DC サーボモータと制御系

1026-30-8137
11b 多田 拓生[*1]

2020 年 11 月 2 日

[*1] tada.takumi.34w@st.kyoto-u.ac.jp

電気電子工学実習報告書

1026-30-8137

11b 多田 拓生

実験日

2020/11/6

担当教員

伊藤陽介先生, 持山志宇先生

実験 1

1 目的

DC サーボモータの周波数応答の測定を元に伝達関数を同定する。ここで、制御対象としての DC サーボモータにはドライバやタコジェネレータ、ポテンショメータを制御対象として含む。周波数応答測定に基づく同定を通して動的システムの周波数特性に親しむ。

2 原理

DC サーボモータは図 1 のような等価回路で表現できる。$e(t)$ は電機子に誘起される逆起電力なので、印加される電圧 $v(t)$、電機子に流れる電流 $i(t)$、電機子の抵抗 R、インダクタンス L に対して次式が成立する。

$$v(t) = Ri(t) + L\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}i(t) + e(t) \tag{1}$$

また、電機子の回転速度を $\omega(t)$ とすると、比例定数を k_{E} として逆起電力に比例するので

$$e(t) = k_{\mathrm{E}}\omega(t) \tag{2}$$

が成立する。また電機子に作用する回転トルク $\tau(t)$ をすると、比例定数を k_{T} として電機子電流に比例するので

$$\tau(t) = k_{\mathrm{T}}i(t) \tag{3}$$

が成立する。

ここで、電機子の慣性モーメントを J、負荷トルクを τ_{L}、電機子の回転に関する粘性摩擦係数を D とすると運動方程式より

$$\tau(t) - \tau_{\mathrm{L}}(t) = J\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\omega(t) + D\omega(t) \tag{4}$$

が成立する。ここで、式 1、2、3、4 をそれぞれラプラス変換すると

$$V(s) = RI(s) + sLI(s) + E(s) \tag{5}$$

$$E(s) = k_{\mathrm{E}}\Omega(s) \tag{6}$$

$$T(s) = k_{\mathrm{T}}I(s) \tag{7}$$

$$T(s) - T_{\mathrm{L}}(s) = sJ\Omega(s) + D\Omega(s) \tag{8}$$

となる。よってこれらの式から $I(s)$、$E(s)$、$T(s)$ を消去し、また電気的時定数 $T_{\mathrm{E}} = L/R$、機械的時定数 $T_{\mathrm{M}} = JR/k_{\mathrm{E}}k_{\mathrm{T}}$ を用いて近似すると

$$\Omega(s) = \frac{1/k_{\mathrm{E}}}{(1+sT_{\mathrm{M}})(1+sT_{\mathrm{E}})} \tag{9}$$

が得られる。したがって印加電圧と回転速度の間の伝達関数は近似的に二次遅れ系で表現できる。

ここで回転角 $\Theta(t)$ に対して

$$\Omega(s) = s\Theta(s) \tag{10}$$

が成立するはずなので、式 9 より、

$$\Theta(s) = \frac{1/k_{\mathrm{E}}}{s(1+sT_{\mathrm{M}})(1+sT_{\mathrm{E}})}V(s) \tag{11}$$

が成立するので、したがって電機子印加電圧と回転角の間の伝達関数 $P(s)$ は

$$P(s) = \frac{1/k_{\mathrm{E}}}{s(1+sT_{\mathrm{M}})(1+sT_{\mathrm{E}})} \tag{12}$$

