

# 法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2024-12-31

## 宇宙重力波望遠鏡DECIGOに向けたドラッグフリー制御の6自由度地上実証実験

西田, 智也 / NISHIDA, Tomoya

---

(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)

64

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

8

(発行年 / Year)

2023-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00026435>

# 宇宙重力波望遠鏡 DECIGO に向けた ドラッグフリー制御の 6 自由度地上実証実験

Ground-based demonstration of 6-DOF drag-free control for Space Gravitational Wave Detector DECIGO

西田智也

Tomoya NISHIDA

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

DECIGO (DECi-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory) is Japanese space antenna project for detecting gravitational wave. One of DECIGO's technologies, "drag-free control", is the research theme. Drag-free control is to actively control the effects of external disturbances by tracking the satellite against a non-contact floating test mass inside the satellite in space. This research's final purpose is to ensure the 6-DOF drag-free control operation on the ground by constructing a ground-suspended demonstration system. Sensors mounted on the simulated satellite measure the distance to the test mass that is swinging in 6-DOF. And then, feedback is given to the actuator that drives the 6-DOF motion on the simulated satellite so that the distance between the simulated satellite and the test mass is kept constant. In this experiment, control of the Pendulum in a 2-D is demonstrated, along with 6-DOF sensing verification.

**Keyword;** DECIGO, drag-free control, 6 degrees of freedom, space antenna, satellite.

## 1. 研究背景と目的

重力波とは質量をもった物体が運動をした際に生まれる光速で伝播する時空の歪みである。1916年にアインシュタイン (A. Einstein) によって構築された一般相対性理論の中で重力波の存在を予言した。2015年9月にアメリカの LIGO による連星ブラックホールが合体する様子を捉えた GW150914 初検出によって証明された。重力波の直接観測は、電磁波やニュートリノなど従来の宇宙観測方法とは別の宇宙の観測道具となる。重力波は電磁波やニュートリノと比べ物質との相互作用が小さく、そのために透過性が高い。この性質を利用し、中性子星の内部や、ビッグバン等の宇宙初期など今までの観測手段では捉えることが出来なかった対象を観測することができる。したがって、重力波の直接観測は天文学の新たな道を開くことができる。現状の重力波検出器の主流は大型のレーザー干渉計であり、アメリカの LIGO やイタリアの Virgo、日本の KAGRA などが該当する。レーザー干渉計型の重力波検出器は、ビームスプリッターから鏡までの光路長変動を観測する事で時空の歪みを検出する。この際に用いられる鏡は、自由質点としてふるまうように振り子のように懸架されている。このようなレーザー干渉計が観測する重力波の周波数帯は、低周波帯において地面振動による制限があるため 100 Hz 以上の高周波数領域となっていて観測ターゲットとしてはパルサーや中性子星連星、超新星爆発などが挙げられる。一方で、100 Hz 以下の低周波の重力波を観測す

るために考案された重力波検出器が、宇宙重力波望遠鏡であり、ヨーロッパを中心とした LISA、日本の DECIGO[1]などがこれにあたる。これは打ち上げられた衛星間でレーザー干渉計を構築し、巨大な干渉計で重力波を観測するという構想である。宇宙空間に存在するため地面振動の影響を受けないのに加え、干渉計の基線長を非常に長くとることができる。宇宙重力波望遠鏡は低周波の重力波において非常に良い感度を持つ。これによる観測ターゲットは、ブラックホール連星や背景重力波などといったものが挙げられる。現在日本で進行中の DECIGO プロジェクトは互いに 1000 km 離れた 3 つの衛星間でレーザーを飛ばしあうことで宇宙空間に巨大なレーザー干渉計を構築し、0.1~10 Hz の周波数の重力波の検出を目標としている。DECIGO の観測対象は、インフレーション理論の検証や、ダークエネルギー探査、巨大ブラックホールの形成過程の解明などが挙げられる。DECIGO の実現には、フォーメーションフライトや干渉計技術、安定化レーザーなどの様々な精密技術が必要であり、ドラッグフリー制御もその中の 1 つである。特に DECIGO の検証プロジェクトであった DECIGO Pathfinder ではドラッグフリー制御において、0.1 Hz 周波数帯で衛星を並進変動  $10^{-9} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、姿勢変動で  $3 \times 10^{-9} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$  以下に抑えることを要求している。本研究では地上におけるドラッグフリー制御の実証実験を行い、DECIGO での実装を目標としている。

## 2. 研究概要

### (1) 先行研究

現在,ESA の LISA Pathfinder のような静電容量式を用いたドラッグフリー制御実験[2]ではテストマスと衛星間の6自由度のドラッグフリー制御は行われている.しかし,現状日本国内ではドラッグフリー衛星は実現しておらず,DECIGO に向けて,実証実験を行う必要がある.研究室の先行研究である1自由度でのドラッグフリー制御の地上実証実験[3]では,疑似衛星に取り付けられたフォトセンサによって鏡の変位を読み取り,疑似衛星と懸架鏡との距離が一定になるように,衛星上のスラスタにフィードバックし,気体の噴出による推力で衛星筐体を動かす制御を行っている.DPF における試験マスモジュールの3自由度デジタル制御[4]では,x, Pitch, Yaw方向の振り子をフォトセンサとコイルマグネットアクチュエータを使い,デジタル回路で制御している.このように,現状自由度を拘束した振り子の制御は行われているが,日本国内ではテストマスをフリーマスと見なす6自由度のドラッグフリー制御の地上実証実験は行われていない.そのため,本研究ではDECIGO でのドラッグフリー制御実現に向けて,最終的にはスラスタとフォトセンサを用いた6自由度でのドラッグフリー制御を目指している.そこで本実験では,本研究において課題とされる自由度間のカップリングの克服に繋がるセンシング理論の検証を行うために3自由度の振り子制御をフォトセンサとコイルマグネットアクチュエータ,アナログ回路で行う.

