

# 電子制御工学実験報告書

## 電子制御工学実験Ⅱ前期

実 験 題 目	DC モータの速度制御
---------	-------------

報 告 書 提 出 者	学年 4    No.   38    宮里 孝希
共 同 実 験 者	No.   37    松永 凌
	No.   39    森 康記

実 験 実 施 期 間    前期 第5週   2024年5月20日  
前期 第6週   2024年5月27日

報 告 書 提 出 日    2024年6月30日

## 1. 目的

移動ロボット等の制御では駆動輪の回転速度を目標速度へ追従させる制御が行われる．本実験の目的は Scilab/Xcos と Arduino を用いて PI 制御（比例・積分制御）による DC モータの速度制御の設計方法について学ぶことである．

## 2. 概要

### 2. 1. 実験方法の概要

本実験では，制御に用いるマイコンとして Arduino UNO R3 を用いた．また，開発環境として Arduino IDE 1.8.19 を使用した．

2 台の DC モータを軸で接続し，1 台を駆動用，もう 1 台を回転速度検出用のセンサ（タコメータ）として用いた．Arduino の PWM 生成機能を用いて，駆動用モータに速度指令値を入力し，その軸の回転速度をもう 1 台の回転速度検出用モータと Arduino のアナログ入力機能を用いて計測した．実験の回路図，実験装置の写真は Fig. 2-1-1, 2-1-2 にそれぞれ示す．

Scilab/Xcos を用いて，DC モータへの入力電圧と回転速度を計測し，またシミュレーションと比較した．

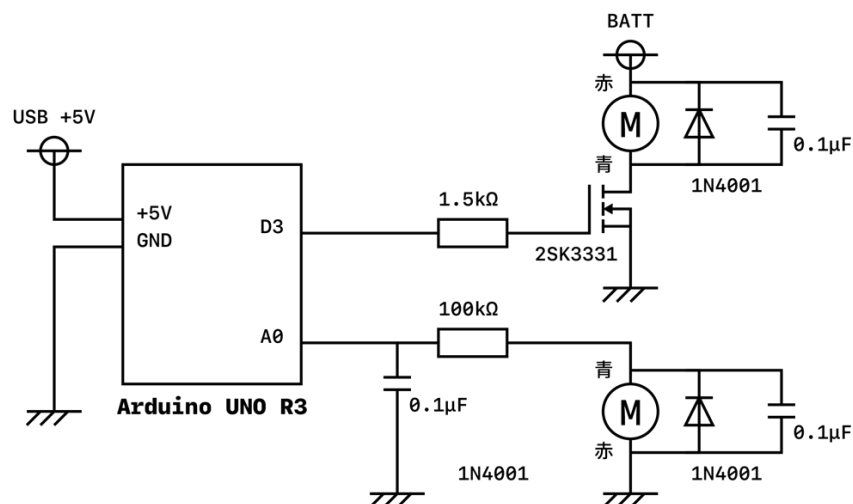


Fig. 2-1-1 Arduino で DC モータの特性評価をするための実験装置の回路図

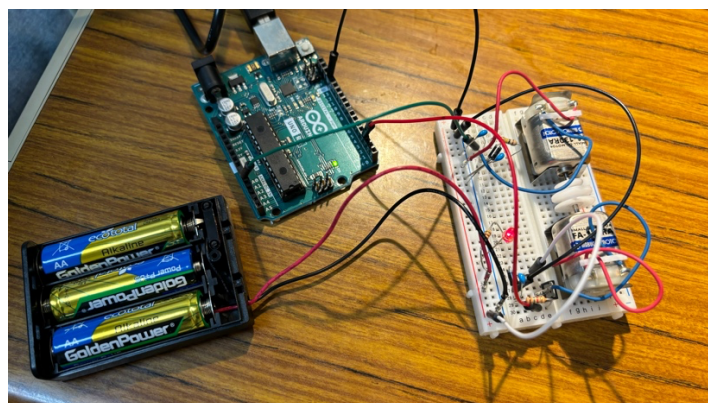


Fig. 2-1-2 Arduino で DC モータの特性評価をするための実験装置の写真

## 2. 2. DC モータのゲイン定数・オフセット電圧の計測

駆動用モータへの入力電圧  $u$  [V] を 0.60 [V] から 2.40 [V] まで 0.2 [V] 刻みに変化させ、定常の回転速度として回転速度検出用モータの電圧  $\omega$  [V] を計測した。この実験の Xcos 図を Fig. 2-2-1 に示す。

この実験結果から、入力電圧  $u$  [V] に対する出力電圧  $\omega$  [V] のグラフを作り、ゲイン定数  $K$  [-] とオフセット電圧  $offset$  [V] を最小二乗法を用いて求めた。