とわかる。

今回の制御では検出器をしてタコジェネレータとポテンショメータを用いる。タコジェネレータの外部端子間に生じる起電力を検出信号 y_{d} として測定するので、回転速度と検出信号には

$$y_{\mathrm{d}}(t) = k'_{\mathrm{E}}\omega(t) \tag{13}$$

が成立する。k'_{E} は逆起電力定数である。また、ポテンショメータは回転角に応じて変化する可変抵抗なので、k_{P} を定数としてポテンショメータの検出信号は

$$y_{\mathrm{d}}(t) = k_{\mathrm{P}}\theta(t) \tag{14}$$

となる。

今回の制御では、速度制御ではタコジェネレータ、位置制御ではポテンショメータからフィードバックすることでそれぞれ図 2、図 3 のようなブロック線図で表現できるフィードバック制御を行う。制御対象には DC サーボモータ、ドライバ、操作器が含まれるので、速度制御に対応する制御対象の伝達関数を $P_{\mathrm{V}}(s)$、位置制御に対応する制御対象の伝達関数を $P(s)$ とするとそれぞれ

$$P(s) = \frac{k_{\mathrm{A}}k'_{\mathrm{E}}/k_{\mathrm{E}}}{(1+sT_{\mathrm{M}})(1+sT_{\mathrm{E}})} \tag{15}$$

$$P(s) = \frac{k_{\mathrm{A}}k_{\mathrm{P}}/k_{\mathrm{E}}}{s(1+sT_{\mathrm{M}})(1+sT_{\mathrm{E}})} \tag{16}$$

となる。

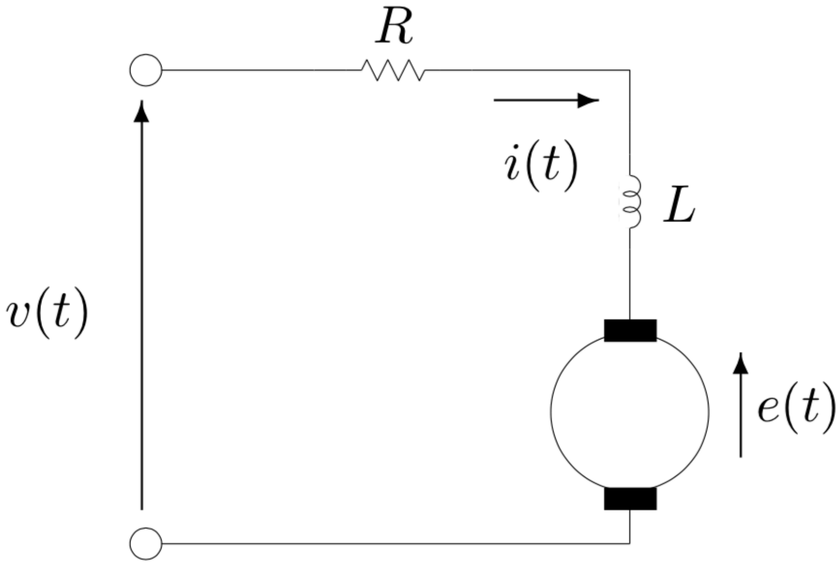

図 1　DC サーボモータの等価回路

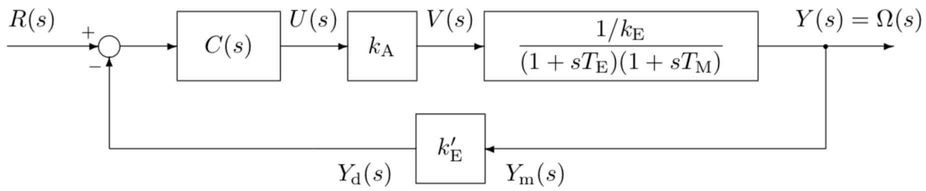

図 2　速度制御のブロック線図

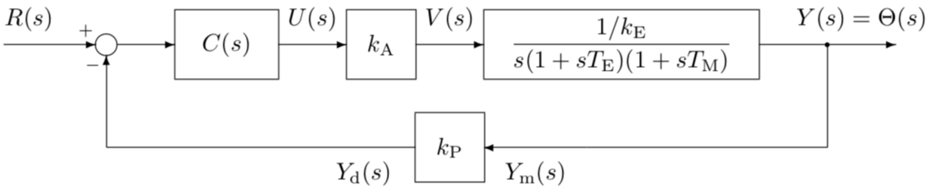

図 3　位置制御のブロック線図

3　方法

今回用いた器具を以下に示す。

- ファンクションジェネレータ：Z94575
- オシロスコープ：IWATSU DS-5110 B
- 電源 (小)：KENWOOD PR18-1.2A
- 電源 (大)：TEXIO PS40-10A (Z000323513)
- ブレッドボード：5 番
- DC サーボ：5 番
- サーボモータドライバ：MS100T05
- ポテンショメータ：J40S
- カップリング：アサ電子工業製
- コンバータ：SUW3 0515

