

論文審査の結果の要旨

氏名 森脇 成典

本論文は、序章、本論 4 章、および、付録からなり、重力波検出に関わる精密光計測・制御技術に関して、新しい概念の提案と実証を行った。

序章では、重力波検出の概要が述べられている。

第 1 章は、光共振器のマッチング率向上に関する課題を扱う。これは、光共振器に外部から光を導入する際に、光共振器の固有モードに入射光モードを合わせるための技術に関するものである。レーザー干渉計型重力波検出器では、さまざまな部分で光共振器が数多く利用される。この光共振器は、ガウシアンモードと呼ばれる固有モードを持っていて、光源と各種光共振器の間で、モードマッチングを行うことが不可欠である。

本論文では、光共振器の反射光を取り出し、円形開口を持つピンホールを通した光を観察することで、符号付きの評価指標が得られることを示した。さらに原理検証実験を行い、効率の向上を示した。

非点収差を持つ光源を軸対称な望遠鏡を用いて軸対称な光共振器にマッチングさせる場合に、最適点を与える解を発見した。さらに、この解は、単純非点収差のビームだけではなく、一般非点収差のビームに対しても最適結合となることを見出した。これらの解を用いて最適結合率が算出できるようになったため、定量的な指針が得られるようになった。

第 2 章は、偏光を利用した光共振器の誤差信号取得法を扱う。光共振器ではその共振周波数とレーザー周波数の差が誤差信号となり、これを得るのに、本論文では、偏光の自由度を用いて誤差信号を得る新しい方法を提案した。光共振器が偏光に対して異なる応答を持つ場合、偏光が互いに直交する二種類の固有モードが、異なる共振周波数で存在する。入射光の偏光状態を適当に選ぶと、共振器の透過光や反射光にそれらが干渉した状態で現れ、偏光検出を行うと動作点においてゼロクロスするような、制御用に適した誤差信号が取得できる。この手法の実証実験としては、リニア共振器の場合と三角リング共振器の場合の二通りについて取り上げた。前者（リニア共振器）は高反射誘電体多層膜鏡に内在する複屈折を利用するもので、そのような鏡を用いたリニア共振器を変位センサーに応用し、1 kHz において $10^{-15} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ の変位雑音レベルを持っていることが確認された。後者（三角リング共振器）は、偏光による反射時の位相変化の違いを利用し、誤差信号の取得が可能である。ここで提案した誤差信号取得法は、導入が簡単におこなえる。そこで、三角リング共振器をモードクリーナーとして、レーザー強度安定化システムに組み込む実験を行った。これにより、極限的な光強度安定化システムにおいて雑音レベルを改善が可能で、実験の結果、100 Hz で $10^{-7} / \sqrt{\text{Hz}}$ の相対強度雑音レベル

を得ることができた。

第 3 章は、精密光計測の人工衛星機器への応用に関するものである。人工衛星を利用した重力波検出器計画は、いくつ提案がされており、いずれも、実証試験のための衛星を使って技術を検証する段階にある。2009 年 1 月に打ち上げられた JAXA の技術試験衛星 SDS-1 には、SWIM と呼ばれる宇宙実証モジュールが搭載された。これには、SWIM μ v と呼ばれる、重力波検出器が搭載されている。このモジュールでは、試験質量の位置制御用変位センサーとして、赤外 LED を光源とした反射型フォトセンサーが用いられ、このセンサーを実際に開発した。そして、非常に限られた条件のもとで必要な性能を実現できるように発光強度モニタを付加する方式を提案し、プロトタイプモデルを作成して雑音特性を実測したところ、1 Hz で $10^{-9} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ の変位雑音を達成した。そして、この構造がフライトモデルにも採用され、2009 年から 2010 年にかけておこなわれた観測に寄与することができた。

また、前述の衛星利用の重力波検出器では、ドラッグフリー制御という技術が必要である。そのドラッグフリー・姿勢の制御系の設計には、衛星の重心位置と慣性モーメントの情報が重要なパラメータとなる。本論文では、同次座標と呼ばれる、4 成分ベクトルを用いて、剛体の質量特性(慣性モーメント、重心位置、質量)の解析に適用し、数値計算を容易にする方法を提案し、DECIGO Pathfinder の質量モデルに適用して質量特性を求めた。その結果、衛星の章動周波数が目標としている重力波観測帯域 0.1-1 Hz より十分小さい値となることが確認できた。

第 4 章は結論として、この論文で提案された手法は、重力波検出器の感度向上に重要な役割を果たすものであることが述べられている。

なお、本論文の第 1 章は、三尾典克、竹野耕平、笹川直人、森匠、第 2 章は三尾典克、境田英之、湯澤貴弘、森匠、尾関孝文、町田幸介、第 3 章は、安東正樹、穀山渉との共同研究であるが、論文提出者が主体となって分析及び検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士(科学)の学位を授与できると認める。

以上 2007 字