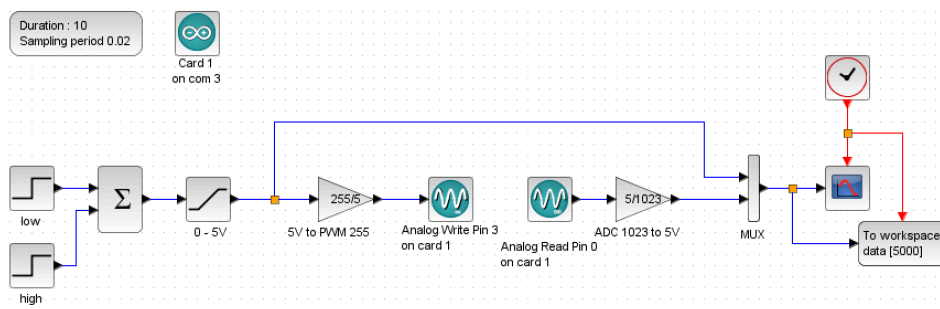


Fig. 2-2-1 DC モータのゲイン定数・オフセット電圧の計測の Xcos 図

## 2. 3. DC モータのステップ応答

実験 2.2 に引き続き、DC モータの入力電圧  $u$  [V] について、1 [V]、2 [V] の 2 段階のステップ入力を入力したときのステップ応答を求め、時定数  $T$  [sec]、ゲイン定数  $K$  [-]、オフセット電圧  $offset$  [V] を求めた。また、ここで求めた定数を元にシミュレーションを行い、実際の結果とシミュレーションを比較した。

## 2. 4. DC モータの PI 制御実験の概要

DC モータの PI 制御器を設計し、実験 2.3 で求めた DC モータのパラメータを元にシミュレーションと実機の動作を比較した。実験とシミュレーションに用いた Xcos 図はそれぞれ Fig. 2-4-1、2-4-2 に示す。また、この閉ループ系の伝達関数は Eq. 2-4-3 に示される。

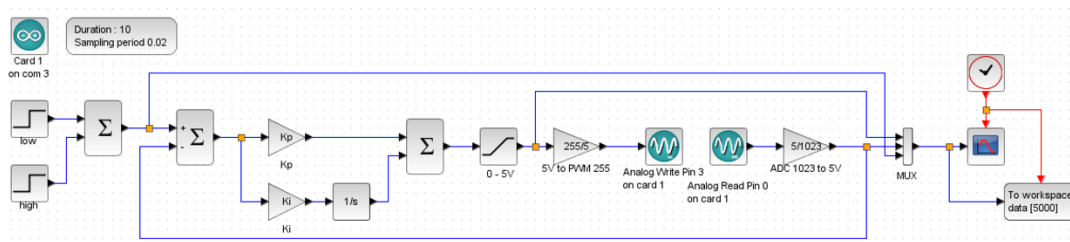


Fig. 2-4-1 DC モータの PI 制御実験の Xcos 図

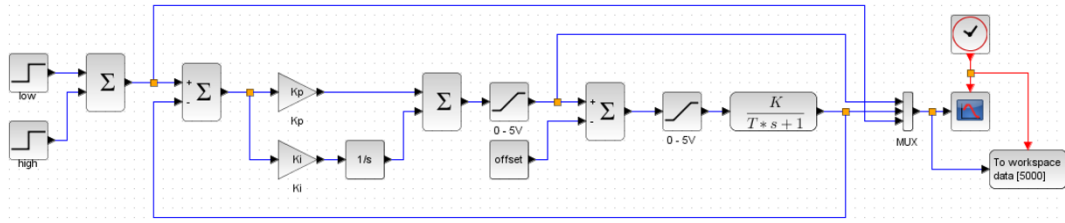


Fig. 2-4-2 DC モータの PI 制御シミュレーションの Xcos 図

$$G(s) = \frac{\frac{K}{T}(K_p s + K_I)}{s^2 + \left(\frac{1}{T} + \frac{K}{T}K_p\right)s + \frac{K}{T}K_I} \quad (2-4-3)$$

## 2. 5. DC モータの P 制御実験

P 制御の効果  $K_p = 2, 4, 8$ ,  $K_I = 0$  をシミュレーションと実機実験で確認した。また、その時の極を Eq. 2-5-1, 2-5-2 で計算した。

$$p_1 = \frac{-\left(\frac{1}{T} + \frac{K}{T}K_p\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{T} + \frac{K}{T}K_p\right)^2 - 4\frac{K}{T}K_I}}{2} \quad (2-5-1)$$

$$p_2 = \frac{-\left(\frac{1}{T} + \frac{K}{T}K_p\right) - \sqrt{\left(\frac{1}{T} + \frac{K}{T}K_p\right)^2 - 4\frac{K}{T}K_I}}{2} \quad (2-5-2)$$

## 2. 6. DC モータの I 制御実験

I 制御の効果  $K_I = 2, 4, 8$ ,  $K_p = 0$  をシミュレーションと実機実験で確認した。また、その時の極を Eq. 2-5-1, 2-5-2 で計算した。

## 2. 7. DC モータの PI 制御実験 極指定

PI 制御において、極指定  $p_1=p_2=-2$ ,  $p_1=p_2=-4$ ,  $p_1=-3+3j$  と  $p_2=-3-3j$  をシミュレーションと実機実験で確認した。 $K_p$ ,  $K_I$  は Eq. 2-7-1 で計算した。

$$K_p = -\frac{(p_1 + p_2)T + 1}{K}, \quad K_I = \frac{p_1 p_2 T}{K} \quad (2-7-1)$$

## 2. 8. DC モータの PI 制御実験 固有振動数指定・減衰比固定

PI 制御において、固有振動数指定  $\omega_n = 1, 3, 5$ , 減衰比  $\zeta = 0.7$  をシミュレーションと実機実験で確認した。 $K_p$ ,  $K_I$  は Eq. 2-8-1 で計算した。また、このときの極を Eq. 2-5-1, 2-5-2 で計算した。

$$K_p = \frac{2\zeta\omega_n T - 1}{K}, \quad K_I = \frac{\omega_n^2 T}{K} \quad (2-8-1)$$