今実験に用いた装置構成図を図 4 および図 5 に示す。図 4 は速度制御を行うとき、図 5 は位置制御を行うときに用いた。

まず、速度制御を行った時の伝達関数 $P_V(s)$ の同定について説明する。

図 4 のファンクションジェネレータの出力電圧を制御対象への入力、タコジェネレータの出力電圧を制御対象からの出力とみなして、入力周波数を 0.2Hz から 100Hz の間で 20 点ほど変化させながら電圧をオシロスコープで計測した。ここで、制御対象の入力、出力とみなしたところはそれぞれ図 2 における $C(s)$ への入力信号、$Y_{\mathrm{d}}(s)$ とみなせる。

次に、位置制御を行った時の伝達関数 $P(s)$ の同定について説明する。

図 3 のファンクションジェネレータの出力電圧を制御対象への入力、ポテンショメータの出力電圧を制御対象からの出力とみなして、入力周波数を 2Hz から 20Hz の間で 6 点ほど変化させながら電圧をオシロスコープで計測した。ここで、制御対象の入力、出力とみなしたところはそれぞれ図 3 における $C(s)$ への入力信号、$Y_{\mathrm{d}}(s)$ とみなせる。

それぞれの計測結果からボード線図を描き、伝達関数を同定する。

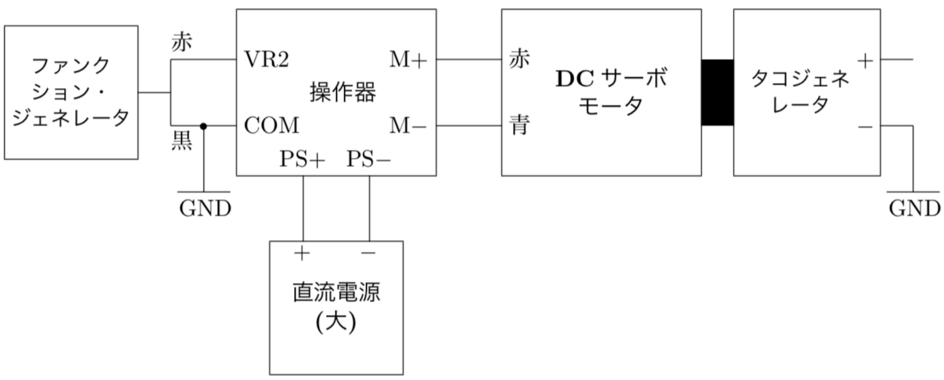

図 4　実験 1-1 の装置構成図

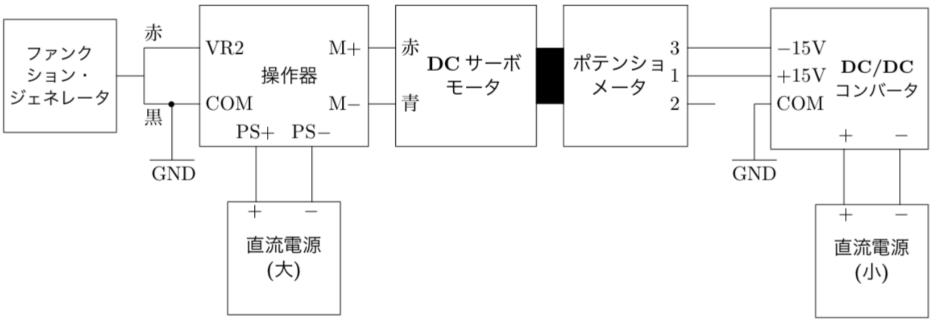

図 5　実験 1-2 の装置構成図

4　実験結果

位置制御によって得られたデータは、式 15、16 を元に得られる関係式

$$P(s) = \frac{k_{\mathrm{P}}}{sk'_{\mathrm{E}}} P_{\mathrm{V}}(s) \tag{17}$$

から得られる変換式

$$|P_{\mathrm{V}}| = \frac{\omega k'_{\mathrm{E}}}{k_{\mathrm{P}}} |P| \tag{18}$$

