

### 浮遊型慣性基準センサーの開発と地上試験系構築

乗本, 雄真 / Norimoto, Yuuma

---

(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. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

65

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

7

(発行年 / Year)

2024-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00030776>

# 浮遊型慣性基準センサーの開発と地上試験系構築

## DEVELOPMENT OF FLOATING INERTIAL REFERENCE SENSOR AND CONSTRUCTION OF GROUND TEST SYSTEM

乗本 雄真

Yuuma Norimoto

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 (創生科学系) 修士課程

Space gravitational wave telescopes and precision formation flying satellites require the implementation of an inertial sensing technique. In this study, an electrostatic actuator is developed and used together with a capacitance sensor to conduct one-degree-of-freedom control test of a test mass as a preliminary step of the control function test. This paper describes the development of the hardware concepts necessary for the electrostatic actuator and the results of the required analysis of ground vibration noise.

**Key Words** : *Electrostatic Actuator, Capacitance sensor, Ground vibration, feedback control*

### 1. 研究背景

宇宙重力波望遠鏡の開発では、編隊飛行と呼ばれる複数の宇宙機が一定の相対距離、角度を保ちながら飛行する技術が必要となる。編隊飛行の精密化は、宇宙空間での重力波観測のみならず赤外線干渉計といった、先鋭的な宇宙科学実験を達成する上で重要なステップと考えられている。

精密化に向けた要素技術の1つは、慣性制御技術である。本技術では、非接触浮遊する試験質量に対して宇宙機との相対距離を常時計測することで、宇宙機に働く外部からの非重力加速度外乱を計測する。しかし、浮遊質量を用いた慣性計測では、浮遊状態にある試験質量を周囲筐体に接触しないよう衛星そのもの、あるいは試験質量の位置を制御する必要がある。

われわれのグループでは、試験質量の位置を制御する方式の採用を検討しており、従って非接触で試験質量の相対位置を読み取るセンサー及び位置を修正する高出力なアクチュエータが必要となる。加えて、地上開発段階においては、完全に浮遊した試験質量を用意することが容易ではないため、慣性計測技術の検証には限定的な複数の試験を段階的に進めていく必要がある。

これまでに、非接触アクチュエータの候補の1つである高電圧で動作する静電アクチュエータの開発を実施し、共同研究者である矢ヶ部 開陸氏(法政大学大学院修士1年)が静電容量センサーの開発を実施してきた。現在、これらセンサーとアクチュエータを統合した状態で期待通りの機能を保持するか検証することが求められている。

以上より、地上制御試験として、1自由度制御試験という試験構想に至った。本研究では、1自由度制御試験に使用する地上試験系の設計と構築を実施した。

### 2. 研究目的と方法

本研究の目的は、地上試験系の設計、要求分析、構築および、本試験系機能に対する事前検証である。研究の流れを図1に示す。

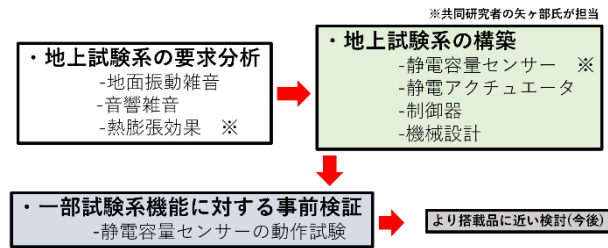


図1 研究の流れ

1自由度制御試験の達成手段として、真空環境でねじれ振り子の試験質量の相対位置を非接触的に制御する。単振り子よりも低共振周波数であるねじれ振り子を採用することで、浮遊状態に近くかつ、地面振動の影響を受けにくい状態を実現することが可能となる。試験系の概略図を図2に示す。

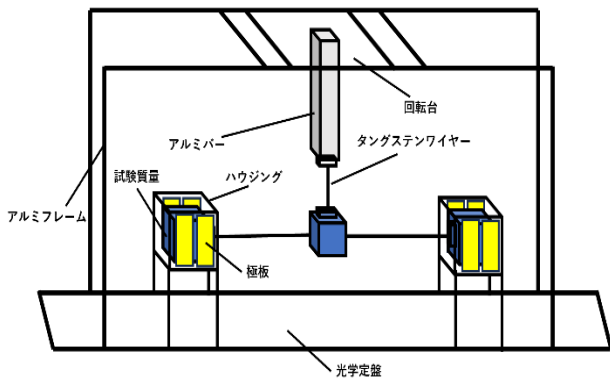


図2 試験系の概略図

ワイヤーで吊られたねじれ振り子と固定された極板との相対位置変化を静電容量センサーの極板間の静電容量が変化することを利用して計測し、その出力が制御器を通して静電アクチュエータに負帰還される。静電アクチュエータからねじれ振り子に吊るされた試験質量の変位への機械応答を介して試験質量の変動が抑制され、位置変化が抑制される。このようなフィードバック制御を実施することで、試験質量と極板間距離を一定に保つ。