## 2. 9. DC モータの PI 制御実験 固有振動数固定・減衰比指定

PI 制御において、減衰比指定  $\zeta=0.3, 0.7, 1.2$ , 固有振動数  $\omega_n=3$  をシミュレーションと実験で確認した。  $K_p, K_i$  は Eq. 2-8-1 で計算した。 また、このときの極を Eq. 2-5-1, 2-5-2 で計算した。

## 3. 結果

### 3. 1. DC モータのゲイン定数・オフセット電圧の計測

実験結果を Fig. 3-1-1 に示す。 この実験より、  $K=1.0317303$  [-],  $offset=0.3338328$  [V] が導かれた。

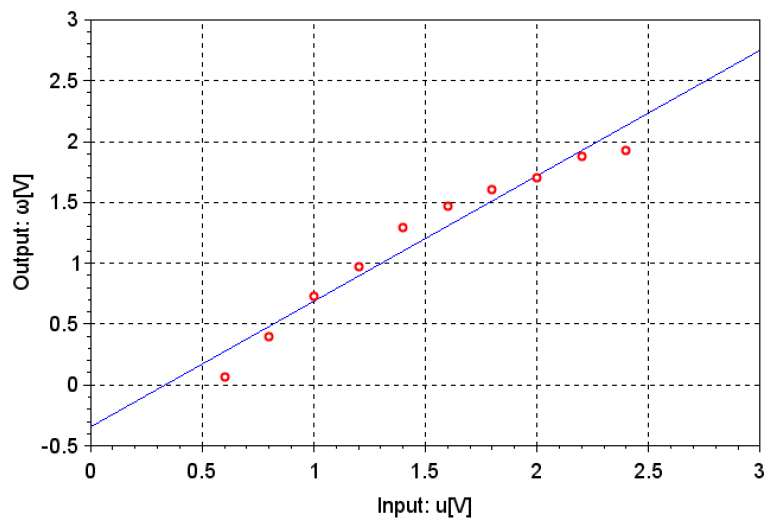


Fig. 3-1-1  $u$  [V] を 0.60 [V] から 2.40 [V] まで 0.2 [V] 刻みに変化させたときの速度検出用モータの電圧  $\omega$  [V]

### 3. 2. DC モータのステップ応答

実験結果を Fig. 3-2-1 に示す。 この実験より、  $K=0.9421910$  [-],  $offset=0.0540832$  [V],  $T=0.48$  [s] が導かれた。

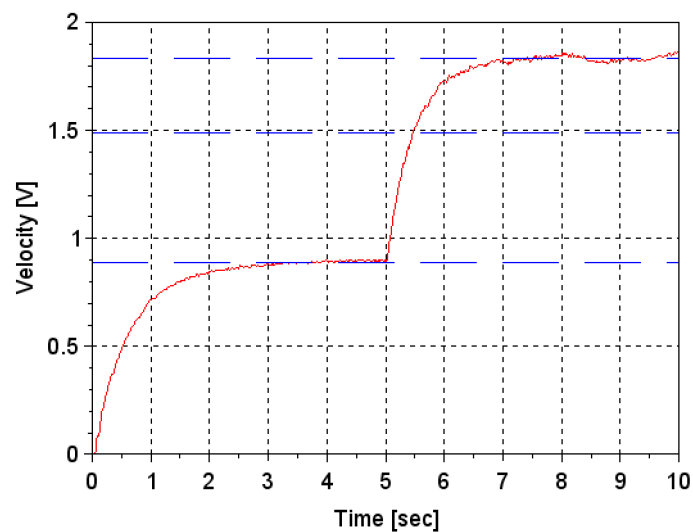


Fig. 3-2-1 1 [V], 2 [V] の 2 段階のステップ入力を入力したときのステップ応答

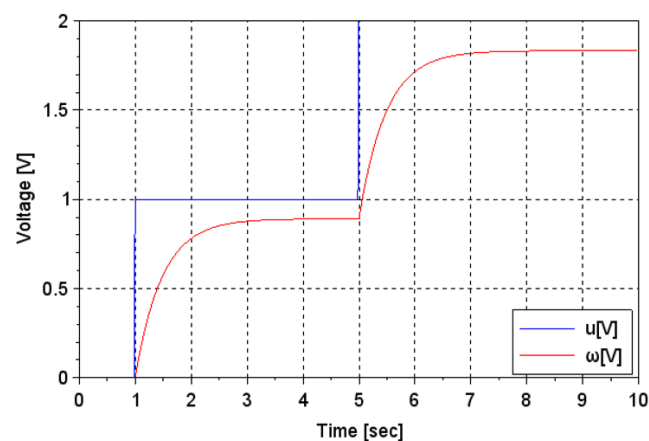


Fig. 3-2-1 1 [V], 2 [V] の 2 段階のステップ入力を入力したときのステップ応答のシミュレーション

### 3. 3. DC モータの P 制御実験

Table 3-3-1 にそれぞれの極を, Fig. 3-3-2, 3-3-3, 3-3-4 にそれぞれの実験結果を示す. シミュレーションよりも実機のほうが速く立ち上がった. また, いずれの結果でも定常偏差が顕著に見られた.

