

ドラッグフリー制御の地上における実証実験

橋本, 安寿佳 / Hashimoto, Yasuka

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

61

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

4

(発行年 / Year)

2020-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00022934>

ドラッグフリー制御の地上における実証実験

DEMONSTRATION OF DRAG-FREE CONTROL ON GROUND

橋本安寿佳

Yasuka Hashimoto

指導教員 佐藤修一

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻修士課程

DECIGO (DECI-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory) is Japanese space antenna project for detecting gravitational wave. To detect gravitational waves using DECIGO, we need to develop some technical points. Among them, my research theme is drag-free controls. The final goal of this experiment is demonstration of drag-free control on ground.

Key Words : Gravitational Wave, DECIGO, Drag-Free control, stability spacecraft

1. 研究の目的と背景

本研究の目的は、宇宙重力波望遠鏡計画 DECIGO (DECI-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory) の要素技術のひとつであるドラッグフリー制御を地上で実証、あるいは実証可能性の検証をすることである。

重力波とは時空の歪みが光速で伝播する現象である。1916年にアインシュタインが一般相対性理論から予言して以来、様々な手法で重力波を観測する試みが行われてきた。2015年9月14日の初観測以来、アメリカの LIGO (Laser Interferometer Gravitational wave Observatory) と欧州の Virgo によって研究観測が進められていて、現在、O3 と呼ばれる 3 回目の観測中である。日本の KAGRA でも、今年の実験参加を目指して建設、コミッションングが進められている。

しかしながら地上での観測は地球由来のノイズの影響などにより、測定の限界が生じてしまうため、現在、宇宙での重力波観測が計画されている。すでに欧州宇宙機関が LISA (Laser Interferometer Space Antenna) 計画の技術実証衛星である LISA Pathfinder を打ち上げ、LISA に必要な多くの技術の実証に成功した[2]。日本においては、LISA とは異なる 0.1 Hz 帯域での重力波をターゲットとした DECIGO プロジェクトが計画されている。

DECIGO が宇宙で重力波を観測するためには、開発しなければならない技術がいくつもある。そのうちのひとつとして、ドラッグフリー制御がある。DECIGO の前段階の重力波観測ミッションである B-DECIGO では衛星変動安定度を $10^{-12} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下にするという要求があり、DECIGO 計画ではより精密な安定度が要求される。本実験では、地上でスラスタを用いて制御

対象の変動をその要求値以下に抑え込むような実験系の開発・設計及び実験を行う。

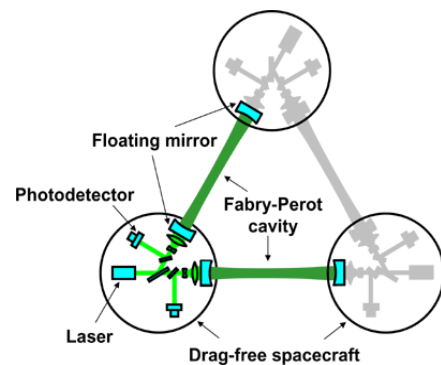


図1 DECIGO の概念図[3]

2. 研究概要

(1) ドラッグフリー制御

DECIGO が宇宙空間で重力波を観測するためには、観測中、常にドラッグフリー制御を行う必要がある。ドラッグフリー制御とは、宇宙空間に浮かぶ試験質量 (図1における Floating mirror) に対して筐体の位置を常に一定に保つ制御のことであり、ドラッグフリー制御を行うことで、衛星内の試験質量が重力以外の影響を受けないようにすることができる。

観測中、試験質量と筐体は 6 自由度において制御されるが、本実験では地上での重力の影響や各自由度間でのクロスカップリングによる煩雑さを考慮し、1 自由度に制限し、かつ低推力なスラスタを用いた精密制御実験を行うこととした。

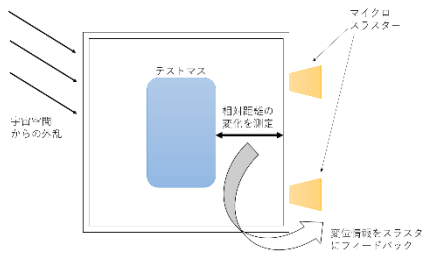


図2 ドラッグフリー制御の概念図

(2) 先行研究と研究方針

まず、ドラッグフリー制御を地上で実証するための実験の第一段階として、ピエゾバルブによる簡易スラスタをアクチュエータとして用いた1軸方向の制御実験を行った。実験は、スラスタを搭載した振り子型の実験系で行った。地面振動による振り子の揺れをセンサーで測定し、その情報を制御フィルターを介してフィードバック制御することで常に振り子の位置を定点に保つような制御を行った。

