制御工学Ⅱ

SETSUDAI

■シラバス

■本講では、まず周波数応答について説明し、ベクトル軌跡とボード線図による周波数特性の表現方法について述べる。続いて、フィードバック制御系の特性評価、ナイキストの安定判別法、さらにゲイン余裕と位相余裕について説明する。最後に、制御系の補償法について述べる。

■到達目標：
1)周波数応答法の理解。
2)フィードバック制御系の安定判別ができる。
3)フィードバック補償により制御系の設計ができる

制御工学Ⅱの概要

1. 線形システムの時間応答 ラプラス変換，ステップ応答，インパルス応答
2. 周波数応答(1) ゲイン，位相特性，ボード線図の読み方
3. 周波数応答(2) ボード線図演習
4. 周波数応答(3) ボード線図の合成，折れ線近似
5. 周波数応答(4) PID制御とボード線図
6. 周波数応答(5) ベクトル軌跡とボード線図
7. 制御系の安定判別(1) ナイキストの簡易判別法
8. 制御系の安定判別(2) 位相余裕とゲイン余裕
9. 総合演習 前半のまとめと総合演習
10. 演習答合わせ
11. フィードバック制御
12. フィードバック制御系の設計(2) ループ整形法
13. フィードバック制御系の設計例(1) 設計仕様を満たす設計
14. フィードバック制御系の設計例(2) 制御目的と設計要件
15. まとめ

閉ループ系＝フィードバック結合

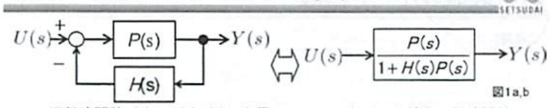


図1a,b

一巡伝達関数$L(s)=H(s)P(s)$ を用いてフィードバック結合の伝達関数

$$G(s)=\frac{P(s)}{1+H(s)P(s)}=\frac{P(s)}{1+L(s)} \quad (2.1)$$

が得られ、伝達関数は分母・分子の s の多項式で与えられる。
伝達関数の特性は分母・分子が０となる**極・零点**で決定される。
安定、不安定を決定するのは分母多項式を０とする特性方程式

$$\boxed{1+L(s)=0} \quad (2.2)$$

の解（＝根）であり、これが極である。
いま極を$p_1\cdots p_n$，零点$z_1\cdots z_m$をとするとすると以下のように表される。

$$\left[\frac{P(s)}{1+L(s)}\right]=\left[\frac{b(s-z_1)(s-z_2)\cdots(s-z_m)}{(s-p_1)(s-p_2)\cdots(s-p_n)}\right] \quad (2.3)$$

ボード線図（Bode Diagram）

周波数応答について学んできたが、
入力振幅をA、角周波数をωとした時の応答振幅をBとすると
その振幅比(**ゲイン**)は

$$g=20\log_{10}\frac{B}{A}=20\log_{10}|G(j\omega)| \qquad デシベル[dB]$$

と与えられる。また**位相**の遅れ・進みは

$$\varphi=\angle G(j\omega)=\tan^{-1}\frac{\mathrm{Im}[G(j\omega)]}{\mathrm{Re}[G(j\omega)]} \qquad {}^\circ[\mathrm{deg}]$$

と表され、これらを 対数表示した**横軸に周波数**ω**[rad/s, Hz]**をとって
プロットしたゲイン線図、位相線図を合わせて**ボード線図**と呼ぶ。

横軸の周波数ω $\begin{cases}|G(j\omega)| \\ \angle G(j\omega)\ の変化を\end{cases}$

基本要素のボード線図

$G(j\omega)=K$

$g=|G(j\omega)|_{dB}=20\log_{10}|K|\ [dB]$

$\varphi=\angle G(j\omega)=\tan^{-1}\frac{0}{K}=0°$

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

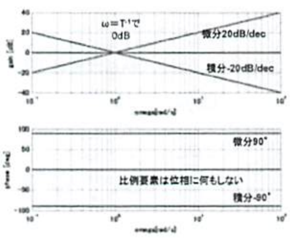
$g=|G(j\omega)|_{dB}=-20\log_{10}\omega T\ [dB]$