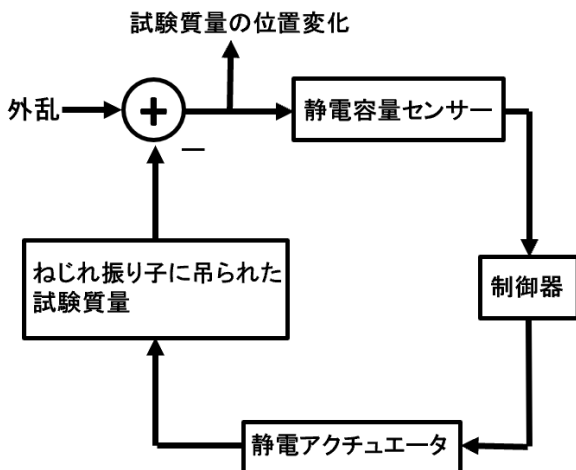


図3 フィードバック制御のブロックダイアグラム

しかし、並進方向及び並進方向から回転方向へカップリングする地面振動雑音によってねじれ振り子の感度向上を妨げている。また、真空環境下における熱膨張効果や音響雑音も感度向上を妨げる要因である。これらの揺れによって試験質量に位置変化が起こる。そのため、真空環境における試験質量に影響する外乱の要求分析を実施した。また、1自由度制御試験を実施するためには、試験質量に影響する外乱の要求分析に加え、試験系を構成する複数要素に対して設計や構築、評価を実施する必要がある。本研究では地上試験系の要求分析に加え、試験系構成要素のうち静電容量センサー、静電アクチュエータ、制御器、アルミフレームの設計と構築を実施した。試験系構築

後、事前試験として静電容量センサーの動作を実験的に確認した。

### 3. 地上試験系の要求分析

1自由度制御試験を実施するために、 $10^{-3}$  mの極板と試験質量間の距離に対して、要求RMSが $10^{-5}$  m ( $10^{-4}$  Hz)となるように地上試験系を設計、構築しなければならない。そこで、真空環境における外乱とその要求分析を実施した。なお、(2)の熱膨張効果は共同研究者の矢ヶ部氏が分析した結果について述べる。

#### (1) 地面振動雑音の影響による極板間の距離と試験質量が受ける力の変化

地面振動雑音はねじれ振り子の雑音源のひとつである。地面振動雑音は、並進地面振動雑音と並進方向からのカップリング雑音の2つに分けられる。カップリング雑音は、ねじれ振り子の重心と懸架点のズレが主なカップリング経路である。

##### a) 並進地面振動雑音

並進方向の地面振動雑音がねじれ振り子にどのような影響を与えるのかを分析した。

ねじれ振り子のワイヤーの長さを2 cm、共振周波数を3.5 Hzとし、並進地面振動雑音による試験質量と極板間距離の変化( $d_{seis}$ )とそのRMS値を評価した結果を図4に示す。

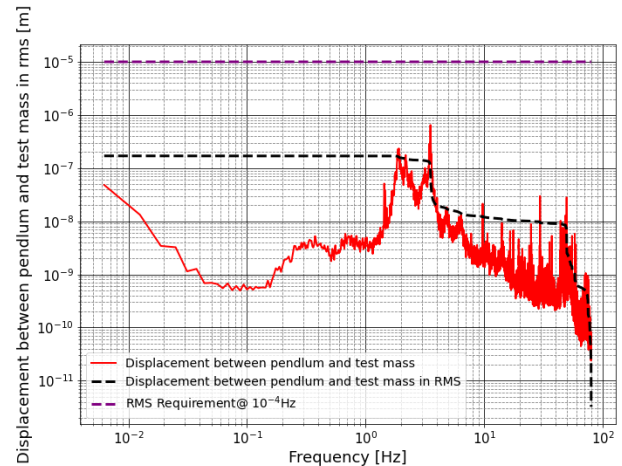


図4  $d_{seis}$ と $d_{seis}$ のRMS値

$d_{seis}$ のRMS値は全周波数帯において要求値である $10^{-5}$  m以下になることが確認できた。しかし、測定した地面振動雑音の低周波のデータ数が少ないため、 $10^{-4}$  Hzまで評価できなかった。よって、追加の検証が必要となる。