### (2) ドラッグフリー制御

ドラッグフリー制御とは,重力波をとらえるための干渉計を構成しているミラーと衛星の間の相対距離を一定に保ち,ミラーに衛星を追従させる制御である.ドラッグフリー制御がない場合,宇宙空間では衛星は太陽風や太陽輻射圧,星間ガスといった外乱(ドラッグ)の影響を受け,衛星の位置は変動する.このとき,衛星とミラーの間の万有引力や電磁気力の変動によってミラーが動いてしまう.そこで,ドラッグフリー制御ではミラーと衛星との相対距離をセンサーで計測し,その情報を衛星外部のスラスタを用いて外乱と逆方向に力を加え,ミラーと衛星の相対距離を一定に保つ.このとき,ミラーは周囲の環境から隔離し重力の影響を受けるだけとなり,衛星の挙動はドラッグフリーとみなされる.DECIGO では,宇宙空間で重力波を観測するために干渉計を構成しており,観測中,常にドラッグフリー制御を行わなければならない.衛星内の非接触で浮遊する Floating mirror に対して Drag-free spacecraft を追従させることで外部からの外乱による影響を能動的に制御する(図1参照).本研究の最終目標では,地上で懸架した疑似衛星とミラーに見立てたテストマスを設計することで,DECIGO でのドラッグフリー制御の動作を保証する.

地上実証実験ではテストマスの3並進3回転の6自由度を疑似衛星内のセンサーで検知し,疑似衛星に搭載された6自由度に推進するスラスタにフィードバックすることで衛星とテストマス間の距離を一定に保ち,地上でのドラッグフリー制御を実証する.

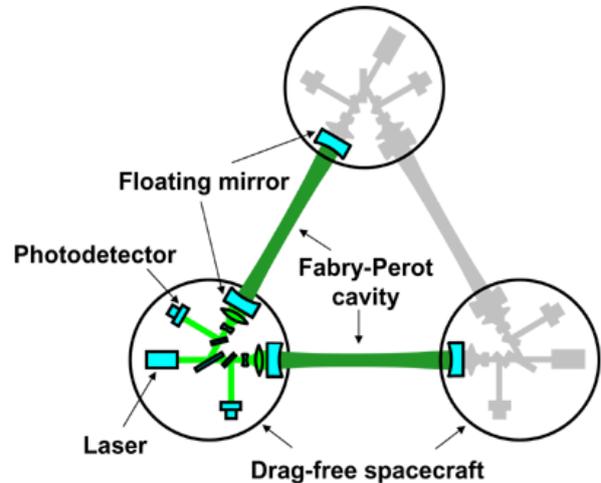


図1.DECIGO の概念図[1]

### 3. 研究方法

本研究では反射型フォトセンサとコイルマグネットアクチュエータを用い,振り子(テストマス)の位置を制御しフォトセンサとの相対距離が一定にすることが目的である.ワイヤーで吊られたテストマスは地面振動によって  $x, y, z, \theta_1, \theta_2, \theta_3$  自由度で微小に揺れている.この揺れを光学盤に固定されたセンサーで測定し,取得データをアナログ回路で自由度分離し,それぞれの自由度に制御フィルタにかける.続いて,フィードバック信号をコイルドライバーに送り,固定されたコイルボビンへの入力信号に変換し,テストマスに取り付けた磁石とコイルに働く電磁気力でアクチュエートする.このようにして,フォトセンサとテストマスの距離を一定に保つ.この一連のフィードバック制御を行うために本研究では,6自由度を検知するセンサー配置の考案,小型フォトセンサの開発を行った.実験のステップとして,2次元の検証が終わり次第,3次元での実験を行う.

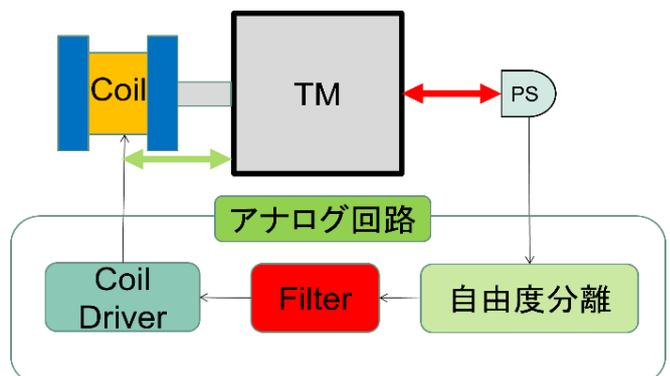


図2.実験セットアップイメージ図

### (1)反射型フォトセンサ

本実験では,変位の測定として反射型フォトセンサを用いる.反射型フォトセンサとは, 発光素子 (LED) と受光素子 (PD) を同一方向に併設したフォトセンサである. センシング原理としては,LED から出た光が測定対象に反射し, 反射した光がフォトダイオードに入射する.その反射した光の光量の変化を測定することで,測定対象までの距離の変化を測定する.フォトダイオードで検出した反射光の光量から測定物との距離の測定が可能である.

