かれていて、8章よりなる。光ファイバジャイロは慣性空間に対する回転センサであり、航空機や人口衛星の姿勢制御および航法、あるいは望遠テレビカメラのぶれ防止装置やヒューマノイドロボットの制御など、航空・宇宙応用から民生応用まで広範囲に活用できる可動部分のない光センサである。長尺光ファイバを比較的小半径のコイルにしたセンシング部を左右逆回りに伝搬する光波間には、サニャック効果によって、回転に比例した位相差が生じる。干渉計を構成してこの位相差を測定する「干渉型光ファイバジャイロ」は既に実用化が進んでいる。しかし、長尺となる光ファイバに沿う温度分布が時間的に変動すると大きな出力ドリフトが生じ、また各種雑音を低減するためにスペクトル線幅の広い光源を使用する必要があるが中心波長の温度変動が大きく出力強度も不十分となり、これらが本ジャイロの高性能化を阻んでいる。そこで本論文では、干渉方式におけるこれらの問題を解決する可能性を有する「共振型光ファイバジャイロ」に関して、主要な雑音要因への対策を提案・実証するとともに、種々の雑音を低減して出力信号の高機能的な処理をも実現するために全デジタル信号処理の実装を指向したジャイロシステムの構成法を提案・研究している。

第1章は“Introduction”であり、本研究の背景や、光ファイバジャイロの研究の歴史とその方式分類を述べ、機械式ジャイロとの比較も行っており、本技術領域における「共振型光ファイバジャイロ」の位置づけを明確化している。つづいて、本研究において基盤とするバイポーラデジタルゼロダイン方式共振型光ファイバジャイロのコンセプトを述べて、本論文の構成を示している。

第2章は“Performance Degradation Factors and Countermeasures in the R-FOG”である。光ファイバ中での偏波状態変動、後方散乱、光カー効果、温度分布の時間変動、地磁気によるファラデー効果等、主要な性能制限要因について、これまでの研究成果を説明するとともに、これらへの対策として考案された方法とその問題点を述べている。また、最近開発が進んでいるフォトニックバンドギャップ光ファイバでは、光波は中空部分を伝搬するので、本質的に上記の雑音要因そのものの発生を低減することも述べて、共振型光ファイバジャイロの研究を展開することの価値を説明している。

第3章は“Twin 90° Polarization-axis Rotated Splicing as a Countermeasure against Polarization-fluctuation Induced Performance Degradation”と題し、偏波維持光ファイバを用いた光ファイバリング共振器構成として、優れた安定性を示す方法を具体的に提案し、シミュレーションにより性能限界を明らかにするとともに、実験系を構成して機能実証にも成功している。偏波維持光ファイバの偏波軸を2箇所90度振って接続することにより、共振器を構成する。ここで、2分された光ファイバの長さの差を偏波維持光ファイバの複屈折長の半分とすることで安定な共振器特性が得られ、さらに偏波依存損失がジャイロ性能に大きく影響することも明らかにして、好ましい共振器構成を提案している。シミュレーションによって、本提案構成によれば、航空機の慣性航法用の性能(0.01度/時の感度)も達成できることが示された。

第4章では、“Automated Suppression of Polarization-Fluctuation Induced Performance Degradation in R-FOG with Twin 90° Polarization-axis Rotated Splicing”について、研究成果を述べている。第3章で述べたように、本共振器構成では、2分された光ファイバの長さの差を偏波維持光ファイバの複屈折長

の半分に設定する必要がある。この長さは数 mm であり、自動的に本条件を設定する手法の開発が必須である。本研究では、共振器からの出力光のある直線偏波成分を抽出することで、この長さの差を制御するための誤差信号が得られることを見出した。この手法に関して、まずシミュレーションを行い、自動的に光ファイバ長の差を制御できることを示した。つづいて実験系を構成し、提案手法によって自動制御が可能であることを実証し、制御が稼働しているときに安定な偏波状態が維持され、またジャイロ性能も向上することを示している。

第 5 章は“Implementation of Digital Signal Processing and Suppression of R-FOG Performance Degradation due to Backscattering”である。本研究の基盤となっている「バイポーラデジタルゼロダイン方式」は、光位相を階段状鋸歯状波によって変調することになり、光波周波数を等価的に変化させ、共振型光ファイバジャイロの性能制限要因を抑圧するとともに、ジャイロ出力の処理も行う技術である。本論文では、この方式の機能向上を図る具体的な手法を提案して、それを FPGA (Field Programmable Gate Array) によって実装した。本章では、本 FPGA によるデジタル信号処理によって、光ファイバ共振器中で生じる後方散乱による性能制限を回避する手法も、提案・実証された。光周波数を精緻に制御するためには、バイポーラデジタルゼロダイン波形の振幅は 2π でなければならない。この条件を自動的に実現するために、FPGA によるオーバーサンプリング手法と利得可変アンプを用いた独自システムを提案して、その機能も実証した。また、本制御のための誤差信号の取得手法も新たに提案して、ジャイロ性能の向上に成功している。

第 6 章は“Suppression of Other External Fluctuations Induced Performance Degradation Using Digital Signal Processing”と題している。光源であるレーザの発振周波数を、光ファイバ共振器中を伝搬する一方の光の共振周波数に追尾させる必要がある。両周波数のずれは、バイポーラデジタルゼロダイン波形による位相変調によって生じるジャイロ出力の変化から捉えられる。この誤差信号を FPGA で処理して、レーザの発振周波数を制御した。振幅は大きいがゆっくりと変化する変動成分と、振幅は小さいが比較的早く変化する成分に対する自動制御ループを、それぞれ FPGA に実装し、レーザ周波数を制御する技術を実現した。

第 7 章は“Demonstration of Closed-loop R-FOG with All Digital Signal Processing”である。第 6 章までに提案・実現したデジタルゼロダイン方式共振型光ファイバジャイロの性能制限要因への対策と信号処理技術を全て含むジャイロ系に、さらにクロズドループ方式を導入した。航空機の慣性航法用などの高級用途には、6 桁にも及ぶダイナミックレンジが要求される。これを実現するためには、左右両周り光を、ともに光ファイバ共振器の共振周波数に追尾させて、両光の共振周波数の差を測定する必要がある。これを実現する手法をクロズドループ方式と呼ぶ。本研究では、一方の光波はレーザの発振周波数を追尾させ、他方の光波はデジタルゼロダイン波形を変形させることで中心周波数を等価的に変化させて、共振周波数を追尾させる。本研究ではこのための手法を提案し、やはり FPGA 中に実装した。光ファイバ共振器を実際に回転させて、回転角速度の検出に成功している。

第 8 章は“Conclusions”であり、本論文の総括を述べ、残された課題と今後の展望についてまとめている。

以上、本論文は、共振型光ファイバジャイロの性能制限要因への対策とジャイロ出力信号の形成を全てデジタル信号処理によって実現することを指向しつつ、偏波変動による性能制限への対策の提案とその理論検討ならびに実証実験を行い、本対策の最適条件を自動的に実現する手法を提案・実証し、そのためのデジタル信号処理を FPGA によって実装して、後方散乱誘起雑音の低減法ならびに光源レーザを共振器の共振周波数に自動追尾させるためのデジタル信号処理も、それぞれ提案・実装した。さらに、これらの提案技術を全て含むジャイロ系において、高性能ジャイロにとって必須なクロズドループ方式の実現手法も提案して、やはり FPGA によってこれを実装し、回転角速度の検出にも成功したものであって、電子工学への貢献が少なくない。

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。