$\varphi=\angle G(j\omega)=-\tan^{-1}\frac{\omega T}{0}=-90°$

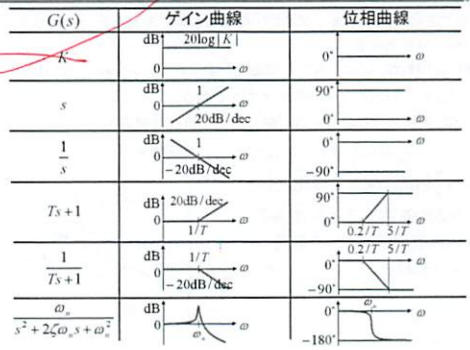
$G(j\omega)=j\omega T$

$g=|G(j\omega)|_{dB}=20\log_{10}\omega T\ [dB]$

$\varphi=\angle G(j\omega)=\tan^{-1}\frac{\omega T}{0}=90°$



基本要素のボード線図



一般的な伝達関数の性質

■ゲインや位相の性質を用いると、一般的な伝達関数のボード線図も一次遅れ要素や二次遅れ要素といった典型的な伝達関数のボード線図をグラフ上で反転させたり、加え合わせたりすることによって容易に得ることができる。

性質(1)：$H(s)=1/G(s)$のときに次の式が成り立つ

$$\boxed{\begin{aligned}&20\log_{10}|H(j\omega)|=-20\log_{10}|G(j\omega)|\\&\angle H(j\omega)=-\angle G(j\omega)\end{aligned}}$$

性質(2)：$H(s)=G_1(s)G_2(s)$のときに次の式が成り立つ

$$\boxed{\begin{aligned}&20\log_{10}|H(j\omega)|=20\log_{10}|G_1(j\omega)|+20\log_{10}|G_2(j\omega)|\\&\angle H(j\omega)=\angle G_1(j\omega)+\angle G_2(j\omega)\end{aligned}}$$

性質(1)は微分要素と積分要素の関係と同じく、ゲイン線図では$0[dB]$で上下を反転させ、位相線図では$0[\mathrm{deg}]$で上下を反転させることによって得られる。性質(2)ではそれぞれ加算すればよい。

一次遅れ要素と折れ線近似

一次遅れ要素の伝達関数は$G(j\omega)=\frac{1}{1+j\omega T}$となるから、

$$g=|G(j\omega)|=-20\log\sqrt{1+(\omega T)^2}$$
$$\approx-20\log 1|_{\omega\le T^{-1}}-20\log\omega T|_{\omega\ge T^{-1}} \qquad [dB]$$
$$\varphi=\angle G(j\omega)=-\tan^{-1}\frac{\omega T}{1}=-\tan^{-1}\omega T$$
$$\approx 0|_{\omega\le 0.2T^{-1}}-64.3\log\omega|_{0.2T^{-1}\le\omega\le 5T^{-1}}-90|_{5T^{-1}\le\omega} \qquad [°]$$

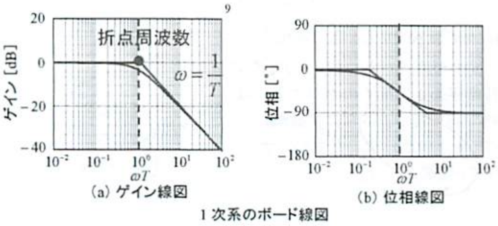
ゲイン特性は$\omega\le T^{-1}$において$0[dB]$、$\omega\ge T^{-1}$において$10\omega=1[\mathrm{dec}]$で-20dB、すなわち$\omega=T^{-1}$を**折れ点周波数**としてそれ以下のゲイン特性は0dB、それ以上は-20dB/decの右下がり直線で近似できる。
このとき$\omega=T^{-1}$での誤差は$g=-3[dB]$である。
また位相は$\omega=T^{-1}$で$\varphi=-45°$であり、この傾斜を直線近似して傾き(参考1)は$-64.3\log\omega|_{0.2T^{-1}\le\omega\le 5T^{-1}}$となる。
$\varphi=0°$で$\omega=0.2T^{-1}$、$\varphi=-90°$で$\omega=5T^{-1}$が折れ点周波数。

折れ線近似

（ゲイン）0 dB と −20 dB/dec の 2 本の直線

（位相） $\omega\le\frac{0.2}{T}$ で $0°$

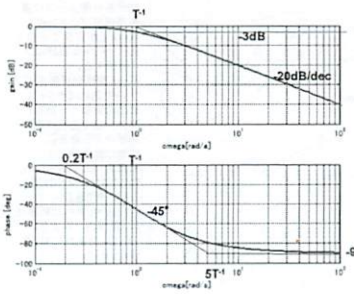
$\omega\ge\frac{5}{T}$ で $-90°$



(a) ゲイン線図　(b) 位相線図

1 次系のボード線図

一次遅れ要素のボード線図



折れ線近似の描き方
① ゲイン線図の折れ点(T⁻¹,0)にマークし、位相線図の(T⁻¹,-45)にマークする。
② (0,0)折れ点(T⁻¹,0)をむすび、(T⁻¹,0)と(10T⁻¹,-20), (100T⁻¹,-40)結ぶ。ゲイン線図ができる。
③ 位相線図に折れ点(0.2T⁻¹,0)、(5T⁻¹,-90)を追加して傾斜角を結ぶ。0.2T⁻¹より低周波は0、5T⁻¹より大きい周波数は-90の一定値をとる
④ 折れ点の周波数を書いて出来上がり。