Table 3-3-1 P 制御のそれぞれの極

$Kp$	$p1$	$p2$
2	0	-6.0091292
4	0	-9.934925
8	0	-17.786517

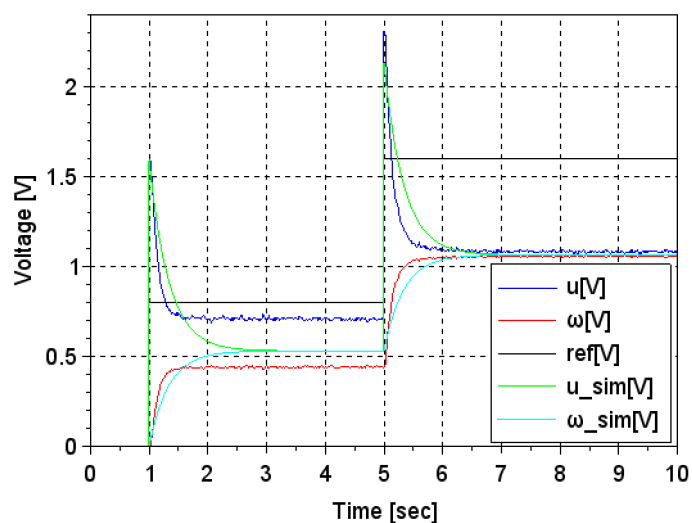


Fig. 3-3-2  $Kp=2$ ,  $Ki=0$  の実機とシミュレーション結果

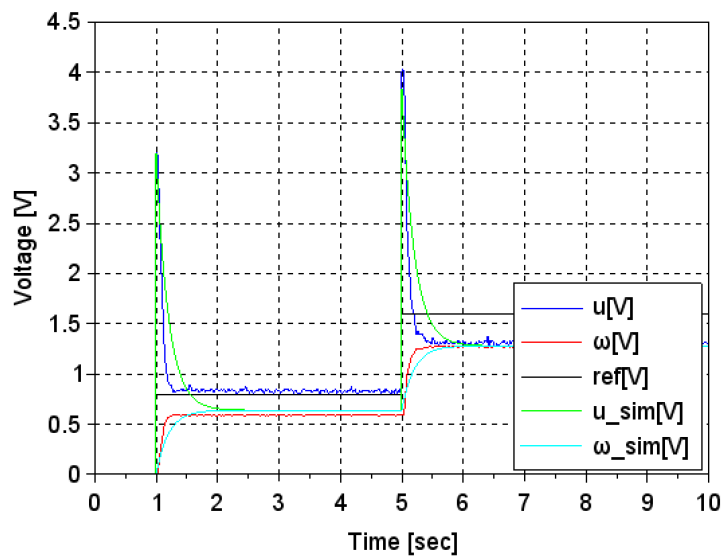


Fig. 3-3-3  $Kp=4$ ,  $Ki=0$  の実機とシミュレーション結果

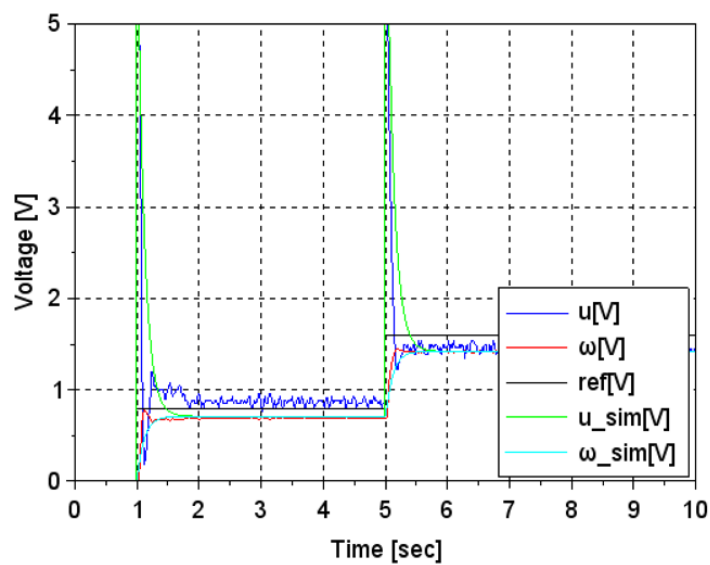


Fig. 3-3-4  $Kp=8$ ,  $Ki=0$  の実機とシミュレーション結果

### 3. 4. DC モータの I 制御実験

Table 3-4-1 にそれぞれの極を, Fig. 3-4-2, 3-4-3, 3-4-4 にそれぞれの実験結果を示す.  $Ki$  が高くなるほど振動が速くなった. また, いずれの結果も P 制御のみのときよりも立ち上がりが遅く, また振動が収束しなかった.

Table 3-4-1 I 制御のそれぞれの極

$Ki$	$p1$	$p2$
2	$-1.0416667 + 1.6854455i$	$-1.0416667 - 1.6854455i$
4	$-1.0416667 + 2.601254i$	$-1.0416667 - 2.601254i$
8	$-1.0416667 + 3.8233642i$	$-1.0416667 - 3.8233642i$