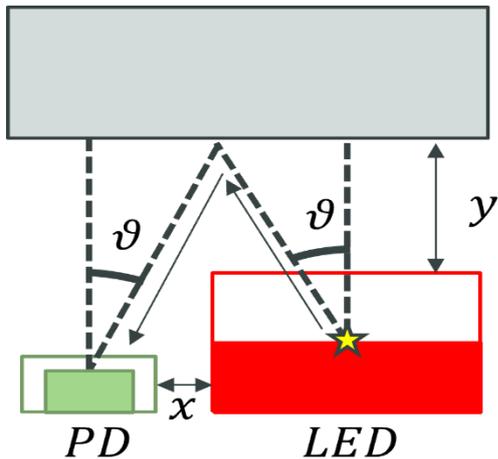


図 3.反射型フォトセンサ概念図

#### 1)回路原理

本研究の反射型フォトセンサは LED 発光回路と PD 信号増幅回路で構成している(図 3 参照).また,コンポーネントは全て表面実装にすることで,1 枚の基板回路で可能なり小型化した.

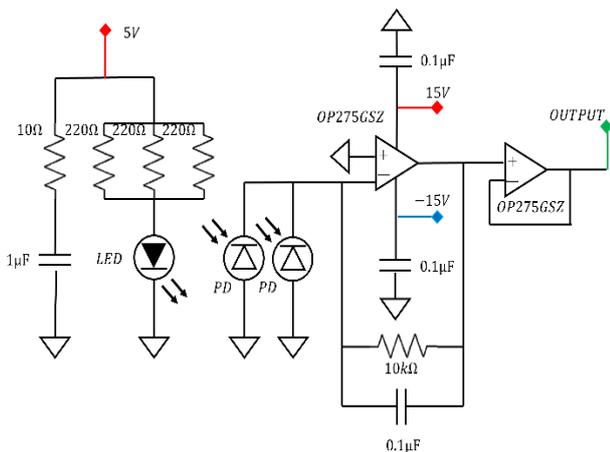


図 4.反射型フォトセンサ回路図

#### 2)プロトタイプ作成

反射型フォトセンサの回路の動作保証のために基板発注前のプロトタイプを作成した.表面実装用の LED と PD はユニバーサル基板に取り付け,動作回路等はブレッドボードに配線し,実験を行った.LED-PD 間距離 $x$ と LED 発光部と対象物との距離 $y$ を変化させながら,計測したデータ

が図5である.今回,ユニバーサル基板でのはんだづけの都合上,LED-PD 間は1.5 mmから始めた.

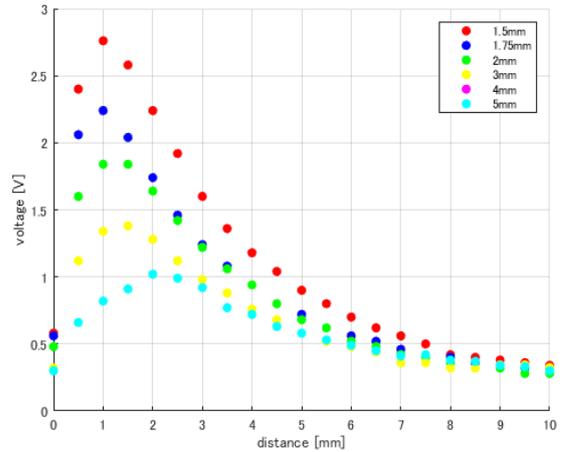


図 5.プロトタイプ距離特性

#### 3)小型表面実装モデル作成

プロトタイプの比較から,LED-PD 間は1.5 mmのときに応答特性が芳しく, 2.5mmでは線形範囲が広いことが確認できた.それぞれのメリットを活用するため,LED-PD 間は上下2.5 mm,左右で1.5 mm,可変できるフットプリントを作成した.基板は3層構造で Top Layer に LED,PD を配置し,Middle Layer 全体をベタグラウンド,Bottom Layerに LED,PD 動作回路の回路と外部接続用のコネクタを配置した.コンポーネントのサイズの兼ね合いで,基板サイズ 15 × 20 mm,配線パターン幅 0.5 mm,Via 内径 0.5 mm, 外径 1 mm,基板取り付け穴 2.2 mmで作成した.

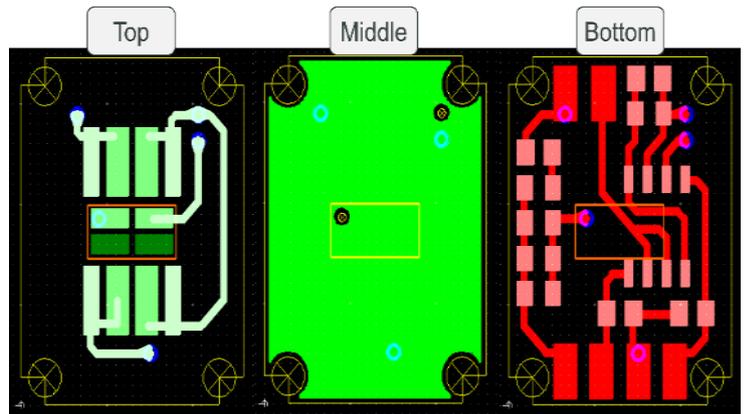


図 6.基板設計図

#### (2)センサー配置

本実験において,テストマスは6自由度に揺らいでおり,並進 $x, y, z$ と回転Roll, Pitch, Yawがカップリングすると,並進方向の変位に回転方向由来の変位が乗る.本研究においてはこれらのカップリングを克服するために,センサー配置と取得したセンサー信号の演算で,並進回転をそれぞれ取り出す.ここでは2次元と3次元に分けて検討する.

