

1.2 直流モータ制御回路の試作実験

1. 目的

本実験では、供試モータとして与えられた小型直流モータの制御系設計を実施し、実際に補償回路を実装し制御性能を実測することを目的とする。

2. 理論

制御系設計は位相補償法を採用することとし、フィードバックループは電流フィードバックによるトルク制御と速度フィードバックによる速度制御を併用した実用レベルに近い制御を実施する。

2.1 直流モータの数式モデル化

制御系を設計するにあたり対象のモデル化を行う。以下にモデル化で使用する諸記号を定義する。

L ; 電機子インダクタンス [H]	R_a ; 電機子抵抗 [Ω]
i ; 電機子電流 [A]	e ; 電機子電圧 [V]
K_e ; 逆起電力定数 [Vsec/rad]	K_t ; トルク定数 [Nm/A]
J_m ; 電機子慣性モーメント [kgm ²]	w ; 回転角速度 [rad/sec]
J_l ; 負荷慣性モーメント [kgm ²]	B_l ; 粘性摩擦係数 [Nm / rad/sec]
t_f ; クーロン摩擦トルク [Nm]	

このとき、モータ電気回路については次式

$$L \frac{di}{dt} + R_a i = e - K_e w \quad (1)$$

が成立し、また、機械的な運動については

$$(J_m + J_l) \frac{dw}{dt} + B_l w = K_t i - t_f \quad (2)$$

なる方程式が成立する。

式(1), (2)においてモータ電気回路のインダクタンス L と粘性摩擦係数 B_l は微小とみなし無視することにして、ブロック線図化すると図1のようになる。

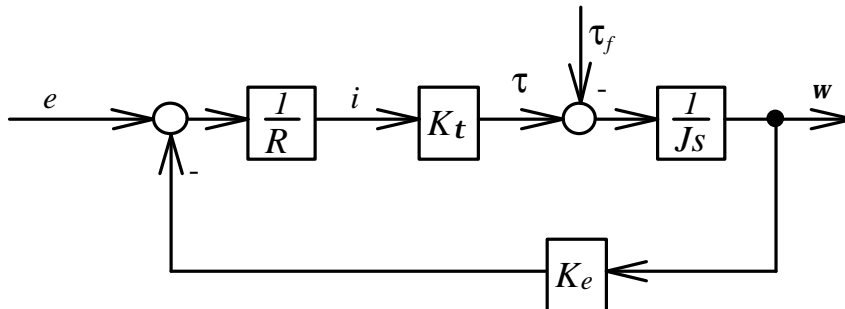


図1 . 直流モータのブロック線図

このブロック線図の電機子電圧 e からモータ回転速度 w [rad/sec]までの伝達関数は次のようになる。

$$\frac{w(s)}{e(s)} = \frac{K}{1+T_m s} \quad (3)$$

$$\therefore T_m = \frac{(J_m + J_l)R_a}{K_t K_e}, \quad K = \frac{1}{K_e}$$

2.2 電流フィードバックによるトルク制御

モータ電流の検出には渦流センサなど幾つかの手段がある。ここでは、回路に微小抵抗 R_i を挿入して検出を行う。電流指令値を e_i 、電流アンプの伝達関数を G_i 、電流帰還率を K_i とした電流制御系のブロック線図を図2に示す。

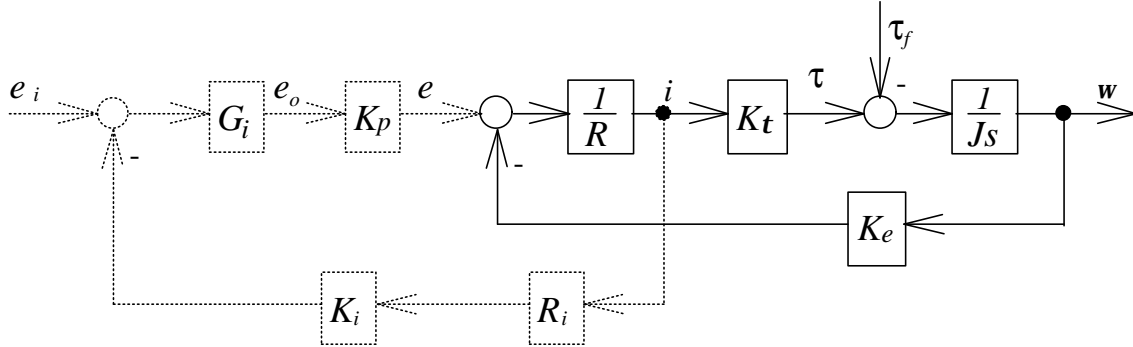


図2. 電流制御系のブロック線図

電流アンプの構成

電流アンプとして以下の2通りの伝達特性をもつものを考える。

a) 一次遅れアンプ

$$G_i = \frac{K_{11}}{1+Ts} \quad (4)$$

b) 積分アンプ

$$G_i = \frac{K_{11}(1+Ts)}{s} \quad (5)$$

2.2.1 一次遅れアンプを使用する場合

図2のブロック線図より、電流指令値 e_i から回転速度 w [rad/sec]までの伝達関数は次のようになる。

$$\frac{w(s)}{e_i(s)} = \frac{K_{11}K_pK_t}{JRTs^2 + (JR + JK_{11}K_pK_iR_i + K_tK_eT)s + K_tK_e} \quad (6)$$