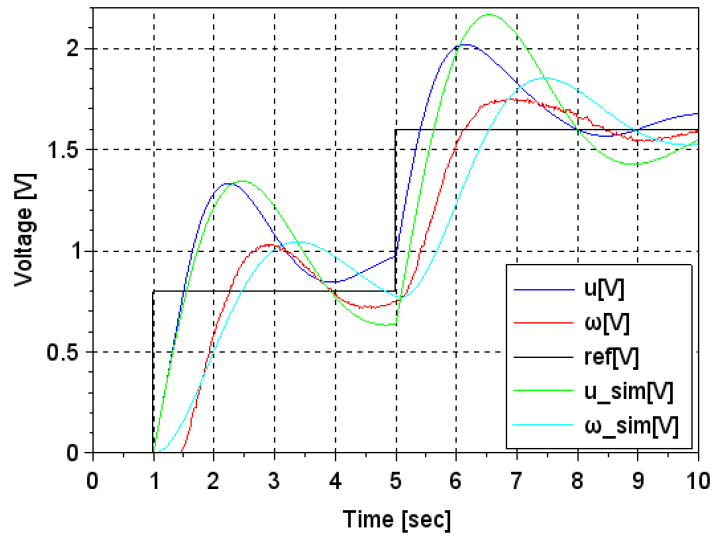


Fig. 3-4-2  $Kp=0$ ,  $Ki=2$  の実機とシミュレーション結果

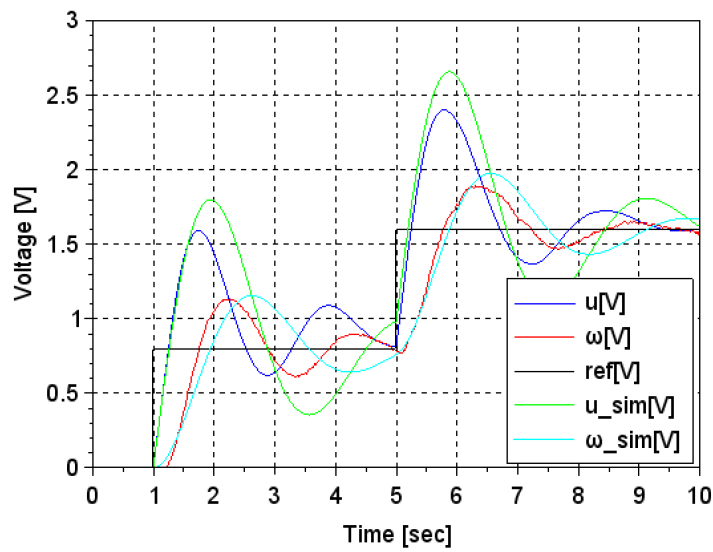


Fig. 3-4-3  $Kp=0$ ,  $Ki=4$  の実機とシミュレーション結果



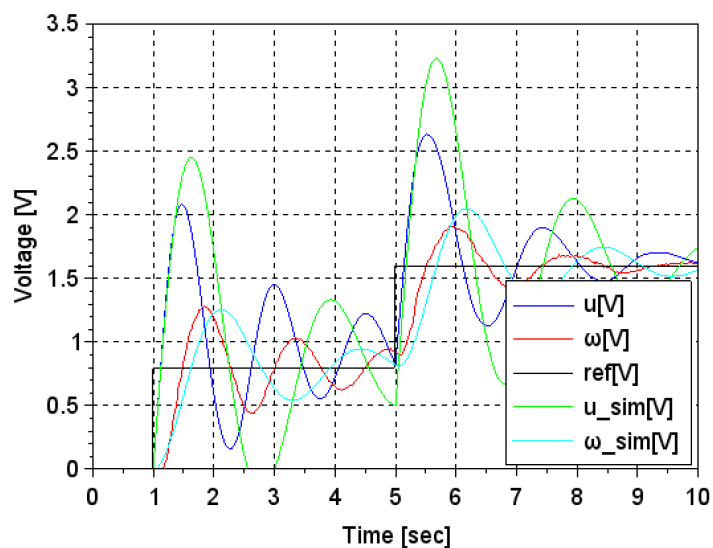


Fig. 3-4-4  $K_p=0$ ,  $K_i=8$  の実機とシミュレーション結果

### 3. 5. DC モータの PI 制御実験 極指定

Figure 3-5-1, 3-5-2, 3-5-3 にそれぞれの実験結果を示す。極が実数のときはあまり振動が見られず、対して極が複素数のときは I 制御のときのような振動が見られた。