### 1)2次元配置

ここでは例として,XY平面について考える.2次元面内で(x,y)をX軸方向に $T_x$ ,Y軸方向に $T_y$ 並進移動し, $\theta_3$ 回転移動させる行列は経路によらず $T_x, T_y, \theta_3$ が微量の場合,2次以上の項は省略できるため以下のように行列で表すことができる.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\theta_3 & T_x \\ \theta_3 & 1 & T_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

テストマスに見立てた正方形が原点(0,0)からx,y, $\theta_3$ と動いた時のフォトセンサとテストマスの直線距離を求める.このとき,X軸とのフォトセンサの距離をLとし,検知する点を $(x_{ps}, L)$ とすると,距離信号 $x_{ps}$ は

$$x_{ps} = -x + (L - y)\theta_3$$

となる.

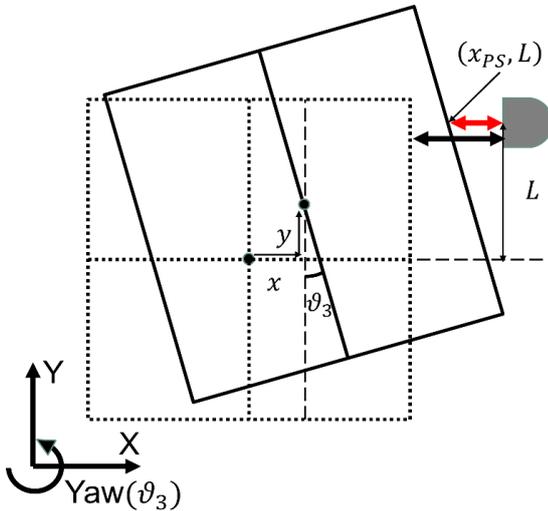


図7. 2次元センサーイメージ図

信号分離の検証実験のセットアップとして正方形周りにPS(Photo sensor)を配置し,距離信号の演算を行う.今回は $PS_1, PS_2, PS_5$ において演算する.

$$PS_1 = -x + (-y - L)\theta_3$$

$$PS_2 = -x + (-y + L)\theta_3$$

$$PS_5 = -y + (x + L)\theta_1$$

$PS_1, PS_2$ の差を取ると

$$PS_1 - PS_2 = -2L\theta_3$$

となり,回転成分の $\theta_3$ のみを取り出すことができる.

1つのフォトセンサからは並進成分x,yと回転成分 $\theta_3$ が混合したものを取り出すことができる.ここから,回転成分

$\theta_3$ を先に制御し,0に近づけることで, $PS_1$ からx成分, $PS_5$ からy成分をそれぞれ取り出すことができる.ここから2次元平面において,x,y, $\theta_3$ の距離信号を取るためには3つのセンサーが必要である.

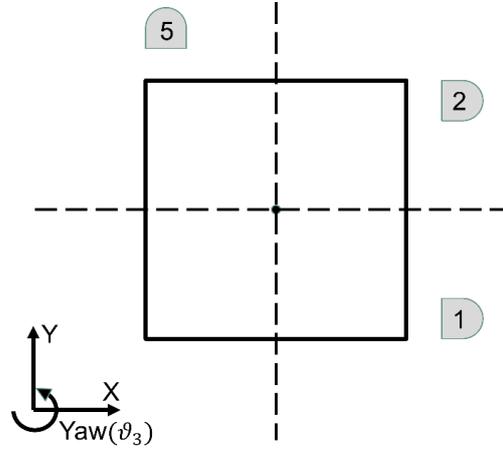


図8. 2次元配置イメージ図

### 2)3次元配置

3次元について考える.点(x,y,z)をX軸方向に $T_x$ ,Y軸方向に $T_y$ ,Z軸方向に $T_z$ 並進移動し,X軸まわりに $\theta_1$ ,Y軸まわりに $\theta_2$ ,Z軸まわりに $\theta_3$ 回転移動させる.一般的にx,y,z, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ の動く順番が変わると距離信号は変わる.しかし.ここでは並進,回転角が微量とし,経路によらない変換行列を以下のように表すことができる.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\theta_3 & \theta_2 & T_x \\ \theta_3 & 1 & -\theta_1 & T_y \\ -\theta_2 & \theta_1 & 1 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

テストマスに見立てた立方体が原点(0,0,0)からx,y,z, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ と動くとする.このとき,XY平面,XZ平面との距離をL,X軸とのフォトセンサの距離をLとし,検知する点を $(x_{ps}, L, L)$ とすると,距離信号は $x_{ps}$ は

$$x_{ps} = -x - (L - z)\theta_2 - (L - y)\theta_3$$

となる.

