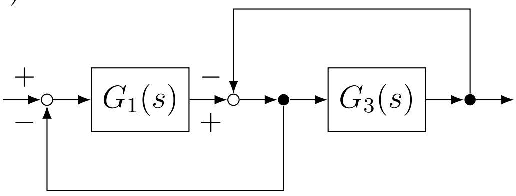
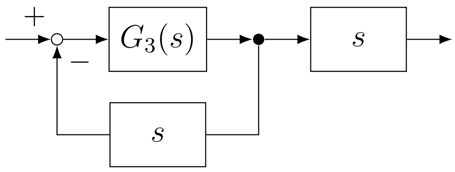
制御工学 I 演習③ 解答

1. 下図に示すシステムにおいて、システム全体の伝達関数を求めよ。

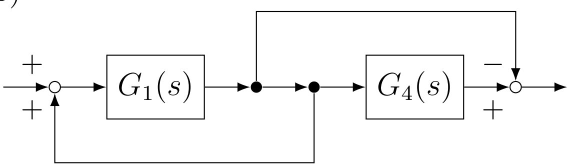
(1)



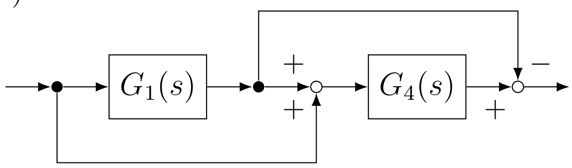
(2)



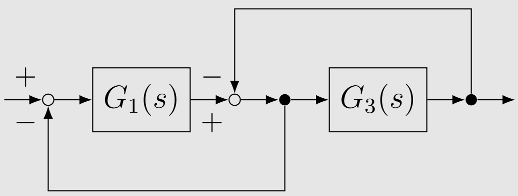
(3)

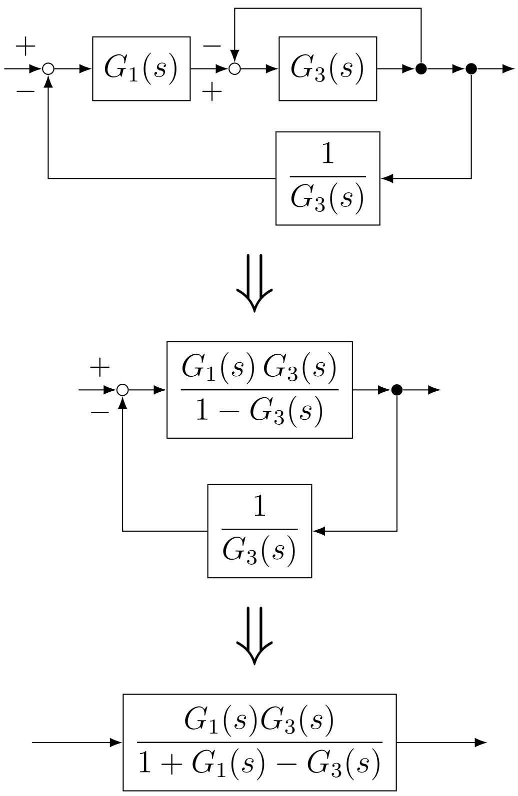


(4)



1. (1)

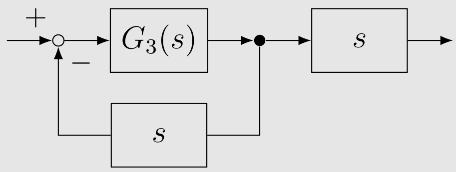


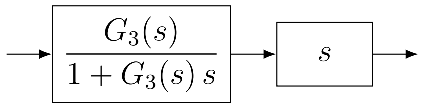


よって、システム全体の伝達関数 $G_{All}(s)$ は

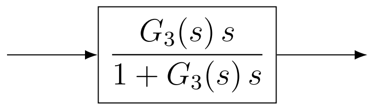
$$G_{All}(s) = \frac{G_1(s)G_3(s)}{1+G_1(s)-G_3(s)}$$