$$\therefore J = J_m + J_l, \quad R = R_a + R_i$$

また、モータを拘束した状態での電流制御系のブロック線図を図3に示す。

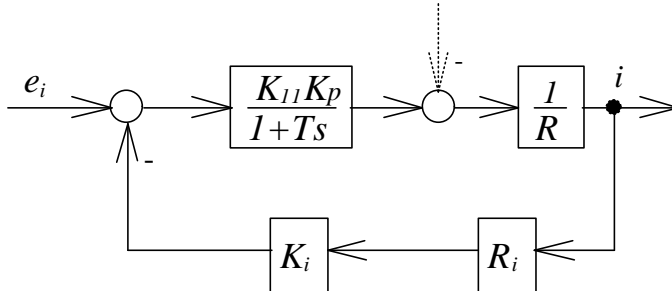


図3. 一次遅れアンプによる電流制御系ブロック線図

図3のブロック線図より、電流指令値 e_i から電機子電流 i までの伝達関数は次のようになる。

$$\frac{i(s)}{e_i(s)} = \frac{K_{11}K_p}{R + K_{11}K_pK_iR_i + RTs} \quad (7)$$

$$\because R = R_a + R_i$$

このとき、定常電流 i_s は式(8)となる。

$$i_s = \frac{K_{11}K_p}{R + K_{11}K_pK_iR_i} e_i \quad (8)$$

2.2.2 積分アンプを使用する場合

図2のブロック線図より、電流指令値 e_i から回転速度 w [rad/sec]までの伝達関数は次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{w(s)}{e_i(s)} &= \frac{K_{11}K_pK_t(1+Ts)}{s[(JR + JK_{11}K_pK_iR_iT)s + (JK_{11}K_pK_iR_i + K_tK_e)]} \\ &= \frac{K_{11}K_p(1+Ts)}{s} \cdot \frac{K'}{1+T_m's} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\because K' = \frac{K_t}{JK_{11}K_pK_iR_i + K_tK_e}, \quad T_m' = \frac{J(R + K_{11}K_pK_iR_iT)}{JK_{11}K_pK_iR_i + K_tK_e}$$

このとき $T = T_m'$ に選べば、指令値にたいして回転速度は積分特性を示すものとなる。また、モータを拘束した状態での電流制御系のブロック線図を図4に示す。

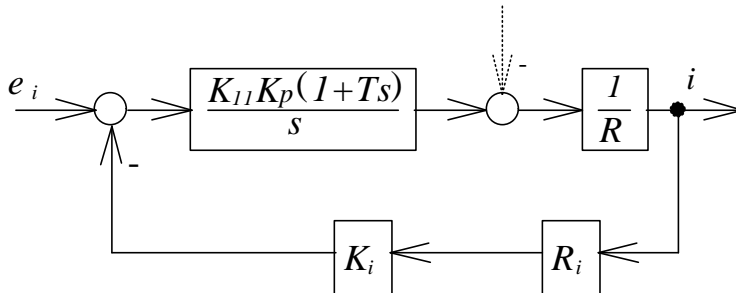


図4. 積分アンプによる電流制御系ブロック線図

図4のブロック線図より、電流指令値 e_i から電機子電流 i までの伝達関数は次のようになる。

$$\frac{i(s)}{e_i(s)} = \frac{K_{11}K_p(1+Ts)}{K_{11}K_pK_iR_i + (K_{11}K_pK_iR_iT + R)s} \quad (10)$$

$$\because R = R_a + R_i$$

このとき、定常電流 i_s は式(11)となる。

$$i_s = \frac{1}{K_i R_i} e_i \quad (11)$$

2.3 速度フィードバックによる速度制御

モータ速度の検出にはオプティカルエンコーダ（ロータリーエンコーダとも呼ぶ）など幾つかの手段がある。ここでは、一般によく使用されている速度発電機（タコジェネレータ）を使用する。速度指令値を e_w 、速度アンプの伝達関数を G_v 、タコジェネレータ定数を S_v とし、図2の電流制御ループの外側に速度フィードバックを施したブロック線図を図5に示す。

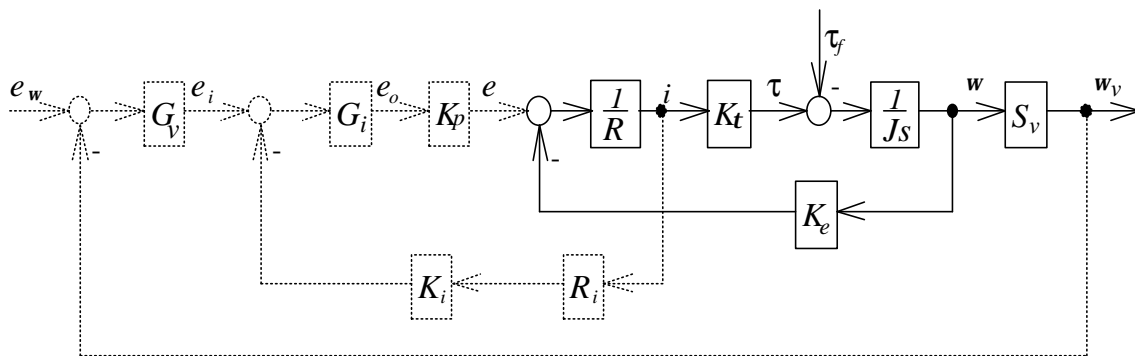


図5 . 速度制御系のブロック線図

速度アンプの構成

電流アンプに2通りの構成を採用しているため、速度アンプはそれぞれの場合で少し異なった構成になるが、どちらの場合もタコジェネレータの低域ノイズを抑制した遅相補償を行なう。詳細はアンプ設計で述べる。また、位相補償法については付録Bを参照して頂きたい。

3 . アンプ設計

ハードウェアの概略

実験に使用する供試モータは3 [V/krpm]の速度発電機を一体化したタイプの直流モータであり、定格は24[V]-20[W]である。更にパワーアンプ回路は図6に示すような高電流出力型(3 A)のパワーオペレーショナルアンプ(TCA365B)を2個使用した構成となっている。電流検出のために電機子に直列に検出抵抗 $R_i=0.2[\Omega]$ を挿入し、両端電圧を計測アンプにより取り出している。

以下の表1にアンプ設計で使用する諸定数を示す。

表1 . アンプ設計の諸定数

トルク定数	$K_t = 5.88 \times 10^{-2}$	[Nm/A]
逆起電力定数	$K_e = 5.825 \times 10^{-2}$	[Vsec/rad]
電機子抵抗	$R_a = 4$	[Ω]
電機子インダクタンス	$L = 4.4$	[mH]
電機子慣性モーメント	$J_m = 0.125 \times 10^{-4}$	[kgm ²]
タコジェネレータ定数	$S_v = 0.02865$	[V / rad/sec]
パワーアンプ利得	$K_p = 2$	
電流検出抵抗	$R_i = 0.2$	[Ω]