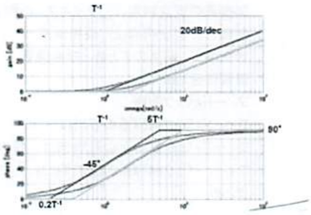
一次進み要素のボード線図

一次遅れ要素の伝達関数は$G(j\omega)=1+j\omega T$となるから、

$$g=\left|G(j\omega)\right|=20\log\sqrt{1+(\omega T)^2}\approx 20\log 1\big|_{\omega\le T^{-1}}+20\log\omega T\big|_{\omega\ge T^{-1}}\qquad [dB]$$

$$\varphi=\angle G(j\omega)=\tan^{-1}\frac{\omega T}{1}=\tan^{-1}\omega T\approx 0\big|_{\omega\le 0.2T^{-1}}+64.3\log\omega\big|_{0.2T^{-1}\le\omega\le 5T^{-1}}+90\big|_{5T^{-1}\le\omega}\quad [°]$$

$\omega=T^{-1}$を**折れ点周波数**として位相遅れの逆特性



PI制御器のボード線図

- 比例ゲインに積分要素を加えた制御器を考える
  PI制御器は偏差の過去データから制御を考える手法

伝達関数は$G(s)=K_p\left(1+\frac{1}{Ts}\right)=K_p\frac{Ts+1}{Ts}=K_p\frac{Tj\omega+1}{Tj\omega}$

$$20\log_{10}\left|G(j\omega)\right|=20\log_{10}K_p-20\log_{10}\omega T+20\log_{10}\sqrt{1+(\omega T)^2}$$

$$\angle G(j\omega)=-\tan^{-1}\infty+\tan^{-1}\omega T=-\pi/4+\tan^{-1}\omega T$$

折れ線近似で考えると、

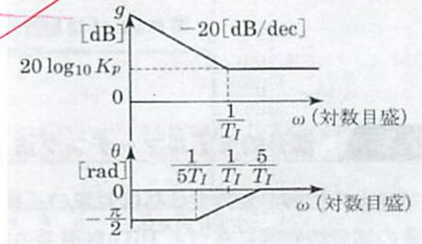
ゲイン特性は積分によって-20dB/decで減少してT^{-1}から

$20\log_{10}K_p$で一定となる。

位相特性は$\omega\ll T^{-1}$では-90°であり$\omega=5T^{-1}$で0°に戻る。

PI制御装置のボード線図

- 高周波領域では変化が少ないが，低周波領域でゲイン特性を大きくしている。
- 積分要素により，ステップ入力に対する定常偏差を0にすることができる。
- 位相遅れが安定性を損なう恐れもある。



13

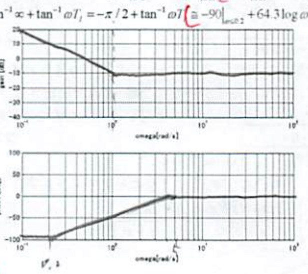
PI制御器のボード線図

伝達関数は$G(s)=K_p\left(1+\frac{1}{T_I s}\right)=0.316\frac{1+j\omega}{j\omega}$　　$Kp=0.316,\ T_I=1$として

$$20\log\left|G(j\omega)\right|=20\log K_p-20\log\omega T_I+20\log\sqrt{1+(\omega T_I)^2}$$

$$\cong -10-20\log\omega+20\log(1)\big|_{\omega<1}+20\log\omega\big|_{\omega\ge 1}\left(=-10\big|_{\omega\ge 1}-20\log(\omega)\big|_{\omega<1}\right)\qquad [dB]$$

$$\angle G(j\omega)=-\tan^{-1}\infty+\tan^{-1}\omega T_I=-\pi/2+\tan^{-1}\omega T\left(\cong -90\big|_{\omega<0.2}+64.3\log\omega\big|_{0.2<\omega<5}+0\big|_{\omega>5}\right)[°]$$



ベクトル軌跡

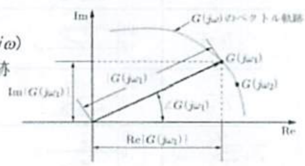
周波数ごとに周波数応答のゲイン・位相を求め、それらをつなげることで制御対象の分析が可能となる。