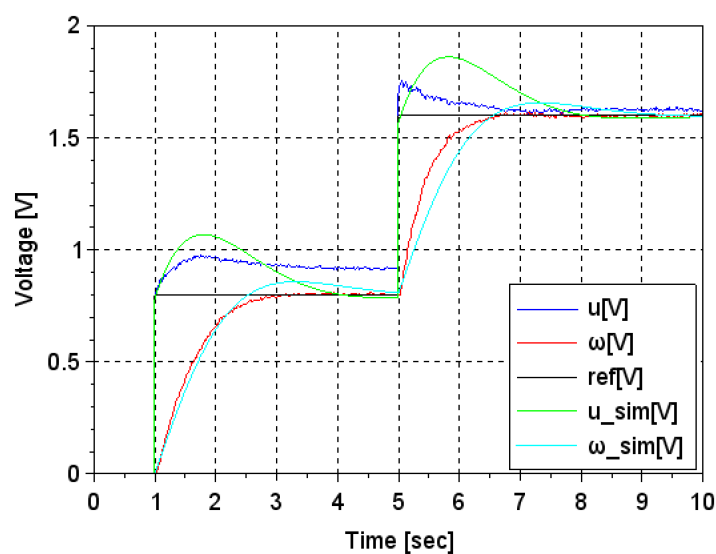


Fig. 3-5-1  $p1=p2=-2$  の実機とシミュレーション結果

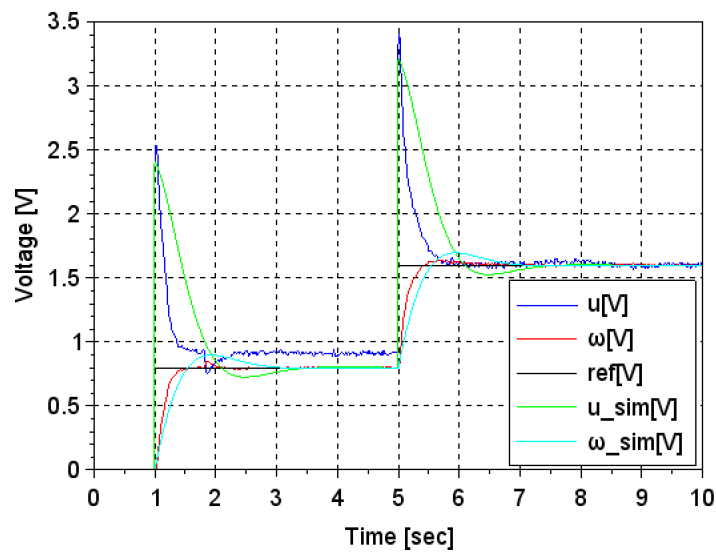


Fig. 3-5-2  $p1=p2=-4$  の実機とシミュレーション結果

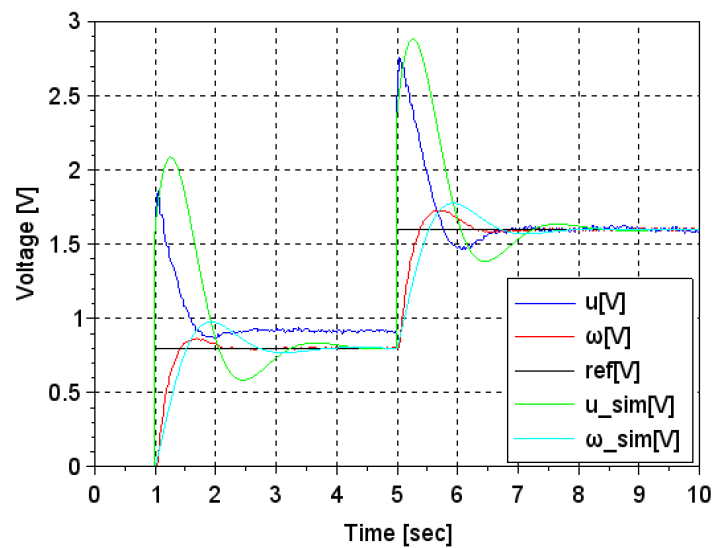


Fig. 3-5-3  $p1=-3+3j$  と  $p2=-3-3j$  の実機とシミュレーション結果

### 3. 6. DC モータの PI 制御実験 固有振動数指定・減衰比固定

Table 3-6-1 にそれぞれの極を, Fig. 3-6-2, 3-6-3, 3-6-4 にそれぞれの実験結果を示す.  $\omega n$  が大きいほど立ち上がりが速かった. また,  $\omega n=1$  では固有振動数が不足し十分に指令値に追従させることができなかった.

Table 3-6-1 固有振動数指定  $\omega n = 1, 3, 5$ , 減衰比  $\zeta = 0.7$  のそれぞれの極

$\omega n$	$p1$	$p2$
1	$-0.7 + 0.7141428i$	$-0.7 - 0.7141428i$
3	$-2.1 + 2.1424285i$	$-2.1 - 2.1424285i$
5	$-3.5 + 3.5707142i$	$-3.5 - 3.5707142i$