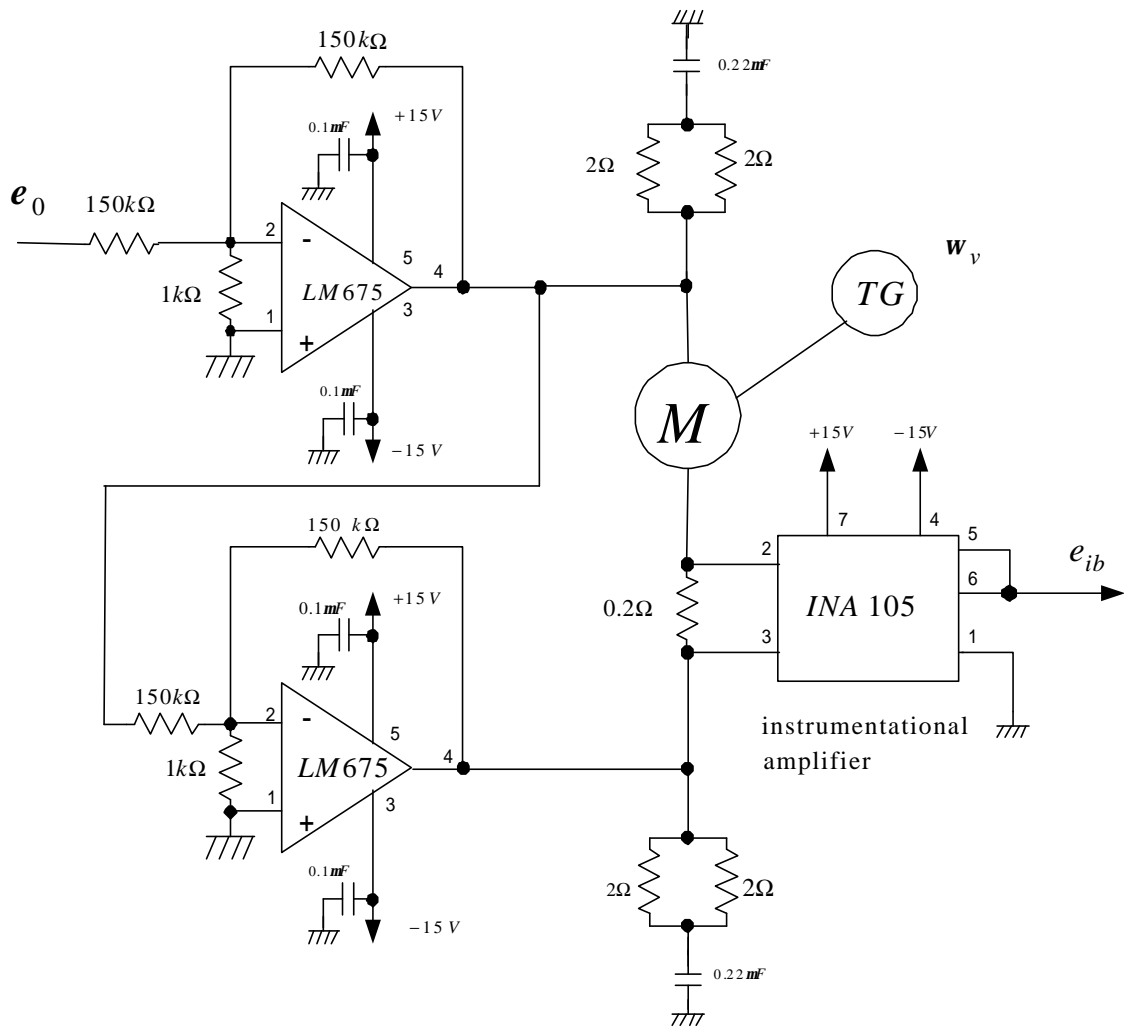


図6 . パワーアンプ回路

3.1 一次遅れ電流アンプ G_i の設計仕様

電流フィードバック信号は図6のパワー回路において計測アンプ(1NA105B)の出力 e_{ib} を使用する。以下に一次遅れ電流アンプ G_i の設計仕様を示す。

1. 電流指令値 $e_i=0.1[\text{Volt}]$ に対して定常電流 $i_s=0.060\sim 0.065[\text{A}]$ 程度を出力する。
2. 電流アンプのゲイン K_{I1} はオペアンプの実装精度を考慮して $K_{I1}=20\sim 30$ 程度とする。
3. 電流の立上りを速くする為に $T=0.01\sim 0.001$ 程度とする。

ここでは、設計仕様を考慮して、 $e_i=0.1[\text{Volt}]$ に対して $i_s=0.062[\text{A}]$ とし、 $K_{I1}=30, T=0.001$ と決めた場合について述べる。式(8)に諸定数を代入すると

$$0.062 = \frac{30 \times 2}{4.2 + 30 \times 2 \times K_i \times 0.2} \times 0.1 \quad (12)$$

となり、電流帰還率 $K_i=7.7$ を得る。したがって、一次遅れ電流アンプ G_i は次のようになる。

$$G_i = \frac{30}{1 + 0.001s} \quad (13)$$

以下の図7、図8に実装オペアンプ回路の一例を示すので参考にせよ。

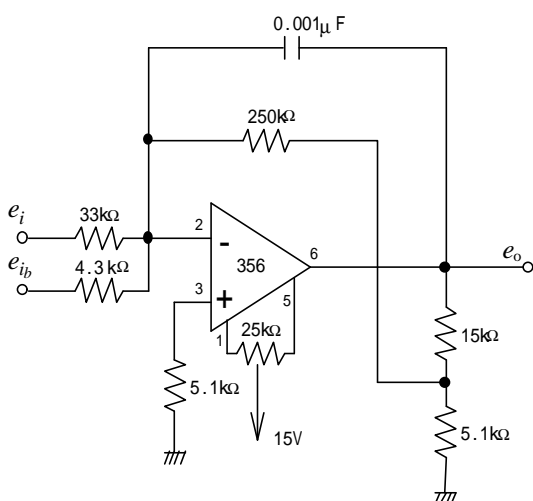


図7. 一次遅れ電流アンプ回路例

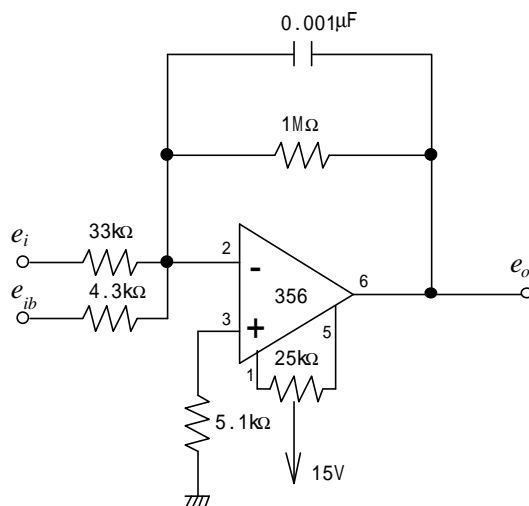


図8. 一次遅れ電流アンプ回路例

このとき、式(6)において s の2次の係数が T を含むことより1次の係数に比して十分小さくなるので無視することができる。したがって、電流指令値 e_i から回転速度 $w_v[\text{Volt}]$ までの伝達関数 G_o は、次のように簡単化できる。

$$G_o = \frac{w_v(s)}{e_i(s)} = \frac{K_{I1} K_p K_t S_v}{J R T s^2 + (J R + J K_{I1} K_p K_i R_i + K_t K_e T) s + K_t K_e} \cong \frac{K_o}{1 + T_r s} \quad (14)$$

$$\therefore K_o = \frac{K_{I1} K_p S_v}{K_e}, \quad T_r = \frac{J R + J K_{I1} K_p K_i R_i + K_t K_e T}{K_t K_e}$$

