

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月18日現在

機関番号：62616

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22840048

研究課題名（和文）微小重力環境における試験質量の全自由度非接触制御法の開発

研究課題名（英文）Development of control scheme of test mass motions in microgravity

研究代表者

阿久津 智忠（AKUTSU TOMOTADA）

国立天文台・光赤外研究部・助教

研究者番号：40564274

研究成果の概要（和文）：将来の宇宙機搭載用の重力波検出器にむけて、その要素技術開発の一環として、試験質量の並進や回転運動を非接触に検知し、非接触に制御する手法の開発を行った。このために、静電容量方式の非接触センサ、静電引力型の非接触アクチュエータを開発した。また、地上で2段のねじれ振り子と組み合わせることで、試験質量の2自由度について微小重力環境を模擬する装置を開発し、これらを用いて総合的な実証試験を行った。

研究成果の概要（英文）：For the future spaceborne gravitational-wave detector, we have developed the capacitive sensor and actuator for controlling a test-mass motion in space. Suspended by a double torsion pendulum, the test mass is kept almost free from the seismic motion in its 2 degrees of freedom.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,250,000	375,000	1,625,000
2011年度	1,150,000	345,000	1,495,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：重力波天文学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：微小重力、防振、重力波

1. 研究開始当初の背景

(1) アインシュタインがその存在を予言し、間接的ながらも存在が証明された重力波について、直接検出のために世界各国で本格的な重力波検出器が開発されようとしていた。日本では中型機 TAMA300 による技術実証は行われていたが、世界と比肩する大型機 KAGRA (LCGT) の建設は開始前であった。

(2) 地上検出器では感度があまり高くない低周波側について、宇宙に検出器を建設する計画があった。これには、欧米の LISA 計画、

日本の DECIGO 計画などが挙げられる。その要素技術開発を順次行って技術を蓄積する必要があった。

(3) 日本では、すでに JAXA の小型実証衛星 SDS-1 に試験的に超小型の重力波検出器を搭載し、軌道上で試験運用を始めた段階であった。欧米でも宇宙重力波検出器 LISA 計画の前哨衛星 LISA Pathfinder が 2010 年代中盤の打ち上げを目途に開発が進められていた。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、将来の宇宙用重力波検出器にむけた要素技術開発の一環として、試験質量の全自由度を非接触で制御する方法を開発することである。

(2) 重力波検出器の感度は慣性系基準の質に依存している。目的とする重力波の観測帯域 (0.1Hz~1Hz 程度) において外力の影響をほぼ排除できるような試験質量およびその保持システムを構築し、それを宇宙機に搭載することで、これをその慣性系基準として使用する予定である。

3. 研究の方法

(1) 試験質量の非接触制御に必要なセンサ、アクチュエータとして、静電容量型のものを開発する。必要に応じ、宇宙機搭載用の試験質量の制御の分野で先行し宇宙での実績もある欧米の技術を参照する。

(2) 地上において宇宙と同様な微小重力環境を模擬する方法を用意し、上記のセンサ、アクチュエータを用いて試験マスの自由度制御を行う。模擬の具体的な方法としては、振り子による防振を行う方法と、より直接的に、落下塔などでの自由落下実験を行う方法が考えられる。このうち前者の振り子方式の方が装置全体を比較的シンプルにでき、技術的課題の切り分けも行いやすい。しかし、振り子方式では、フリーにできる自由度が限られる。これに対し、後者の自由落下実験では全自由度をフリーにできるが、試験筐体の準備や落下塔の使用などにコストがかかる。

(3) これらの事情を総合的に勘案し、まずは振り子を用いた限られた自由度での試験で、センサ、アクチュエータの特性や課題を洗い出し、同時にそこで使用する制御回路などについてはデジタル化を図るなど小型化をすすめることにした。これら小型化された機器は、この後、落下筐体に全てを組み入れる際にそのまま使用することを意識した設計とした。一方で、落下筐体の試作も平行して行うこととした。