$$\arg P_{\mathrm{V}} = \arg P + 90 \tag{19}$$

を用いて位相制御の計測値を速度制御のものと同様に扱えるように変換し、ボード線図を描いたものを図 6 に示す。

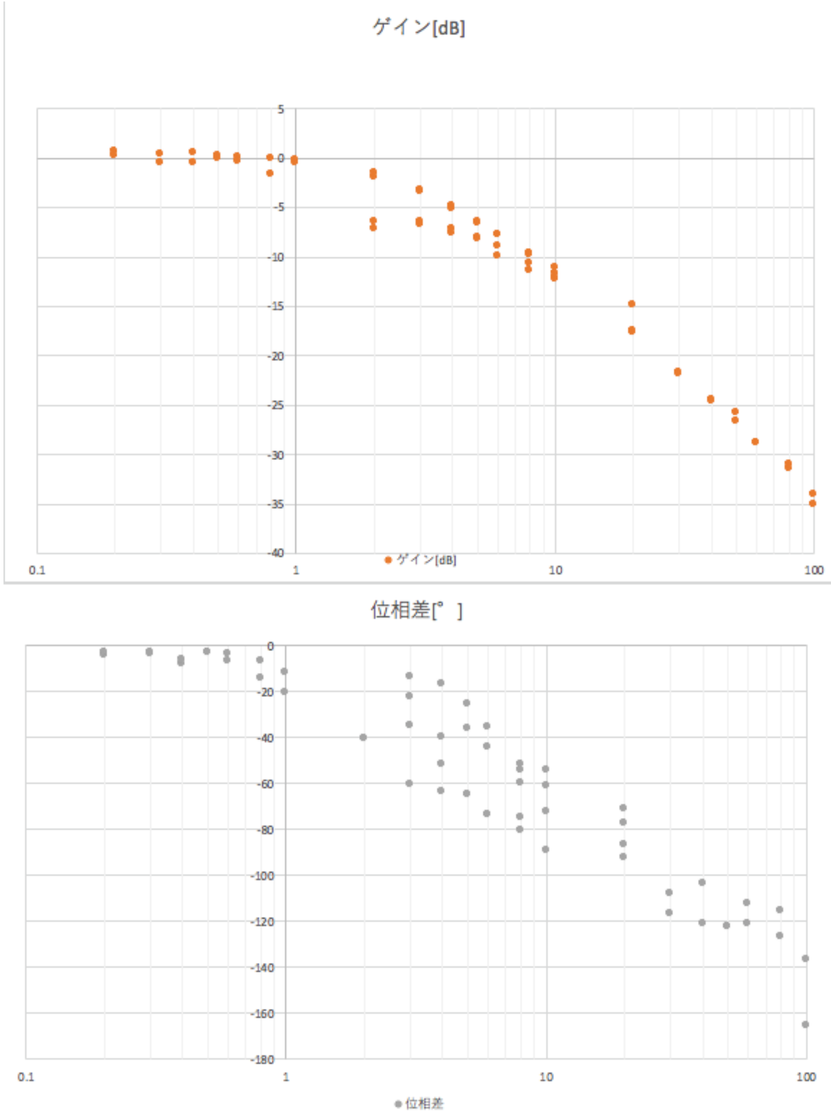

図 6　制御対象のボード線図

5　考察

まず、1 回転ポテンショメータに対する k_{p} の値を考える。ポテンショメータの両端子にはそれぞれ-15V と 15V の電源を接続した。1 回転ポテンショメータは 1 回転する間に-15V から 15V へ変化するので、式 13 を参考に考えると k_{p} の値は $30/2\pi$ になると考えた。