さて、式(14)に諸定数を代入することになるが、モータは無負荷で運転することは少ないので、ここでは最適負荷状態の $J=2J_m$ でモデル化すると

$$K_o = \frac{30 \times 2 \times 0.02865}{5.825 \times 10^{-2}} \cong 29.5 \quad (15)$$

$$T_r = \frac{0.25 \times 10^{-4} (4.2 + 30 \times 2 \times 7.7 \times 0.2) + 5.88 \times 10^{-2} \times 5.825 \times 10^{-2} \times 10^{-3}}{5.88 \times 10^{-2} \times 5.825 \times 10^{-2}} \cong 0.71 \quad (16)$$

が得られ、伝達関数 G_o は次式となる。

$$G_o = \frac{29.5}{1 + 0.71s} \quad (17)$$

3.2 速度アンプ G_v の設計仕様

速度フィードバック信号は図6のパワー回路において速度発電機の出力 w_v を使用する。以下に速度アンプ G_v の設計仕様を示す。

1. 速度アンプ G_v は定常外乱を排除するために積分特性を含んだ次の構成とする。

$$G_v = \frac{K_2(1 + T_r s)}{s} \cdot \frac{1 + T_2 s}{1 + T_1 s} \quad (18)$$

2. 速度制御系の一巡伝達関数 $G_v G_o$ の交叉周波数 ω_m を $\omega_m = 100 \sim 150$ [rad/sec]程度とする。
3. 速度制御系の位相余有 q_m は $q_m = 60 \sim 65$ [deg]程度とする。

交叉周波数 ω_m を満たすように全体のゲインを $K_o K_2 = 240$ とする。また、 $K_o = 29.5$ ゆえ速度アンプのゲイン K_2 は $K_2 = 8.14$ となる。ここで位相補償法により $q_m = 60$ [deg]の補償器を求めると交叉周波数 $\omega_m = 138$ [rad/sec]となり、次の速度アンプ G_v を得る。(付録B参照)

$$G_v = \frac{8.14(1 + 0.71s)}{s} \cdot \frac{1 + s/240}{1 + s/80} \quad (19)$$

以下の図9に実装オペアンプ回路の一例を示すので参考にせよ。

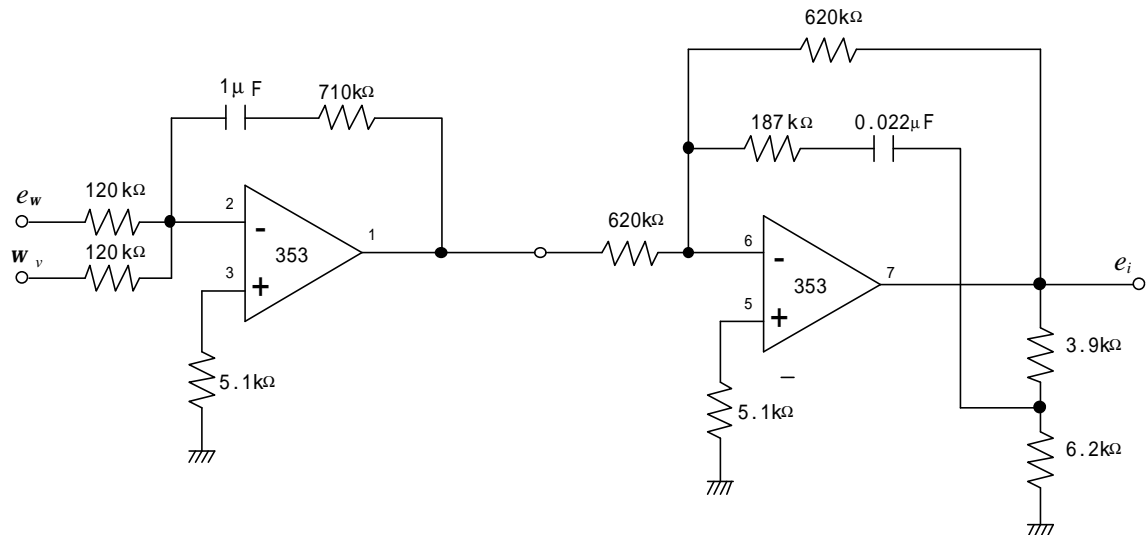


図9 . 積分器を含んだ遅相補償速度アンプ回路例

3.3 積分電流アンプ G_i の設計仕様

電流信号は3.1節と同一の e_{ib} を使用するものとする。また、以下に積分電流アンプ G_i の設計仕様を示す。

1. 電流指令値 $e_i=0.1$ [Volt]に対して定常電流 $i_s=0.5$ [A]を出力。
2. 電流アンプのゲイン K_{II} はオペアンプの実装精度を考慮して $K_{II}=20\sim30$ 程度とする。
3. 電流から速度の特性を積分特性に近似する為に T_m' とする。

ここで、電流アンプのゲイン K_{II} は一次遅れ電流アンプと同様に $K_{II}=30$ とする。また、設計仕様1より式(11)は

$$0.5 = \frac{0.1}{K_i \times 0.2} \quad (20)$$

となり、電流帰還率 $K_i=1$ を得る。このとき、電流指令値 e_i から回転速度 w_r [Volt]までの伝達関数 G_o は、式(9)より次のようになる。

$$\begin{aligned} G_o &= \frac{w_r(s)}{e_i(s)} = \frac{K_{II} K_p K_t (1+T_s) S_v}{s [(JR + JK_{II} K_p K_i R_i T) s + (JK_{II} K_p K_i R_i + K_t K_e)]} \\ &= \frac{K_o (1+T_s)}{s} \cdot \frac{1}{1+T_m' s} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\therefore K_o = \frac{K_{II} K_p K_t S_v}{JK_{II} K_p K_i R_i + K_t K_e}, \quad T_m' = \frac{J(R + K_{II} K_p K_i R_i T)}{JK_{II} K_p K_i R_i + K_t K_e}$$

