

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：32675

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25610059

研究課題名(和文)次世代レーザー干渉計重力波天文台のための縮退光共振器姿勢制御技術の開発

研究課題名(英文)Development of alignment sensing and control technic for degenerated cavity used in next generation laser interferometer gravitational wave observatory.

研究代表者

佐藤 修一(SATO, Shuichi)

法政大学・理工学部・教授

研究者番号：30425409

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：共振器内のモードを操作するという手法を導入することにより、鏡の姿勢について新しい制御信号の取得方法を開発した。縮退した共振器の姿勢制御という従来の設計のレーザー干渉計での未解決問題を抜本的に解決する新しい制御の方式を提案し、実証実験を進めた。KAGRAのパラメータを用いた計算でも本提案の効果が確認されたことを踏まえ、テーブルトップサイズでの実証実験のための光学系・機械系・制御系の設計・製作を行った。

研究成果の概要(英文)：We have developed novel design of sensing technique for alignment control of the laser interferometer mirrors, by introducing modified Gouy phase inside cavities. We could give a drastic solution for outstanding problem known as signal degeneracy of the traditional designed degenerated cavities, and proceeded the proof-of-principal experiment. As the sensing simulation using KAGRA parameters confirmed to give similar effects, we have proceeded the experiment: the design and fabrication of the optical, mechanical and control systems.

研究分野：重力波物理学

キーワード：重力波

1. 研究開始当初の背景

重力波を検出するためのレーザー干渉計は、重力波とレーザー光との相互作用長となる光路長を稼ぐために光共振器を用いる。次世代のレーザー干渉計は **Resonant sideband Extraction (RSE)** というトポロジーを採用し、4つの光共振器がマイケルソン干渉計を介して複雑に結合した結合共振器系を構成する。これら共振器系が長さおよび角度に関して適切に制御され、共振状態を保つことで初めて重力波検出器として動作する。

昨今の干渉計技術においては、RF帯の位相変調・復調を用いた **Wave Front Sensing (WFS)** と呼ばれる波面検出法が鏡の姿勢制御の方法として採用され、次世代干渉計設計にも用いられることになっている。この WFS という方法は、伝搬するレーザー光を共振器で定義される空間モードに分解したときの基本モードおよび高次モードの各モード間の **Gouy 位相** の違いを拠り所として誤差信号の検出を行っている。したがって例えば、2枚の鏡から成る共振器の姿勢の誤差信号を理想的に分離して得るには、共振器のモードが縮退していないこと、つまりモード間に適切な **Gouy 位相** が存在することが本質的に重要である。

通常レーザー干渉計の光学設計では、重力波のプロブとなる **Fabry-Perot 共振器** はできるだけ長く設計される一方で、光強度を増幅するためのリサイクリング共振器は極端に短い構成となることが多い。たとえば **KAGRA** では、腕共振器の基線長 **3km** に対しリサイクリング共振器の長さ **66m** 程度である。この場合、レーザー光のモードは腕共振器に最適化されるため、腕共振器は幾何光学的に十分に安定な設計となる一方で、リサイクリング共振器はモード不安定に近い、縮退した共振器となる。こうした縮退した共振器ではモード間の **Gouy 位相** が十分でないために、共振器を構成する2枚の鏡に関して独立な信号を得ることがきわめて困難となる。これはつまり、どちらの鏡が動いてもよく似た誤差信号しか得られず、適切な制御ができないという結果に帰着する。

2. 研究の目的

(1) 共振器内のモードを操作するという斬新な手法を導入することにより、鏡の姿勢について新しい制御信号の取得方法を開発する。縮退した共振器の姿勢制御という従来の設計のレーザー干渉計での未解決問題を抜本的に解決し、新しい制御方式を提案・実証する。

(2) このアイデアを実際のフルスケール結合共振器系に展開・応用し、現在建設が進められている重力波観測装置 **KAGRA** への実装を想定した設計を進める。

3. 研究の方法

(1) 実験によって実証するための光学系設計のため、適切なモード操作によって鏡の姿勢に関する誤差信号が理想的に取得できることをはじめとして、共振器の光学設計、検出系・制御系などの設計を行う。共振器が縮退する場合、得られる誤差信号の大きさは大きくなる一方で分離するための **Gouy 位相角** が小さくなる。対角化する際に **S/N** まで含めた状態で最適な信号取得の方法を開発する。