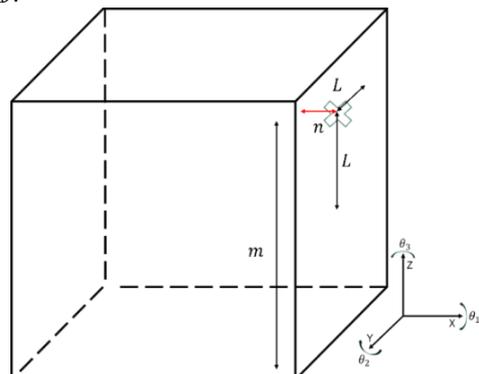


図9. 3次元センサーイメージ図

信号分離の検証実験のセットアップとして立方体周りにPSを配置し,距離信号の演算を行う.最小個数での信号分離を検討するため,今回はPS<sub>1</sub>, PS<sub>2</sub>, PS<sub>9</sub>, PS<sub>11</sub>, PS<sub>17</sub>, PS<sub>18</sub>において演算する.

$$\begin{aligned} PS_1 &= -x - (L - y)\theta_3 - (L - z)\theta_2 \\ PS_2 &= -x + (L + y)\theta_3 - (L - z)\theta_2 \\ PS_9 &= -y - (L - z)\theta_1 - (L - x)\theta_3 \\ PS_{11} &= -y + (L + z)\theta_1 - (L - x)\theta_3 \\ PS_{17} &= -z - (L + x)\theta_2 - (L + y)\theta_1 \\ PS_{18} &= -z + (L - x)\theta_2 - (L + y)\theta_1 \end{aligned}$$

ここで,PS<sub>1</sub>とPS<sub>2</sub>, PS<sub>9</sub>,とPS<sub>11</sub>, PS<sub>17</sub>とPS<sub>18</sub>を差を取ると

$$\begin{aligned} PS_1 - PS_2 &= -2L\theta_3 \\ PS_9 - PS_{11} &= -2L\theta_1 \\ PS_{17} - PS_{18} &= -2L\theta_2 \end{aligned}$$

となり,回転成分のみを取り出すことができる. また,1つのフォトセンサからは並進成分と回転成分が混合したものを取り出すことができる.ここから,回転成分を先に制御し,0に近づけることで,x,y,z成分を取り出すことができる.ここから3次元において,6自由度の距離信号を取るためには6つのセンサーが必要である.

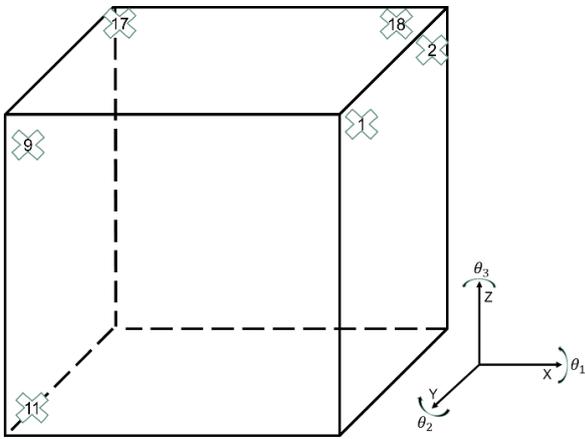


図 10. 3次元配置イメージ図

#### 4.実験シミュレーション

2次元で3自由度の振り子の制御実験を行うためのシミュレーションを行った.ここでは振り子の伝達関数を求め,アクチュエーターにフィードバックするための制御フィルタの設計を行う.

##### (1)振り子の伝達関数

振り子の重さをm,減衰項をγ,共振の鋭さをQ,共振周波数をω<sub>0</sub>とすると振り子の並進の伝達関数を以下のように表すことができる.

$$H_{xy}(s) = \frac{1}{ms^2 + m\gamma s + m\omega_0^2}$$

続いて,回転の伝達関数を以下のように表すことができる.

$$H_{yaw}(s) = \frac{1}{s^2 + \frac{s\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$$

##### (2)制御フィルタ

振り子の制御を安定化させるためのフィルタにはラグリードフィルタを適用する.

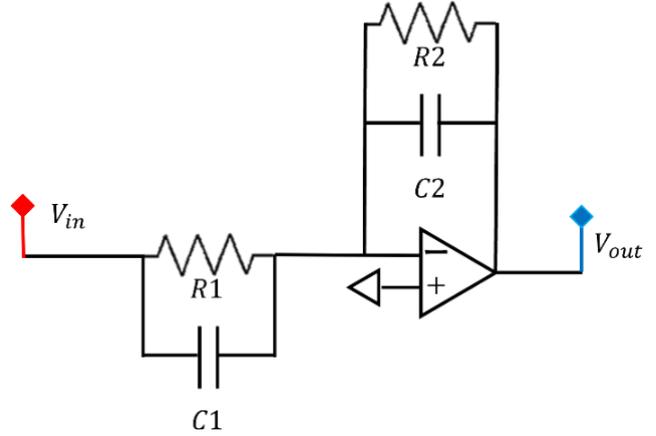


図 11. ラグリードフィルタ

$$F(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_2(1 + sR_1C_1)}{R_1(1 + sR_2C_2)}$$

と与えられる.

