

舞鶴工業高等専門学校 電子制御工学科 卒業論文（令和7年1月29日提出）
小型衛星模型を用いた磁気トルカによる姿勢制御の検証

西保 洋太 (s9122)

令和 6 年度
卒 業 研 究 論 文

題目	小型衛星模型を用いた磁気トル力による姿勢制御の検証
----	---------------------------

学 科	電子制御工学科
学籍番号	s9122
氏 名	西保 洸太
提 出 日	令和 7 年 1 月 29 日

指導教員	西 佑介 教授
------	---------



舞鶴工業高等専門学校
電子制御工学科

論文要旨

人工衛星とは、惑星である地球の周りをまわっている人工の衛星であり、搭載しているセンサなどで地球の気象や地表・海面の温度、植物の有無などを調べる地球観測衛星、位置情報を正確に測る測位衛星、インターネットなどを構成する通信衛星などがある。内閣府の調査によれば、2023年に打ち上げられた人工衛星等の機数は、過去最大の2,901機であり、10年前と比べて約14倍に増加したという。超小型人工衛星は、機能が制限され、単一のミッションしか実行できないという欠点がある。その代わり、短期間での開発・低コストでの打ち上げが可能であるため、学生が在学中に開発・打ち上げをすることが可能となっている。超小型人工衛星は、その小ささから、搭載可能な機器のサイズや重量に制限がある。そのため、リアクションホイールやスラスタといった、性能の代わりに大型な機器は搭載が難しい。そこで、姿勢制御に磁気トルカやCMG（コントロールモーメントジャイロ）が用いられることが多い。

本研究では、小型衛星の模型を用いて、磁気トルカを用いて1軸のみの衛星の姿勢制御を行う様子を再現し、人工衛星によく用いられる、B-dot制御則やクロスプロダクト則といった制御理論や、P制御、PD制御といった基本的な理論を検証する。

実験の結果、B-dot制御則については、定常偏差と整定時間から、衛星の角速度を0に指向するという、制御則の特徴が現れる結果が得られた。P、PD制御、クロスプロダクト則については、軸受の摩擦の影響による定常偏差が残り、評価が難しかった。作製した実験装置においては、整定時間を重視すればB-dot制御則が、定常偏差を重視すればクロスプロダクト則が最も良いと判断できる結果が得られた。しかし、PD制御、クロスプロダクト則についてはゲイン設定の余地があるため、定常偏差、オーバーシュートの改善がまだ済んでいない状態にある。

本実験装置を磁気トルカおよび制御理論を検証する実験装置として評価すると、特にB-dot制御則については、角速度を0に指向するというB-dot制御則の特徴が現れていると考えられ、またPD制御、クロスプロダクト則については、改良の余地はあるものの、コントローラの設計が行えるため、人工衛星の姿勢制御についての簡単な実験装置として用いることは可能であると考える。

今後の展望として、実験装置の環境を宇宙空間に近づけること、磁気トルカを増やした際の検証、実際の人工衛星の挙動との比較が挙げられる。実験装置の環境を宇宙空間に近づけるには、空気抵抗や転がり軸受の摩擦、外部電源の接続といった点を改善する必要がある。中でも転がり軸受の滑り摩擦の軽減は実行しやすく、また外部電源を実験装置に搭載することも可能であると考えられる。本研究では磁気トルカを1つのみ用いて検証を行ったが、実際に打ち上げられている超小型人工衛星には、磁気トルカを2つ以上用いるものも多いため、本実験装置に磁気トルカを2つ搭載した際の挙動の変化も検証する必要がある。さらに、本実験装置の有用性の判断のため、本実験装置の条件のもとシミュレーションを行い、その結果との定量的な比較を行うことで有用性の定量的な判断ができるようになる可能性がある。

目 次

第 1 章 序論	1
1.1 始めに	1
1.2 超小型人工衛星とは	1
1.3 本研究の目的	3
第 2 章 制御理論	4
2.1 本研究で用いる理論	4
2.2 P 制御	4
2.3 PD 制御	4
2.4 B-dot 制御則	5
2.5 クロスプロダクト則	7
第 3 章 実験システムの構築	9
3.1 実験装置の構造	9
3.2 制御システムの設計	10
3.2.1 磁気トルカの作製	10
3.3 磁気トルカの駆動回路	11
3.3.1 駆動回路の設計	11
3.3.2 磁気トルカの電流計算など	13
3.4 磁束密度の測定結果	15
第 4 章 実験方法および結果	16
4.1 Duty 比 100%・Duty 比 50%による制御	16
4.1.1 実験方法	16
4.1.2 実験結果	16
4.2 P 制御	17
4.2.1 実験方法	17
4.2.2 実験結果	17
4.3 PD 制御	18
4.3.1 実験方法	18
4.3.2 実験結果	18
4.4 B-dot 制御則	19
4.4.1 実験方法	19
4.4.2 実験結果	19
4.5 クロスプロダクト則	19
4.5.1 実験方法	19

4.5.2 実験結果	19
4.6 考察	20
第 5 章 結論	22
5.1 本研究のまとめ	22
5.2 今後の展望	22
参考文献	23
謝辞	24
付録	25
A.1 Solidedge を用いたモデルの作製と 3D プリンターの設定	25
A.2 磁気トルカ駆動用の Arduino プログラム	29

第 1 章 序論

1.1 始めに

人工衛星とは、惑星である地球の周りをまわっている人工の衛星であり、搭載しているセンサなどで地球の気象や地表・海面の温度、植物の有無などを調べる地球観測衛星、位置情報を正確に測る測位衛星、インターネットなどを構成する通信衛星などがある。内閣府の調査によれば、2023年に打ち上げられた人工衛星等の機数は、過去最大の2,901機であり、10年前と比べて約14倍に増加したという¹⁾。

例えばJAXAが運用および開発している人工衛星には、だいち4号やGOSAT-GWがある。だいち4号は、地球に向けて電波を放射し、帰ってきた電波から地上の様子を観測する衛星であり、地殻変動や洋上風速、森林の分布の調査などを行っており、火山活動や台風といった自然災害の予測、農業統計の役割を担っている。GOSAT-GWは、温室効果ガスを観測するTANSO-3(たんそりー)や、AMSR3(あむさーすりー)といったセンサを搭載しており、主に地球温暖化にかかわっているとされる情報を調査する目的で運用されている²⁾。

数十～数千の人工衛星を一体的に運用しネットワークを形成する、メガコンステレーションの構築への取り組みや、先進国・新興宇宙開発国による、安全保障分野におけるミサイル防衛や宇宙領域把握を目的とする衛星の打ち上げも見込まれることから、宇宙輸送のニーズは一層拡大することが見込まれている。

1.2 超小型人工衛星とは

人工衛星は、大きいものでは例えば大きさが約108.5 m × 72.8 m 質量約420 t のISS(International Space Station)がある³⁾。それに対し小さいものでは、一辺10 cmの立方体サイズの超小型人工衛星が存在している。超小型人工衛星の定義は明確には決まっておらず、全質量が100 kg以下とするものや、50 kg以下とするものもある。本研究では、超小型人工衛星の中でも、一辺10 cmの立方体を1Uとして規格化された小型衛星(CubeSat)に絞って述べる。

大型人工衛星、中型人工衛星と呼ばれる人工衛星は、多くが国家プロジェクトとして開発され、打ち上げられている。その特徴として、高機能で信頼性が高く、複雑な用途、複数のミッションに活用できるという利点がある。しかし、設計・製造に莫大な費用と時間がかかる。反対に、超小型人工衛星は、機能が制限され、単一のミッションしか実行できないという欠点がある。その代わり、短期間での開発・低コストでの打ち上げが可能であるため、学生が在学中に開発・打ち上げをすることが可能となっている。また、世界各国が宇宙開発研究でしのぎを削るなか、新しい技術を素早く試せることも、注目されている一つの理由である。超小型人工衛星の中でもCubuSatの写真を図1.1⁴⁾に、中型人工衛星の写真を図1.2⁵⁾に、大型人工衛星の写真を図1.3⁶⁾に示す。

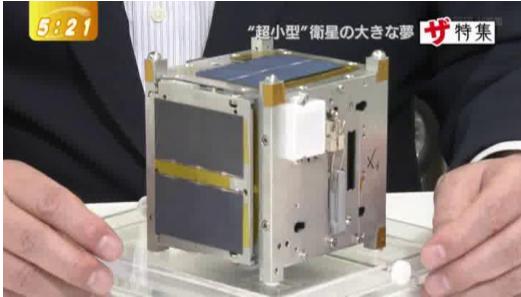


図 1.1：超小型人工衛星



図 1.2：中型人工衛星

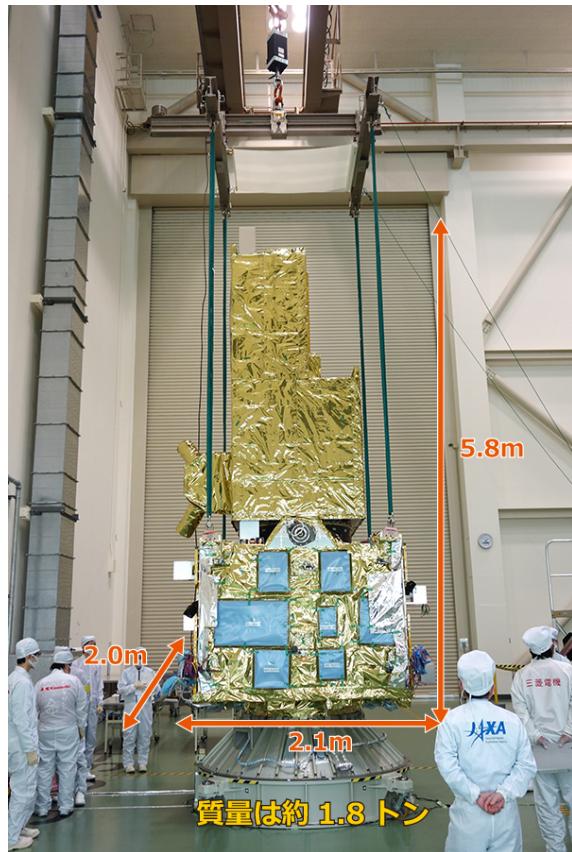


図 1.3：大型人工衛星

人工衛星は、地球との通信のためのアンテナや、発電のための太陽光パネルの向きを制御するために、姿勢の制御が行われる。なお、ここでいう「姿勢」とは、人工衛星内に選んだ基準軸と特定の基準座標系との関係をいう⁷⁾。人工衛星の姿勢制御の方式には、主に以下のようなものがある。