次に逆起電力定数 k'_{E} の算出法について考える。

1 回転ポテンショメータを DC サーボモータに取り付けた状態で、DC サーボモータ・ドライバに一定の直流電圧を与えて DC サーボモータを定速回転させ、この状態でのタコジェネレータ及びポテンショメータの出力電圧波形を観測することによっても測定できる。その原理は、式 15、16 を参照して考えると、与えられた状況下では $P(s)$ と $P_{\mathrm{V}}(s)$ の差異が生じるのはそれぞれの定数 k_{A}、k'_{E} によってだけである。したがってそれぞれの出力電圧波形の比をとると $k_{\mathrm{A}}/k'_{\mathrm{E}}$ が求まるので、そこに k_{A} を代入すれば k'_{E} が求まる。

最後に、K、T_{E}、T_{M} の同定を行った。まず、ボード線図の理論的な概形を考える。

式 15 を参考に理論的なボード線図の概形を描いたものが、図 7 に示す。これは、一次遅れのボード線図を元に考えた。これを元に、図 6 の特にゲインの方を使いそれぞれに値を同定した。実際の同定には、グラフを印刷して線を引いて求めた。求めた値はそれぞれ

$$K = 1.03 \tag{20}$$

$$T_{\mathrm{M}} = 0.0909 \tag{21}$$

$$T_{\mathrm{E}} = 0.00132 \tag{22}$$

となった。実際この値を用いて求めたグラフを実測値を元にしたグラフに重ねると図 9、**??**のようになる。高周波部分は補助線が引きづらかったため、特に T_{E} の値の推定が難しく、その結果がゲイン図の高周波域での実測値とのズレが出たのだと考えた。