##### b) 並進地面振動からのカップリング雑音

ねじれ振り子ではテストマスの鉛直軸周りの回転を読み取るので、理想的には並進地面振動による運動は雑音源にはならない。しかし現実的には実験装置の様々な非

対称性により、鉛直軸周り回転以外の自由度の運動が雑音源となる。このことによる雑音を並進地面振動カップリング雑音と呼ぶ。ねじれ振り子においてはこのカップリング雑音が主要な雑音源のひとつとなり感度向上を大きく妨げているため、優先的に対策が必要な雑音のひとつである。[1]

今回はねじれ振り子の重心と懸架点のズレについて考えた。理想的にはテストマスの懸架点は重心の真上(慣性主軸上)に来ることが望ましいが、実際は装置の製作精度により多少のズレが生じカップリング雑音の経路となる。重心と懸架点のズレによるねじれ振り子の傾きを $\varphi$ とし、カップリング雑音による極板間距離の変化とそのRMS値を導出し、要求RMSを満たすか検証した。

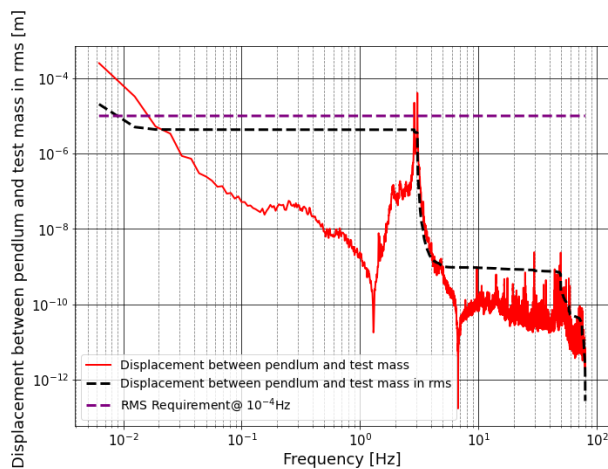


図5 カップリング雑音による極板間距離の変化 RMS 値

ワイヤーの長さを2 cm, 共振周波数を3.5 Hz,  $\varphi$ を0.1 radとして検証した。図5より、 $10^{-2}$  Hz付近で要求RMS値より大きくなったため、要求を満たすことはできなかった。

次に、並進方向からのカップリング雑音による試験質量の角度変化を静電アクチュエータから出力される制御量で抑制できるか検証した。静電アクチュエータ最大出力時(100 V)の試験質量の角度変化と並進方向からのカップリング雑音による試験質量の角度変化を比較すると、以下の図のようになる。

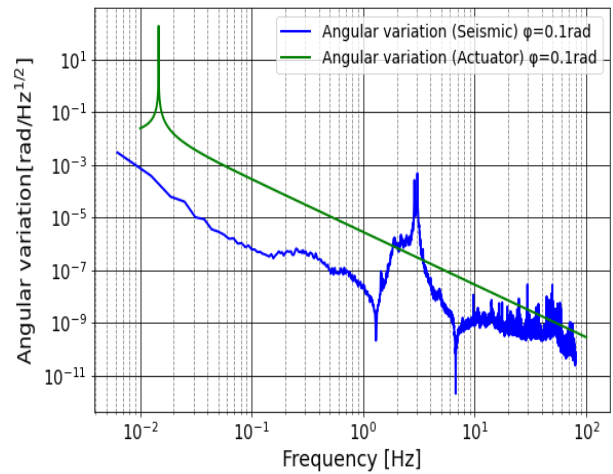


図6 並進方向からのカップリング雑音による試験質量の角度変化と静電アクチュエータ最大出力時の試験質量の角度変化

図6より、周波数が3 Hzと30 Hz付近を除けば並進方向からのカップリング雑音による試験質量の角度変化は静電アクチュエータの制御範囲内に収まることが確認された。

### (2) 熱膨張効果

ねじれ振り子はアルミニウムで作られており、アルミニウムは温度揺らぎが原因で膨張、収縮し、センサーの読み出し性能や制御性能に影響を与える。真空槽外壁の温度揺らぎによる外乱は熱伝導と黒体放射の2つが要因として考えられる。そこで、真空槽外壁の温度揺らぎによる外乱が要求RMSを満たすか検証した。