ここで、 K_o を求める為に諸定数を代入すると次式が得られる。

$$K_o = \frac{30 \times 2 \times 5.88 \times 10^{-2} \times 0.02865}{0.25 \times 10^{-4} \times 30 \times 2 \times 0.2 + 5.88 \times 10^{-2} \times 5.825 \times 10^{-2}} \cong 27.13 \quad (22)$$

また、設計仕様3に基づいて式(21)の T_m' を求めることにする(ただし、負荷については3.1節と同様に $J=2J_m$ を使用する)。また、式(21)の T_m' に関する次式

$$T_m' = \frac{0.25 \times 10^{-4} (4.2 + 30 \times 2 \times 0.2 \times T_m')}{0.25 \times 10^{-4} \times 30 \times 2 \times 0.2 + 5.88 \times 10^{-2} \times 5.825 \times 10^{-2}} \quad (23)$$

を解いて $T_m'=0.031$ を得る。したがって、 $T=0.031$ と選ぶと積分電流アンプ G_i は次のようになる。

$$G_i = \frac{30(1+0.031s)}{s} \quad (24)$$

以下の図10に実装回路の一例を示すので参考にせよ。また、このとき、式(21)の伝達関数 G_o は次の積分特性を有する。

$$G_o = \frac{27.13}{s} \quad (25)$$

3.4 速度アンプ G_v の設計仕様

速度信号は3.2節と同様に速度発電機の出力 w_r を使用する。また、以下に速度アンプ G_v の設計仕様を示す。

1. 速度アンプ G_v は位相補償を実施するために次の構成とする。

$$G_v = \frac{K_2(1+T_2s)}{1+T_1s} \quad (26)$$

2. 速度制御系の一巡伝達関数 $G_v G_o$ の交叉周波数 w_m を $w_m=100\sim150$ [rad/sec]程度とする。
3. 速度制御系の位相余有 q_m は $q_m=60\sim65$ [deg]程度とする。

交叉周波数 w_m を満たすように全体のゲインを $K_o K_2=240$ とする。また、 $K_o=27.13$ ゆえ速度アンプのゲイン K_2 は $K_2=8.85$ となる。ここで位相補償法により $q_m=60$ [deg]の補償器を求めると次の速度アンプ G_v を得る。

$$G_v = \frac{8.85(1+s/240)}{1+s/80} \quad (27)$$

以下の図11に実装オペアンプ回路の一例を示すので参考にせよ。

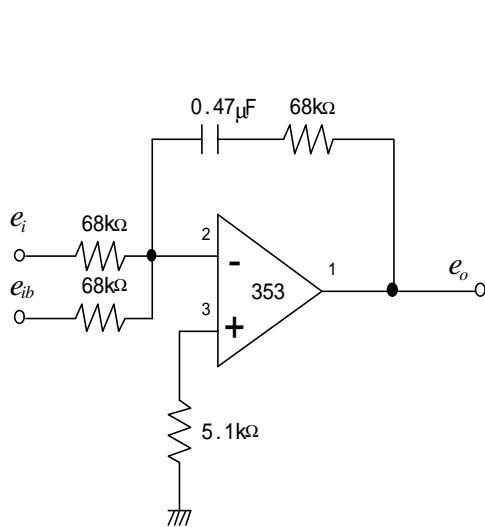


図 1 0 . 積分電流アンプ回路例

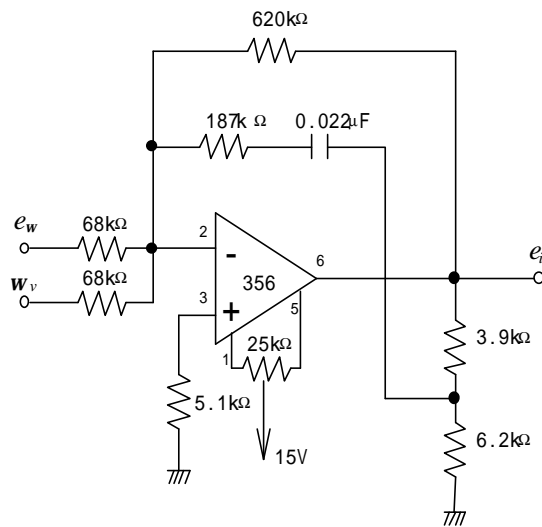


図 1 1 . 遅相補償速度アンプ回路例

4 . 実験事項

- 1 . 電流アンプ G_i を設計試作し、設計仕様 1 を満たすか確認せよ。
- 2 . 速度アンプ G_v を設計試作し、制御性能を確認する為にステップ応答を実測せよ。

5 . 報告事項

電流フィードバックによるトルク制御を行わず速度フィードバックによる速度制御のみ実施する場合を考える。

- 5 . 1 速度制御系のブロック線図を示せ。
ただし、速度アンプを G_v 、パワーアンプゲインを K_p とせよ。
- 5 . 2 パワーアンプ入力 e_o から回転速度 w_v までの伝達関数 G_o を求めよ。
ただし、慣性モーメント J については $J = 2J_m$ を用いること。
- 5 . 3 速度アンプ G_v の設計仕様は式(18)構成とし、
 $w_m = 100 \sim 150$ [rad/sec], $K_o K_2 = 200$, $q_m = 60$ [deg] (Aグループ)
 $q_m = 65$ [deg] (Bグループ) 程度で設計せよ。
ただし、 $K_o = K K_p S_v$ である。
- 5 . 4 設計した速度アンプ G_v の回路構成を示せ。

付録 A

本実験において使用したオペアンプ回路について説明する。本実験では2つのタイプの反転増幅回路を使用している。以下にそれらの回路構成を示す。

反転増幅回路 (タイプ1)

図A - 1 に示す回路の入出力関係の導出には幾つかの方法がある。ここでは簡単に求めることにする。まず e_m を仮想グランドとみなし

$$i_1 + i_2 = 0$$

$$\therefore i_1 = \frac{e_i}{Z_i}, \quad i_2 = \frac{e_o}{Z_f} \quad (\text{A-1})$$