以後は値が必要になった時はこの値を用いることにする。

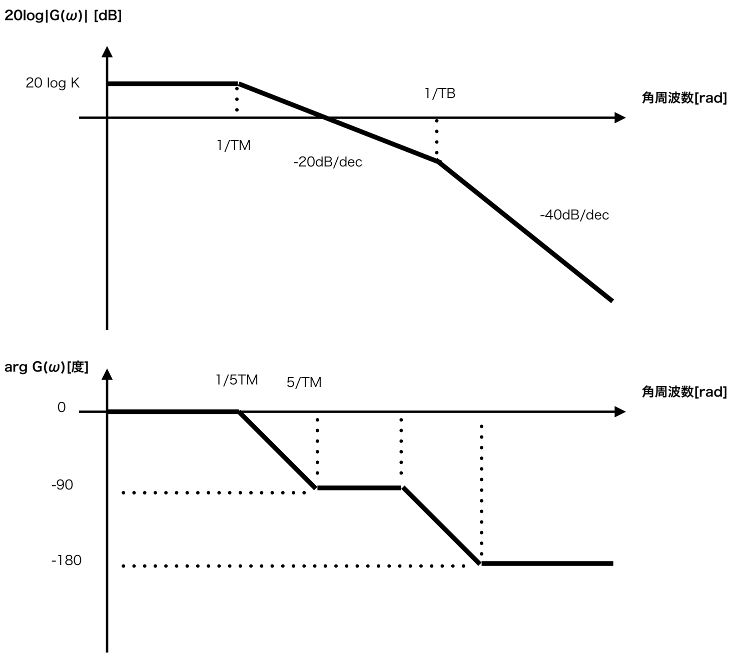

図 7　理論的なボード線図

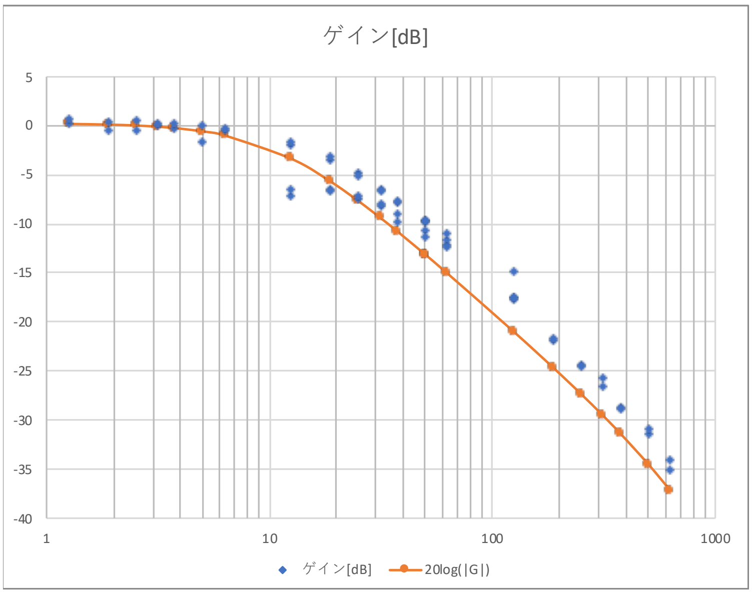

図 8　推測値と実測値

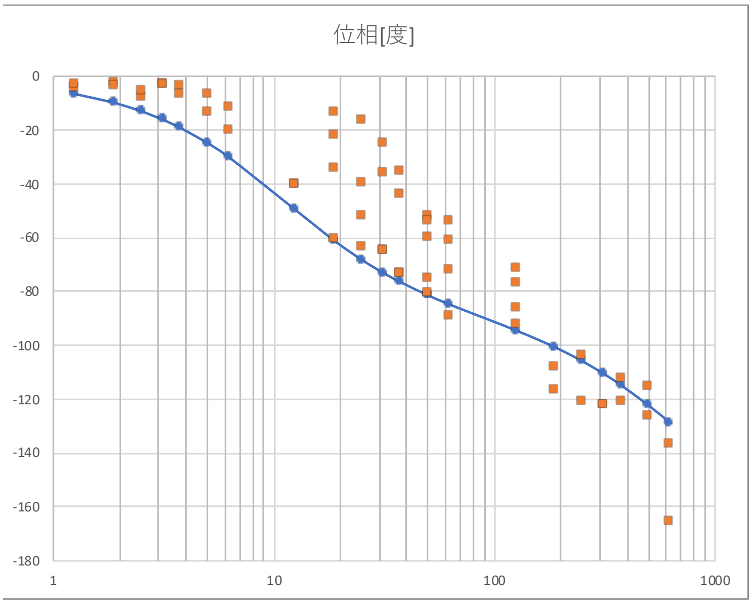

図 9　推測値と実測値 2

実験 2

6　目的

制御用アナログ回路を作成しそれを各制御に用いて測定する。その結果を測定し、安定性や定常偏差、応答について議論する。

7　原理

今実験では、制御用アナログ回路は図 10 および 11 に示す構成のものを使用する。
まず、図 10 において、

$$v_{\mathrm{out}}(t) = K_{\mathrm{C}}(v_{\mathrm{ref}}(t) - v_{\mathrm{in}}(t)) \tag{23}$$

の関係が成り立つ。この式を導出する。
オペアンプの + での電圧を V_+、-での電圧を V_- とすると、

$$\frac{v_{\mathrm{in}} - V_-}{R_1} = \frac{V_- - v_{\mathrm{out}}}{R_2} \tag{24}$$

$$V_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{\mathrm{ref}} \tag{25}$$

が成立し、仮想短絡のことを考えると $V_+ = V_-$ が成立するので、

$$v_{\mathrm{out}}(t) = \frac{R_2}{R_1}(v_{\mathrm{ref}}(t) - v_{\mathrm{in}}(t)) \tag{26}$$

が得られる。したがって $K_C = \frac{R_2}{R_1}$ が得られる。
次に、図 11 において

$$C(s) = K_C \frac{\alpha(1 + sT)}{1 + s\alpha T} \tag{27}$$

が成立する。
この式を導出する。まず回路の左側は 10 と同じなので、図中の境目では

$$V_X = -\frac{R_2}{R_1}(V_{\mathrm{in}} - V_{\mathrm{ref}}) \tag{28}$$

となる。オペアンプの仮想短絡を考えると、

$$\frac{V_X}{\frac{R_3}{1+sC_1}} = \frac{V_{\mathrm{out}}}{\frac{R_4}{1+sC_2}} \tag{29}$$