(2) テーブルトップに最小限の構成で干渉計を構築し、本研究のアイデアである「縮退を解く」ことによって適切な姿勢制御の誤差信号が取得できることを実験的に実証する。光学系はもとより、複数変調に対応した **WFS 信号取得系**、デジタル制御系およびアクチュエート系を設計・製作する。WFS を用いた姿勢制御の研究は実績も経験も豊富であることから、既存の要素技術・道具立ての準備ができれば実験の遂行にあたって原理的な部分に関しては大きな困難はない。むしろ本実験の核心は、縮退した共振器と縮退を解いた共振器との比較において、信号取得の質が改善されていることを実験的に明確に示すことにある。

(3) 干渉計(結合共振器系)のスケールは光学系の取り回しの容易性からテーブルトップ実験程度に小さくするが、共振器のモード、変調・復調方法等はフルスケール干渉計に拡張できるように一般的な構成に設定する。さらに光学構成を単純化することで問題の本質的な部分にのみ集中し、短期間で効率的な成果を挙げられるように工夫する。また、信号取得に関して計算と一致する結果を得るためには、設計に沿った「クリーン」な干渉計を構築することが重要である。特に WFS はレーザービームのモードの変化を検出する方法なので、不要なモードが干渉計に入らないように、精密な光学設計および実験環境の構築が重要となる。

4. 研究成果

(1) 信号取得法: 現在神岡で建設中の **KAGRA** 光学系について、実際のパラメータを元に WFS を用いた姿勢制御信号を計算した。**KAGRA** では腕共振器におけるビームのウエストが共振器内部にある設計のため、リサイクリング共振器内部での **Gouy 位相** の進みは通常的设计の干渉計に比べて更に極端に小さい。リサイクリング共振器の **Gouy 位相** を操作しない縮退した共振器の場合と、**Gouy 位相** を操作して縮退を解いた場合の共振器について期待される取得信号の計算を行った。

ここではフルの **RSE 干渉計** を3枚鏡の結合共振器に単純化し、フロント・エンドおよびリサイクリング鏡の3枚についての信号分離度をみるのが目的である。変調は2周波

を用いて共振器の長さや姿勢の制御に用いる。信号取得ポートは反射側ポートに加えてリサイクリング共振器内からも一部の光を取り出して利用するものとする。復調位相および干渉計ポートから WFS までの Gouy 位相は該当する必要な信号が最大になるように、かつ混入信号が小さくなるように調整した。

Sig. Part		End	Front	Rec
Ref. 1	'	2.0	-0.02	-0.07
Pick	Deg.	0.3	17	-15
Ref. 2		-3.5	-40	41

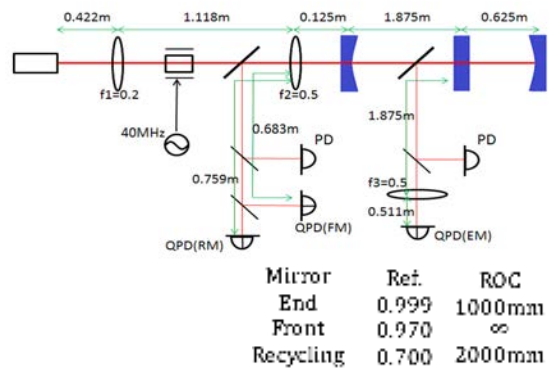
Sig. Part		End	Front	Rec
Pick	'	0.68	0.02	0.01
Ref. 1	Non-deg.	-3.9	4.5	0.08
Ref. 2		0.09	-0.06	1.3