より

$$e_o = G e_i$$

$$\therefore G = -\frac{Z_f}{Z_i} \quad (\text{A-2})$$

となる。

反転増幅回路 (タイプ2)

図A - 2 に示す回路も同様にして

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

$$\therefore i_1 = \frac{e_i}{Z_1}, \quad i_3 = \frac{e_o}{Z_f} \quad (\text{A-3})$$

$$i_2 = \frac{e_o}{Z_3 + \frac{Z_2 Z_4}{Z_2 + Z_4}} \cdot \frac{Z_2 Z_4}{Z_2 + Z_4} \cdot \frac{1}{Z_2} = \frac{e_o}{Z_r} \quad (\text{A-4})$$

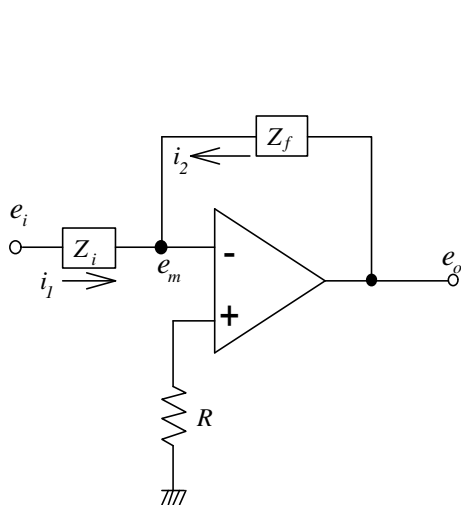
$$\therefore Z_r = Z_2 + Z_3 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_4}$$

より

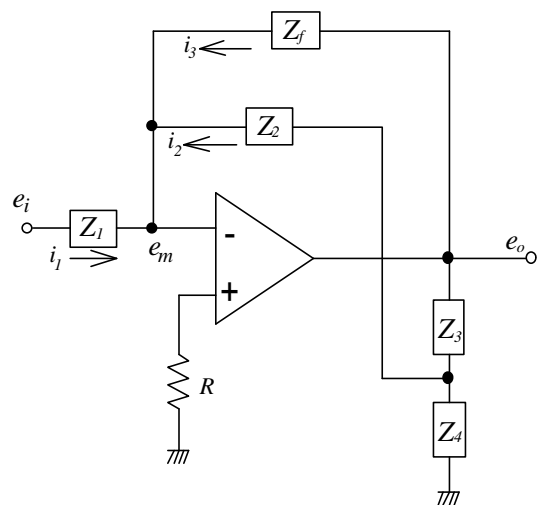
$$e_o = G e_i$$

$$\therefore G = -\frac{Z_r Z_f}{Z_1 (Z_r + Z_f)} \quad (\text{A-5})$$

となる。



図A - 1 反転増幅回路 (タイプ1)



図A - 2 反転増幅回路 (タイプ2)

次に、実際の素子を使用した回路伝達関数を求める。まず、タイプ1の回路については以下の図A - 3、図A - 4のそれぞれについて伝達関数 G を求める。

一次遅れ回路（図A - 3）について

図A - 1の反転増幅回路（タイプ1）において

$$Z_i = R_i, \quad Z_f = \frac{\frac{R_f}{sC}}{\frac{1}{sC} + R_f} \quad (\text{A-6})$$

とおくと、図A - 3に示す回路の伝達関数 G は次式で与えられる。

$$G = -\frac{K_{11}}{1+Ts} \quad (\text{A-7})$$

$\because K_{11} = R_f/R_i, \quad T = CR_f$

積分回路（図A - 4）について

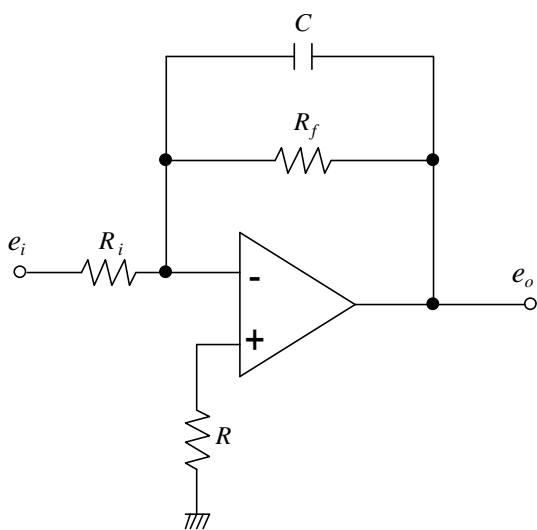
また、同様に

$$Z_i = R_i, \quad Z_f = \frac{1}{sC} + R_f \quad (\text{A-8})$$

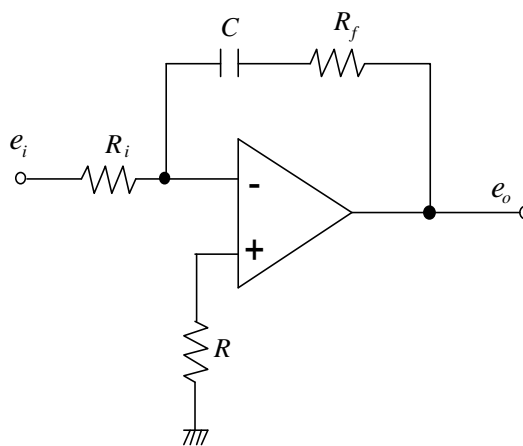
とおくと、図A - 4に示す回路の伝達関数 G は次式で与えられる。

$$G = -\frac{K_{11}(1+Ts)}{s} \quad (\text{A-9})$$

$\because K_{11} = 1/CR_i, \quad T = CR_f$



図A - 3 一次遅れ回路（タイプ1）



図A - 4 積分回路（タイプ1）

さらに、タイプ2の回路については以下の図A - 5、図A - 6のそれぞれについて伝達関数Gを求める。

一次遅れ回路(図A - 5)について

図A - 2の反転増幅回路(タイプ2)において

$$Z_1 = R_1, \quad Z_2 = R_2, \quad Z_3 = R_3, \quad Z_4 = R_4, \quad Z_f = \frac{1}{sC} \quad (\text{A-10})$$

とおくと、図A - 5に示す回路の伝達関数Gは次式で与えられる。

$$G = -\frac{K_{11}}{1+Ts} \quad (\text{A-11})$$

$$\therefore K_{11} = R_f/R_1, \quad T = CR_f, \quad R_r = R_2 + R_3 + \frac{R_2R_3}{R_4}$$