周波数伝達関数$G(j\omega)$は複素関数であり、ある任意の$\omega\left[rad/s\right]$に対して複素平面上の一つのベクトルを表すこととなる。

$$G(j\omega)=\mathrm{Re}\left\{G(j\omega)\right\}+j\,\mathrm{Im}\left\{G(j\omega)\right\}\qquad(直交座標表示)$$

$$=\left|G(j\omega)\right|\exp\left\{j\angle G(j\omega)\right\}\qquad(極座標表示)$$

$\omega\left[rad/s\right]$を0から∞まで変化させたときの複素ベクトル$G(j\omega)$の先端が複素平面上に描く軌跡をベクトル軌跡という。



積分要素

周波数伝達関数は

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

となる。ベクトル軌跡は虚軸上を-∞から0に至る半直線。

$$\left|G(j\omega)\right|=\frac{1}{\left|j\omega\right|}=\frac{1}{\omega}$$

$$\angle G(j\omega)=\angle 1-\angle j\omega$$

$$=\tan^{-1}\frac{0}{1}-\tan^{-1}\frac{\omega}{0}=0°-90°$$

1次遅れ要素

周波数伝達関数は

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

となる。ベクトル軌跡は複素平面の代象限を1から0に至る半径1/2の円を描く。

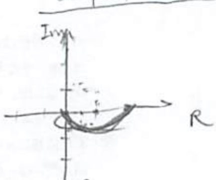
$$\left|G(j\omega)\right|=\boxed{\frac{1}{\left|1+j\omega T\right|}=\frac{1}{\sqrt{1+(\omega T)^2}}}$$

$$\angle G(j\omega)=\boxed{\angle 1-\angle(1+j\omega T)=\tan^{-1}\frac{0}{1}-\tan^{-1}\frac{\omega T}{1}}$$

$$=-\tan^{-1}\omega T$$

$\frac{1}{2}$

ω	g	φ	G
0	1	0	1−j0
1/T	1/√2	−45°	1/2 − 1/2 j
∞	0	−90°	0 − 0j



PI制御器のベクトル軌跡

周波数伝達関数は

$$G(j\omega)=K\left(1+\frac{1}{j\omega T}\right)=K-j\frac{K}{\omega T}$$

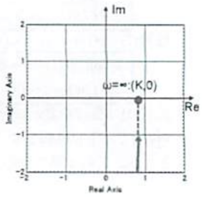
$$\left|G(j\omega)\right|=K\left|1+\frac{1}{j\omega T}\right|=K\sqrt{1+\frac{1}{(\omega T)^2}}$$

$$\angle G(j\omega)=\angle\left(K-j\frac{K}{\omega T}\right)=-\tan^{-1}\frac{1}{\omega T}$$

ω	$G(j\omega)$	$\left|G(j\omega)\right|$	$\angle G(j\omega)$
0	$K-j\infty$	∞	−90°
$1/T$	$K-jK$	$K\sqrt{2}$	−45°
∞	$K-j0$	K	−0

$G(j\omega)=\left|G(j\omega)\right|e^{j\angle G(j\omega)}$

となる。$\omega=0$のとき虚数が$G(j\omega)=-\infty$, $\omega=\infty$では$G(j\omega)=K$ だからベクトル軌跡は複素平面の第4象限の実軸上のKを通る直線を$-\infty$からKに至る。積分の軌跡の終点をKずらしたもの。



ボード線図との特徴比較

システムの種類	ω→大(∞)	ボード線図の概形	ベクトル軌跡の形
1次遅れ系(要素) $\frac{K}{T_1 s+1}$ 分母:1次, 分子:0次	大きさ→0 ゲイン→-20[dB/dec] 位相→-90°		
2次遅れ系(要素) $\frac{K}{(T_1 s+1)(T_2 s+1)}$ 分母:2次, 分子:0次	大きさ→0 ゲイン→-40[dB/dec] 位相→-180°		
1次遅れ系+積分要素 $\frac{K}{s(T_1 s+1)}$ 分母:2次, 分子:0次	大きさ→0 ゲイン→-40[dB/dec] 位相→-180°		
2次遅れ系+積分要素 $\frac{K}{s(T_1 s+1)(T_2 s+1)}$ 分母:2次, 分子:0次	大きさ→0 ゲイン→-60[dB/dec] 位相→-270°		

制御系の開ループは高周波領域で小さな値を取ることが安定上必須であり、ベクトル軌跡は0に近接する。
ボード線図が低周波でフラットであればベクトル軌跡は実軸から始まる。
積分特性であれば虚軸無限小から始まる。
終端は位相角によって収束方向が決定される。
同じことはゲイン線図からも判断できる。
-40dB/dであれば軌跡は第3象限内に収まる。
-60dB/dであれば第2象限にいたる。