- 重力傾度姿勢安定方式

軌道を廻る衛星が地球の重力により衛星の軸のうち一つが常に地球の中心を向く性質を利用するもの。能動的な制御やエネルギーを必要としない⁸⁾。

- スピニ安定方式

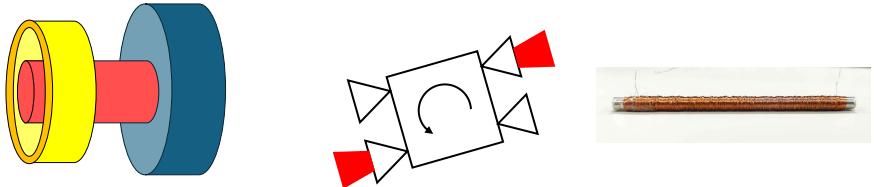
慣性主軸の回りにスピニを与えて、コマのように安定させる方式。衛星全体を回転させるシングルスピニ方式と、通信用のアンテナを回転させないため、アンテナ部と衛星本体をそれぞれ違う方向に回転させるデュアルスピニ方式がある⁹⁾。

- 3軸安定方式

衛星の直交する3軸（ロール・ピッチ・ヨー角）の各軸について制御する方式である。リアクションホイールを用いるものには、ジャイロ効果を用いるバイアスモーメンタム方式と、外乱に応じて回転数を変化させるゼロモーメンタム方式がある⁹⁾。

特に3軸安定方式に用いられるアクチュエータには、スラスター、リアクションホイール、コントロールモーメントジャイロ（Control Moment Gyroscopes: CMG）、磁気トルカといったものが

ある。スラスターは、推進剤を噴出し、その反力で推進力を得るものである。またリアクションホイールは、ホイールを回転させて生ずる反力によるトルクで回転を起こし、CMGは、その回転の向きを変えることにより姿勢を制御する。磁気トルカは、電磁誘導を利用してコイルに発生させた磁気モーメントと地磁気を反応させることでトルクを発生させ、回転力を得るものである。超小型人工衛星は、その小ささから、搭載可能な機器のサイズや重量に制限がある。そのため、リアクションホイールやスラスターといった、性能の代わりに大型な機器は搭載が難しい。そこで、姿勢制御に磁気トルカやCMGが用いられることが多い。図1.4に、人工衛星の姿勢制御によく用いられるアクチュエータの例を示す。



	リアクションホイール	スラスター	磁気トルカ
利点	発生トルクが大きい	平行移動可 高い推進効率	軽い 小さい
欠点	重い 大きい	燃料が必要 →タンク要	トルクが小さい 受動的

図1.4：アクチュエータの例

1.3 本研究の目的

人工衛星の姿勢制御を地上で実験し、研究・検討するには、通常球面の空気軸受を使った3軸テーブルが用いられる。しかし、3軸で制御する衛星でも、3軸を同時に検証する前に、1軸のみでの制御実験を検証する場合が多い¹⁰⁾。また、3軸での実験の設計の難しさから、1軸での実験装置は有効な実験道具となる。

本研究では、小型衛星の模型を用いて、磁気トルカを用いて1軸のみの衛星の姿勢制御を行う様子を再現し、人工衛星によく用いられる、B-dot制御則やクロスプロダクト則といった制御理論や、P制御、PD制御といった基本的な理論を検証する。実際の人工衛星の動きを完璧にトレースするのではなく、あくまでもデモンストレーションとして、制御理論の特徴を反映できることを確かめる。

本論文の構成は、2章で検証する制御理論についてまとめ、3章で作製した実験システムについてまとめ、4章で検証の手法、結果を示し、考察を行い、最後に5章で本研究のまとめを示している。

第 2 章 制御理論

2.1 本研究で用いる理論

本研究では、P 制御, PD 制御, B-dot 制御則, クロスプロダクト則を検証する。

本研究で用いる制御モデルは、電流 I を入力とし、出力は角速度 ω である。この二つの関係を運動方程式で表すと、模型の地面に平行に伸びる軸についての慣性モーメントを J として、

$$\begin{aligned} J\dot{\omega} &= \mathbf{M} \times \mathbf{B} \\ &= MB \sin \theta \\ &= \mu n ISB \sin \theta \end{aligned} \tag{2.1}$$

となり、出力の 2 階微分が入力 I と出力 θ の正弦の積に比例しているため、非線形システムである。また、検証の際には初期角度を 90 deg とするため、 $\sin \theta \approx \theta$ とする近似は適切でない。これらのことから、伝達関数を求めることが難しく、部分的モデルマッチング法のような、伝達関数を用いるゲイン決定法が使えない。そのため P, PD 制御では、制御対象のモデリングを必要としない、限界感度法を用いてゲインの調整を行った。

2.2 P 制御

P 制御では、制御量 $\omega(t)$ と目標値 $\omega^{ref}(t)$ の差を偏差 $e(t)$ として、コントローラを

$$u(s) = k_P e(s) \tag{2.2}$$

で定める。この P コントローラは一般に、ステップ状に変化する目標値や外乱に対して定常偏差が残る。比例ゲイン k_P を大きくすれば、定常偏差が小さくなり、速応性が向上するが、オーバーシュートが大きくなる。つまり、比例ゲイン k_P によって調整できるのは速応性と安定度のどちらか一方である。また、多くの場合入力の大きさ $|u(t)|$ には上限があるため、それに伴って k_P の大きさも上限がある¹¹⁾。

2.3 PD 制御

PD 制御では、制御量 $\omega(t)$ と目標値 $\omega^{ref}(t)$ の差を偏差 $e(t)$ として、コントローラを

$$u(s) = (k_P + k_D s)e(s) \tag{2.3}$$

で定める。PD 制御は、粘性を高めることに相当する効果があり、P 制御で問題となった振動を改善することができる。パラメータが比例ゲイン k_P と微分ゲイン k_D の 2 つを持つため、速応性、安定度の両方を調整できる¹¹⁾。

2.4 B-dot 制御則

B-dot 制御則とは、人工衛星のある 1 軸を規定し、その軸に沿った磁場の変化率の符号と反対の磁気モーメントを発生させる制御である。衛星の回転運動のエネルギーを消散させることを目的とするため、角速度が 0 になることを目標として制御する¹²⁾。

静止状態において、地磁気ベクトル \mathbf{B}_{geo} が、衛星を基準とする $x - y$ 平面上の x 軸に沿っているとする。 t 秒後の地磁気の x 成分 B_x 、 y 成分 B_y は、地磁気ベクトルの大きさ $B_o = |\mathbf{B}_{geo}|$ 、角速度 ω_z を用いて、

$$\begin{cases} B_x = B_o \cos \omega_z t \\ B_y = -B_o \sin \omega_z t \end{cases} \quad (2.4)$$

で表される。図を用いて表すと、図 2.1 のようになる。

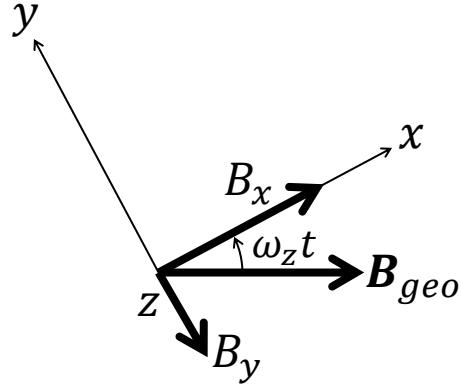


図 2.1：地磁気ベクトルの表現

そして、それぞれの時間変化は、

$$\begin{cases} \dot{B}_x = -B_o \omega_z \sin \omega_z t = B_y \omega_z \\ \dot{B}_y = -B_o \omega_z \cos \omega_z t = -B_x \omega_z \end{cases} \quad (2.5)$$

である。初期位相および目標角を 0 [deg]、 k を正の定数とすると、目標磁気モーメントは、

$$M_x = -k \dot{B}_x = -B_o \omega_z \sin \omega_z t \quad (2.6)$$

で決定される。このとき、生じるトルクは、

$$\begin{aligned} T_z &= M_x \times B_y \\ &= (kB_o \omega_z \sin \omega_z t)(-B_o \sin \omega_z t) \\ &= -kB_o^2 \omega_z \sin^2 \omega_z t \end{aligned} \quad (2.7)$$

である。衛星の1回転にわたり、 $\sin^2 \omega_z t$ の絶対値の平均値は0.5となるため、その平均値は

$$T_{z,\text{ave}} = \frac{-kB_o^2\omega_z}{2} \quad (2.8)$$

で表される。このトルクから、衛星の回転運動についての運動方程式は、

$$J_z \dot{\omega}_z = T_{z,\text{ave}} = \frac{-kB_o^2\omega_z}{2} \quad (2.9)$$

となる。これを変形して、

$$\dot{\omega}_z + \frac{kB_o^2}{2J_z}\omega_z = 0 \quad (2.10)$$

が得られる。この微分方程式は、 $\tau = \frac{J_z}{kB_o^2}$ とすると、衛星の初期角速度を ω_{z_0} として、

$$\omega_z = \omega_{z_0} e^{-\frac{t}{2\tau}} \quad (2.11)$$

となり、指数関数的に角速度が減少することがわかる。本研究では、 z 軸について磁気トルカを1つ用いて制御を行う。

次に、磁気トルカを1つ増やし、それを y 軸に添わせることを考える。目標磁気モーメントは

$$M_y = -k\dot{B}_y = kB_o\omega_z \cos \omega_z t \quad (2.12)$$

となる。2つの磁気トルカにより生じるトルクを合成すると、

$$\begin{aligned} T_z &= M_x B_y - M_y B_x \\ &= (kB_o\omega_z \sin \omega_z t)(-B_o \sin \omega_z t) - (kB_o\omega_z \cos \omega_z t)(B_o \cos \omega_z t) \\ &= -kB_o^2\omega_z \sin^2 \omega_z t - kB_o^2\omega_z \cos^2 \omega_z t \\ &= -kB_o^2\omega_z t \\ &= \dot{L} = J_Z \dot{\omega}_z \end{aligned} \quad (2.13)$$

この微分方程式の ω_z の解は、

$$\omega_z = \omega_{z_0} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.14)$$

となるので、減衰の時定数が半分となることがわかる。

次に、磁気トルカをもう1つ追加したときを考える。3つの磁気トルカがそれぞれ直交するよう衛星に配置されているとき、 $x-y$ 平面、 $z-x$ 平面、 $y-z$ 平面について、B-dot制御を考える。 x 軸回り、 y 軸回りの角速度を ω_x 、 ω_y とすると、

$$\begin{cases} B_z = B_o \cos \omega_y t \\ B_x = -B_o \sin \omega_y t \end{cases}, \quad \begin{cases} B_y = B_o \cos \omega_x t \\ B_z = -B_o \sin \omega_x t \end{cases} \quad (2.15)$$

で表される。そして、それぞれの時間変化は、

$$\begin{cases} \dot{B}_z = -B_o\omega_y \sin \omega_y t = B_x\omega_y \\ \dot{B}_x = -B_o\omega_y \cos \omega_y t = -B_z\omega_y \end{cases}, \quad \begin{cases} \dot{B}_y = -B_o\omega_x \sin \omega_x t = B_z\omega_x \\ \dot{B}_z = -B_o\omega_x \cos \omega_x t = -B_y\omega_x \end{cases} \quad (2.16)$$