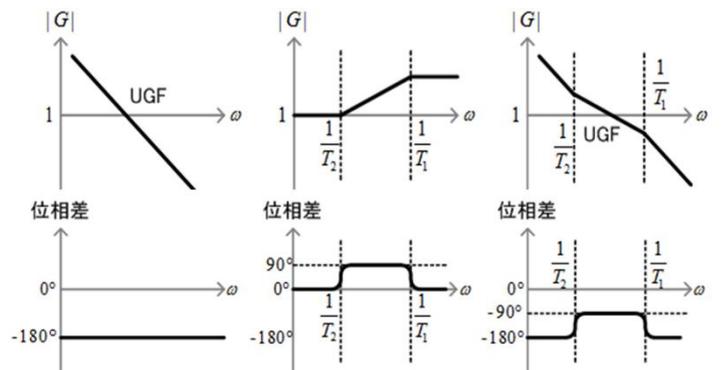


図 12. ラグリードフィルタ制御イメージ[5]

振り子の共振周波数以下の変位伝達関数は自由質点のようにふるまうため,本実験では, $|G(s)| = 1$ となるようなユニティゲイン周波数で位相差が $\pm 180^\circ$ 以内に収めることで制御を安定させる.ここではユニティゲイン周波数が $1/T_2$ から $1/T_1$ の間に収まるような周波数 $f_2 = \frac{1}{2\pi T_2}$ ,  $f_1 = \frac{1}{2\pi T_1}$ を定め, $T_1, T_2$ を求める.

### (3)制御全体の伝達関数

$T_1 = R_2C_2, T_2 = R_1C_1$ とし, $K$ を制御 Gain としたときのオープンループを以下に示す.オープンループ伝達関数 $G(s)$ は制御対象とセンサー,ラグリードフィルタ,コイルの伝達関数の積となるので以下のように表すことができる.

$$G(s) = KH(s)S(s)F(s)C(s)$$

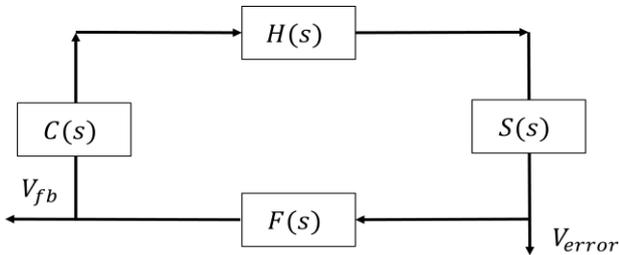


図 13. 制御全体図

本実験において, 並進では1~100 Hz,回転では0.1~10 Hz で位相余裕が必要なため制御フィルタはそれぞれ以下のように表すことができる.

$$F_{xy}(s) = \frac{1 + 0.16s}{1 + 0.0016s}$$

$$F_{Yaw}(s) = \frac{1 + 1.6s}{1 + 0.016s}$$

振り子の応答,ラグリードフィルタ,センサーとコイルの伝達関数を1とし制御 Gain をかけたとき時の制御系全体のオープンループ伝達関数を以下に示す.

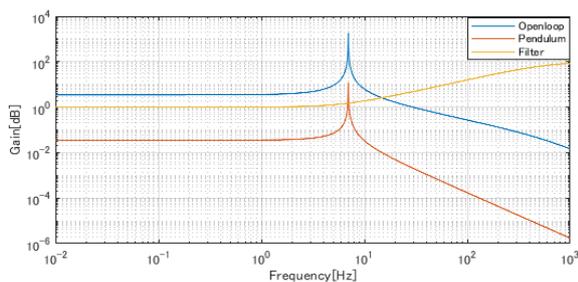


図 14.振り子の並進伝達関数

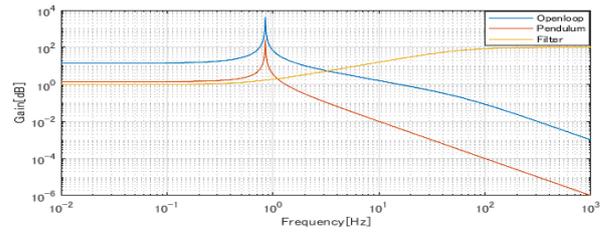


図 15.振り子の回転伝達関数

## 5.実験結果

振り子の構成として,テストマスの大きさは150 mm × 150 mm × 10 mm ,重量は0.584 kg.糸の長さは180 mm で実験を行った.また,2次元平面で安定させるために3点で懸架し,重心をテストマスの中心に設定した.

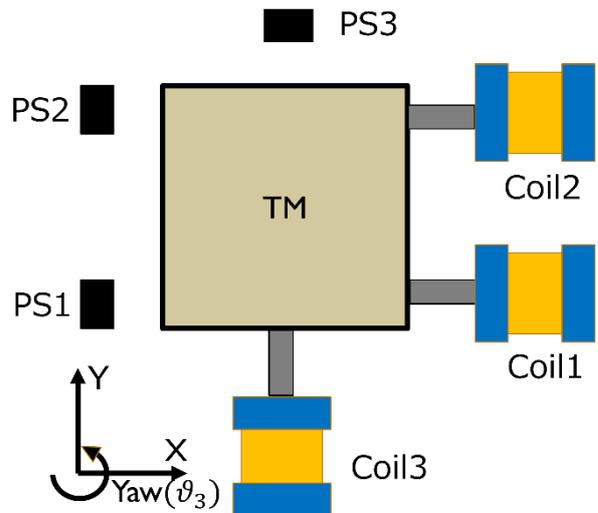


図 16.センサーとコイル配置イメージ

### (1)制御マトリクス

センサーを固定点としテストマスに近づくことをマイナス,遠のくことをプラスの電気信号とするため,オフセットの電圧を加える必要がある.本実験では,センサーとテストマスの距離を固定し,オフセットの電圧を引くことで0点周りの制御を行った.Xの信号はPS<sub>1</sub>とPS<sub>2</sub>の信号の和.Yの信号はPS<sub>3</sub>からの信号.YawはPS<sub>1</sub>とPS<sub>2</sub>の信号の差をそれぞれ使用した.独立した信号を制御フィルタにかけた後に,Xの制御信号はCoil1とCoil2. Yの制御信号はCoil3.Yawの制御信号はCoil1と反転した信号をCoil2にそれぞれフィードバックする.