となるので、これを変形して

$$C(s) = \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} \frac{1 + sC_1 R_3}{1 + sC_2 R_4} = \frac{C_2 R_2}{C_1 R_1} \frac{\frac{C_2 R_4}{C_1 R_3}(1 + sC_1 R_3)}{1 + s\frac{C_2 R_4}{C_1 R_3} C_1 R_3} \tag{30}$$

したがって

$$K_C = \frac{C_2 R_4}{C_1 R_3} \tag{31}$$

$$\alpha = \frac{C_2 R_4}{C_1 R_3} \tag{32}$$

$$T = C_1 R_3 \tag{33}$$

が算出できる。

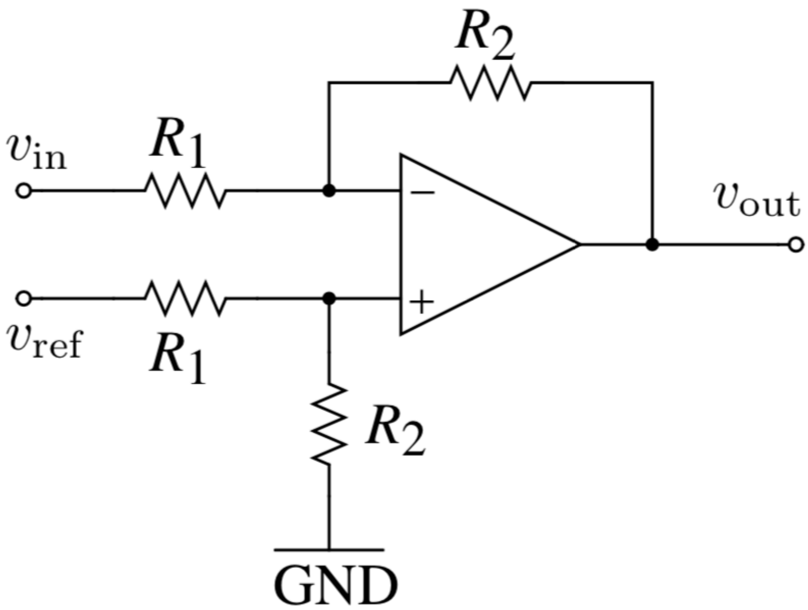

図 10　制御用アナログ回路 (a)

8　実験

9　結果

10　考察

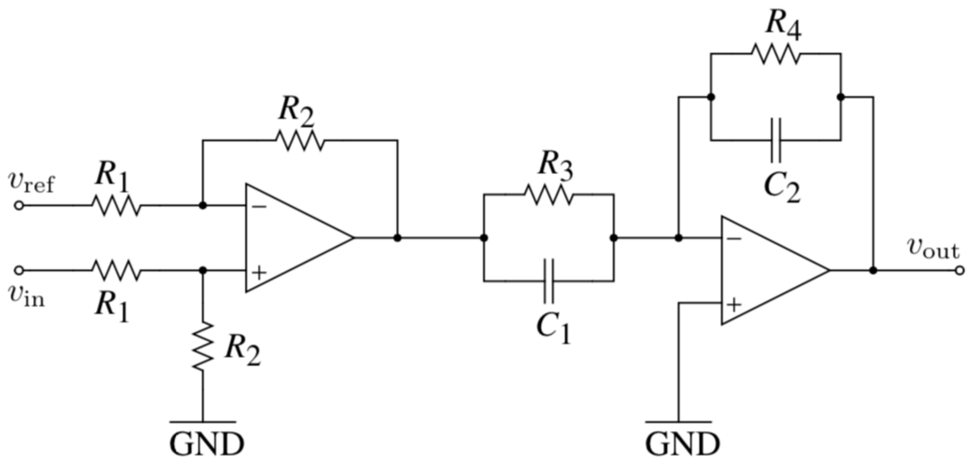

図 11　制御用アナログ回路 (b)

実験 3

11　目的

12　実験

13　実験結果

14　考察

15　課題

参考文献

[1] 電気電子工学実習テキスト. 2020.