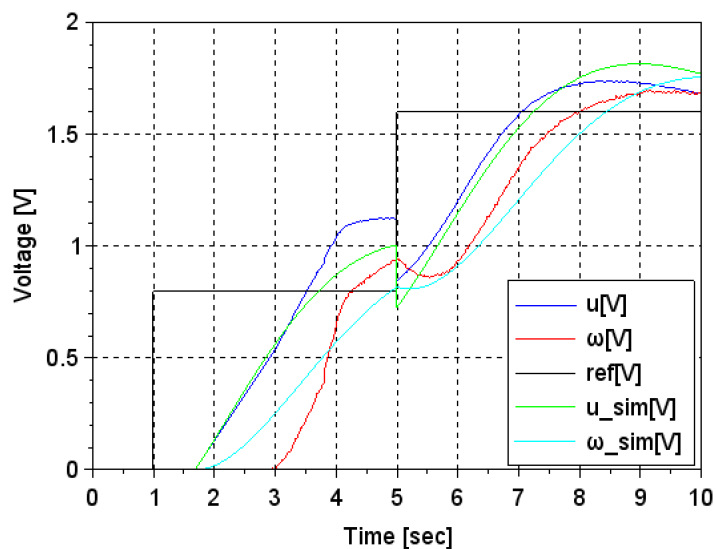


Fig. 3-6-2  $\omega n = 1$ ,  $\zeta = 0.7$  の実機とシミュレーション結果

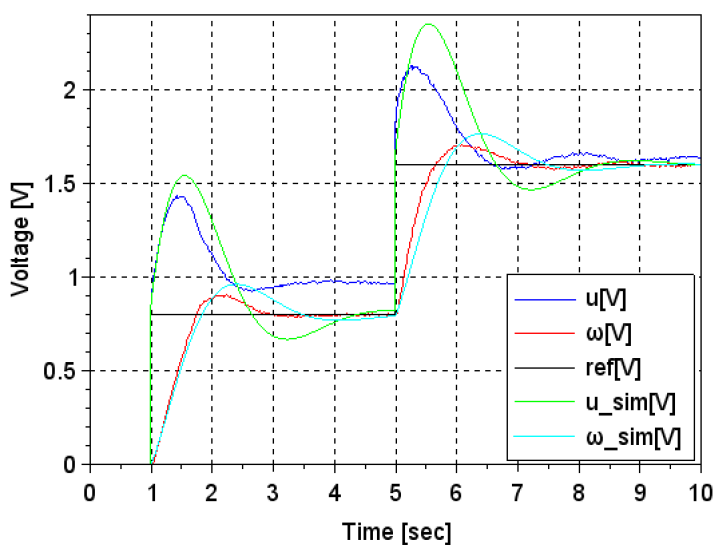


Fig. 3-6-3  $\omega n = 3$ ,  $\zeta = 0.7$  の実機とシミュレーション結果

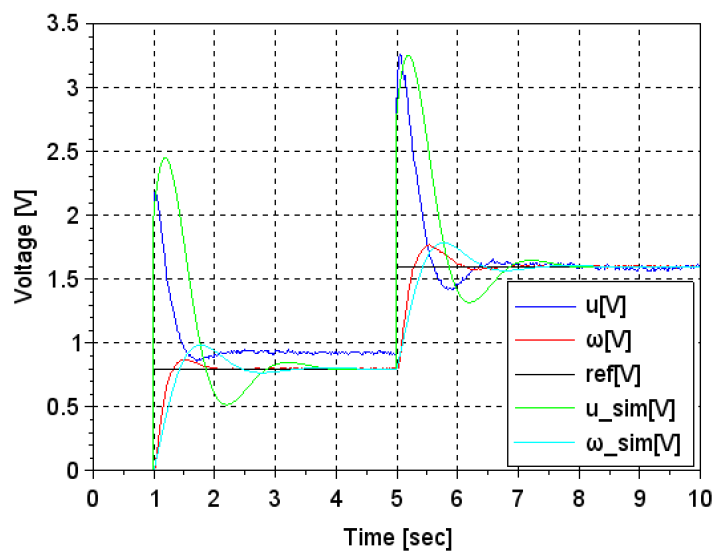


Fig. 3-6-4  $\omega_n=5$ ,  $\zeta=0.7$  の実機とシミュレーション結果

### 3. 7. DC モータの PI 制御実験 固有振動数固定・減衰比指定

Table 3-7-1 にそれぞれの極を, Fig. 3-7-2, 3-7-3, 3-7-4 にそれぞれの実験結果を示す. 減衰比が大きいほど振動が小さくなった. また  $\zeta=1.2$  のときは, 極が実数になり, 実験結果でも振動があまり見られない結果となった.

Table 3-7-1 減衰比指定  $\zeta=0.3, 0.7, 1.2$ , 固有振動数  $\omega_n=3$  のそれぞれの極

$\zeta$	$p1$	$p2$
0.3	$-0.9 + 2.8618176i$	$-0.9 - 2.8618176i$
0.7	$-2.1 + 2.1424285i$	$-2.1 - 2.1424285i$
1.2	$-1.6100251$	$-5.5899749$