遅相補償回路(図A - 6)について

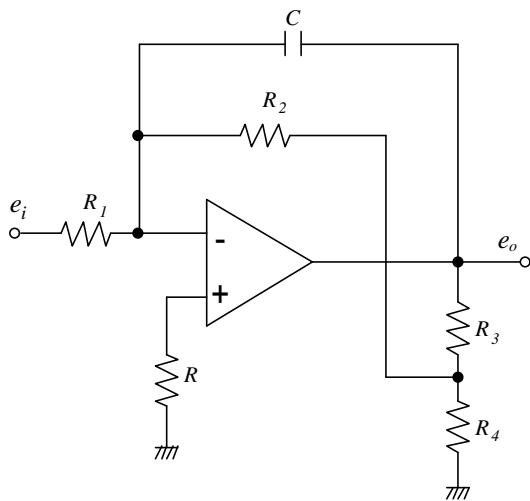
また、同様に

$$Z_1 = R_1, \quad Z_2 = R_2 + \frac{1}{sC}, \quad Z_3 = R_3, \quad Z_4 = R_4, \quad Z_f = R_f \quad (\text{A-12})$$

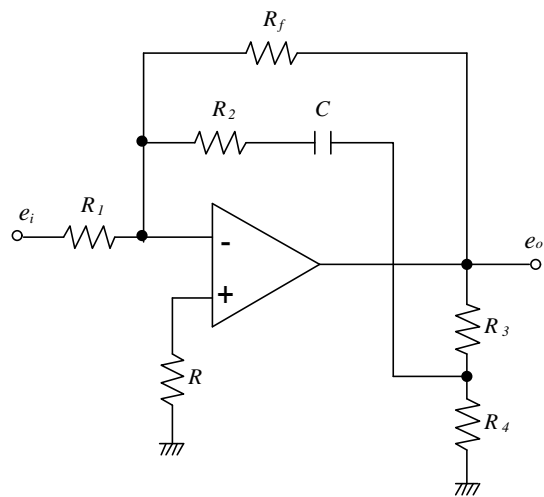
とおくと、図A - 6に示す回路の伝達関数Gは次式で与えられる。

$$G = \frac{K_{11}(1+T_2s)}{1+T_1s} \quad (\text{A-13})$$

$$\therefore K_{11} = \frac{R_f}{R_1}, \quad T_1 = C \cdot \frac{(R_2 + R_3 + R_f)R_4 + R_2R_3}{R_3 + R_4}, \quad T_2 = C \cdot \frac{(R_2 + R_3)R_4 + R_2R_3}{R_3 + R_4}$$



図A - 5 一次遅れ回路(タイプ2)



図A - 6 遅相補償回路(タイプ2)

付録 B

次の図 B-1 のような直結フィードバック系において、制御対象 G_o の位相補償を行なう為に補償要素 G_c として、次の伝達関数

$$G_c = \frac{1+Ts}{1+aTs} \tag{B-1}$$

を考える。式 (B-1) において $a < 1$ の場合進相要素、 $a > 1$ の場合遅相要素となる。

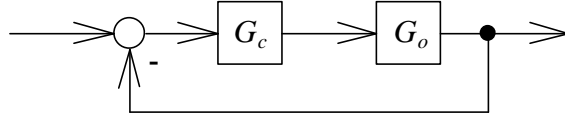


図 B-1 直結フィードバック系

ここでは、進相要素のボード線図について述べる。進相要素のボード線図は一般に図 B-2 に示すような形になる。

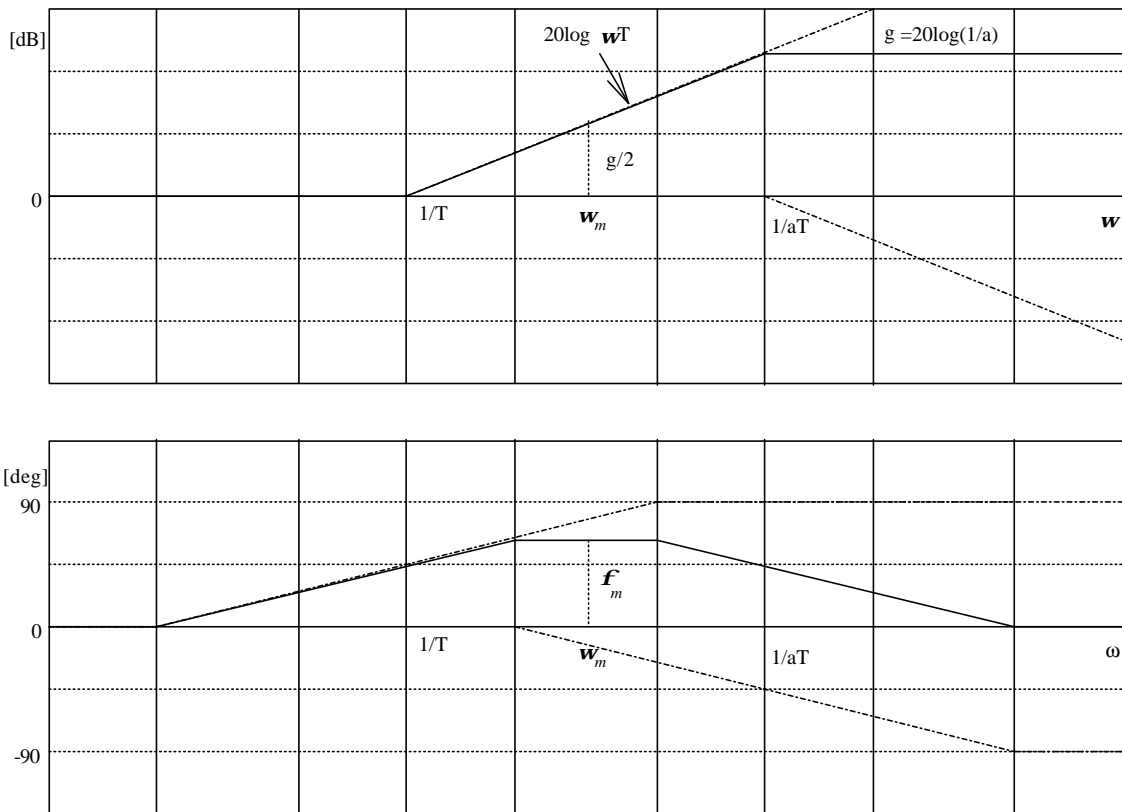


図 B-2 進相要素のボード線図

ボード線図より、 $g/2$ を与える角周波数 w_m が最大進み位相 f_m を与える。したがって、次式

$$\frac{g}{2} = 10 \log(1/a) = 20 \log wT \tag{B-2}$$

より、つぎの角周波数 w_m を得る。

$$w_m = \frac{1}{\sqrt{a} T} \tag{B-3}$$

また、最大進み位相 f_m は

$$G_c(j\omega) = \frac{1 + a\omega^2 T^2 + j(1-a)\omega T}{1 + (a\omega T)^2} \quad (\text{B-4})$$