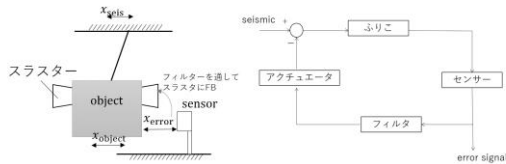


図3 前実験における実験のスキーム(左)と、ブロックダイアグラム (右)

本実験では、液化炭酸のガスカートリッジとピエゾバルブを組み合わせたものをスラスタとし、2つのスラスタの空気の噴出口を各々逆に組み合わせることで、正負両方向に推力を出せるようにした。このスラスタでは、設定電圧により0~6 mNの推力を出すことができ、スラスタをアクチュエータとして利用した低推力での制御実験を可能とした。

先行研究での実験結果を以下に示す。制御をかけていないときに比べ、制御をかけた場合には共振周波数(約1.5Hz)での変位を抑えることができていることがわかる。

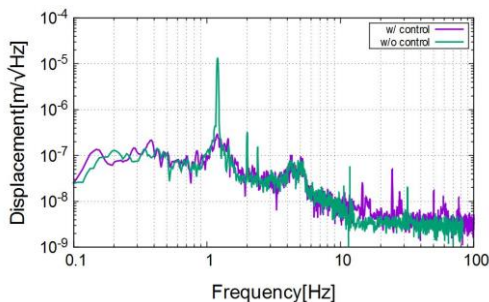


図4 制御をかける前後の変位スペクトル[4]

スラスタをアクチュエータとして用いた制御実験ができるようになったので、次に、ドラッグフリー制御の地上実証に向けた実験系の設計をおこなった。

設計する実験系は図2に対応させ、大きく分けて以下の3つのパーツに分けて考えることにした。

- テストマス
- スラスタの付属した筐体
- その間の距離を測定するセンサー

本論文で主に検討した項目はセンサー系とテストマスである。

実際に飛行中のドラッグフリーを模すためには、自由質点として振る舞うテストマスが必要となる。また、前実験では地面に固定されているセンサーと制御対象との距離を測定していたために、正味の筐体の変位を観測できていない(図5)。そこで、地面振動の影響が出ないような制御ダイアグラム及びセンサーの検討を行った。

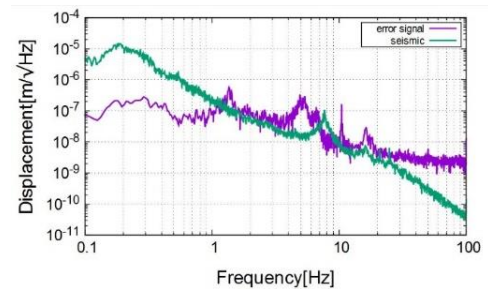


図5 前実験における振り子の揺れと地面振動。地面振動から見た振り子の変動成分を観測しているため、低周波数帯では地面振動より小さい変動、中間周波数帯では地面振動と同じ変位となっていることがわかる。

3. 研究結果

(1) センサー系の諸々の検討

a) ローカルセンサーを用いた制御の検討

従来と同じように変位センサーを用いての測定であれば、図の左のように地面振動を別で測定し、それを引き算すればよい。あるいは、慣性センサーを用いて制御ループを組めばよい。

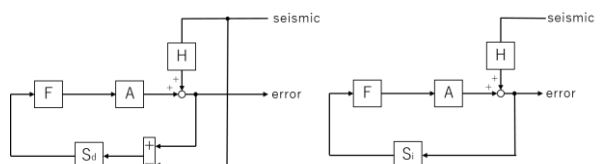


図5 地面振動によらない測定ができる制御ダイアグラム。変位センサーを用いた場合(左)と、慣性センサーを用いた場合(右)。Hは筐体の伝達関数、Sdは変位センサー、Siは慣性センサー、Fはフィルター、Aはアクチュエータを示している。

変位センサーと慣性センサーを比較すると、変位センサーは低周波数帯に感度がよく、慣性センサーは高周波数帯に感度を持つので、それらを組み合わせて広帯域に感度の良いセンサーを構築することも可能である。