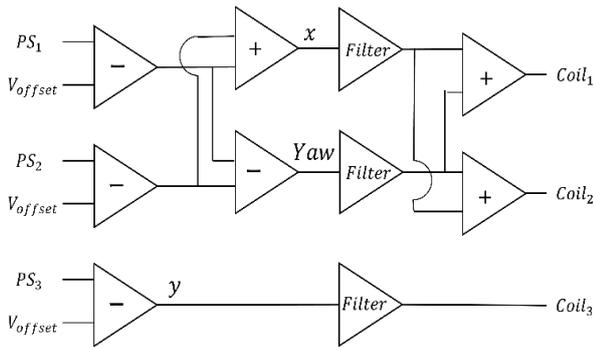


図 17.制御マトリクス

## (2)制御フィルタ

並進では1~100 Hz,回転では0.1~10 Hzで位相余裕が必要のため以下の制御フィルタを設計し,アナログ回路に実装し,伝達関数の計測を行った.図中の Theory は回路シミュレーションソフト Multisim の周波数特性の解析を行い,Circuit は組んだアナログ回路を Spectrum Analyzer でそれぞれ伝達関数の測定を行った.

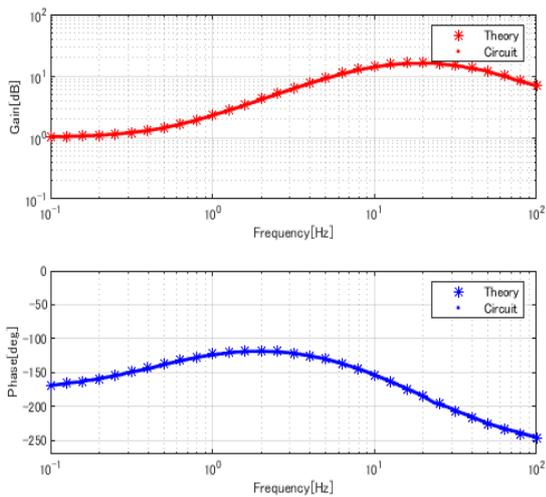


図 18.並進ラグリードフィルタ

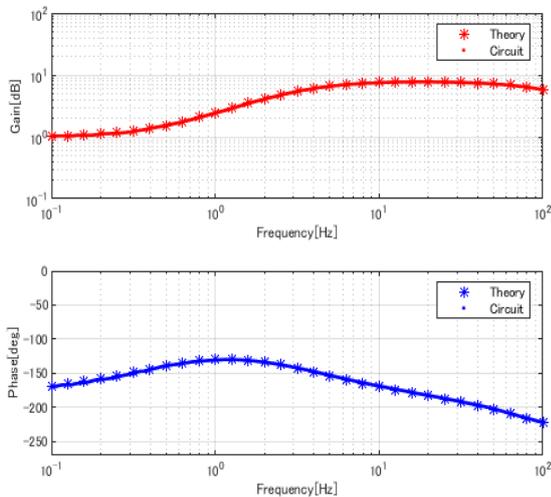


図 19.回転ラグリードフィルタ

実測から並進回転共に,振り子の共振周りの周波数帯で50°~60°位相余裕が生まれた.今回,振り子のX並進の伝達関数を計測した際,共振周波数は1 Hzであったため,制御フィルタは回転用を使用した.また,フォトセンサの変位はオペアンプの増幅限界で±13Vである.コイルにかかる電圧 $x_{fb}$ を線形制御できるラインは±7Vまでなため今回はにおけるGainを33に設定した.

## (3)制御結果

制御時と制御なしの振り子の減衰を確認するためフィードバック信号を比較する. 制御なしの振り子においてXに加振した後,1000 秒間計測した.

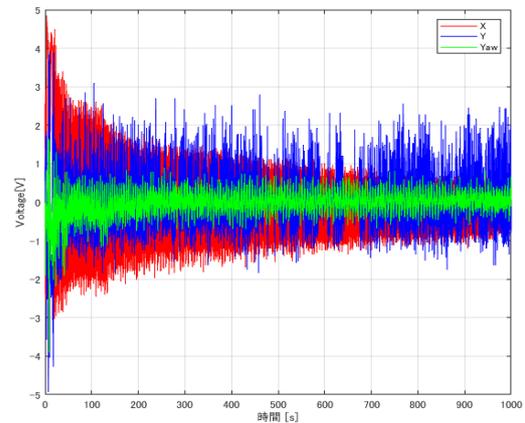


図 20.制御 OFF 振り子の減衰

Xは自然減衰で波形が安定するまでに 1000 秒,Yawは100秒かかりYは常に揺らいている.今回Coil1,2においてカップリングが起きると考慮し, Yの制御の前にX, Yawの変位を安定させる.