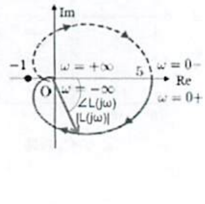
ナイキスト線図(開ループ伝達関数のベクトル軌跡)

開ループ伝達関数$P(j\omega)C(j\omega)$は複素関数であり、ある任意の$\omega\left[rad/s\right]$に対して複素平面($P(j\omega)C(j\omega)$平面と呼ぶこともある)上の一つのベクトルを表す。

$$L(j\omega)=P(j\omega)C(j\omega)=\mathrm{Re}\left\{L(j\omega)\right\}+j\,\mathrm{Im}\left\{L(j\omega)\right\}\qquad(直交座標表示)$$

$$=\left|L(j\omega)\right|\exp\left\{j\angle L(j\omega)\right\}\qquad(極座標表示)$$

$\omega\left[rad/s\right]$を0から∞まで変化させたときの複素ベクトル$L(j\omega)$の先端が複素平面上に描くのがベクトル軌跡であったが、さらに実数軸に対して上下対象に描いたものを**ナイキスト線図**という。



ナイキストの安定判別法

21

[ステップ1]

開ループ伝達関数のベクトル軌跡P(jω)C(jω)を，周波数ω=0～∞の範囲で描く. さらにこれを実軸に関して上下対称に描き，ナイキスト軌跡 Γ を得る.

[ステップ2]

ナイキスト軌跡 Γ が点(-1, 0)のまわりを時計方向にまわる回数を調べ，これをNとする.（反時計方向に1回の場合N=-1）

[ステップ3]

開ループ伝達関数P(s)C(s)の極の中で実部が正であるものの個数を調べ，これをΠとする. ← 不安定極

[ステップ4]

閉ループ系の不安定な極の数はZ=N+Πとなる. したがって，Z=0ならばフィードバック制御系は安定，
Z≠0ならば系は不安定である.

ナイキスト線図で見たゲイン余裕と位相余裕

22

■ベクトル軌跡が点(-1,j0)から離れていれば安定であり、不安定になるまでの余裕を安定余裕という

ベクトル軌跡が点 (−1, 0) からある程度離れているならば，安定余裕がある。

ゲイン余裕 GM

あとどれだけゲインを増やすと制御系が不安定になるか。

$$\mathrm{GM} = \frac{1}{\mathrm{OP}}\ (\mathrm{dB})$$
$$= 0dB - 20\log_{10}\left|L(j\omega_{pc})\right|$$

位相余裕 PM

あとどれだけ位相が遅れると制御系が不安定になるか。

$$\mathrm{PM} = \angle \mathrm{GOP}\ (^\circ)$$

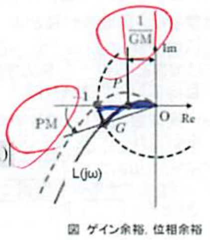


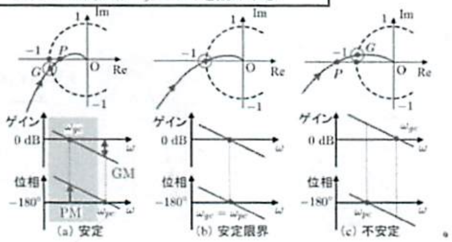
図 ゲイン余裕，位相余裕

ボード線図と対比1

23

ボード線図での読み取り (a) 位相が −180° より進む ⇒ 安定
(b) 位相が −180° ちょうど ⇒ 安定限界
(c) 位相が −180° より遅れる ⇒ 不安定

ゲイン交差周波数 ω_{gc} で PM を読み取る.



(a) 安定　(b) 安定限界　(c) 不安定

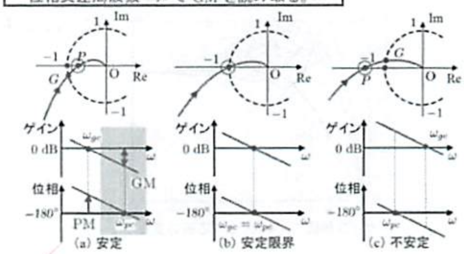
ボード線図と対比2

24

$G = 20\log_{10}\left|L(j\omega_{pc})\right|$

(a) ゲインが 0 dB より低い ⇒ 安定
(b) ゲインが 0 dB ちょうど ⇒ 安定限界
(c) ゲインが 0 dB より高い ⇒ 不安定

位相交差周波数 ω_{pc} で GM を読み取る。



(a) 安定　(b) 安定限界　(c) 不安定

開ループ伝達関数のボード線図

25

さらに測定装置の伝達関数を $H(s) = 0.2$ としたときの一巡(開ループ)伝達関数 $L(s)$ は

$$L(s) = C(s)P(s)H(s) = \frac{0.2(3s+1)}{s(0.1s+1)} = \frac{0.2(3j\omega+1)}{j\omega(0.1j\omega+1)}$$