より

$$\mathbf{f}_m = \tan^{-1} \frac{(1-a)\omega T}{1 + a\omega^2 T^2} \Big|_{\omega = \omega_m} = \tan^{-1} \frac{1-a}{2\sqrt{a}} \quad (\text{B-5})$$

となる。更に式(B-3)と式(B-5)から次の2つの式

$$T = \frac{1}{\sqrt{a} \omega_m} \quad (\text{B-6})$$

$$\sin \mathbf{f}_m = \frac{1-a}{1+a} \quad (\text{B-7})$$

を得る。

具体的に補償要素を求める手順を以下に示す。

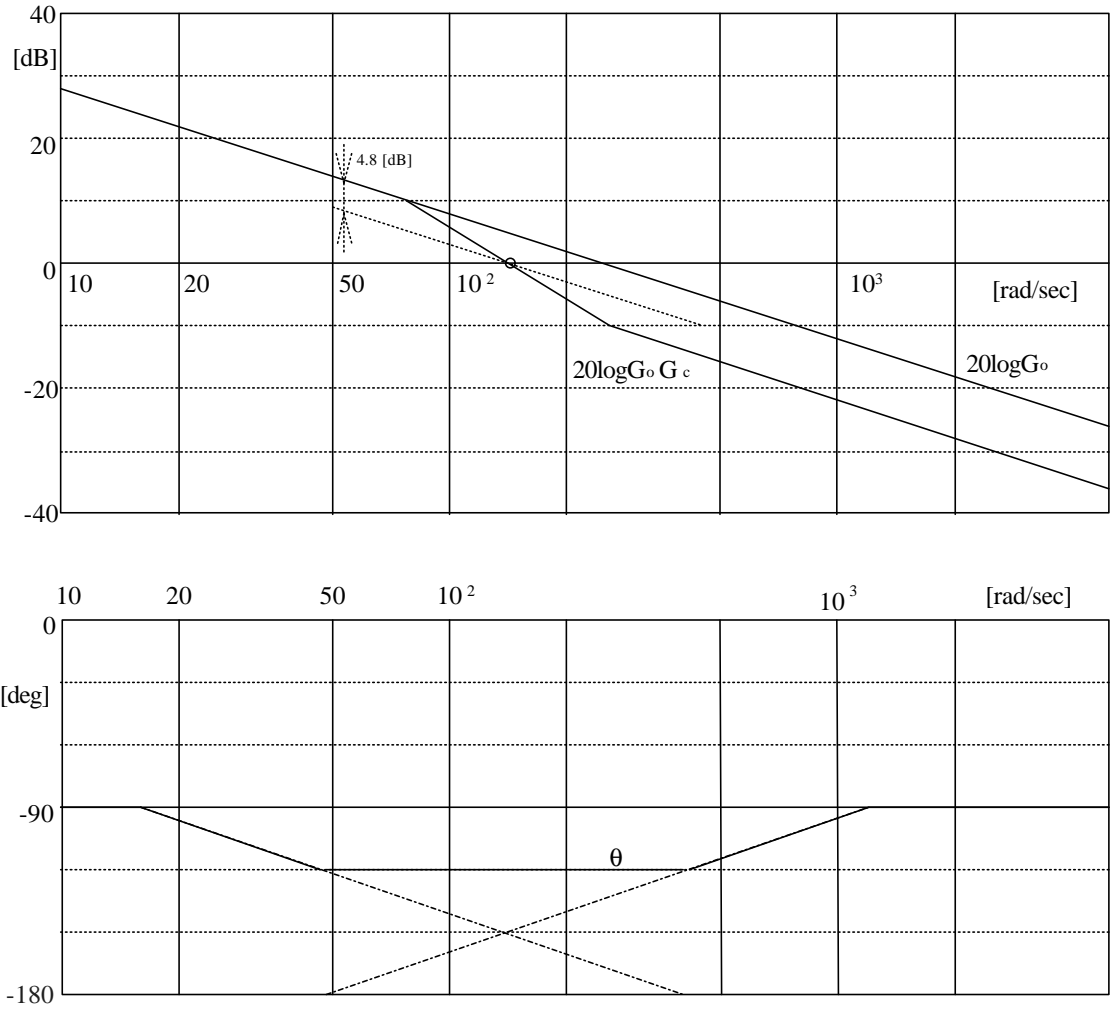
1. 制御対象 G_o のボード線図から位相余裕 q_m を求め、実際に補償する位相を f_m とする。
2. 式(B-7)より、 a を求める。
3. 式(B-2)より、 $g/2$ を G_o のボード線図に書き込み、交叉周波数を読み取り ω_m とする。
4. 式(B-6)より、 T を得る。

次に、本実験の補償要素を考える。既に、3.2節及び3.4節で速度アンプの設計を行なった。このとき、いずれの場合でも制御対象 G_o として次式

$$G_o = \frac{240}{s} \quad (\text{B-8})$$

を仮想し、補償要素の設計を実施している。以下にその手順を示す。

1. 式(B-8)のボード線図を描く(図B-3参照)。明らかに位相余裕は $q_m=90[\text{deg}]$ である。補償後の位相余裕 $q_m=60[\text{deg}]$ とする。したがって、 $f_m=-30[\text{deg}]$ である。
2. 式(B-7)より $a=3$ となる。
3. 式(B-2)より $\frac{g}{2} \cong -4.8[\text{dB}]$ となり、これをボード線図内に書き込む(ゲイン線図に点線で図示)と交叉周波数(○印で図示)として $\omega_m=138[\text{rad/sec}]$ が得られる。
4. 式(B-6)より $T \cong 0.00417$, $aT \cong 0.0125$ を得る。



図B-3 遅相補償要素の導出に使用したボード線図