となる。(1.2) 式と(1.13)式を重ね合わせると、

$$\begin{cases} \dot{B}_x = B_y\omega_z - B_z\omega_y \\ \dot{B}_y = B_z\omega_x - B_x\omega_z \\ \dot{B}_z = B_x\omega_y - B_y\omega_x \end{cases} \quad (2.17)$$

となることから、 xyz 空間において、地磁気の時間変化は

$$\dot{\mathbf{B}} = \mathbf{B} \times \boldsymbol{\omega} \quad (2.18)$$

で表され、目標磁気モーメントは、

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= -k\dot{\mathbf{B}} \\ &= -k(\mathbf{B} \times \boldsymbol{\omega}) \end{aligned} \quad (2.19)$$

で求められる。

2.5 クロスプロダクト則

クロスプロダクト則は、衛星の姿勢情報を必要とせず、観測した地磁気ベクトルと、予測される目標姿勢での地磁気ベクトル、現在の角速度を用いて行う制御である。PD 制御との相違点は、角度情報を角度センサでなく磁気ベクトルの外積から得ているという点である。B-dot 制御則との違いは、B-dot 制御則は角速度（地磁気ベクトルの時間変化）を 0 に指向する、簡単にいわば D 制御のようなものであるのに対し、クロスプロダクト則は、姿勢を目標値に指向し、角速度情報を用いる、いわば PD 制御のようなものという点である。衛星座標系で測定された地磁気ベクトル \mathbf{b}_m 、その衛星の位置が目標姿勢を保っていた場合の地磁気ベクトル \mathbf{b}_r を用いて、外積ベクトル \mathbf{c} を

$$\mathbf{c} = \frac{\mathbf{b}_m}{|\mathbf{b}_m|} \times \frac{\mathbf{b}_r}{|\mathbf{b}_r|} \quad (2.20)$$

で定める。これと、角速度の誤差 $\Delta\boldsymbol{\omega} = [\omega_x \omega_y \omega_z]$ を用いて、目標トルクが

$$\mathbf{T}_R = K\mathbf{c} + k\Delta\boldsymbol{\omega} \quad (2.21)$$

で定められる。なお、 K , k は、

$$K = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{bmatrix}, k = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

で定められる係数行列である。本研究は z 軸方向の一軸のみ制御する。 $c_z = b_{m_x}b_{r_y} - b_{m_y}b_{r_x}$ なので、

$$T_{R_z} = K_x c_z + k_x \omega_z \quad (2.23)$$

で、磁気トルカにより発生するトルクの式より、磁気トルカの目標磁気モーメントは、

$$\begin{aligned} T_z &= M_x B_y - M_y B_x = M_x B_y \quad (M_y = 0) \\ K_x c_z + k_x \omega_z &= M_x B_y \\ M_x &= \frac{K_x c_z + k_x \omega_z}{B_y} \end{aligned} \quad (2.24)$$

で求められる¹³⁾。

第 3 章 実験システムの構築

3.1 実験装置の構造

本研究では、図 3.1 に示すような超小型人工衛星の模型を用いて実験を行う。模型は、転がり軸受を利用してできるだけ滑らかに回転し、なるべく摩擦の影響を受けることなく各制御理論の特性が反映されるようになっている。着脱可能な中心部のテーブルを固定し 1 軸の回転を実現している人工衛星に搭載している物は、Arduino Uno, SD Card シールド、磁気・角度・角速度センサ、磁気トルカ駆動用の回路、磁気トルカ、9 V 角型乾電池である。Arduinoへの電力供給は角型乾電池を用い、磁気トルカへの電力供給は菊水電子工業株式会社製の PMC18-5A を用いる。搭載物の写真を図 3.2 に示す。模型の土台は Solidedge と 3D プリンターを用いて作製した。3D プリンターの使い方は、付録 A.1 に記す。

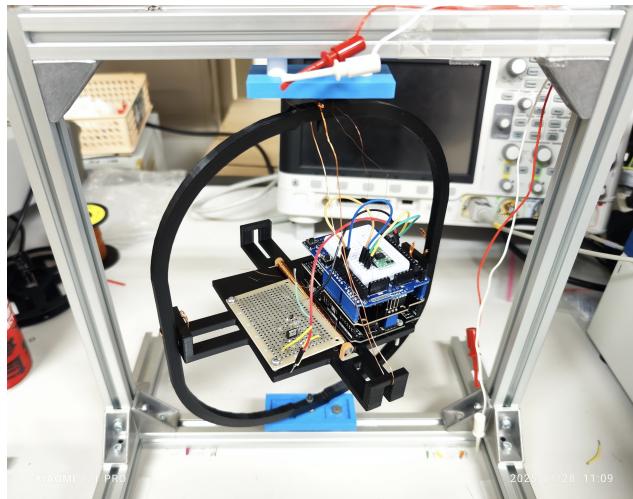


図 3.1：実験システムの外観

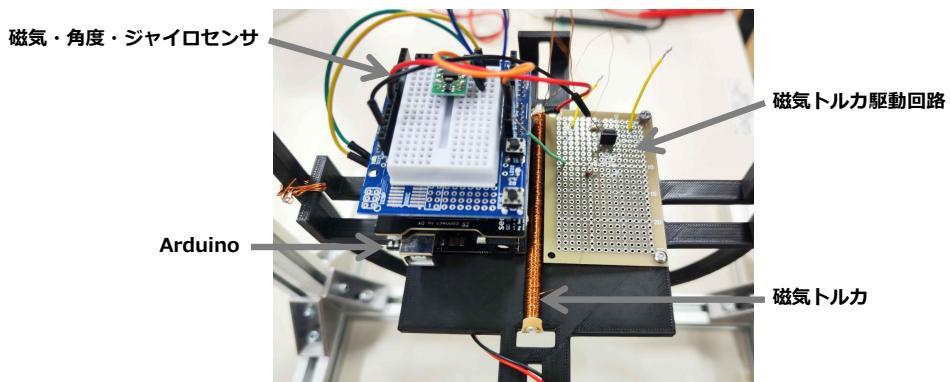


図 3.2：実験システムに搭載されている物品

3.2 制御システムの設計

搭載する Arduino は、ELEGOO 社製の Arduino Uno R3 を、開発環境には Arduino IDE を用いる。姿勢角度、角速度および磁力の検出には、Bosch Sensortec 社製の BNO055 と、Arduino IDE のライブラリ ”Adafruit_Sensor.h”，”Adafruit_BNO055.h” を用いる。また、姿勢角度、角速度および磁力の記録には SD カードを用いており、seeed studio 社製の SD Card shield V4.0 を Arduino に装着している。Arduino に書き込んだコードは、付録 A.2 に記す。センサから取得した角度、角速度および磁気のデータを用いて、フィードバック制御を行う。記録した角度・角速度のデータを CSV ファイルに保存、それを Python でグラフに描画し、姿勢角度の遷移を確認する。実験システムの概要をブロック図にしたものを見ると図 3.3 に示す。

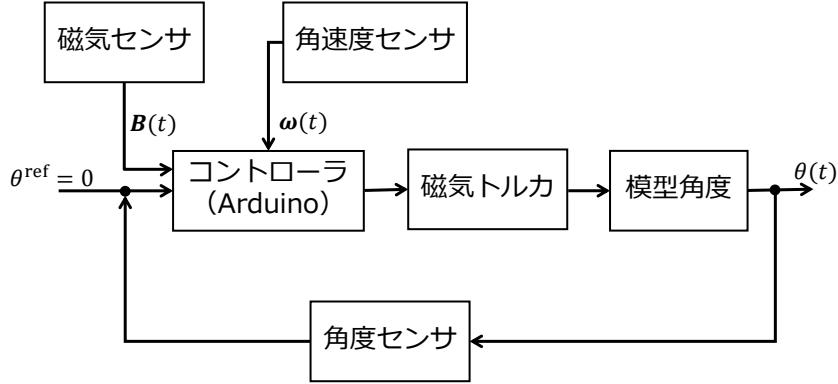


図 3.3：実験システムブロック図

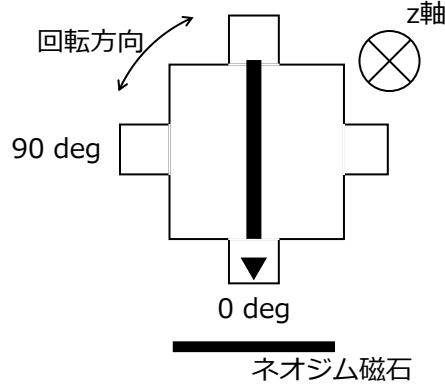


図 3.4：実験システム概略図

3.2.1 磁気トルカの作製

搭載した磁気トルカのパラメータを表 3.1 に示す。 $E-B$ 対応において、磁気トルカが発生させる磁気モーメントは、電流 I 、磁心の断面積 S 、断面の法線ベクトル n を用いて、

$$m = ISn \quad (3.1)$$

と表される。また、地磁気を B_{geo} [T]、磁心の比透磁率を μ_r とすると、磁気トルカがとらえる磁束密度は、

$$\mathbf{B} = \mu_r \mathbf{B}_{\text{geo}} \quad (3.2)$$

となる。そして、磁気トルカが発生させられるトルクは、磁気トルカの磁気モーメントと、磁気トルカがとらえる磁束密度を用いて、

$$\mathbf{T} = \mathbf{m} \times \mathbf{B} \quad (3.3)$$

と表される。このことから、磁気トルカが生み出すトルクは比透磁率に比例していることがわかる。

まず、芯材にステンレス鋼を用いて磁気トルカを作り、磁石を用いて反応性を確かめた。しかし、ステンレス鋼の保磁力の高さのため、磁気トルカに電流を流していないときも磁力を持っており、また比透磁率も低く、電流を流しているとき、いないときの差がなく磁力も低かった。そこで比透磁率が高く、また保磁力が低い材料を探したところ、PC パーマロイ (Ni78%) が条件を満足していたため、ステンレス鋼を用いず PC パーマロイを用いて磁気トルカの作製を行った。芯材である PC パーマロイの選定理由は、その透磁率の高さである。PC パーマロイは比透磁率が約 180,000 で、磁気トルカがとらえられる磁力が高くなる。また、保磁力が低く、消磁しやすいため、必要な時だけトルクを発生させられる。線材には、磁気トルカ作製によく用いられている銅線を、被膜は比較的安価なポリエスチルとする。