となり、ループのゲイン特性と位相特性は次のようになる。

$$20\log|L(j\omega)| = 20\log|C(j\omega)| + 20\log|P(j\omega)| + 20\log|H(j\omega)|$$
$$= \boxed{-20\log\omega + 20\log\sqrt{9\omega^2+1} - 20\log\sqrt{(0.1\omega)^2+1} - 14}\ [dB]$$
$$\angle L(j\omega) = \boxed{-\pi/4 + \tan^{-1}3\omega - \tan^{-1}0.1\omega}\ [rad]$$

これをボード線図で示してみよう。

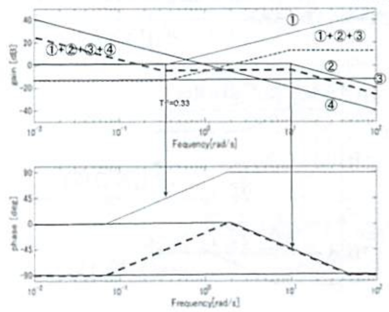
■演習：折れ線近似で各要素を示し、合成して開ループ特性を求めよ

演習）開ループ伝達関数のボード線図

26

■開ループ伝達関数

$$L(s) = C(s)P(s)H(s) = \frac{0.2(3s+1)}{s(0.1s+1)} = \frac{0.2(3j\omega+1)}{j\omega(0.1j\omega+1)}$$

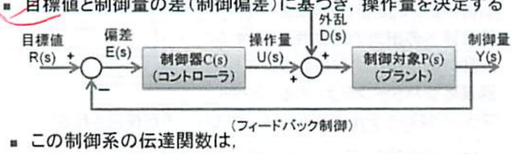


① $20\log|3j\omega+1|$
② $-20\log|0.1j\omega+1|$
③ $20\log(0.2) = -14dB$
④ $-20\log|j\omega|$

フィードバック制御の構成

27

■ 目標値と制御量の差（制御偏差）に基づき，操作量を決定する



(フィードバック制御)

■ この制御系の伝達関数は，

$$G_{ur}(s) = \frac{C(s)}{1+P(s)C(s)} \quad G_{ud}(s) = -\frac{P(s)C(s)}{1+P(s)C(s)}$$
$$G_{yr}(s) = \frac{P(s)C(s)}{1+P(s)C(s)} \quad G_{yd}(s) = \frac{P(s)}{1+P(s)C(s)} \qquad (8.1)$$

いずれもC(s)を含んでいるので，制御対象P(s)が不安定であっても，制御器C(s)によって安定化できる。分母が同じに注目

開ループ伝達関数と安定性

28

式8.2のK=1,ωn=10,ζ=0.5として

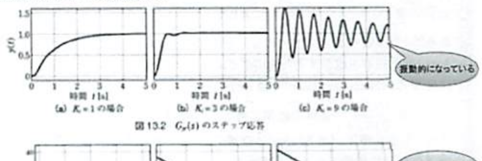


図 13.2 $G_{yr}(s)$ のステップ応答

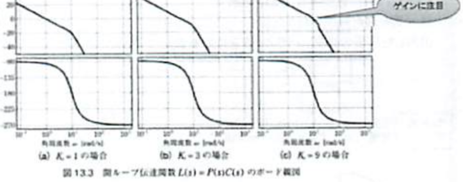
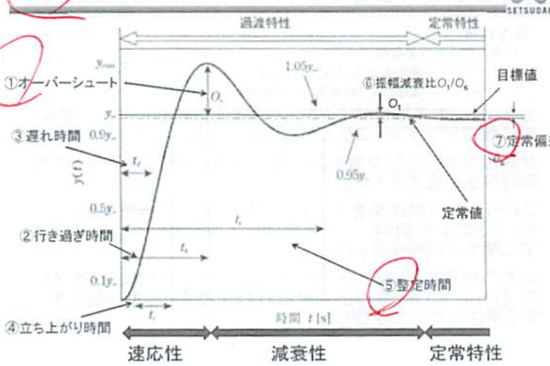