1. (2)





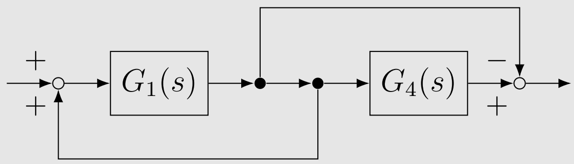
$$\Downarrow$$

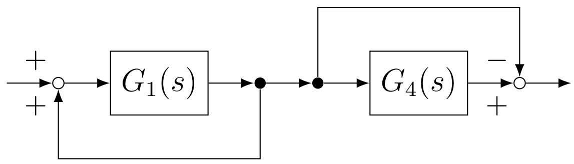


よって、システム全体の伝達関数 $G_{All}(s)$ は

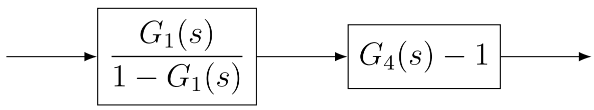
$$G_{All}(s) = \frac{G_3(s)\,s}{1+G_3(s)\,s}$$

1. (3)

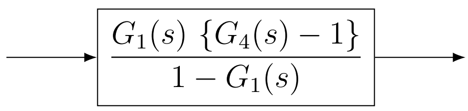




$$\Downarrow$$



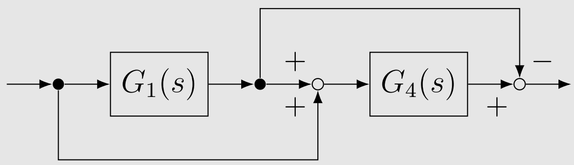
$$\Downarrow$$

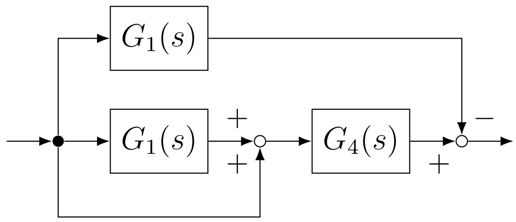


よって、システム全体の伝達関数 $G_{All}(s)$ は

$$G_{All}(s) = \frac{G_1(s)\ \{G_4(s)-1\}}{1-G_1(s)}$$

1. (4)





$$\Downarrow$$

$$\longrightarrow \boxed{G_1(s) + G_4(s) + G_1(s)G_4(s)} \longrightarrow$$

よって、システム全体の伝達関数 $G_{All}(s)$ は

$$G_{All}(s) = G_1(s) + G_4(s) + G_1(s)G_4(s)$$

2. $\ddot{x}(t) - \sin(\omega t) = 0$ を解け。ただし、初期値はすべて 0 とする。

両辺にラプラス変換を施すと,

$$\begin{aligned}
&\mathcal{L}\left[\ddot{x}(t) - \sin(\omega t)\right] = 0 \\
&\Leftrightarrow \left\{s^2 X(s) - sx(0) - \dot{x}(0)\right\} - \frac{\omega}{s^2+\omega^2} = 0 \\
&\Leftrightarrow X(s) = \frac{\omega}{s^2(s^2+\omega^2)} \\
&\Leftrightarrow X(s) = \frac{1}{\omega}\left\{\frac{1}{s^2} - \frac{1}{s^2+\omega^2}\right\}
\end{aligned}$$

両辺にラプラス逆変換を施すと,

$$\begin{aligned}
&\mathcal{L}^{-1}\left[X(s)\right] = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{\omega}\left\{\frac{1}{s^2} - \frac{1}{\omega}\frac{\omega}{s^2+\omega^2}\right\}\right] \\
&\Leftrightarrow x(t) = \frac{1}{\omega}\left(t - \frac{1}{\omega}\sin\omega t\right)
\end{aligned}$$