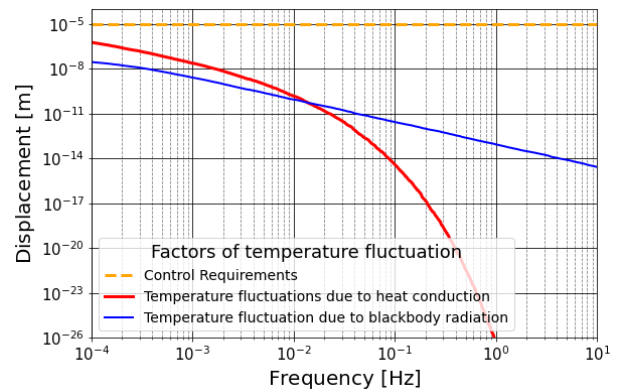


図7 熱伝導・黒体放射によって生じるアルミニウムの膨張・収縮する影響をRMS積分

熱伝導、黒体放射によって生じるアルミニウムの膨張、収縮する影響は要求値より十分小さいと考えられるため、ねじれ振り子における雑音源として考慮する必要がないことが確認された。[2]

### (3) 音響雑音

真空放電のリスクについて評価し、音響振動カップリングが有効でなくなる真空度を規定した。なお、周囲の

環境音(騒音)などから生じる雑音を音響雑音と呼ぶ。パッシェンの法則より、気体中に強い電界を印加すると、やがて絶縁破壊に至り、火花放電が生じる。平行な極板間で火花放電の生じる電圧はガス圧と極板間距離の積の関数で表すことができる。縦軸に火花電圧、横軸にガス圧と極板間距離の積の関数をとった曲線(パッシェン曲線)を図8に示す。

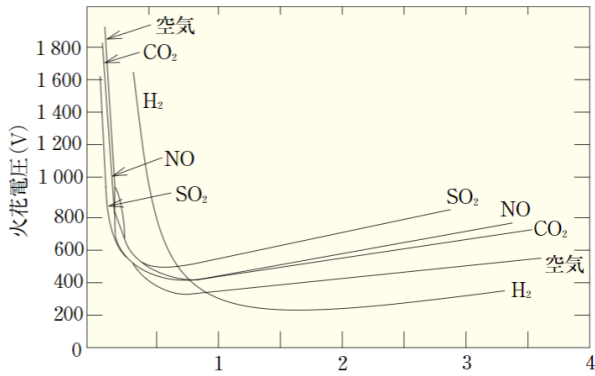


図8 パッシェン曲線 [3]

1自由度制御試験で用いる極板間(極板と試験質量間)距離は $10^{-3}$  mであるため、音響雑音によるカップリングは100 Pa以下であれば無視できると考えられる。

#### 4. 試験系の構築

##### (1) 静電容量センサー

静電容量センサーの開発は共同研究者の矢ヶ部氏が担当した。静電容量センサーは、試験質量と極板によって構成される(図9)。

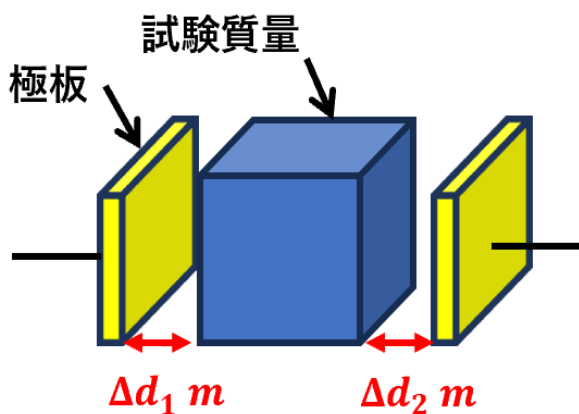


図9 静電容量センサー

極板と試験質量間の距離が $d$  m, 極板の表面積が $S$  m<sup>2</sup>の場合、電極と試験質量間には式のような静電容量が生じる。なお、 $\epsilon_0$ は真空中の誘電率とする。

$$C = \epsilon_0 \frac{S}{d} \quad (1)$$

試験質量と極板間の静電容量の変化を検知することで試験質量の位置変化を読み出し、変位計測を行っている。静電容量センサーの読み出し回路は、5つの機能から構成される。すなわち、静電容量センサーの変位読み取るためのブリッジ回路と静電容量センサーの変位によってブリッジ回路に生じた左右の電流を減算する差動トランス、電流を電圧に変換するトランスインピーダンスアンプ、同相雑音を除去するための差動アンプで構成されている。[4]