これによとりサイクリング共振器が縮退している場合、エンド鏡の信号は比較的独立した状態を取り出せるが、フロントとリサイクリング鏡の 2 枚は反射ポートの信号をみてもピックオフポートの信号をみても縮退しており、それぞれを独立に取り出すことは困難であることがわかる。一方でリサイクリング共振器の縮退をなんらかの方法で解いた場合、期待される信号のマトリクスによると、エンド鏡の信号を独立に取得することができる状況は共通であるが、リサイクリング鏡の情報がピックオフポートからほぼ独立に取り出せることが大きな違いである。フロント鏡の情報は独立に取り出すことはできないが、他 2 枚の鏡の情報が独立であることからマトリクスは容易に対角化できる。

以上のことから、KAGRA においてもリサイクリング共振器の縮退は鏡の姿勢制御信号の取得に大きな影響を与えることが確認された。一方でリサイクリング共振器の縮退を解くことができれば、比較的良好（独立）な誤差信号が期待されることも確かめられた。

(2) 光学系設計

重力波に用いられるレーザー干渉計は、その共振器の大きさに応じて適切な鏡の曲率と制御に用いる変調の周波数が決定される。従って同じ設計のまま干渉計のサイズだけをスケールしてテーブルトップのサイズにすることは不可能である。ここでは縮退/非縮退の共振器における姿勢制御信号の比較という点に焦点を絞り、市販されている離散的な値の曲率半径（と反射率）の鏡、および現実的な範囲の変調周波数を持ちいることによってテーブルトップサイズの光学系を設計した。



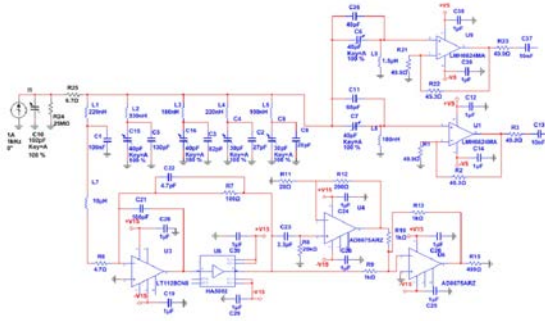
(3) 機械系設計

小規模な実験ではあるが 3 枚の鏡はそれぞれ長さ方向および姿勢（ピッチ・ヨー）の併せて 3 自由度を計測・制御する必要がある。このためそれぞれの鏡には 3 自由度を独立にアクチュエートする機構が必要となる。ここでは 3 軸のピエゾ素子が一体化され、長さ方向および傾き方向に自由度を持つ市販のピエゾアクチュエータを採用した。0.5 インチ規格の鏡を固定するためにアタッチメント治具を設計し取り付けした。この機構を用いて光共振器を構成し、フィードバック制御系を閉じることで共振状態に制御することに成功した。



(4) 制御系設計

結合共振器の制御のために 2 つの周波数の位相変調を用いる方式を採用する。これに対応して光検出器も 2 周波対応の共振型とし、1 つの検出器から二つの周波数に対応した RF 信号（と DC）を同時に得られる構成とした。光学設計との調整から、変調周波数は 17.25Mhz と 40Mhz の 2 種類とし、これらに対応した長さ方向を計測する光検出器、姿勢を検出する WFS、およびミキサ復調回路も併せて新規設計した。



5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 4 件)

- ① 佐藤修一, DECIGO ワーキンググループ, ”スペース重力波アンテナ DECIGO 計画(63):pre-DECIGO の設計”, 23pDJ-5, 日本物理学会, 2015年3月23日, 早稲田大学(東京都新宿区)
- ② 佐藤修一, DECIGO ワーキンググループ, ”スペース重力波アンテナ DECIGO 計画(58):ドラッグフリー”, 21aSB-7, 日本物理学会, 2014年9月21日, 佐賀大学(佐賀県佐賀市)
- ③ 佐藤修一, DECIGO ワーキンググループ, ”スペース重力波アンテナ DECIGO 計画(53):ドラッグフリー制御”, 28aTL-4, 日本物理学会, 2014年3月28日, 東海大学(神奈川県平塚市)
- ④ 佐藤修一, DECIGO ワーキンググループ, ”スペース重力波アンテナ DECIGO 計画(48):ドラッグフリー制御”, 23aSR-12, 日本物理学会, 2013年9月23日, 高知大学(高知県高知市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

佐藤 修一 (SATO, Shuichi)

法政大学・理工学部・教授

研究者番号: 30425409