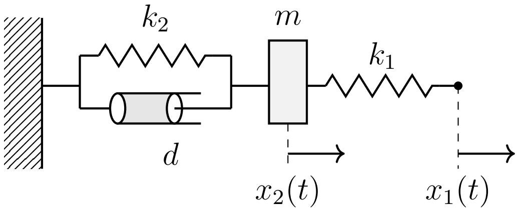
3. 伝達関数 $\dfrac{s+1}{s^2+2s+4}$ のラプラス逆変換を行え。

$$G(s)=\frac{s+1}{s^2+2s+4}$$
$$\Leftrightarrow G(s)=\frac{s+1}{(s+1)^2+3}$$

両辺にラプラス逆変換を施すと,

$$\mathcal{L}^{-1}\left[G(s)\right]=\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{s+1}{(s+1)^2+3}\right]$$
$$\Leftrightarrow g(t)=e^{-t}\cos(\sqrt{3}t)$$

4. 右図に示す系について、入力を変位 $x_1(t)$、出力を変位 $x_2(t)$ としたとき、次の問いに答えよ。なお、m は質量 [kg]、d は粘性係数 [Ns/m]、k_1、k_2 はバネ [N/m] とし、初期状態において系は静止しているとする。



(1) この図によって示されるシステムの運動方程式と伝達関数を求めよ。

(2)$m=1, d=4, k_1=1, k_2=2$ とし、インパルス応答、ステップ応答をそれぞれ求めよ。

(3)$m=1, d=2, k_1=3, k_2=2$ とし、ステップ応答を求めよ。

(4)$m=1, d=2, k_1=1, k_2=0$ とし、ステップ応答を求めよ。

(5)$m=1, d=0, k_1=1, k_2=2$ とし、ステップ応答を求めよ。

(6)$m=1, d=0, k_1=2, k_2=1$ とし、入力変位 $x_1(t)=\sin(t)$ を与えたときの応答を求めよ。

(7)$m=1, d=2, k_1=1, k_2=1$ とし、入力変位 $x_1(t)=\sin(2t)$ を与えたときの応答を求めよ。

4. (1) この図によって示されるシステムの運動方程式と伝達関数を求めよ。

$x(t)$ に関する運動方程式は

$$m\ddot{x}_2 = -k_2 x_2 - d\dot{x}_2 - k_1\left(x_2 - x_1\right)$$

また伝達関数は

$$\begin{aligned}
& m\ddot{x}_2 + d\dot{x}_2 + \left(k_1 + k_2\right) x_2 = k_1 x_1 \\
\therefore\quad & \mathcal{L}\left[m\ddot{x}_2 + d\dot{x}_2 + \left(k_1 + k_2\right) x_2\right] = \mathcal{L}\left[k_1 x_1\right] \\
\therefore\quad & \left\{ms^2 + ds + \left(k_1 + k_2\right)\right\} X_2(s) = k_1 X_1(s) \quad [\because \dot{x}(0) = x(0) = 0] \\
\therefore\quad & G(s) \ = \ \frac{X_2(s)}{X_1(s)} \ = \ \frac{k_1}{ms^2 + ds + \left(k_1 + k_2\right)}
\end{aligned}$$

4. (2)$m = 1, d = 4, k_1 = 1, k_2 = 2$ とし、インパルス応答、ステップ応答をそれぞれ求めよ。

(I) インパルス応答
パラメータを代入し、インパルス入力のラプラス変換は $F(s) = 1$ なので

$$\begin{aligned}
& G(s) = \frac{1}{s^2 + 4s + 3} \\
\therefore\quad & X(s) = G(s)F(s) = \frac{1}{(s+1)(s+3)} \\
\therefore\quad & X(s) = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{s+1} + \frac{-1}{s+3}\right) \\
\therefore\quad & \mathcal{L}^{-1}\left[X(s)\right] = \frac{1}{2}\left\{\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s+1}\right] + \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{-1}{s+3}\right]\right\} \\
\therefore\quad & x(t) = \frac{1}{2}\left(e^{-t} - e^{-3t}\right)
\end{aligned}$$