表 3.1 : 磁気トルカのパラメータ

コイル長さ L [mm]	100
コイル直径 D [mm]	5
巻き数 n [-]	983
比透磁率 μ_r [-]	約 180,000

3.3 磁気トルカの駆動回路

3.3.1 駆動回路の設計

図 3.5 に、最初に構築した回路図を示す。FET には Nch パワー MOSFET : 2SK4017 を用いている。ゲート閾値電圧は 4 V で、Arduino の PWM 出力は 5 V なので、FET を駆動させられる。Arduino からの PWM 信号が 2SK4017 のゲートに入力され、PWM が ON のとき、ドレイン-ソース間が導通し、磁気トルカに電流が流れる、といった仕組みとなっている。この回路で、duty 比 50% の PWM 信号を入力した場合の、磁気トルカにかかる電圧を図 3.6 に示す。なお、電圧のレンジは 5 V/div であり、磁気トルカの逆起電力が大きい。そのため、FET が OFF のとき、磁気トルカに流れる電流が本来流すべき方向と逆方向に流れ、逆方向のトルクが発生することが予測された。

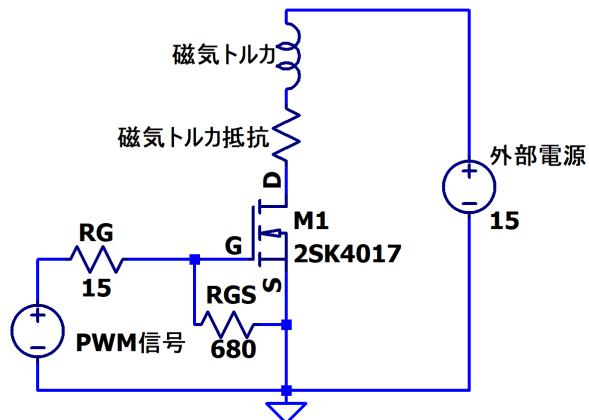


図 3.5：初期の磁気トルカの駆動回路

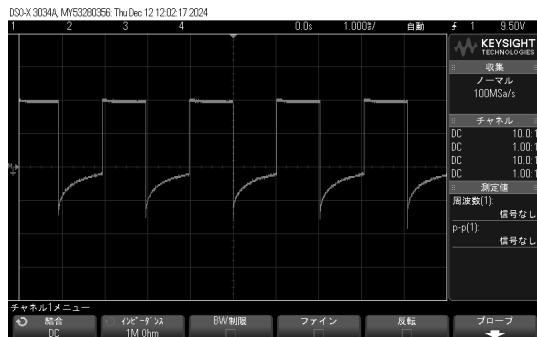


図 3.6：初期の駆動回路における磁気トルカに加わる電圧

そこで次に、磁気トルカと並列にダイオード（1N4148）を接続することで逆起電力を防止した。作製した回路の回路図を図 3.7 に示す。具体的には、ON 時に磁気トルカに蓄えられたエネルギーを、ダイオードを通して閉回路となった磁気トルカの抵抗により消費することにより、逆起電力を防ぐ。この回路での磁気トルカにかかる電圧を図 3.8 に示す。このように、逆起電力を防ぐことができていることがわかる。

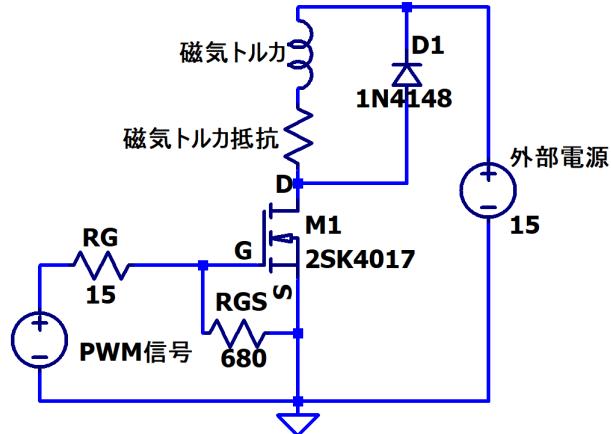


図 3.7：改良した磁気トルカの駆動回路

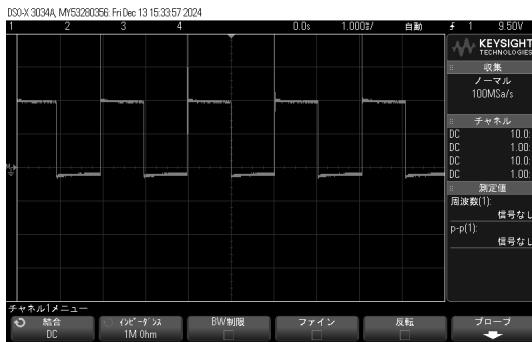


図 3.8：改良した駆動回路における磁気トルカに加わる電圧

3.3.2 磁気トルカの電流計算など

電流の制御を PWM で行うため、コイルの過渡特性を考慮して電流値の計算を行う必要がある。一般的にコイルは、インダクタ成分のみでなく抵抗成分も含んでおり、低周波での等価回路は図 3.9 のようになる。よって、LR 直列回路の過渡現象を考えればよい。磁気トルカのインダクタンス、抵抗値は、表 3.2 に示す。インダクタンスは LCR メータを、抵抗値はテスタを用いて測定した。LCR メータ、テスターは三和電気計器株式会社製の LCR700 および CD770 を使用した。外部電源の電圧値 E [V]、抵抗成分 R_L [Ω]、インダクタンス L [mH] から求められる FET が ON のときの電流の過渡特性は、

$$i(t) = \frac{E}{R_L} \left(1 - e^{-\frac{R_L}{L} t} \right) \quad (3.4)$$

で表される。また、FET が OFF となったときの時刻を t_1 [s] とすると、その後の電流の過渡特性は、

$$i(t) = \frac{E \left(1 - e^{-\frac{R_L}{L} t_1} \right)}{R_L} e^{-\frac{R_L}{L} (t-t_1)} \quad (3.5)$$

となる。さらに t_2 [s] 経過して FET が ON になると,

$$i(t) = \frac{E \left(1 - e^{-\frac{R_L}{L}t_1}\right) e^{-\frac{R_L}{L}t_2}}{R_L} \left(1 - e^{-\frac{R_L}{L}(t-t_1-t_2)}\right) \quad (3.6)$$

で表される電流の推移をする。ここで、 D , t_1 , t_2 の関係は,

$$D = \frac{t_1}{t_1 + t_2} \quad (3.7)$$

で表される。また、 t_1 , t_2 と Duty 比 D ($0 \leq D \leq 1$), PWM 周波数 $f = 490$ Hz の関係は,

$$t_1 = \frac{D}{f}, \quad t_2 = \frac{1-D}{f} \quad (3.8)$$

となる。

表 3.2 : 磁気トルカの寄生成分

インダクタンス L [mH]	17.8
抵抗 R_L [Ω]	18.3

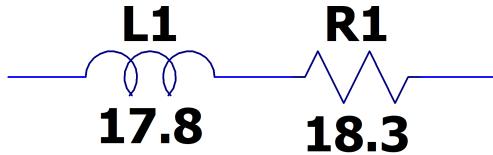


図 3.9 : 磁気トルカの等価回路

この電流の推移を、図 3.7 の回路を用いて duty 比 50% でシミュレーションしたグラフを図 3.10 に示す。このように、磁気トルカに電圧 E [V] を印加したときの電流を I_{\max} [A] とすると、duty 比 D の PWM 信号で磁気トルカを駆動させたとき、およその電流を $I(D) = I_{\max}D$ [A] で近似できる。そのため電流 I を流したいときは、

$$D = \frac{I}{I_{\max}} \quad (3.9)$$

で Duty 比を決定する。なお、 $I_{\max} = \frac{E}{R_L} = \frac{15}{18.3} \approx 0.82$ mA である。

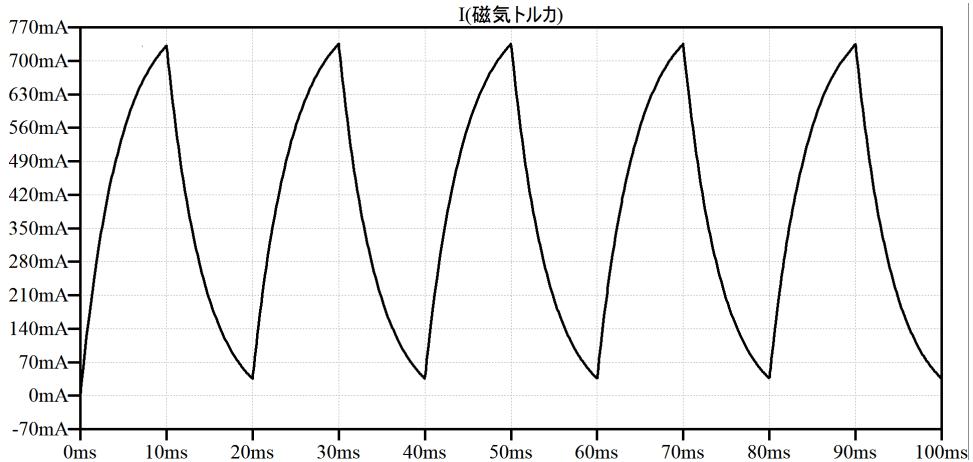


図 3.10 : 磁気トルカに流れる電流

3.4 磁束密度の測定結果

磁気トルカに電圧を印加し、発生する磁束密度をシロ産業社製のハンディガウスマータ MG-501 で測定した。その結果を図 3.11 に示す。今回磁気トルカ駆動用回路に用いた外部電源の電圧は 15 V であるが、図 3.11 の結果から、電圧に対する磁束密度の線形性を維持できているのは 5 V 近傍までである。今回用いた PWM 制御の Duty 比で表すと約 33% となる。

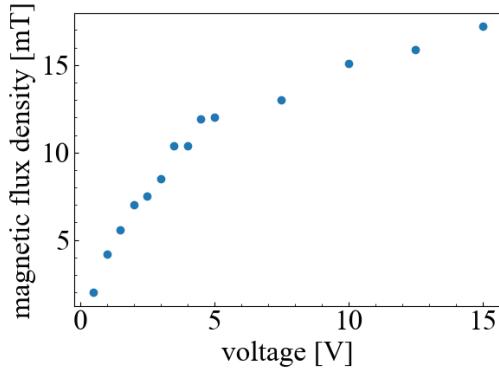


図 3.11 : 電圧値に対する磁気トルカの磁束密度

第 4 章 実験方法および結果

実験装置を図 4.1(b) の状態から時計回りに 90 deg 回転させ、手を離したときの角度推移を観測する。実験を複数回行い、その平均値の角度推移をグラフにプロットする。また、同時に角速度の推移もプロットし、観測する。なお、角速度データはノイズが多かったため、csv ファイルの角速度データに対して、Python の pykalman ライブラリを用いてカルマンフィルタを通し、平滑化している。時刻 t における PWM 信号の Duty 比 $D(t)$ は、式 (3.7) より、

$$D(t) = \frac{I(t)}{I_{max}} \quad (4.1)$$

とする。

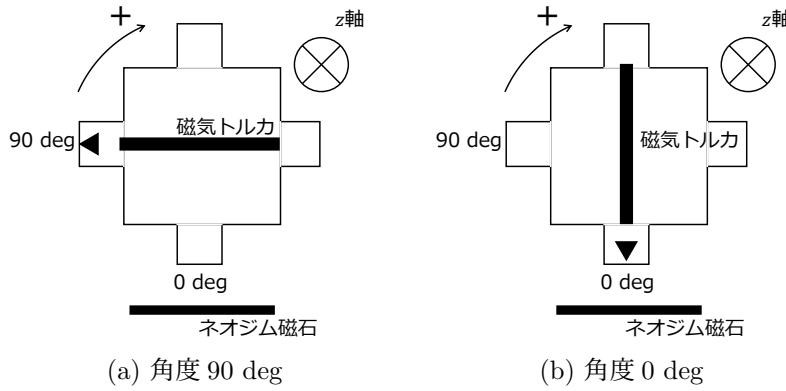


図 4.1 : Duty 比 50%としたとき

また、ガウスメータを用いて作製した磁気トルカの電圧に対する磁束密度の値を測定した。

4.1 Duty 比 100%・Duty 比 50%による制御

4.1.1 実験方法

PWM 信号の Duty 比を、50%と 100%として実験を行う。

4.1.2 実験結果

Duty 比を 50%としたときの結果を図 4.2(a), 図 4.2(b) に、100%としたときの結果を図 4.3(a), 図 4.3(b) に示す。図に示すようにオーバーシュートが大きく、振動回数が 2 回となっている。また、磁気トルカに触ると明らかに発熱していた。発熱を抑えようとすれば整定時間が伸びる傾向にあった。

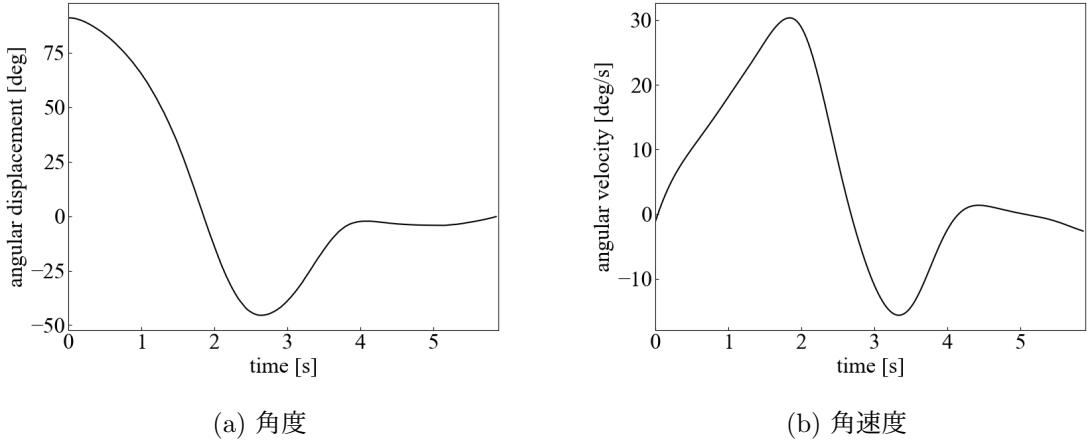


図 4.2 : PWM 信号の Duty 比を 50%で連続入力したとき

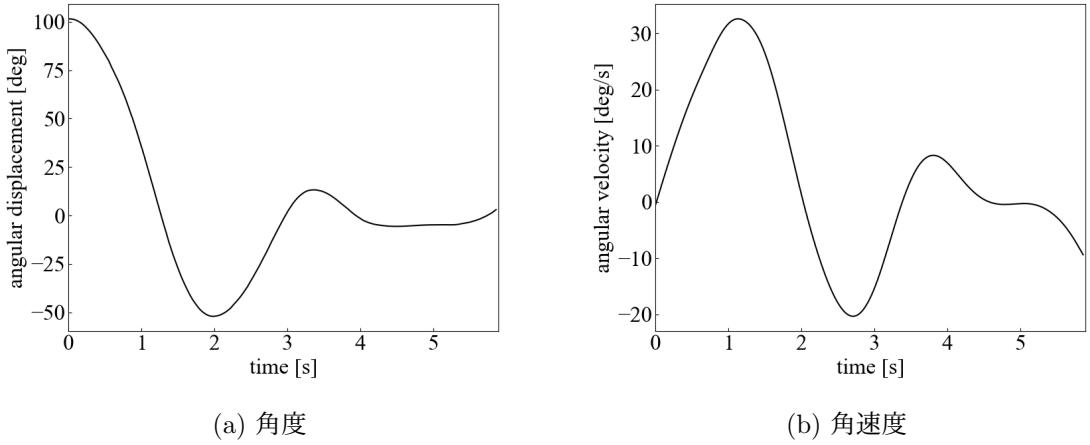


図 4.3 : PWM 信号の Duty 比を 100%で連続入力したとき

4.2 P 制御

4.2.1 実験方法

P コントローラを $I(t) = k_P |\theta(t)|$ とし, 実験を行う.

4.2.2 実験結果

何度か実験を行って k_P を調整し, $k_P = 0.05$ としたときの結果を図 4.4(a), 図 4.4(b) に示す. 整定時間は 3.8 s, 定常偏差は 2.78 deg であった.

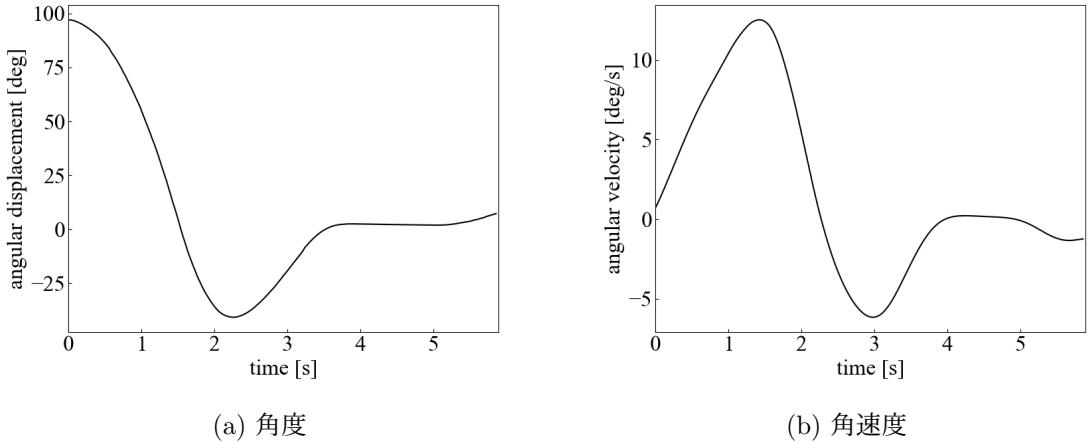


図 4.4 : コントローラを P 制御で設計した場合

4.3 PD 制御

4.3.1 実験方法

P コントローラを $I(t) = k_P|\theta(t)| + k_D\left|\frac{d\theta(t)}{dt}\right|$ とする。なお、 $\frac{d\theta(t)}{dt}$ は、プログラムの 1 ループ前の角度を $\theta_{\text{pre}}(t)$ とし、 $\frac{d\theta(t)}{dt} = \theta(t) - \theta_{\text{pre}}(t)$ で近似する。ゲインの決定は、限界感度法を用いて行った。具体的には、比例ゲイン k_P はオーバーシュートが大きくなっていてかつ k_D が大きければ小さく、整定時間が長くかつ k_D が小さければ大きくする。微分ゲイン k_D は、オーバーシュートが大きくかつ k_P が小さければ大きく、整定時間が長くかつ k_P が大きければ小さくする。

4.3.2 実験結果

何度か実験を行ってゲインを調整し、 $k_P = 0.03$, $k_P = 0.05$ としたときの結果を図 4.5(a), 図 4.5(b) に示す。整定時間は 4.0 s, 定常偏差は -21.3 deg であった。

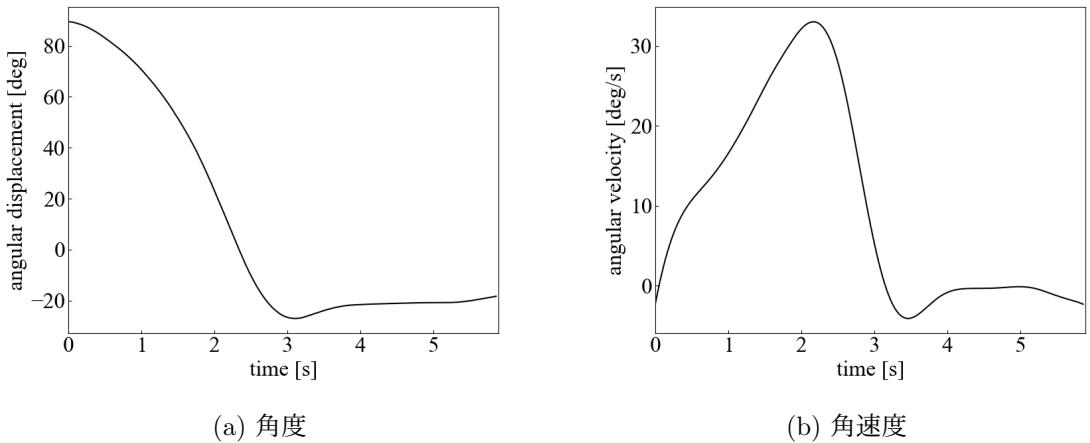


図 4.5 : コントローラを PD 制御で設計した場合

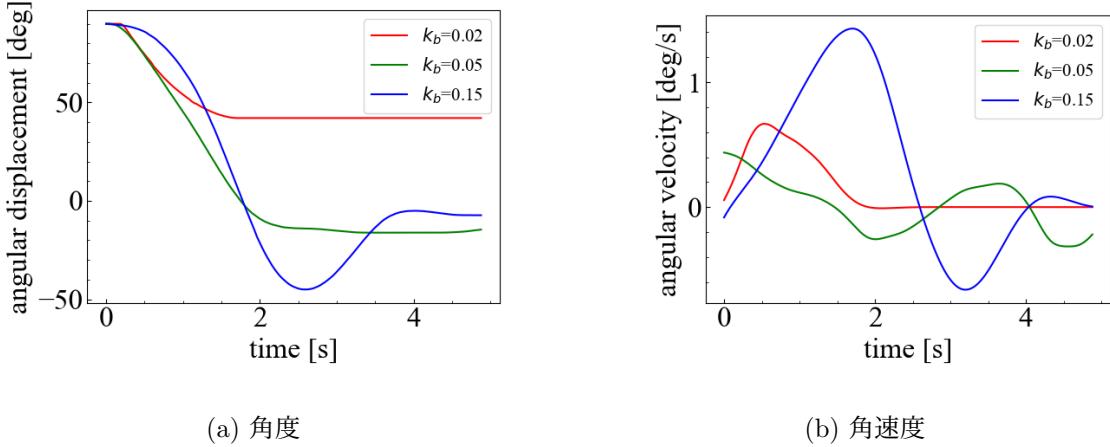
4.4 B-dot 制御則

4.4.1 実験方法

搭載する磁気トルカが1つであるので、目標磁気モーメントは $M = -k_b B_y \omega_z$ である。 $|M| = nIS$ より、コントローラを $I = \frac{-k_b B_y \omega_z}{nS}$ として実験を行う。

4.4.2 実験結果

$k_b = 0.02, k_b = 0.05, k_b = 0.15$ としたときの結果を図4.6(a), 図4.6(b)に示す。整定時間は3.0 s, 定常偏差は-13.4 degであった。



(a) 角度

(b) 角速度

図 4.6 : コントローラを B-dot 制御則で設計した場合

4.5 クロスプロダクト則

4.5.1 実験方法

目標磁気モーメントが $M = \frac{K_x c_z + k_x \omega_z}{B_y}$ であるので、コントローラを $I = \frac{K_x c_z + k_x \omega_z}{n S B_y}$ として実験を行う。ゲインの決定は、PD制御と同様に限界感度法に近い操作で。具体的には、 K はオーバーシュートが大きくなっていてかつ k が大きければ小さく、整定時間が長くかつ k が小さければ大きくなる。 k は、オーバーシュートが大きくかつ K が小さければ大きく、整定時間が長くかつ K が大きければ小さくする。

4.5.2 実験結果

$K_x = 0.04, k_x = 0.03$ としたときの結果を図4.7(a), 図4.7(b)に示す。整定時間は3.8 s, 定常偏差は0.1 degであった。

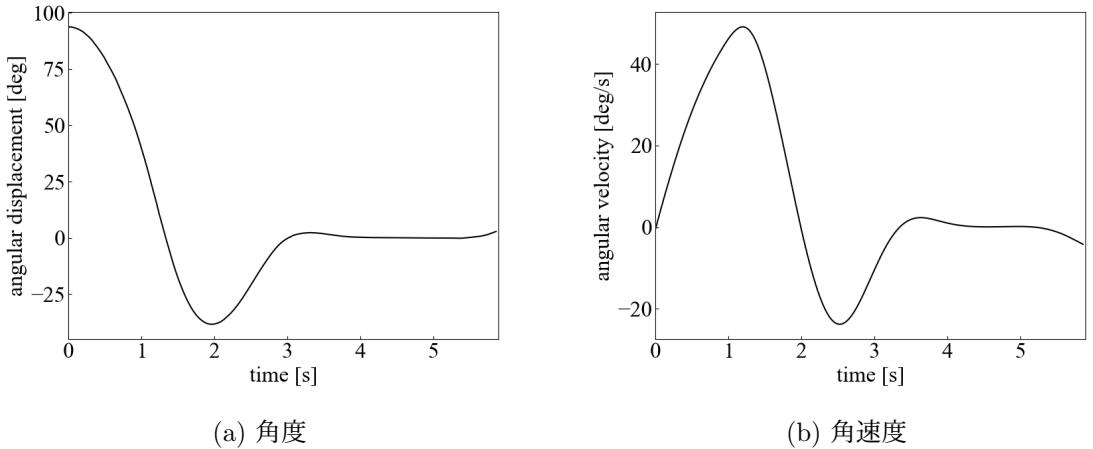


図 4.7 : コントローラをクロスプロダクト則で設計した場合

4.6 考察

各結果の整定時間、定常偏差を表 4.1 に示す。この表から、整定時間に基づいて評価すれば B-dot 制御則が最適であり、定常偏差に基づいて評価すればクロスプロダクト則が最も優れた制御則となる結果を得た。P, PD, クロスプロダクト則は、制御量が角度であるのに対して積分要素を含まないため、ゲインの組み合わせによっては定常偏差が残る。B-dot 制御則は制御量が角速度であるため、定常偏差が残っていると考えられる。PD 制御、クロスプロダクト則については摩擦を考慮して定常偏差、整定時間、オーバーシュートの評価について満足するゲインの設定を行う余地がある。

3.4 節の結果については、測定結果の誤差を考慮すれば、0 から 15 V まで比例していると考えることもできるが、少なからず実験への影響が現れることが考えられる。

表 4.1 : 実験結果

	50%	100%	P 制御	PD 制御	B-dot 制御則	クロスプロダクト則
整定時間 T [s]	4.1	4.3	3.8	4.0	3.0	3.8
定常偏差 θ [deg]	-2.4	-3.9	2.78	-21.3	-13.4	0.1

次に、磁気トルカおよび制御理論を検証する実験装置としての評価を行う。B-dot 制御則については、ゲインの調整をしても定常偏差が残りやすく、角速度を 0 に指向するという B-dot 制御則の特徴が現れていると考えられる。PD、クロスプロダクト則についてはゲイン設定の余地はあるものの、ゲインの組み合わせによりオーバーシュートを抑えられたり、整定時間を抑えられたりと、コントローラの設計が行える点から、人工衛星の姿勢制御についての簡単な実験装置として用いることは可能であると考える。

本実験装置の宇宙空間との大きな相違点として、発生するトルクの大きさ、転がり軸受に生じる滑り摩擦、空気抵抗が挙げられる。式 (2.1) より、磁気トルカが生み出すトルクは、芯材の透磁率、巻き数、電流値、芯材の断面積および磁束密度に比例していることがわかる。この中で、本実験装

置において宇宙空間と大きく変更した点は、電流値と磁束密度である。まず電流値については、本研究で用いた用いた磁気トルカは、最大電流値が $I_{\max} = 8.2 \times 10^2$ mA で、実際に用いられているものは、文献¹⁴⁾においては 130 mA とするものがある。本研究で用いる磁気トルカに流す電流は、常に 100% とは限らないため、最大値の 50% の 4.1×10^2 mA を用いて計算する。また地磁気については、本研究で用いたネオジム磁石の、磁気トルカが反応する距離での磁束密度はおよそ 20 mT であり、日本上空の地磁気は約 30 μ T である¹⁵⁾。このことから、人工衛星で用いられる磁気トルカと、本研究で用いた磁気トルカのトルクについて相対的な比較を行うと、

$$\frac{20 \times 10^{-3} \text{ T}}{30 \times 10^{-6} \text{ T}} \times \frac{410 \text{ mA}}{130 \text{ mA}} \approx 2000 \quad (4.2)$$

となり、この計算からトルクが約 2000 倍異なることがわかる。また、宇宙空間は地上とは違い大気がなく、例えば ISS の高度での圧力は 10^{-5} Pa と、地球上 (1.013×10^5 Pa) の約 10^{10} 分の 1 である。また気体の粘性もほとんどないため、粘性抵抗、圧力抵抗とともに小さく、地上とは大きく異なる点となっている。

第 5 章 結論

5.1 本研究のまとめ

本研究では、人工衛星の模型や実験システムを新規に作製して、磁気トルカによる姿勢制御を検証した。B-dot 制御則については、角速度を 0 に指向するという、制御理論の特徴が現れる結果となった。しかし、PD 制御・クロスプロダクト則についてはゲイン設定の余地があり、今回得られた結果から、制御理論としての評価を行うのは尚早と考えられる。

また本研究で作製した実験装置は、転がり軸受の摩擦や外部電源との接続といった部分で宇宙空間の環境とは程遠く、これを用いて磁気トルカの性能検証やゲイン設定などを行うことはできないと考えられる。しかし制御理論の一部の特徴（制御量や制御入力による違いなど）を反映できている点はあるため、そういった特徴を視覚的に理解することができると言える。

5.2 今後の展望

摩擦の影響がない宇宙空間を想定すると、積分要素が含まれていなくても定常偏差は残らない。転がり軸受の工夫等により摩擦をさらに軽減できれば、PD 制御・クロスプロダクト則は定常偏差が残らず、B-dot 制御則との役割の違いが現れ、評価が変わる可能性がある。そのため本実験装置の改良は、摩擦を減らすことが優先されると言える。また磁気トルカ駆動用電源の電圧を下げることなどにより、外部電源を実験装置自体に搭載することで、外部電源との接続の影響をなくすことができる。

今回は磁気トルカを 1 本のみ用いて検証を行った。しかし実際の人工衛星の姿勢制御では、1 軸に対して磁気トルカを 2 本用いて姿勢制御を行っていることが多いため、磁気トルカをもう 1 本増やした検証も必要であると言える。

実際の人工衛星の挙動や、シミュレーションから得られる角度・角速度推移との定量的な比較ができるおらず、作製した実験装置の有用性の判断ができていない。作製した模型の質量、大きさなどから宇宙空間での挙動のシミュレーションを行い、その結果との類似点・相違点を比較し、定量的な有用性の判断が必要となる。

本研究を通して、人工衛星の姿勢制御に関する大まかな知識が得られた。調査する中で姿勢制御の意義や用いられるアクチュエータとその特徴、目的を知ることができた。特に磁気トルカを用いた制御理論である B-dot 制御則、クロスプロダクト則について、その設計思想や理論、特性について理解を深めることができた。今後は、超小型人工衛星について学び、研究し、宇宙利用分野に関して貢献できる人材に成長したいと考えている。

参考文献

- 1) 内閣府宇宙開発戦略推進事務局：宇宙輸送を取り巻く環境認識と将来像、宇宙政策委員会 宇宙輸送小委員会 第2回会合 資料、1/4 (2023)
- 2) JAXA 「人工衛星プロジェクト」：<https://www.satnavi.jaxa.jp/ja/index.html>
- 3) JAXA「国際宇宙ステーション(ISS)とは」：<https://humans-in-space.jaxa.jp/iss/about/>
- 4) テレビ愛知 ザ特集「”超小型”衛星の大きな夢」：<https://tv-aichi.co.jp/you/2019/03/012464.html>
- 5) 中央日報「韓国、精密地上観測用次世代中型衛星1号を3月に打ち上げ」：<https://japanese.joins.com/Jarticle/274738>
- 6) JAXA 「「いぶき2号」の大きさ」：https://fanfun.jaxa.jp/eos/topics/post_35
- 7) 二宮敬虔, 中谷一郎：人工衛星の姿勢安定と制御, 電気学会雑誌, 94卷, 1号, p.19 (1974)
- 8) 茂原正道：重力傾度を利用する人工衛星の姿勢制御, 日本航空学会誌, 15卷, 159号, p.1 (1967)
- 9) 中丸邦男, 田中俊輔：人工衛星の姿勢制御, 計測と制御, 30卷, 10号, pp.1-2 (1991)
- 10) 村上力, 岡本修, 中島厚, 木田隆：人工衛星の姿勢制御研究用1軸テーブル装置について, 航空宇宙技術研究所資料, 257卷, p.19 (1974)
- 11) 川田昌克: MATLAB/Simulinkによる制御工学入門, 森北出版 (2020)
- 12) Goddard Space Flight Center: Flight Mechanics Symposium 1997: Proceedings of a Conference Sponsored by NASA Goddard Space Flight Center at Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, May 19-21, 1997, pp.79-81 IICA Biblioteca Venezuela (1997)
- 13) Kikuko Miyata and Jozef C. van der Ha: ATTITUDE CONTROL BY MAGNETIC TORQUER, pp.1047-1048, Advances in the Astronautical Sciences (2009)
- 14) 多羽田俊, 三品博司：超小型人工衛星に関する研究—磁気トルカによる姿勢制御システムの開発と熱解析コードの開発—, p.1 日本大学 (2007)
- 15) 気象庁：https://www.jma.go.jp/jma/press/2405/11a/20240511_chijiki.html

謝 辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にご指導ご鞭撻を賜りました。指導教員の西佑介教授からは多大なご指導を賜り、数々の助言を頂きました。また、編入学試験に際して、面接練習や受験勉強の場を提供して頂きました。心より感謝いたします。

電子制御工学科教員の仲川力教授には、ガウスマータを貸与していただき、考察を深めることができました。心より感謝いたします。

本科5年の野口史遠氏には、Arduinoや回路制作で行き詰った際に多くの助言を頂きました。心より感謝いたします。

専攻科1年の三宅航希氏と、本科5年の正木律氏には、特に電子回路について助言をいただき、回路の改良にご助力頂きました。心より感謝いたします。

本科5年の神田大訓氏には、研究内容は異なるものの、実験に対するひたむきな姿勢に感化されることもありました。心より感謝いたします。

本科5年の澤田一理氏には、卒研発表のスライドにおいて自分の視点にはない鋭い指摘を頂き、よりよい発表スライドを作成できました。心より感謝いたします。

本科5年の櫻井蒼真氏には、卒業研究の中間発表の練習に際して、発表に関する改善点を指摘いただき、満足のいく発表ができました。心より感謝いたします。

本科5年の林巧巳氏には、編入学試験の勉強について、度々議論を交わしていただき、互いに高めあうことができました。心より感謝いたします。

最後に、研究や日頃の生活において、有形無形の援助をしていただいた舞鶴高専電子制御工学科教員の皆様、および生活を支えてくださった家族と友人に心より感謝いたします。

付 錄

A.1 Solidedge を用いたモデルの作製と 3D プリンターの設定

まず Solidedge を用いて.par 形式の 3D パーツを作製し、.stl 形式のファイルに変換する。そのファイルをスライサーソフトで開く。

使用した 3D プリンターは QIDI TECH 社製の X-PLUS3 で、スライサーソフトには QIDI TECH 社が提供している QIDI Slicer Ver.1.0.7 を用いている。フィラメントは PLA Rapido である。以下に、.stl 形式のファイルを G コードに変換する方法を示す。上のメニューから.stl ファイルを選択し、後述する設定を行った後、スライスを実行する。最後に G コードをエクスポートして、3D プリンターで実行すれば印刷が行える。