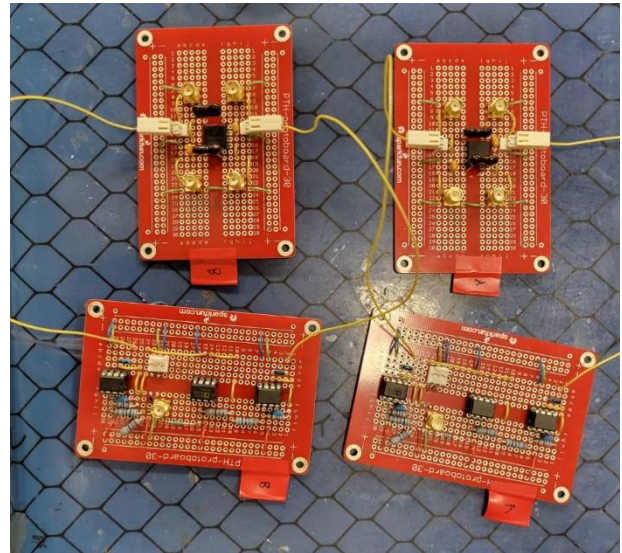


図10 矢ヶ部氏が実装した静電容量センサー回路

A circuit, B circuitの2つ実装した。

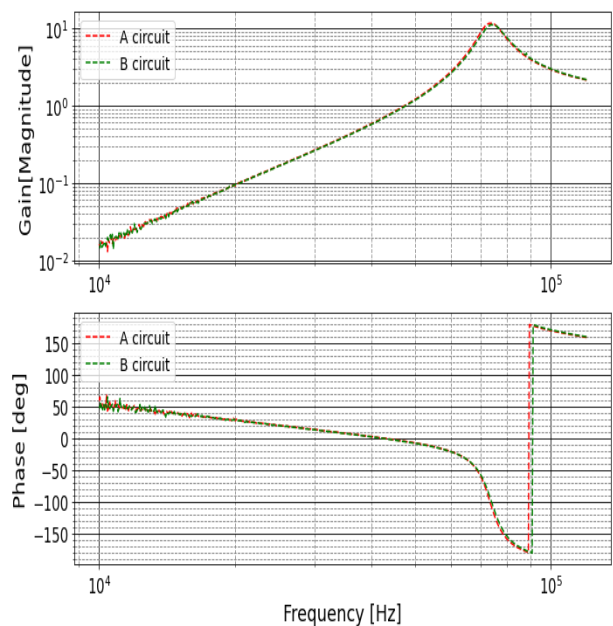


図11 静電容量センサー回路における伝達関数

##### (2) 静電アクチュエータ

静電アクチュエータの概略図を図12に示す。

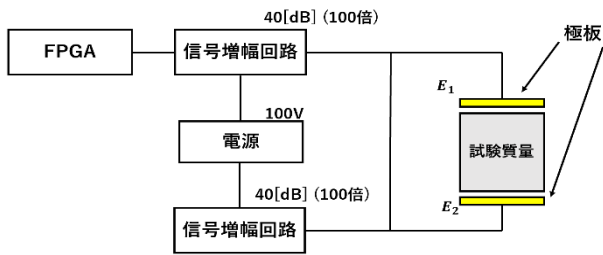


図 12 静電アクチュエータ (概略図)

Red Pitaya と呼ばれる FPGA デジタル系を用いて波形を生成し、信号増幅回路で波形の振幅を 100 倍に増幅させて出力する。

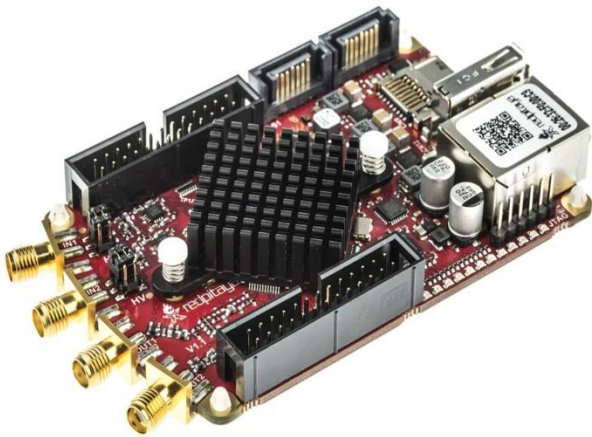


図 13 Red Pitaya [5]

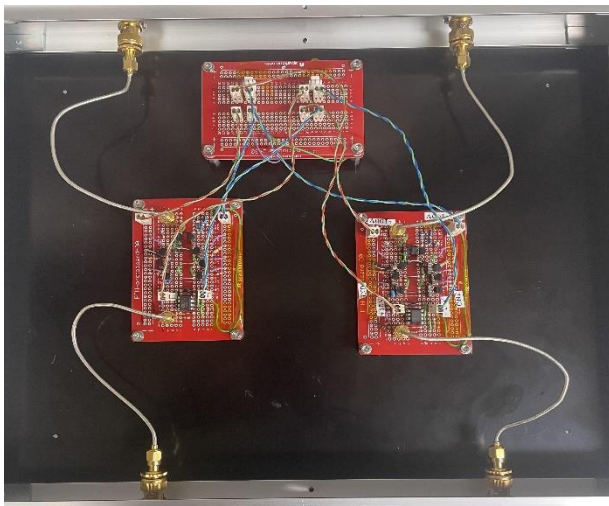


図 14 信号増幅回路

静電アクチュエータの動作原理について述べる。

図 12 のように電極  $E_1$ ,  $E_2$  から電圧  $V_1(t)$ ,  $V_2(t)$  が出力され、極板間の静電気力によって試験質量の位置が変化する。  $V_1(t)$ ,  $V_2(t)$  はそれぞれ