(II) ステップ応答
パラメータを代入し、ステップ入力のラプラス変換は $F(s) = \dfrac{1}{s}$ なので

$$\begin{aligned}
& G(s) = \frac{1}{s^2 + 4s + 3} \\
\therefore\quad & X(s) = G(s)F(s) = \frac{1}{s(s+1)(s+3)} \\
\therefore\quad & X(s) = \frac{\frac{1}{3}}{s} + \frac{\left(-\frac{1}{2}\right)}{s+1} + \frac{\left(\frac{1}{6}\right)}{s+3} \\
\therefore\quad & \mathcal{L}^{-1}\left[X(s)\right] = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{\left(\frac{1}{3}\right)}{s}\right] + \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{\left(-\frac{1}{2}\right)}{s+1}\right] + \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{\left(\frac{1}{6}\right)}{s+3}\right] \\
\therefore\quad & x(t) = \frac{1}{3} - \frac{1}{2}e^{-t} + \frac{1}{6}e^{-3t}
\end{aligned}$$

4. (3)$m=1, d=2, k_1=3, k_2=2$ とし、ステップ応答を求めよ。

パラメータを代入し、ステップ入力のラプラス変換は $F(s)=\dfrac{1}{s}$ なので

$$G(s)=\frac{3}{s^2+2s+5}$$

$$\therefore\quad X(s)=G(s)F(s)=\frac{3}{s(s^2+2s+5)}$$

$$\therefore\quad X(s)=\frac{\left(\frac{3}{5}\right)}{s}+\frac{-\frac{3}{5}s-\frac{6}{5}}{s^2+2s+5}$$

$$\therefore\quad \mathcal{L}^{-1}\left[X(s)\right]=\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{\left(\frac{3}{5}\right)}{s}\right]+\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{-\frac{3}{5}\left\{(s+1)+\frac{1}{2}\cdot 2\right\}}{(s+1)^2+2^2}\right]$$

$$\therefore\quad x(t)=\frac{3}{5}-\frac{3}{5}e^{-t}\left\{\cos 2t+\frac{1}{2}\sin 2t\right\}$$

4. (4)$m=1, d=2, k_1=1, k_2=0$ とし、ステップ応答を求めよ。

パラメータを代入し、ステップ入力のラプラス変換は $F(s)=\dfrac{1}{s}$ なので

$$G(s)=\frac{1}{s^2+2s+1}$$

$$\therefore\quad X(s)=G(s)F(s)=\frac{1}{s(s+1)^2}$$

$$\therefore\quad X(s)=\frac{1}{s}+\frac{-1}{(s+1)^2}+\frac{-1}{s+1}$$

$$\therefore\quad \mathcal{L}^{-1}\left[X(s)\right]=\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s}\right]+\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{-1}{(s+1)^2}\right]+\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{-1}{s+1}\right]$$

$$\therefore\quad x(t)=1-e^{-t}(t+1)$$

4. (5)$m=1, d=0, k_1=1, k_2=2$ とし、ステップ応答を求めよ。

パラメータを代入し、ステップ入力のラプラス変換は $F(s)=\dfrac{1}{s}$ なので

$$G(s)=\frac{1}{s^2+3}$$

$$\therefore\quad X(s)=G(s)F(s)=\frac{1}{s(s^2+3)}$$

$$\therefore\quad X(s)=\frac{\left(\frac{1}{3}\right)}{s}+\frac{\left(-\frac{1}{3}s\right)}{s^2+3}$$

$$\therefore\quad \mathcal{L}^{-1}\left[X(s)\right]=\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{\left(\frac{1}{3}\right)}{s}\right]+\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{\left(-\frac{1}{3}s\right)}{s^2+3}\right]$$