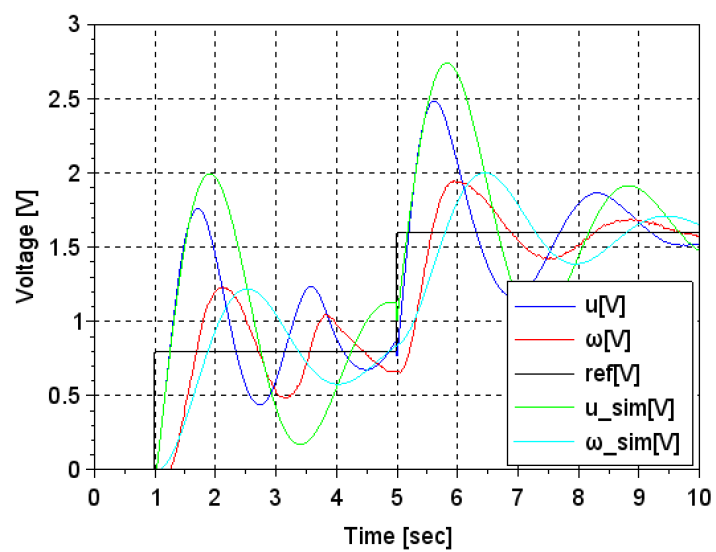


Fig. 3-7-2  $\omega n = 3$ ,  $\zeta = 0.3$  の実機とシミュレーション結果

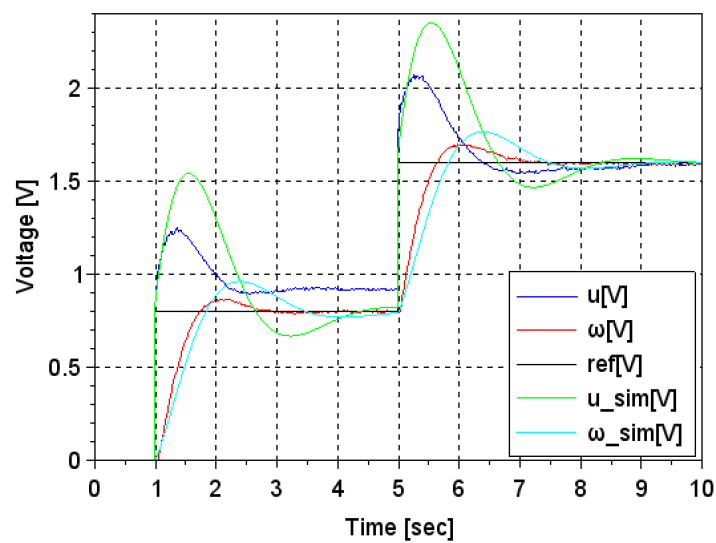


Fig. 3-7-3  $\omega n = 3$ ,  $\zeta = 0.7$  の実機とシミュレーション結果

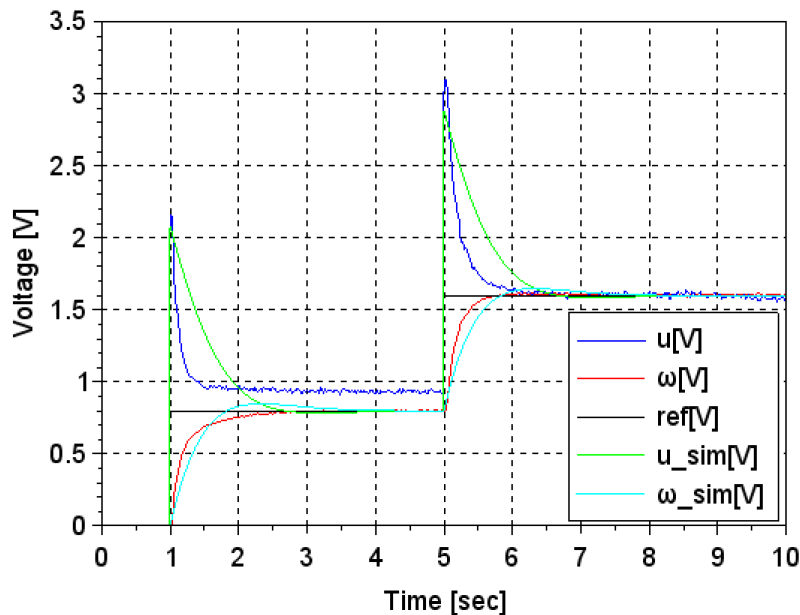


Fig. 3-7-4  $\omega n=3$ ,  $\zeta=1.2$  の実機とシミュレーション結果

## 4. 考察

### 4. 1. 実験 2.2, 2.3 のパラメータについての比較

どちらの実験でもゲイン定数  $K$  とオフセット電圧  $offset$  はほぼ同じ結果が得られた。これは、DC モーターの特性が線形的であり、入力電圧と回転速度の関係を比例関係で近似できることを示していると考ええる。

### 4. 2. P 制御, I 制御の制御効果

P 制御は、目標値と出力値の誤差に比例した制御入力を行うため、応答が速く、目標値の変化に素早く反応できたが、P 制御のみでは定常偏差が残ってしまった。

一方、I 制御は、目標値と出力値の誤差を積分した値に比例した制御入力を行うため、定常偏差をなくすことができた。しかし、応答が遅く、I 制御のみでは目標値の変化にゆっくりとしか反応できなかった。

これらから、P 制御には目標に素早く近づける効果、I 制御には定常偏差を減らす効果が主にあると考えられる。

### 4. 3. 極指定の PI 制御効果

極指定の PI 制御実験 (3.5) では、極が実数の場合と複素数の場合で応答が大きく異なった。極が実数の場合は振動が少なく、目標値に速やかに収束する応答を示した。一方、極が複素数の場合には、I 制御のみの場合と同様に振動が発生し、目標値への収束も遅くなった。このため、極の実部は収束の速さ、極の虚部は振動の大きさに関係すると考えられる。

#### 4. 4. 固有振動数指定, 減衰比指定の PI 制御効果についての考察

固有振動数指定・減衰比固定の PI 制御実験 (3.6) では, 固有振動数  $\omega_n$  が大きいほど立ち上がりが速く, 目標値への追従性能が向上することが確認された. また, 減衰比  $\zeta$  が大きいほど振動が小さくなり, 安定した応答が得られることが確認された.

このことから, 固有振動数は立ち上がりの速さ, 減衰比は振動をどれだけ抑制するかに管領すると考えられる.

#### 4. 5. PI 制御でどのような極, 固有振動数, 減衰比指定が望ましいかの考察

振動を抑え, 速やかな応答を達成するためには, 極を実数に設定することが望ましいと考える. これらの結果から, 応答速度を重視する場合は, 極の実部の絶対値を大きく, 安定した応答を重視する場合は曲の実部の絶対値を小さくするのが適切と考える.

ただし, モータへ指令できる電圧には限度がある. そのため, シミュレーションと実機の挙動を見ながら, モータへの指令電圧の範囲内, 今回の実験だと単三電池 3 本の直列である 4.5 [V] 以内に収まる極にする必要があると考える.

### 5. 結論

本実験では, Scilab/Xcos と Arduino を用いて DC モータの PI 制御による速度制御システムを構築した. DC モータの入力電圧と回転速度の関係は線形であり, 比例関係で近似できることを確認できた. P 制御は速応性, I 制御は定常偏差の除去に効果があり, PI 制御の設計には, 極, 減衰比, 固有振動数を適切に設定する必要があることがわかった.

### 6. 感想

今まではお気持ちロボティクスで PI ゲインをそれっぽく設定していたのが, これからはちゃんと PI 制御できそうです. がんばります.