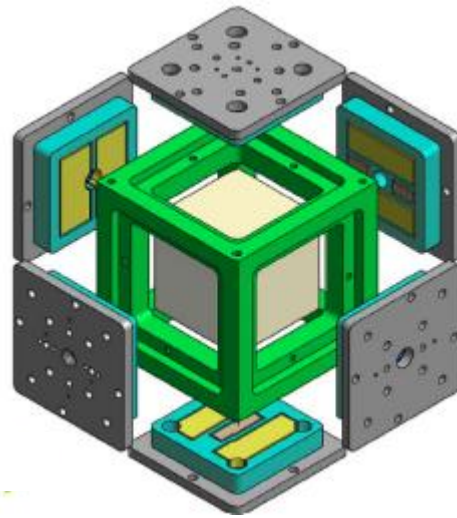
4. 研究成果

(1) 試験質量モジュールの設計、試作

試験質量モジュールの設計と試作を行った。このモジュールは、DECIGO の前哨衛星である DECIGO Pathfinder に実際に搭載するものと同等な設計となるようにした。

これは、一辺 50mm の立方体である試験質

量を取り囲む構造をしており、それぞれの内壁には、静電容量型センサおよびアクチュエータ用の電極板がうめこまれたものである (下図)。

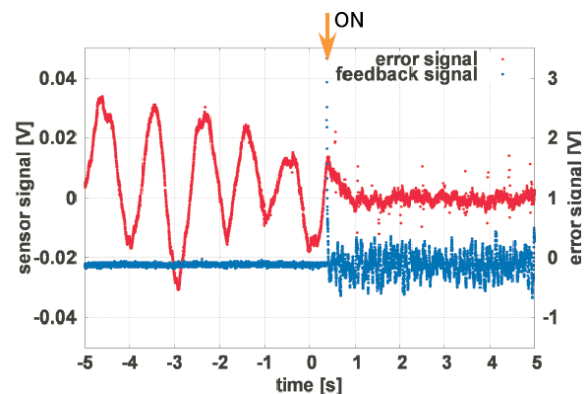


実際の運用時には、このような試験質量モジュールを 2 台設置し、試験質量に鏡を貼り付け、その試験質量どうしの距離の変化をレーザー光による干渉計測する装置とすることで、重力波や重力勾配に対するセンサとすることができる。

電極板の配置や、電極板と試験質量とのギャップ間隔は、読み出し回路部と合わせて、静電容量センサの雑音特性やアクチュエータの性能、静電的な (弱い) ばねによる剛性などに直結するため、これらの要求性能を満たすように設計した。

(2) 非接触制御系の動作検証

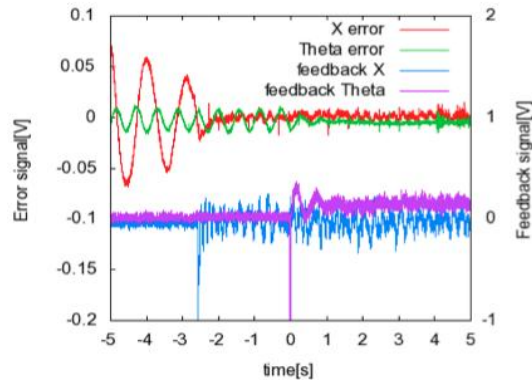
静電容量型センサやアクチュエータをふくめた、試験質量の自由度制御系の動作検証や性能評価を行った。まずは 1 自由度での動作検証を行い、試験質量が制御できることを示した。



上図は、制御をかける前後の様子を示したも

のである。赤線が試験質量の動き、青線はフィードバック量を表している。この実験では試験質量は小型の2段振り子に吊って防振してあるため、制御なしの状態では振り子の共振周波数（1 Hz 程度）で大きく揺れている。これに対し、制御を on にした後はすみやかに制御状態に引き込めることが確かめられた。

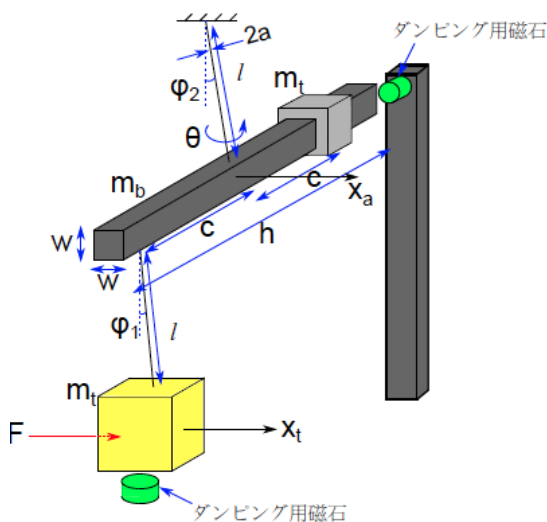
この状態でさらに制御自由度を1つ増やして、2自由度について同時に制御できることを確かめた。