$$\therefore\quad x(t)=\frac{1}{3}-\frac{1}{3}\cos\left(\sqrt{3}t\right)$$

4. (6)$m=1, d=0, k_1=2, k_2=1$ とし、入力変位 $x_1(t)=\sin(t)$ を与えたときの応答を求めよ。

パラメータを代入し、$x_1(t)=\sin(t)$ のラプラス変換は $X_i(s)=\dfrac{1}{s^2+1}$ なので

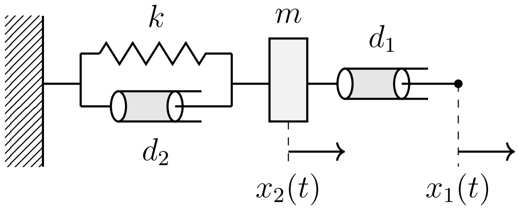
$$
\begin{aligned}
& G(s)=\frac{2}{s^2+3} \\
\therefore\quad & X(s)=G(s)F(s)=\frac{2}{(s^2+1)(s^2+3)} \\
\therefore\quad & X(s)=\frac{1}{s^2+1}+\frac{(-1)}{s^2+3} \\
\therefore\quad & \mathcal{L}^{-1}\left[X(s)\right]=\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s^2+1}\right]-\frac{1}{\sqrt{3}}\cdot\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{\sqrt{3}}{s^2+3}\right] \\
\therefore\quad & x(t)=\sin t-\frac{1}{\sqrt{3}}\sin(\sqrt{3}t)
\end{aligned}
$$

4. (7)$m=1, d=2, k_1=1, k_2=1$ とし、入力変位 $x_1(t)=\sin(2t)$ を与えたときの応答を求めよ。

パラメータを代入し、$x_1(t)=\sin(2t)$ のラプラス変換は $X_i(s)=\dfrac{2}{s^2+2^2}$ なので

$$
\begin{aligned}
& G(s)=\frac{1}{s^2+2s+1} \\
\therefore\quad & X(s)=G(s)F(s)=\frac{1}{(s+1)^2(s^2+2^2)} \\
\therefore\quad & X(s)=\frac{\left(\frac{1}{5}\right)}{(s+1)^2}+\frac{\left(\frac{2}{25}\right)}{s+1}+\frac{\left(-\frac{2}{25}s-\frac{3}{25}\right)}{s^2+2^2} \\
\therefore\quad & \mathcal{L}^{-1}\left[X(s)\right]=\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{\left(\frac{5}{25}\right)}{(s+1)^2}\right]+\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{\left(\frac{2}{25}\right)}{s+1}\right]+\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{\left(-\frac{2}{25}s-\frac{3}{25}\right)}{s^2+2^2}\right] \\
\therefore\quad & x(t)=\frac{1}{25}e^{-t}(5t+2)-\frac{1}{25}\left(2\cos 2t+\frac{3}{2}\sin 2t\right)
\end{aligned}
$$

5. 右図に示す系について、入力を変位 $x_1(t)$、出力を変位 $x_2(t)$ としたとき、次の問いに答えよ。なお、m は質量 [kg]、d は粘性係数 [Ns/m]、k_1、k_2 はバネ [N/m] とし、初期状態において系は静止しているとする。