$$V_1(t) = (V_{OFF} + V_{IN}(t)) \sin \omega t \quad (2)$$

$$V_2(t) = (-V_{OFF} + V_{IN}(t)) \sin \omega t \quad (3)$$

とする。ここで、  $V_{OFF}$  はオフセット電圧 (アクチュエータの動作点で、FPGA 内で設定)、  $V_{IN}(t)$  は信号発生器から出力される正弦波である。また、FPGA 内でも正弦波  $\sin \omega t$  を生成する。

電極から出力される力  $F$  は  $V^2$  に比例するため、  $E_1$ ,  $E_2$  の極板から出力される力  $F_1$ ,  $F_2$  及び  $F_1$ ,  $F_2$  の合計  $F_{total}$  は、

$$F_1 \approx V_{OFF}^2 + 2V_{OFF}V_{IN}(t) \quad (4)$$

$$F_2 \approx V_{OFF}^2 - 2V_{OFF}V_{IN}(t) \quad (5)$$

$$F_{total} \approx 4V_{OFF}V_{IN}(t) \quad (6)$$

となる。

$V_{IN}(t)$  を  $0.5 \text{ V}$  とした時の静電アクチュエータの出力波形を図 15 に示す。

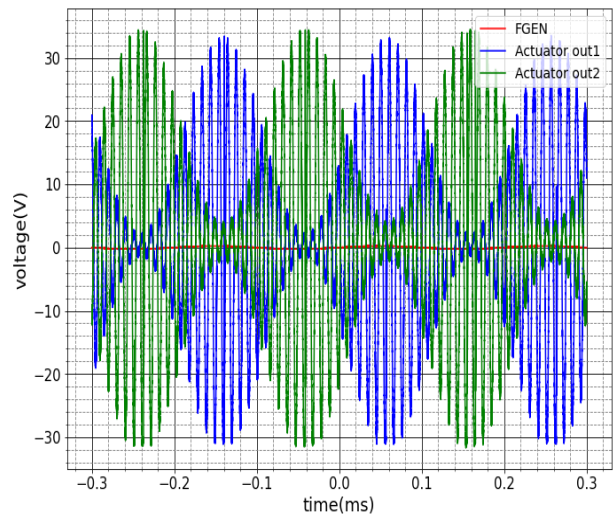


図 15 静電アクチュエータからの出力波形

Rohde & Schwarz のオシロスコープで測定できる最大電圧が  $50 \text{ V}_{p-p}$  のため、抵抗を 3 つ回路の出力部分に直列につなぎ、出力電圧を  $\frac{1}{3}$  倍に分圧して表示した。

### (3) 制御器

デジタル系を用いて制御器を実装した。デジタル実装の利点として、高性能で複雑な制御器を容易に実現できる点や、制御器の仕様変更が容易である点が挙げられる。制御器の実現手段として、LIQUID INSTRUMENTS のマルチ計測器 Moku:Go への実装を検討する。

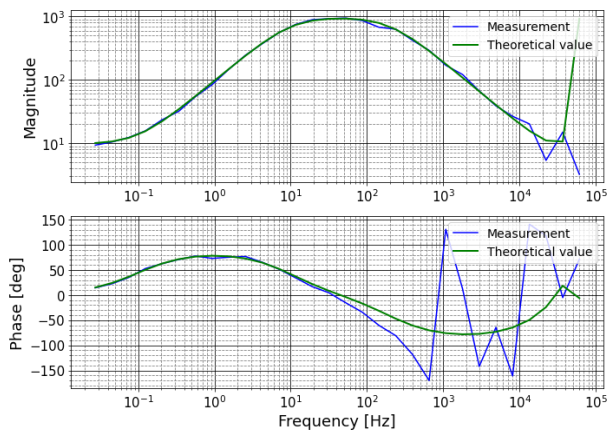


図 16 実装した制御器の伝達関数

図 16 はフィードバック制御の安定性を維持するために用いる制御器である。緑線が計算値で、青線が Moku:Go への実装結果である。30 Hz 以上での位相遅延は計測器による遅延が原因であることが確認された。しかし、制御器自体は機能しているため、影響はないと考えられる。