しかしながら現状研究室にて使用している慣性センサー(Trillium Compact)は 1.2 kg の重量があり、筐体に搭載してしまうと制御に必要な推力が大きくなってしまい、本研究の目的とは逸れてしまうことから、より軽量のセンサーを準備する必要がある。

また、現行のセットアップでは in-loop の信号を用いての制御となり、感度を過剰に良く評価してしまいかねない。そこで、センサーを制御ループの外(out-of-loop)に配置することで筐体そのものの変位を評価できるようにする必要がある。

b) 状態空間モデル

次に、状態空間モデルを用いた手法での筐体の位置測定を検討した。

状態空間モデルを用いた筐体の動きを測定するシステムは、LISA の前哨衛星である LPF でも用いられている [5], [6]。LPF では、状態空間モデルを用いることで代っている性質の変数をグループ化しやすくなる特徴を生かし、例えば光学計測サブシステムや重力センサー(GRS)のモデルを用いてそこからテストマスのダイナミクス特性のモデルを組み立てる、といったような運用をしていた。また、制御残差を各ノイズに分解することで、筐体に対するテストマスの並進と角度変位の in-loop 観測を説明でき、そうすることで、筐体の「真の変位」や加速度など、on-board sensors では観測することのできない物理量を測定することを可能とした。

状態空間モデルは MIMO(multi-input, multi-output)に対応した手法ではあるが、いずれ本研究で制御軸を増やし、構造が複雑になっていくことも念頭に、検討対象とした。また、微小変化のうちでは本実験のシステムも線形システムで与えられると考えた。

状態空間モデルにおいて状態を推定するための手法としては、カルマンフィルターが一般的で、これを用いることで観測値とその観測方程式・状態方程式から状態を推定することができる。本研究では、状態量を筐体の位置、観測量をセンサーの雑音に乗った筐体の位置に関する信号として得ることができる。ローカルモデルと呼ばれる最も基本的な状態空間モデルでは、

$$\begin{aligned} \text{観測値} &\sim \text{状態} + \text{ノイズ} \\ \text{状態値} &\sim \text{前の状態} + \text{ノイズ} \end{aligned}$$

(1)

と表され、そこから位置推定を行う。

(2) テストマスの検討

新しい実験系では、自由質点としてふるまうテストマスの設置を検討している。そこで、本年は 2 つの方法で実現を検討した。

a) メカニカルフィルターを用いての検討

まず初めに、振り子を用いた形状のテストマスの検討を行った。振り子が共振周波数より高い周波数帯は自由質点としてふるまう性質を利用する。振り子の糸の長さが長ければ長いほど共振周波数は低周波数帯に移動する。

振り子の形状にもよるが、簡単な為、これまでに研究室にて利用していた捻じれ振り子 [7] で計算を行った結果を図に示す。振り子の長さが 4.0 m で変位が 10^{-8} m/√Hz 程度となるがこれはあまり現実的でない。

振り子の形状をより慣性モーメントが大きくなるように設計し、テストマス自体にも制御を効かせることでより自由質点に近い挙動をすることができるはずである。

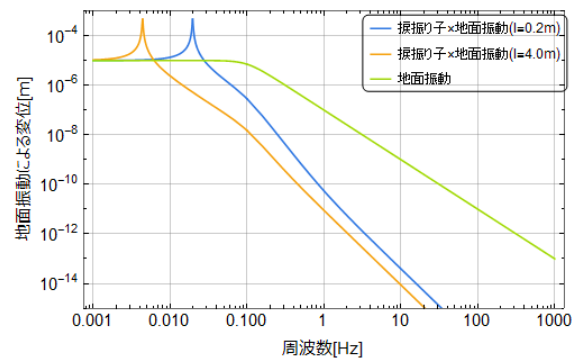


図 6. 振り子による地面振動の低減

b) モノリシック干渉計を用いての検討

地上に実験系を設置する以上、低周波数帯での地面振動による影響は避けることができない。そこで、地面振動の影響を低減した変動の小さなテストマスとして、クリアセラムにミラーを固定したモノリシック干渉計 [8] を用いることを検討した。

図に示すように、干渉計の一部のいくつかの鏡をモノリシックにすることで、各鏡に独立で影響する地面振動の影響を抑えることができる。モノリシックデザインの干渉計に対して、腕の片方のエンドミラー(図中一番右)をモノリシックの外に独立に配置し、正味の歪位を取得、制御することで変動の小さいテストマスが実現できると考えた。そして、そのテストマスを基準とし、筐体の制御を行うことで、より精度のよいドラッグフリー制御ができると考える。