図 13.3 開ループ伝達関数 $L(s) = P(s)C(s)$ のボード線図

時間応答の指標

29



ステップ入力に対する定常偏差

30

フィードバック系の一巡伝達関数を

$$L(s) = \frac{K}{1+Ts}$$ の1次遅れとすると

フィードバック系の定常偏差は

$$e_s = \lim_{t\to\infty}\{r(t) - y(t)\} = \lim_{s\to 0} s\{r(s) - y(s)\}$$
$$= \lim_{s\to 0} s\left\{r(s) - \frac{L(s)}{1+L(s)}r(s)\right\} = \lim_{s\to 0} s\left\{\frac{1}{1+L(s)}\right\}r(s)$$

今、単位ステップが目標値とすると定常位置偏差は

$$e_p = \lim_{s\to 0} s\left\{\frac{1}{1+L(s)}\right\}\frac{1}{s} = \frac{1}{1+L(0)}$$ 最終値の定理

$L(0) = K$であり、ゲインKを十分大きくすれば定常位置偏差はゼロに近づく。またこの時のKを位置偏差定数K_pという。

開ループ伝達関数の理想

制御系の設計はセンサやアクチュエータに依存するのは明らかであるが、基本的に制御器の設計にある。制御器の特性はその開ループ伝達関数によって表され、この周波数特性を望ましいものすることによって設計が実現される。

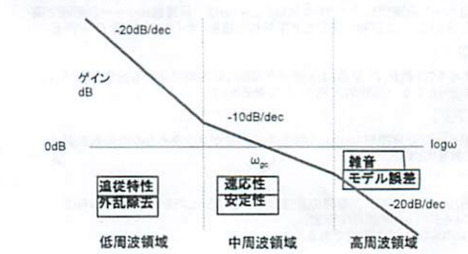
では望ましい周波数特性とは　ゲイン　除去

- 低い周波数領域（＝外乱や目標値の変化が想定される領域）ではできるだけ[　　]を大きくする
  ＝目標値[　　]性能や外乱[　　]性能を高める　安定　ゲイン交差周波数
  追従
- 高い周波数領域（＝雑音やモデル誤差が存在する領域）ではできるだけ[　　]を小さくする＝[　　]を高める
- ゲインが0dBになる[　　　　]を大きくしながら、ハンチングをおこす条件を回避できるように制御器の[　　]を大きくとる＝[　　]や[　　]を高める　位相余裕
  ゲイン

安定性

望ましい周波数特性

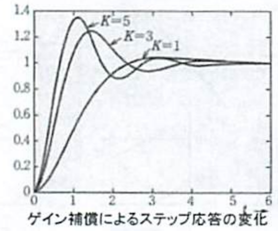
- 開ループ伝達関数



ゲイン補償

- ゲインを上げると速応性が良くなるが，減衰性が悪くなる。逆に，ゲインを下げると減衰性は良くなるが，速応性が悪くなる。
- ゲインを下げることで，システムの安定度を高めることができる。

$$G_c(s) = K$$

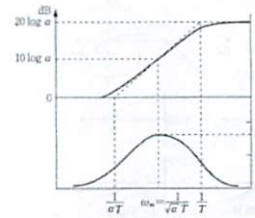


ゲイン補償によるステップ応答の変化

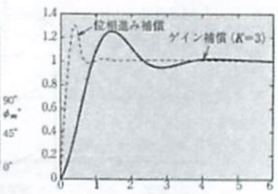
位相進み補償

- 位相をω_m周辺で進ませる。高周波領域でゲインを増大させる。
- 位相を進ませることで位相余裕を改善し，減衰性を確保しつつ，速応性を改善することができる。

$$C(s) = \frac{K(1+\alpha Ts)}{1+Ts}, \quad \alpha > 1$$



位相進み補償器のボード線図

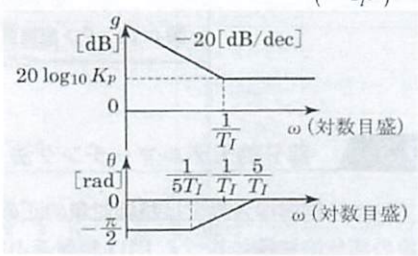


ステップ応答の比較

PI補償

- 高周波領域では変化が少ないが，低周波領域でゲイン特性を大きくしている。
- 積分要素により，ステップ入力に対する定常偏差を0にすることができる。
- 位相遅れが安定性を損なう恐れもある。