制御を行った自由度は並進1自由度と回転1自由度であり、それぞれの動きは上のグラフの赤線と緑の線に対応する。制御系を切っている間は、並進、回転それぞれの共振周波数（それぞれ1Hzと1.7Hz）付近で大きく動いているところ、制御系を順次 on にしていくことで、どちらも揺らぎを抑え込めている。

(3) 2自由度系への拡張

続いて、より実際の運用環境である微小重力環境に近い状況を再現するため、ねじれ振り子を2段組み合わせた防振系を開発した。この防振系では、装置の単純さや、サイズの大きさなどとの兼ね合いを考慮し、0.03Hz付近に共振周波数がかかるように設計した。



この模擬装置を用いて、先ほどと同様に、静電容量型センサの各自由度の分離や、制御フィルタの構成、アクチュエータの動作検証、そして全体としての2自由度系の制御ループの動作検証を行った。そして、振り子の共振によるそれぞれの自由度でのゆらぎを今回構成した制御系によって抑え込めることを示した。

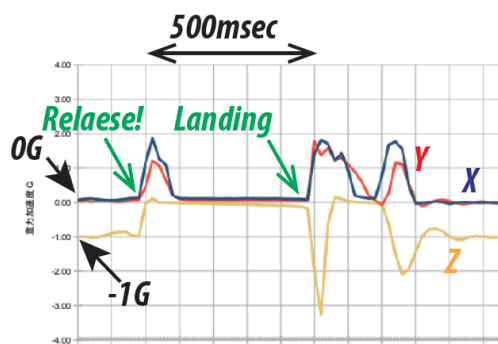
本装置に関して新たな課題として、制御をかけている状況で、非制御帯域での雑音上昇がわかった。これは、より固く（共振周波数が高く）吊った振り子の防振系では見られなかった問題である。現状、アクチュエータの最大出力に関係した問題であろうと予想されているが、調査中である。また、長期的に動作させていくうちに、試験質量モジュールの直後にあるフロントエンド回路が不安定になることがあることが判明したため、宇宙などで使用するためには更なる設計の改善が必要であることが認識された。

(4) 自由落下実験用筐体の開発

落下塔などでの自由落下実験を行うには、試験質量モジュールを含めて電源やフロントエンド回路、制御回路なども1つも小さな試験筐体に収める必要がある。

これらの筐体の開発を行った。また同時に、回路の小型化をはかるため、FPGAを用いたデジタル制御系を開発した。また、これを用いて前述の振り子の試験質量の制御系と組み合わせることで、アナログの場合と同様に制御がかかることを確認した。

また、自由落下筐体の周辺機器として、加速度計やデータロガーの開発も合わせておこなった。



上の図は加速度計とデータロガーを組みあわせ、簡易的に2m程度の高さから実験筐体を落下させたときの実測を示したものである。Z方向（黄色）が鉛直方向の加速度を表しており、実験筐体を落下させるとすみやかに-1Gから微小重力状態（0G付近）に移行することが分かる。その語、500ミリ秒程度自由落下した後、着地する様子を示している。

なお、X および Y 方向でのリリース直後の信号は、加速度計を変更し、またリリース方法を工夫することで低減できることが分かっている。

(5) その他

試験質量に対するセンサやアクチュエータの性能以外の課題として、残留ガスによるブラウン運動が、試験質量に無視できない外乱を与えることが計算によって示されている。将来、衛星に搭載する際には 10^{-6} Pa程度の真空度を想定しているが、この影響をいかに排除するかが今後の課題としてあげられる。

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 2 件)

① 阿久津智忠、DECIGO pathfinder の試験質量の全自由度制御実験 II、日本物理学会、2011 年 9 月 17 日、弘前大学

② 阿久津智忠、DECIGO pathfinder の信号取得系の開発、日本物理学会、2010 年 9 月 13 日、九州工科大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阿久津 智忠 (AKUTSU TOMOTADA)
国立天文台・光赤外研究部・助教
研究者番号：40564274

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし