

第 1 章 実験システムの構築

1.1 実験装置の構造

本研究では、図 1.1 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。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。

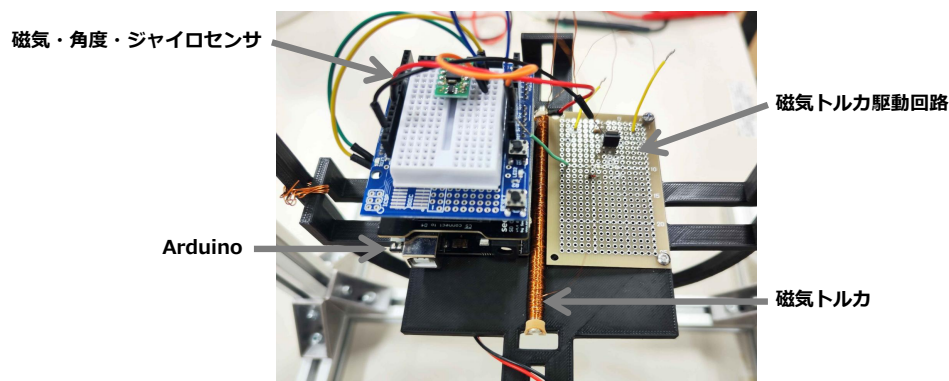


図 1.1 : 実験システムの外観

1.2 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。センサから取得した角度、角速度および磁気的数据を用いて、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図 1.2 に示す。

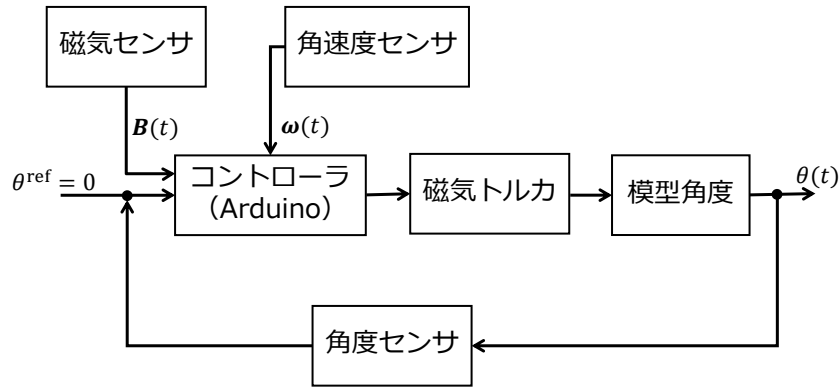


図 1.2 : 実験システムブロック図

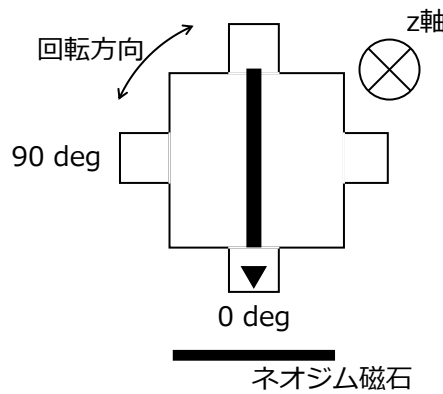


図 1.3 : 実験システム概略図

1.2.1 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 1.1 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 \mathbf{n} を用いて，

$$\mathbf{m} = IS\mathbf{n} \quad (1.1)$$

と表される．また，地磁気を \mathbf{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，

$$\mathbf{B} = \mu_r \mathbf{B}_{\text{geo}} \quad (1.2)$$

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，

$$\mathbf{T} = \mathbf{m} \times \mathbf{B} \quad (1.3)$$

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テルとする．

表 1.1 : 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

1.3 磁気トルカの駆動回路

1.3.1 駆動回路の設計

図 1.4 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 1.5 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．

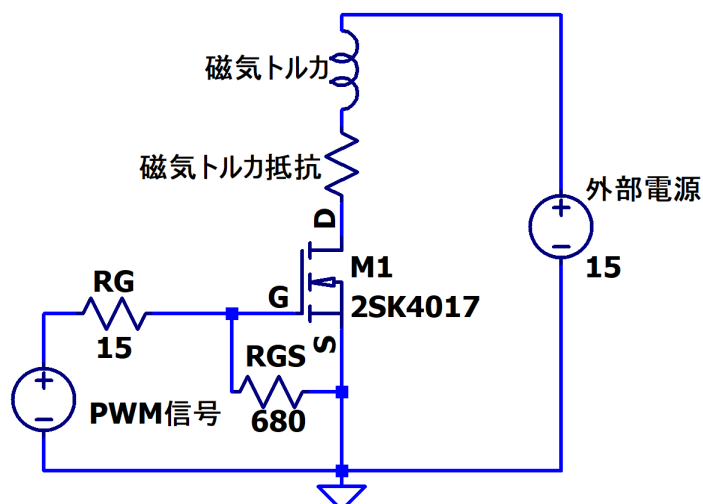


図 1.4 : 初期の磁気トルカの駆動回路

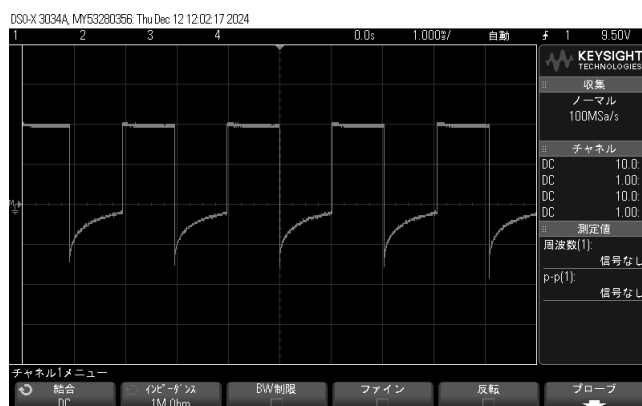


図 1.5 : 初期案

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。制作した回路の回路図を図 1.7 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 1.8 に示す。このように、逆起電力を防ぐことができることがわかる。

1.3.2 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 1.6 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 1.2 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,

$$i(t) = \frac{E}{R_L} \left(1 - e^{-\frac{R_L}{L}t}\right) \quad (1.4)$$

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,

$$i(t) = \frac{E \left(1 - e^{-\frac{R_L}{L}t_1}\right)}{R_L} e^{-\frac{R_L}{L}(t-t_1)} \quad (1.5)$$

となる. さらに t_2 [s] 経過して ON となり,

$$i(t) = \frac{E \left(1 - e^{-\frac{R_L}{L}t_1}\right) e^{-\frac{R_L}{L}(t_2-t_1)}}{R_L} \left(1 - e^{-\frac{R_L}{L}(t-t_1-t_2)}\right) \quad (1.6)$$

で表される電流の推移をする. ここで用いた t_1, t_2 を Duty 比 D ($0 \leq D \leq 1$), PWM 周波数 f を用いて表すと,

$$t_1 = \frac{D}{f}, t_2 = \frac{1-D}{f} \quad (1.7)$$

表 1.2 : 磁気トルカの等価回路

インダクタンス L [mH]	17.8
抵抗 R_L [Ω]	18.3

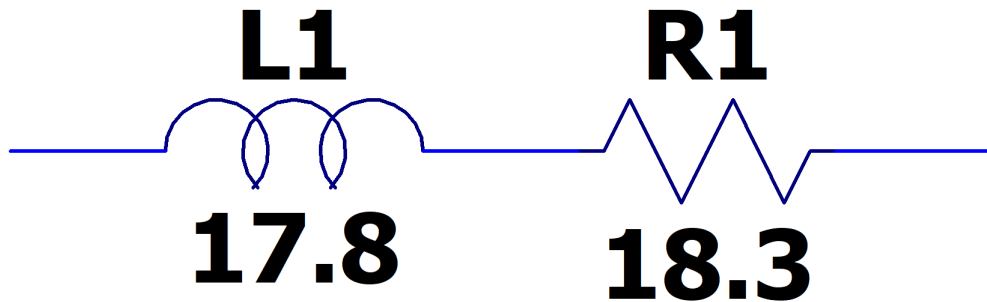


図 1.6 : 磁気トルカの等価回路

この電流の推移を, 図 1.7 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 1.9 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,

$$D = \frac{I}{I_{\max}} \quad (1.8)$$

で Duty 比を決定する.

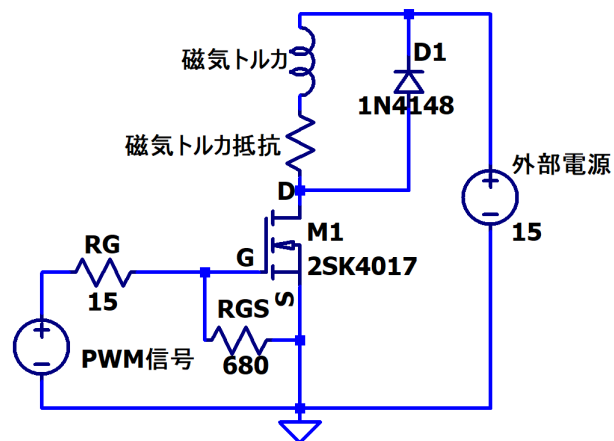


図 1.7 : 磁気トルカの駆動回路

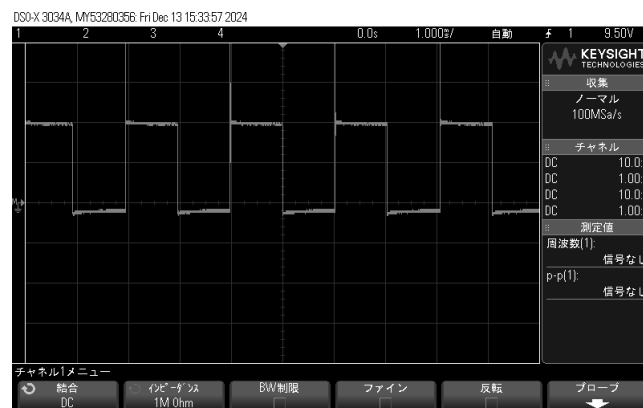


図 1.8 : 磁気トルカに加わる電圧

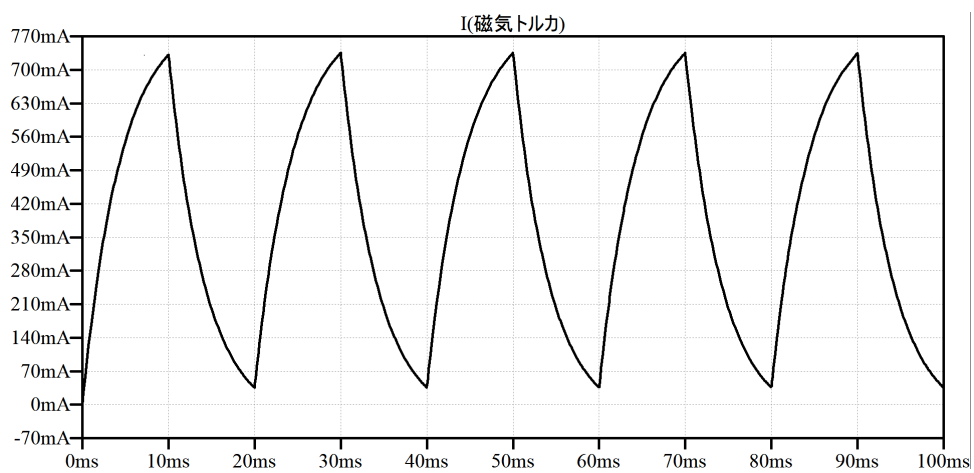


図 1.9 : 磁気トルカに流れる電流