$$C(s) = K_p\left(1 + \frac{1}{T_I s}\right)$$

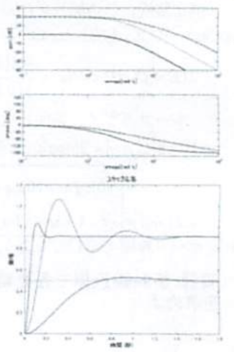


ループ整形演習1

制御対象 $P(s) = \dfrac{10}{s^2+6s+10}$ に対してあるゲイン補償 $C(s) = K$ を行い緑線の結果を得た。
さらに振動性状を改善するためにゲイン交差周波数付近にある補償を行った。
最初のゲイン補償と次の補償の種類、パラメータを推定せよ。

$$C(s) = \frac{\boxed{10}(\boxed{0.3}s+1)}{(\boxed{0.03}s+1)}$$

ゲイン補償　w_{gc} =9.58rad/s　Pm =35.1°
位相進み補償　w_{gc} =24.2rad/s　Pm =60.4°

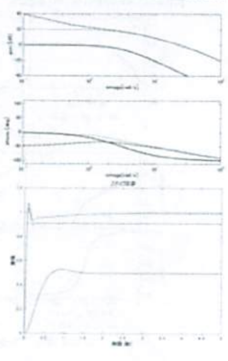


ループ整形演習2

制御対象 $P(s) = \dfrac{10}{s^2+6s+10}$ に対してあるゲイン補償 $C(s) = K$ を行いさらに振動性状を改善するためにゲイン交差周波数付近に位相進み補償を行い
$C(s) = K\dfrac{0.3s+1}{0.03s+1}$ 破線の結果を得た。
それでも定常偏差が残るために、交差周波数付近に影響を与えない範囲で積分器を含む補償を行った。
追加した補償の種類、パラメータを推定せよ。

$$C2(s) = C(s)\frac{\boxed{1}s+1}{\boxed{1}s}$$

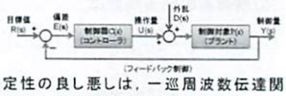
位相進み補償　Wgc =24.2rad/s　Pm =60.4°
PI補償　Wgc =24.2rad/s　Pm =58.0°



制御目的と設計　～考慮すべき5項目～

① 制御系として安定であること・・・[　　　]
② 目標値への出力の追従性をよくすること・・・[　　　]
③ 外乱の影響が出力に現れないこと・・・[　　　]
④ 過渡応答パターンをよくすること・・・[　　　]
⑤ プラント制御モデルに誤差があっても①~④が保証されること・・・[　　　]

安定であるとは



フィードバック制御系の安定性の良し悪しは，一巡周波数伝達関数 L(jω)=P(jω)C(jω)の位相余裕，ゲイン余裕で定量的に評価される．
定性的には，位相余裕に関しては[ゲイン交差周波数]（すなわち|L(jω)|=1となる周波数）ω_{gc}において∠L($j\omega_{gc}$)[>-180°] となること，
ゲイン余裕に関しては[位相交差周波数]（すなわち∠L(jω)=-180° となる周波数）ω_{pc}において|L($j\omega_{pc}$)|[<1] となることである．

14.1-5 設計要件のまとめ

① 安定性
　開ループ$L(j\omega) = P(j\omega)C(j\omega)$から位相余裕、ゲイン余裕を評価
② 目標追従特性
　$E(s) = S(s)R(s) = \dfrac{1}{1+P(s)C(s)}R(s)$から感度関数を[小さく]すればよい。
③ 外乱除去
　$Y(s) = S(s)P(s)D(s) = \dfrac{P(s)}{1+P(s)C(s)}D(s)$から感度関数を[小さく]すればよい。
④ 過渡応答特性
　$Y(s) = T(s)R(s)$から相補感度関数を希望する特性に近づける。
⑤ ロバスト性
　$\delta(j\omega)$を含む開ループを$|\delta(j\omega)T(j\omega)| < 1$ とする。そのためには相補感度関数$|T(j\omega)|$を[小さく]＝開ループ$|P(j\omega)C(j\omega)|$を[小さく]。

制御工学Ⅱのまとめ

- 到達目標：
  1）周波数応答法の理解。
  2）フィードバック制御系の安定判別ができる。
  3）フィードバック補償により制御系の設計ができる
- 工学にとって重要なダイナミクスの周波数表現について学習し、周波数空間でダイナミクスの応答を考えた。
- 対数表現された周波数空間を用いるボード線図を利用して制御特性を把握できるようになった。
- フィードバック制御系をより深く学び、開ループ特性を用いたナイキストの安定判別やボード線図による安定判別を学習し、安定に関する理解を深めた。
- 以上の知識を用いたループ整形法によって、望ましい制御系の設計について、具体的な設計仕様を設定して制御器を実現する手法について学習した。