#### (4) アルミフレーム

アルミフレームの筐体は、アルミフレーム設計ソフト MISUMI FRAMES を用いて設計し、発注、組立を行った。



図 17 アルミフレーム筐体

### 5. 静電容量センサーの動作試験

静電容量センサーの応答特性(距離-電圧特性)を矢ヶ部氏と共同で導出した。固定された試験質量(固定質量)に電圧を印加し、帯電させた後に固定質量の位置を動かすことで発生する電圧の振幅変化から応答特性(距離-電圧特性)を計測した。なお、印加する電圧の大きさは  $4V_{p-p}$  とし、周波数は静電容量センサーの共振周波数である 73.85 kHz に設定して実施した。

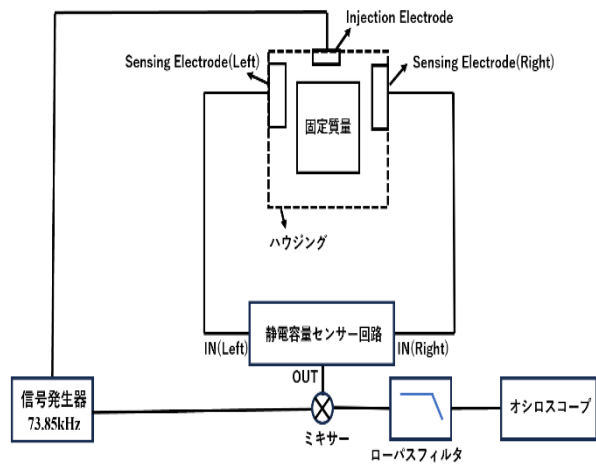


図 18 静電容量センサーの動作試験概略図

静電容量センサー回路から出力された信号を復調し、復調信号を用いて極板間距離を変化させたときの応答(距離-電圧特性)の計測を行った。本試験では信号発生器と静電容量センサー回路、Mixer(ミキサー)、サレンキー型ローパスフィルタ(矢ヶ部氏が実装)、オシロスコープを使用して復調を実施した。 [6]



図 19 Mixer (ミキサー)