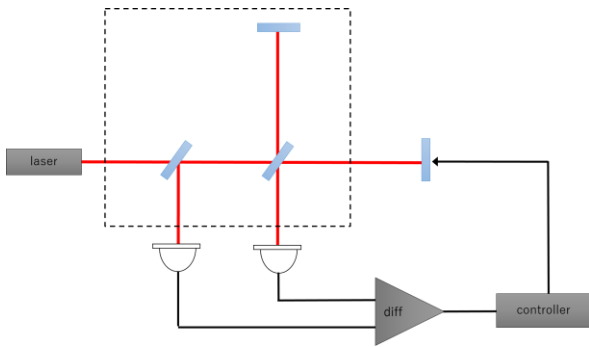


図7. マイケルソン干渉計. 点線で囲っている3枚の鏡をクリアセラムに固定し, モノリシックにする.

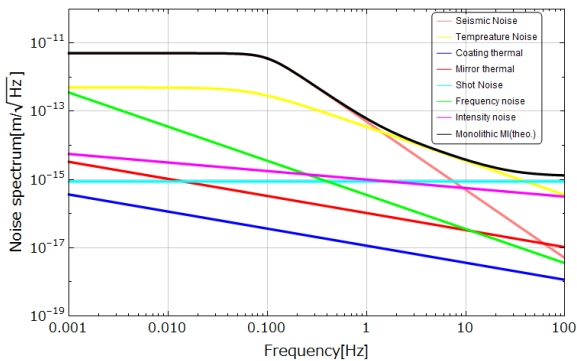


図8. 予想されるテストマスの変位感度

ここでは主にモノリシック干渉計に寄与すると考えられる鏡の熱雑音, 周波数雑音, 強度雑音, 地面振動, PDの電気ノイズ, ショットノイズ, 温度変動を考慮し, 予想感度を求めた. PDのノイズ, 温度変動に関しては実測にて求める必要があるが, 過去の実験より推定される値を利用した. また, 上に示した感度は, CMRR (Common-Mode Rejection Ratio: 同相信号除去比) が効いており, 実際のテストマスの変動は100倍ほど大きくなるが, それでも0.1 Hz帯で 10^{-9} m/√Hz程度の変動に抑え込むことができる見通しである.

4. 結論と今後の展望

ドラッグフリーの実証実験に向け, スラスタをアクチュエータとして用いた制御実験とその評価を行い, より精密なドラッグフリー実験に向けたセンサーとテ

ストマスについての検討を行った. 制御軸を1軸に限定した系では慣性センサーと変位センサーでもある程度の実証は可能だと思われるが, 最終的には制御軸を増やし, かつ光共振器との競合も考慮すると状態空間モデルを用いて筐体そのものの変動を測定できるようにすることが現実的であると考えられる.

そのためには, 実験系に寄与してくる雑音の考慮が必要となってくるため, その他筐体の機構やアクチュエータの設計が必要になってくる. また, 前実験で問題であった局所的にしか制御がかかっていない問題については, 構造設計とともにコントローラーの設計で改善を期待する.

謝辞: 本論文を書き上げるにあたり, 多くの方々に支えていただきました. 特に, 学校生活及び研究への復帰を手助けしていただいた前理工学研究科長の藤井章博教授には深く感謝いたします.

参考文献

- 1) B.P.Abbott et al., : Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, Phys. RevLett., 116, 061102, 2016
- 2) M.Armano et al., : Sub-Femto-g Free Fall for Space-Based Gravitational Wave Observatories: LISA Pathfinder Results, Phys. Rev. Lett., 116, 231101, 2016
- 3) 国立天文台重力波プロジェクト推進室 http://tamago.mtk.nao.ac.jp/spacetime/decigo_e.html
- 4) 松井秀太郎: 宇宙重力波望遠鏡DECIGOのための微小推力スラスタを用いた1軸制御実験, 法政大学卒業論文, 2019年
- 5) M Nofrarias et al., : State space modelling and data analysis exercises in LISA Pathfinder, 2013ASPC..467..161N, 2013
- 6) M Armano et al., : LISA Path_nder Platform Stability and Drag-free Performance, astro-ph.IM, 2018
- 7) 久保海: 捻じれ振り子を用いた微小推力雑音計測のためのスラスタスタンドの開発, 法政大学修士論文, 2017
- 8) 田嶋茂樹: 重力波検出のための変位雑音フリー干渉計(DFI)を用いた超精密計測, 法政大学修士論文, 2012年