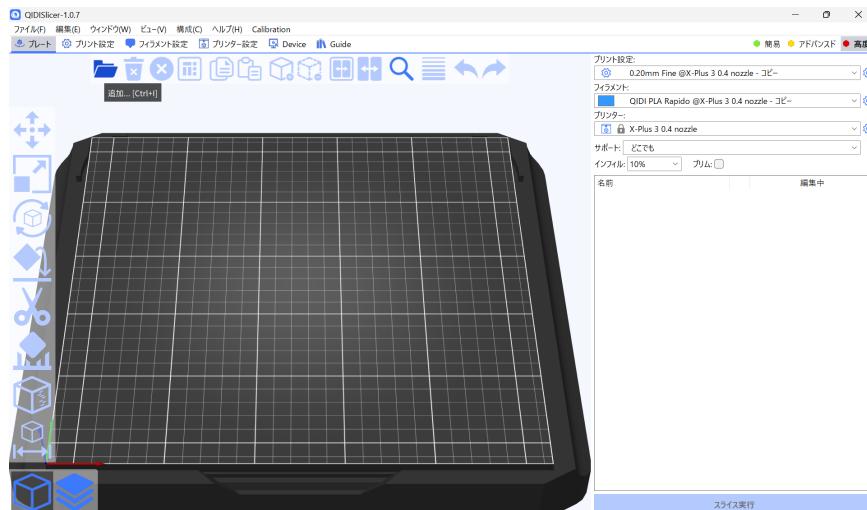


図 A.1 : step1

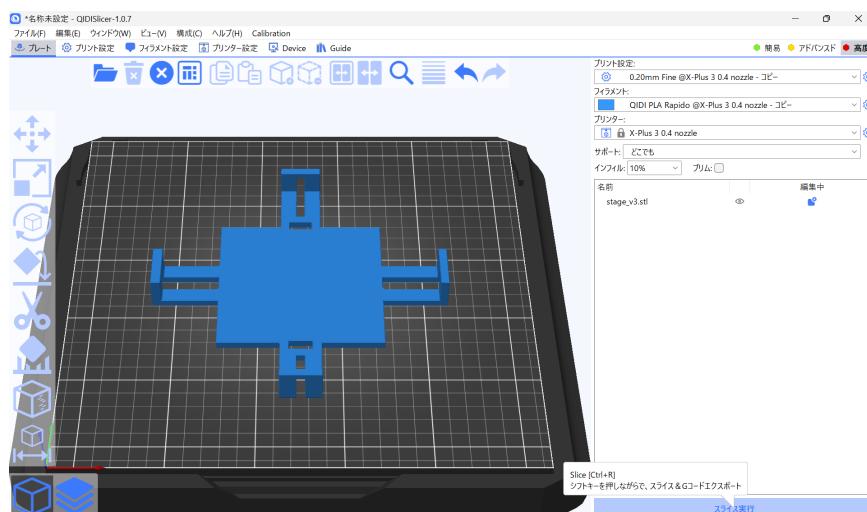


図 A.2 : step2

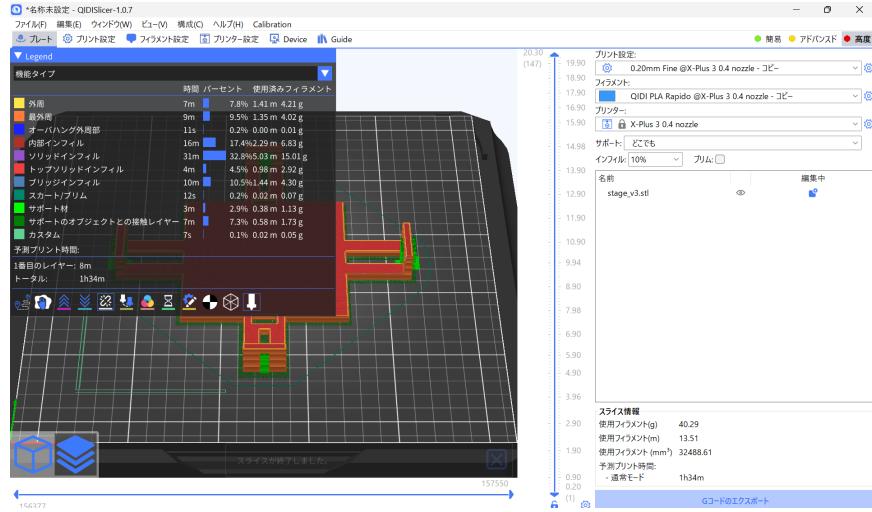


図 A.3 : step3

以下に、デフォルトから変更した設定をスクリーンショットで示す。変更された設定には青色の錠前マークがついている。

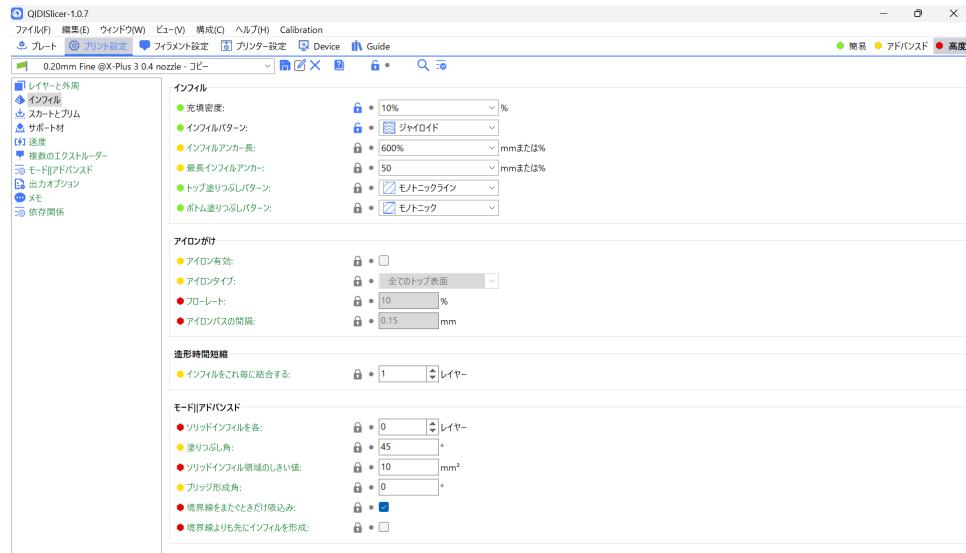


図 A.4 : インフィル

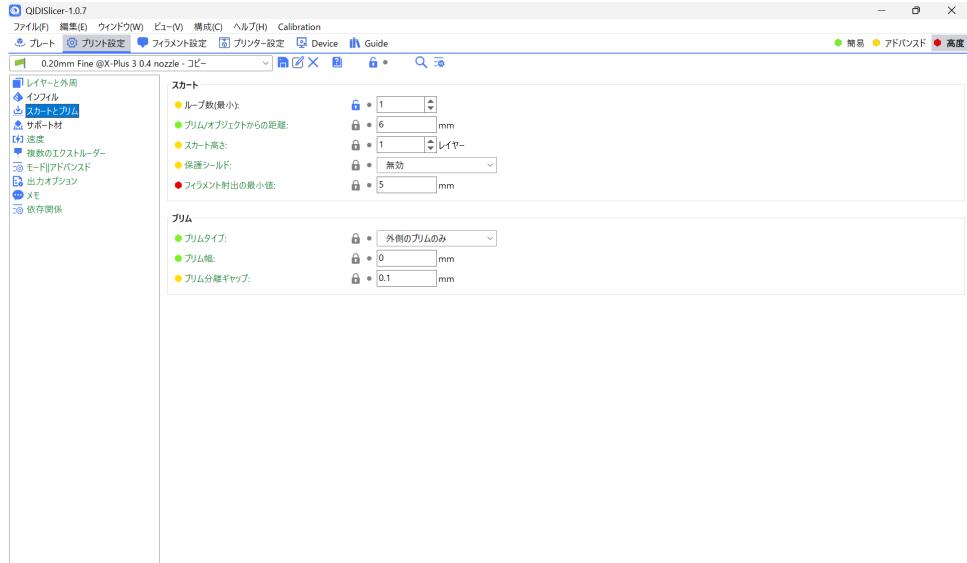


図 A.5 : スカートとプリム

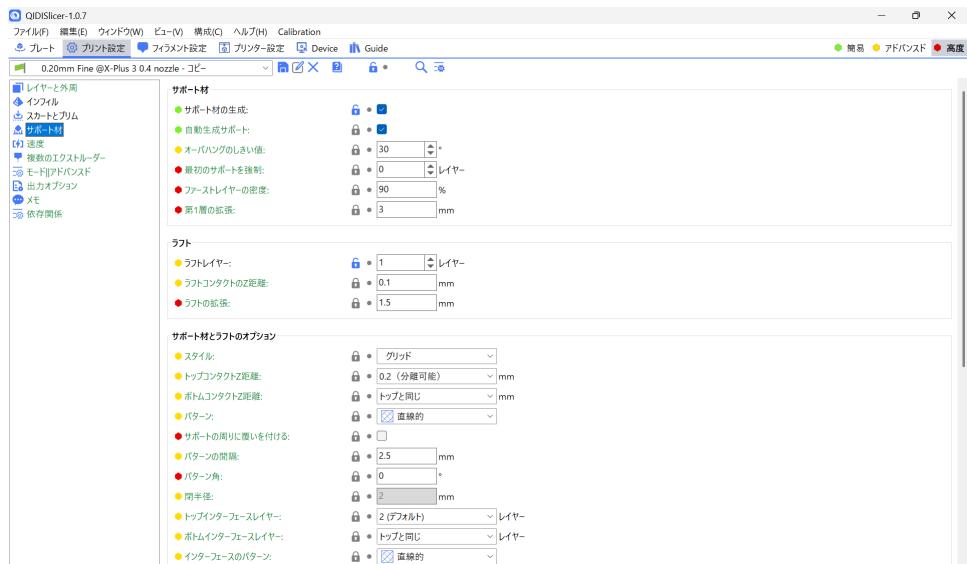


図 A.6 : サポート材

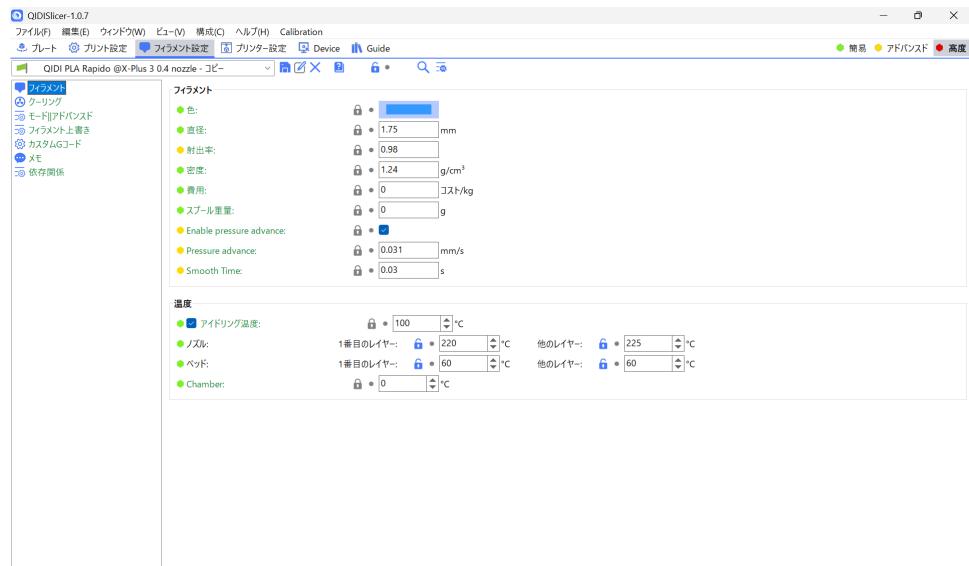


図 A.7 : フィラメント

A.2 磁気トルク駆動用のArduinoプログラム

以下に、本研究で使用したArduino用のC++プログラムを示す。

```
1 #include <Wire.h>
2 #include <SD.h>
3 #include <Adafruit_Sensor.h>
4 #include <Adafruit_BNO055.h>
5 #include <utility/imumath.h>
6 #define PWM 9
7 #define VMAX 15.0f
8 #define RESISTER 18.37
9
10 bool flag = true;
11 double T=0.0327438; //実行時間
12 double e_pre = 0.0; // 微分の近似計算のための初期値
13 double de = 0.0;
14 const int analogWriteStep = 255;
15 int dutyRatio = 80; //duty比[%]
16 double angle[3]={-1000,-1000,-1000};
17 double magne[3]={0,0,0};
18 double gyro[3]={-1000,-1000,-1000};
19 double bdot[3]={0,0,0};
20 double cross[3]={0,0,0};
21 double pre_gyro = 0;
22 unsigned long int time;
23 const int chipSelect = 10;
24 double kb = 0.00002;
25 double kp = 0.007;
26 double kd = 0.011;
27 double kc = 0.03;
28 double kw = 0.02;
29 double current = 0;
30 double voltage = 0;
31 double initmagne[3] = {0,0,0};
32 double normmag = 0;
33 double normmaginit = 0;
34 String datastr = "";
35 // Check I2C device address and correct line below (by default address is 0x29
36 // or 0x28)
36 // id, address
37 Adafruit_BNO055 bno = Adafruit_BNO055(55, 0x28, &Wire);
38
39 void setup(void)
40 {
41     pinMode(10, OUTPUT);
42     pinMode(9,OUTPUT);
43     Serial.begin(115200);
44     Serial.println("Orientation Sensor Test"); Serial.println("");
45     //センサの初期化
```

```

46 if (!bno.begin())
47 {
48     /* There was a problem detecting the BN0055 ... check your connections */
49     Serial.print("Ooops, no BN0055 detected ... Check your wiring or I2C ADDR
50         !");
51     while (1);
52 }
53 //SD カードの初期化
54 if (!SD.begin(chipSelect)) {
55     Serial.println("SD card initialization failed!");
56     while (1); // 初期化に失敗したら停止
57 }
58 Serial.println("initialization done.");
59 }

60 void loop(void){
61     //could add VECTOR_ACCELEROMETER, VECTOR_MAGNETOMETER,VECTOR_GRAVITY...
62     sensors_event_t orientationData , angVelocityData , linearAccelData,
63         magnetometerData, accelerometerData, gravityData;
64     bno.getEvent(&orientationData, Adafruit_BN0055::VECTOR_EULER);
65     bno.getEvent(&angVelocityData, Adafruit_BN0055::VECTOR_GYROSCOPE);
66     bno.getEvent(&linearAccelData, Adafruit_BN0055::VECTOR_LINEARACCEL);
67     bno.getEvent(&magnetometerData, Adafruit_BN0055::VECTOR_MAGNETOMETER);
68     bno.getEvent(&accelerometerData, Adafruit_BN0055::VECTOR_ACCELEROMETER);
69     bno.getEvent(&gravityData, Adafruit_BN0055::VECTOR_GRAVITY);

70 //センサの値を取得
71 returnEvent(&orientationData,angle);
72 returnEvent(&magnetometerData,magne);
73 returnEvent(&angVelocityData,gyro);
74 if(flag){
75     for (int i = 0; i< 3; i++){
76         initmagne[i]=magne[i];
77     }
78     normmmaginit = sqrt(pow(magne[0],2)+pow(magne[1],2)+pow(magne[2],2));
79     for (int i = 0; i< 3; i++){
80         initmagne[i]=magne[i]/normmmaginit;
81     }
82     flag = false;
83 }
84 //Bdot 制御則の計算
85 bdot[0]=magne[1]*gyro[2]-magne[2]*gyro[1];
86 bdot[1]=magne[0]*gyro[2]-magne[2]*gyro[0];
87 bdot[2]=magne[0]*gyro[1]-magne[1]*gyro[0];
88 normmag = sqrt(pow(magne[0],2)+pow(magne[1],2)+pow(magne[2],2));
89 cross[0]=initmagne[1]*(magne[2]/normmag)-initmagne[2]*(magne[1]/normmag);
90 cross[1]=initmagne[0]*(magne[2]/normmag)-initmagne[2]*(magne[0]/normmag);
91 cross[2]=initmagne[0]*(magne[1]/normmag)-initmagne[1]*(magne[0]/normmag);
92
93

```

```

94 //目標角度を 0[deg] とする
95 double e = angle[0];
96 if(e > 270){
97     e = abs(e - 360);
98 }
99 de = (e - e_pre)/T;
100
101 //PD
102 // current = kp*e + kd*de;
103 //B-dot
104 current = kb*bdt[0]/0.04935;
105 // クロスプロダクト
106 // current = (kc*cross[2] + kw*(gyro[2]-pre_gyro))/0.04935;
107
108 //算出した電流値を電圧値に変換
109 voltage = current * RESISTER;
110 if(abs(voltage) > VMAX) {
111     voltage = VMAX;
112 }
113 //電圧値をduty 比に変換
114 int duty = int(abs((voltage / 15.0) * 100.0));
115 Serial.print(duty);
116
117 int ledBrightness = analogWriteStep * duty / 100.0f;
118 analogWrite( 9, ledBrightness );
119
120 //値をstring 型に
121 datastr = String(angle[0]);
122 for (int i = 0; i < 3; i++){
123     datastr += ","+String(magne[i]);
124 }
125 datastr += ","+String(gyro[2]);
126 //csv ファイルの open
127 File angFile = SD.open("LOG.CSV", FILE_WRITE);
128 //書き込み
129 if (angFile) {
130     angFile.println(datastr);
131     angFile.close(); // ファイルを閉じる
132     Serial.println("Write successful.");
133 } else {
134     Serial.println("Error opening test.txt for writing.");
135 }
136 e_pre = e;
137 pre_gyro = gyro[2];
138 }
139
140 //センサの値を返す
141 void returnEvent(sensors_event_t* event,double tmp[3]) {
142     double x = -1000000, y = -1000000 , z = -1000000; //dumb values, easy to
spot problem

```

```
143 else if (event->type == SENSOR_TYPE_ORIENTATION) {
144     // Serial.print("orient:");
145     x = event->orientation.x;
146     y = event->orientation.y;
147     z = event->orientation.z;
148 }
149 else if (event->type == SENSOR_TYPE_MAGNETIC_FIELD) {
150     // Serial.print("Mag:");
151     x = event->magnetic.x;
152     y = event->magnetic.y;
153     z = event->magnetic.z;
154 }
155 else if (event->type == SENSOR_TYPE_GYROSCOPE) {
156     // Serial.print("Gyro:");
157     x = event->gyro.x;
158     y = event->gyro.y;
159     z = event->gyro.z;
160 }
161 else if (event->type == SENSOR_TYPE_ROTATION_VECTOR) {
162     Serial.print("Rot:");
163     x = event->gyro.x;
164     y = event->gyro.y;
165     z = event->gyro.z;
166 }
167 else {
168     Serial.print("Unk:");
169 }
170 tmp[0]=x;
171 tmp[1]=y;
172 tmp[2]=z;
173 }
```