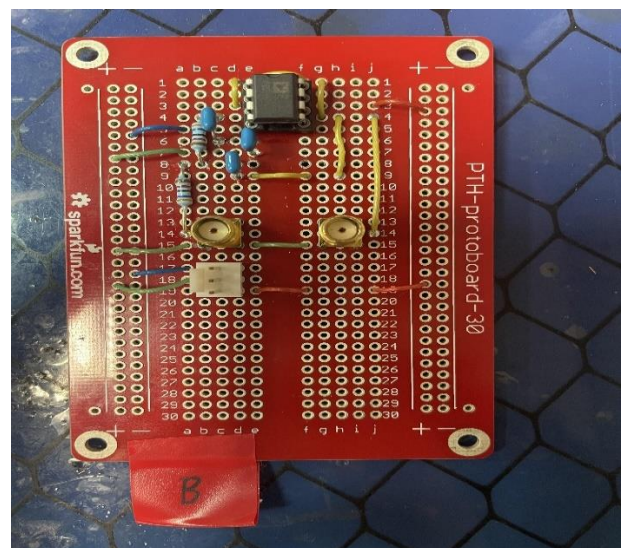


図 20 矢ヶ部氏が実装したサレンキー型ローパスフィルタ

固定質量と極板の干渉を防ぐため極板周囲に取り付けているガードリングを外した場合と取り付けた場合の応答特性(距離-電圧特性)を計測した。

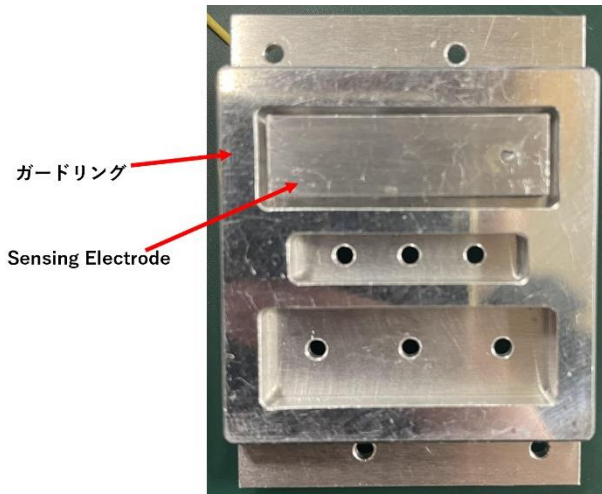


図 21 ガードリング

計測結果を図 22, 図 23 に示す。

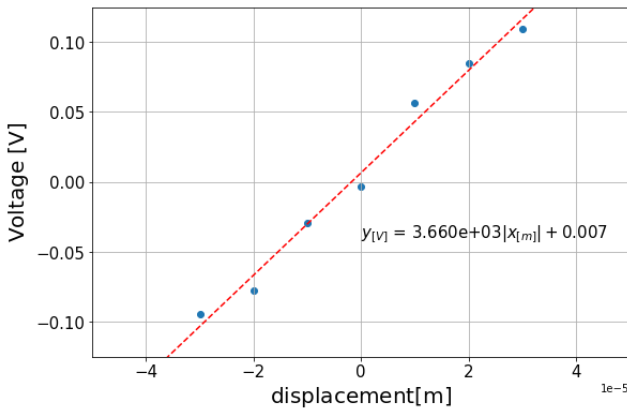


図 22 静電容量センサーの応答特性(ガードリングなし)

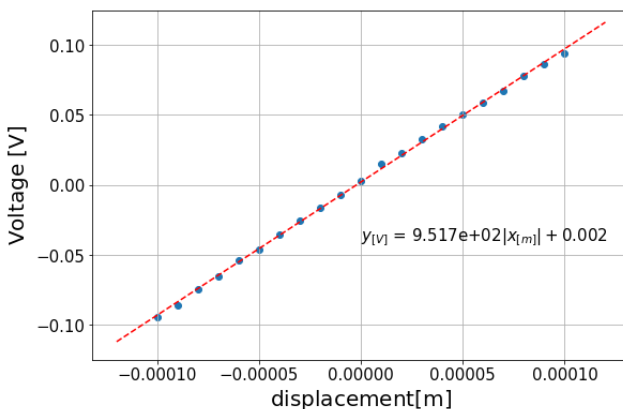


図 23 静電容量センサーの応答特性(ガードリングあり)

図 22, 図 23 より, ガードリングを取り外した場合の静電容量センサーの応答特性は  $3.66 \times 10^3 \text{ V/m}$ , ガードリングを取り付けた場合の静電容量センサーの応答特性は

$9.52 \times 10^2 \text{ V/m}$ と計測された。結果から, ガードリングの有無によって応答特性(距離特性)が約 3.8 倍変化することが確認された。ガードリング, Sensing Electrode, Injection Electrode の表面積から固定質量に印加される電圧を算出した結果, ガードリングの有無によって電圧が約 2.1 倍変化した。実測値と導出結果が一致しない原因として, 数値計算ではガードリングと極板間のギャップを 4 mm, 極板間距離を  $10^{-3} \text{ m}$  と仮定して導出したが, 実際の距離や静電容量が異なるため一致しないのではないかと考察する。また, 計測した時の周囲の環境も実測値と導出結果が一致しない原因の 1 つではないかと考える。

## 6. 結論と今後の展望

浮遊型慣性基準センサーの開発に向け, 地上試験系の要求分析と構築および一部試験系検証を実施した。地上試験系の要求分析を行ったところ, 熱膨張効果, 音響雑音については雑音源として考慮する必要がないことが確認された。地面振動雑音に関しては測定した地面振動雑音の低周波のデータ数が少ないため,  $10^{-4} \text{ Hz}$ まで評価できなかった。次に, 地上試験系の構築と一部試験系検証を実施した。地上試験系については, 静電容量センサー, 静電アクチュエータ, 制御器, アルミフレームの構築が完了した。また, 大気中で静電容量センサーの応答特性を計測し, 静電容量センサーが機能していることが確認された。1 自由度制御試験は真空中で行うため, 今後は静電容量センサーの応答特性を真空中で計測する必要がある。また, その他試験系の検証も実施する必要がある。

### 参考文献

- [1] 下田智文: ねじれ型重力波望遠鏡 TOBA のための地面振動雑音低減法の研究, 修士論文, 2017
- [2] 矢ヶ部開陸: Derivation of temperature stability spectrum requirements~technical report~, 2023
- [3] パッシェンの法則とは  
[https://www.ulvac.co.jp/wiki/process\\_g\\_keyword\\_paschen/](https://www.ulvac.co.jp/wiki/process_g_keyword_paschen/)
- [4] 矢ヶ部開陸: 浮遊質量の慣性計測に向けた静電容量センサーの性能評価, 2022 年度卒業論文
- [5] IZD0021 Red Pitaya | Mouser 日本  
<https://www.mouser.jp/ProductDetail/Red-Pitaya/IZD0021?qs=vLWxofP3U2xO460RDEeKaw%3D%3D>
- [6] 矢ヶ部開陸: Demodulation~Experimental report~ 2023