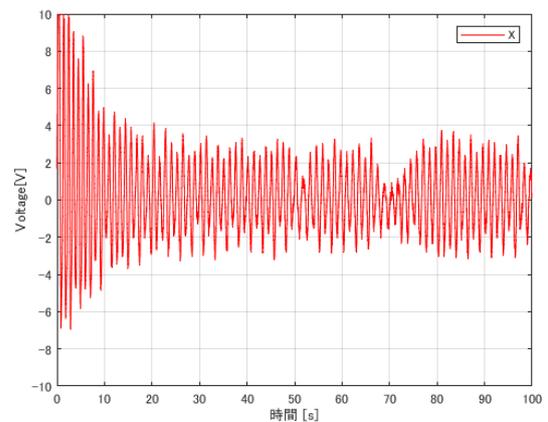


図 21.制御時 ON 振り子X並進の減衰

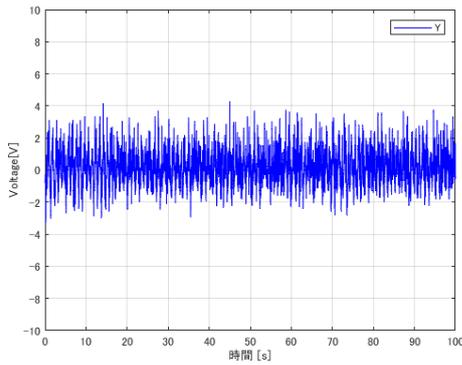


図 22.制御 ON 振り子Y並進の減衰

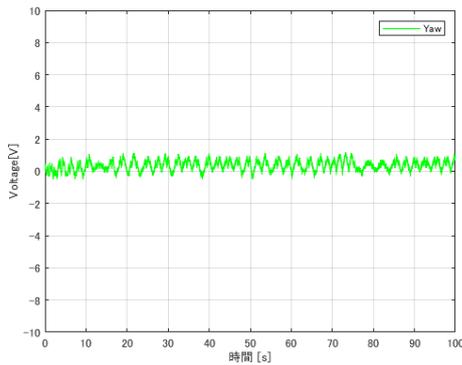


図 23.制御 ON 振り子Yaw回転の減衰

Xは自然減衰に比べ、波形が安定するまでに 10 秒程度、Yは自然減衰よりも揺らいでいる.Yawは常に安定している。また、フィードバック信号はどの自由度も位相差なしでコイルに供給している。コイルの土をつなぐ向きを逆にした場合、並進に加振し、Coil1,2を逆に繋げた場合、回転方向に加振した。ここから、フィードバック信号までは問題がないと考えられる。このとき、定常状態でのセンサーのノイズは約200 mVでセンサーからの信号をアンプで10倍にし、ノイズは約2Vになる。このノイズでコイルにノイズが乗り加振している。変位に換算すると3 mm以下に抑えることができない。次に制御系全体の応答の確認を行う。Gainを上げる前のX並進の制御計全体のオープンループ伝達関数の測定結果を以下に示す。

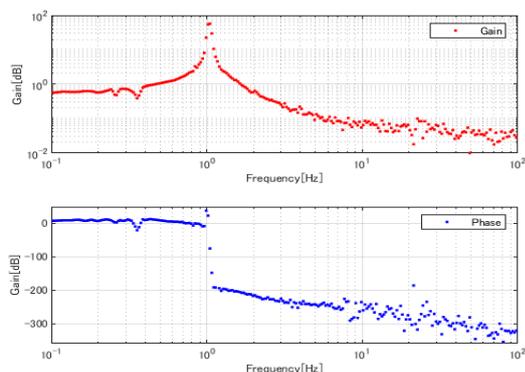


図 24. X並進のオープンループ伝達関数

このときの共振周波数が1 Hz, ユニティゲイン周波数が1.6 Hzであることが確認できた。

## 6. 結論と今後の展望

本実験では、配置による6自由度の信号分離の検証のため、微小角を用いた6自由度センシングの考案と3自由度の振り子の制御をフォトセンサとコイルマグネットアクチュエータで行った。微小角を定義した場合、並進と回転の混入の順番を問わず、変換行列を用いれば、一様にテストマスの変位を読み取れるシステムを考案した。また、制御実験においては、XとYawの変位の低減は確認できたが、センサーでの読み取りができないためGainを上げた際のオープンループ伝達関数の測定はできなかった。センサーのノイズで振り子をどこまで低減できるかは決まるため、ノイズの少ないセンサーが求められる。本研究内で作成したセンサーではプロトタイプの段階で定常ノイズは約120 mVであるため、表面実装後はより高い精度を出すことが期待できる。また、今後の展開として、6自由度の実験系のセットアップをするため、機器をそれぞれ小型化したモデルが求められる。最終的には、DECIGOにおけるドラッグフリー制御の構成にあった実験系の設計が要求されているため、本研究室の1自由度のドラッグフリー制御同様にアクチュエーターをスラスタにし、疑似衛星とテストマスの相対位置を制御する機構が必要である。そのため、6自由度で推進する疑似衛星と揺動するテストマスの設計が求められている。

## 参考文献

- [1]国立天文台重力波プロジェクト推進室  
<http://gwpo.nao.ac.jp/en/>
- [2]M.Armano:Sub-Femto-g Free Fall for Space-Based Gravitational Wave Observatories:LISA Pathfinder Results
- [3]T.Nishimura:宇宙重力波望遠鏡 DECIGO における一軸ドラッグフリー制御 2021 年度卒業論文
- [4]Y.Michimura 2009 年度夏学期特別実験 IDPF における試験マスモジュールの3 自由度デジタル制御
- [5]A.Honma:2 次元平面上でのドラッグフリー制御 2009 年度 卒業論文