(1) この図によって示されるシステムの運動方程式と伝達関数を求めよ。

(2)$x_1(t)$ に単位ステップ入力を印加した際の応答について、$x_2(t)$ の定常値を求めよ。

(3)$m = 1, d_1 = 1, d_2 = 1, k = 1$ としインパルス応答, ステップ応答をそれぞれ求めよ。

(4)$m = 1, d_1 = 2, d_2 = 2, k = 5$ とし、ステップ応答を求めよ。

(5)$m = d_1 = d_2 = k = 1$ とし、入力 $x_1(t) = \sin(t)$ を与えたときの応答を求めよ。

(6)$m = d_1 = 1, d_2 = k = 2$ とし、入力 $x_1(t) = \sin(2t)$ を与えたときの応答を求めよ。

(7)$m = 1, d_1 = 2, d_2 = 0, k = 2$ とし、ステップ応答を求めよ。

5. (1) この図によって示されるシステムの運動方程式と伝達関数を求めよ。

$x(t)$ に関する運動方程式は

$$m\ddot{x}_2 = -kx_2 - d_2\dot{x}_2 - d_1\left(\dot{x}_2 - \dot{x}_1\right)$$

また伝達関数は

$$\begin{aligned}
& m\ddot{x}_2 + (d_1 + d_2)\dot{x}_2 + kx_2 = d_1\dot{x}_1 \\
\therefore\quad & \mathcal{L}\left[m\ddot{x}_2 + (d_1 + d_2)\dot{x}_2 + kx_2\right] = \mathcal{L}\left[d_1\dot{x}_1\right] \\
\therefore\quad & \left\{ms^2 + (d_1 + d_2)s + k\right\} X_2(s) = d_1 s X_1(s) \quad [\because \dot{x}(0) = x(0) = 0] \\
\therefore\quad & G(s) \;=\; \frac{X_2(s)}{X_1(s)} \;=\; \frac{d_1 s}{ms^2 + (d_1 + d_2)s + k}
\end{aligned}$$

5. (2)$x_1(t)$ に単位ステップ入力を印加した際の応答について、$x_2(t)$ の定常値を求めよ。

ステップ入力のラプラス変換は $X_1(s) = \frac{1}{s}$ なので

$$G(s) = \frac{d_1 s}{ms^2 + (d_1 + d_2)s + k}$$

$$\therefore\quad X_o(s) = G(s)X_i(s) = \frac{d_1}{ms^2 + (d_1 + d_2)s + k}$$

最終値定理より

$$\begin{aligned}
\lim_{t\to\infty} x_o(t) &= \lim_{s\to 0} sX_o(s) \\
&= \lim_{s\to 0} \frac{d_1 s}{ms^2 + (d_1 + d_2)s + k} \\
&= 0
\end{aligned}$$

5. (3)$m=1, d_1=1, d_2=1, k=1$ とし、インパルス応答、ステップ応答をそれぞれ求めよ。

(I) インパルス応答

パラメータを代入し、インパルス入力のラプラス変換は $F(s)=1$ なので

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{s}{s^2+2s+1} \\ \therefore \quad X(s) &= G(s)F(s) = \frac{s}{(s+1)^2} \\ \therefore \quad X(s) &= \frac{-1}{(s+1)^2} + \frac{1}{s+1} \\ \therefore \quad \mathcal{L}^{-1}\left[X(s)\right] &= \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{-1}{(s+1)^2}\right] + \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s+1}\right] \\ \therefore \quad x(t) &= -e^{-t}(t-1) \end{aligned}$$

(II) ステップ応答

パラメータを代入し、ステップ入力のラプラス変換は $F(s)=\dfrac{1}{s}$ なので

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{s}{s^2+2s+1} \\ \therefore \quad X(s) &= G(s)F(s) = \frac{1}{(s+1)^2} \\ \therefore \quad \mathcal{L}^{-1}\left[X(s)\right] &= \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{(s+1)^2}\right] \\ \therefore \quad x(t) &= te^{-t} \end{aligned}$$

5. (4)$m=1, d_1=2, d_2=2, k=5$ とし、ステップ応答を求めよ。

パラメータを代入し、ステップ入力のラプラス変換は $F(s)=\dfrac{1}{s}$ なので

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{2s}{s^2+4s+5} \\ \therefore \quad X(s) &= G(s)F(s) = \frac{2}{(s+2)^2+1^2} \\ \therefore \quad \mathcal{L}^{-1}\left[X(s)\right] &= \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{2}{(s+2)^2+1^2}\right] \\ \therefore \quad x(t) &= 2e^{-2t}\sin t \end{aligned}$$

5. (5)$m=1, d_1=1, d_2=1, k=1$ とし、入力変位 $x_1(t)=\sin(t)$ を与えたときの応答を求めよ。

パラメータを代入し、$x_1(t)=\sin(t)$ のラプラス変換は $X_i(s)=\dfrac{1}{s^2+1}$ なので

$$
\begin{aligned}
G(s) &= \frac{s}{s^2+2s+1} \\
\therefore\quad X(s) &= G(s)F(s) = \frac{s}{(s+1)^2(s^2+1)} \\
\therefore\quad X(s) &= \frac{\left(-\frac{1}{2}\right)}{(s+1)^2} + \frac{\left(\frac{1}{2}\right)}{s^2+1} \\
\therefore\quad \mathcal{L}^{-1}\left[X(s)\right] &= \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{\left(-\frac{1}{2}\right)}{(s+1)^2}\right] + \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{\left(\frac{1}{2}\right)}{s^2+1}\right] \\
\therefore\quad x(t) &= -\frac{1}{2}te^{-t} + \frac{1}{2}\sin t
\end{aligned}
$$

5. (6)$m=1, d_1=1, d_2=2, k=2$ とし、入力変位 $x_1(t)=\sin(2t)$ を与えたときの応答を求めよ。

パラメータを代入し、$x_1(t)=\sin(2t)$ のラプラス変換は $X_i(s)=\dfrac{2}{s^2+2^2}$ なので

$$
\begin{aligned}
G(s) &= \frac{s}{s^2+3s+2} \\
\therefore\quad X(s) &= G(s)F(s) = \frac{s}{(s+1)(s+2)(s^2+2^2)} \\
\therefore\quad X(s) &= \frac{\left(-\frac{1}{5}\right)}{s+1} + \frac{\left(\frac{1}{4}\right)}{s+2} + \frac{\left(-\frac{1}{20}s+\frac{3}{10}\right)}{s^2+2^2} \\
\therefore\quad \mathcal{L}^{-1}\left[X(s)\right] &= \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{\left(-\frac{1}{5}\right)}{s+1}\right] + \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{\left(\frac{1}{4}\right)}{s+2}\right] + \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{\left(-\frac{1}{20}s+\frac{3}{10}\right)}{s^2+2^2}\right] \\
\therefore\quad x(t) &= -\frac{1}{5}e^{-t} + \frac{1}{4}e^{-2t} - \frac{1}{20}\left\{\cos(2t) - 3\sin(2t)\right\}
\end{aligned}
$$

5. (7)$m=1, d_1=2, d_2=0, k=2$ とし、ステップ応答を求めよ。

パラメータを代入し、ステップ入力のラプラス変換は $F(s)=\dfrac{1}{s}$ なので

$$
\begin{aligned}
G(s) &= \frac{2s}{s^2+2s+2} \\
\therefore\quad X(s) &= G(s)F(s) = \frac{2}{s^2+2s+2} \\
\therefore\quad \mathcal{L}^{-1}\left[X(s)\right] &= \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{2}{(s+1)^2+1}\right] \\
\therefore\quad x(t) &= 2e^{-t}\sin t
\end{aligned}
$$

6. 伝達関数 $G_1(s) = \dfrac{1}{s+0.1}$ について漸近線を用いてボード線図を描け。まず $10 \times \dfrac{1}{10s+1}$ として一次遅れ系に変形した上で、ゲイン (dB)、位相 (deg.) を求めよ。各軸には適宜数値を記入し、折れ点等の特徴点を明示すること。

ゲイン [dB] は $20\log_{10}|G(j\omega)|$ で表されるので

$$G(j\omega) = \frac{10}{10j\omega+1}$$

$$\therefore \quad |G(j\omega)| = \left|\frac{10}{10j\omega+1}\right| = \frac{10}{\sqrt{(10\omega)^2+1}}$$

よってゲイン [dB] は

$$dB = 20\log_{10}\left(\frac{10}{\sqrt{(10\omega)^2+1}}\right) = 20 - 20\log_{10}\left(\frac{1}{\sqrt{(10\omega)^2+1}}\right)$$

位相は∠G(jω) で与えられるので、

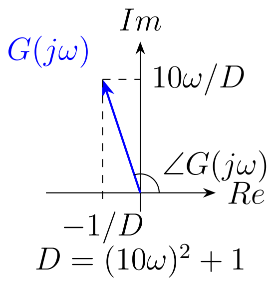
$$G(j\omega) = 10 \times \frac{10j\omega - 1}{(10\omega)^2+1}$$

であることに注意して分子に着目すると、実部が -1、虚部が 10ω なので下図より

$$\angle G(j\omega) = \pi - \tan^{-1}(10\omega)$$

定義域 $-\dfrac{\pi}{2} < \angle G(j\omega) < \dfrac{\pi}{2}$ より

$$\angle G(j\omega) = -\tan^{-1}(10\omega)$$



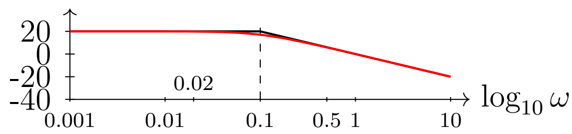
また、ボード線図は
$\omega >> 1$ のとき

$$dB = 20 - 20\log_{10}\left(\frac{1}{10\omega}\right)$$

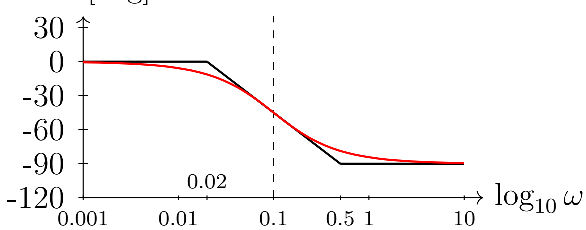
$\omega << 1$ のとき

$$dB = 20$$

ゲイン [dB]



位相 [deg]



7. $G(s) = \dfrac{10}{s(s+1)}$ について、周波数応答関数、ゲイン (dB)、位相 (deg.) を求めよ。また、漸近線を用いてボード線図の概形を描け。各軸には適宜数値を記入し、折れ点等の特徴点を明示すること。

ゲイン [dB] は $20\log_{10}|G(j\omega)|$ で表されるので

$$G(j\omega) = \frac{10}{j\omega(j\omega+1)} = 10 \times \frac{1}{-\omega(\omega - j)}$$
$$|G(j\omega)| = \frac{10}{\omega\sqrt{\omega^2+1}}$$

よってゲイン [dB] は

$$\mathrm{dB} = 20\log_{10}\left(\frac{10}{\omega\sqrt{\omega^2+1}}\right) = 20 - 20\log_{10}\left(\frac{1}{\omega}\right) - 20\log_{10}\left(\frac{1}{\sqrt{\omega^2+1}}\right)$$

位相は∠G(jω) で与えられるので、

$$\angle G(j\omega) = \angle(10) - \angle(j\omega) - \angle(j\omega+1)$$
$$= 0^\circ - 90^\circ - tan^{-1}(\omega)$$

また、$-20\log_{10}\left(\frac{1}{\sqrt{\omega^2+1}}\right)$ は

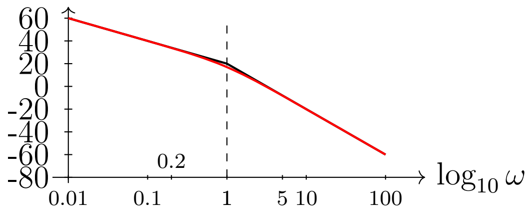
$\omega >> 1$ のとき

$$dB = 0$$

$\omega << 1$ のとき

$$dB = -20\log_{10}\left(\frac{1}{\sqrt{\omega^2+1}}\right)$$

ゲイン [dB]



位相 [deg]