

第 8 章 : フィードバック制御系の設計法

8.1 設計手順と性能評価
キーワード : 設計手順, 性能評価

8.2 PID 補償による制御系設計
キーワード : P(比例), I(積分), D(微分)

8.3 位相進み-遅れ補償による制御系設計
キーワード : 位相遅れ補償, 位相進み補償

学習目標 : 一般的な制御系設計における手順と制御系の性能評価について学ぶ。ループ整形の考え方を用いて、位相遅れ補償, 位相進み補償による制御系設計を習得する。

$$P(s) = \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

$$\omega_n = 10 \quad \zeta = 0.5 \quad k = 10$$

第 8 章 : フィードバック制御系の設計法

8.1 設計手順と性能評価
キーワード : 設計手順, 性能評価

8.2 PID 補償による制御系設計
キーワード : P(比例), I(積分), D(微分)

8.3 位相進み-遅れ補償による制御系設計
キーワード : 位相遅れ補償, 位相進み補償

学習目標 : 一般的な制御系設計における手順と制御系の性能評価について学ぶ。ループ整形の考え方を用いて、位相遅れ補償, 位相進み補償による制御系設計を習得する。

8. フィードバック制御系の設計法

8.1 設計手順と性能評価

制御系の設計手順

レギュレータ問題(定置制御)
 : 一定の値に保持(制)
 人工衛星の姿勢制御など

http://edu.jaxa.jp/materialDB/list.php?category=theme&node_id=10000000

サーボ問題(追従制御)
 : 目標値に良好に追従(御)
 航空機の自動操縦など

http://spaceinfo.jaxa.jp/gallery/gallery-j/movie_allflex_j.html

(広い意味では)

- センサ・アクチュエータの選択・配置
- 制御量・操作量の決定
- 動作環境・拘束条件の分析... など

LEGO

タッチセンサ

制御系の設計手順

[ステップ1]
 制御対象の数学的モデルを求める。

[ステップ2]
 制御目的から、性能仕様を決める。

[ステップ3]
 性能仕様を満たすように、コントローラを設計する。

[ステップ4]
 シミュレーションにより、設計された制御系を評価する。必要ならば以上のステップを繰り返し設計をやり直す。

[ステップ5]
 コントローラを実装し、ハードウェアを用いてテストする。

第8章：フィードバック制御系の設計法

8.1 設計手順と性能評価
キーワード：設計手順, 性能評価

8.2 PID 補償による制御系設計
キーワード：P(比例), I(積分), D(微分)

8.3 位相進み-遅れ補償による制御系設計
キーワード：位相遅れ補償, 位相進み補償

学習目標：一般的な制御系設計における手順と制御系の性能評価について学ぶ。ループ整形の考え方をを用いて、位相遅れ補償, 位相進み補償による制御系設計を習得する。

制御系の性能評価

定常特性
 過渡特性

定常特性 (§ 4.2)
 $L(s) = P(s)K(s)$
 e_s : 定常位置偏差 $e_s = \frac{1}{1+L(0)}$
 K_p : 位置偏差定数 $K_p = L(0)$

表4.1 制御系の型と定常偏差

| 制御系の型 | $r(t)=1$ | $r(t)=t$ | $r(t)=t^2/2$ |
|-------|-------------------|-----------------|-----------------|
| 0型 | $\frac{1}{1+K_p}$ | ∞ | ∞ |
| 1型 | 0 | $\frac{1}{K_v}$ | ∞ |
| 2型 | 0 | 0 | $\frac{1}{K_a}$ |

図4.4 定常位置偏差

制御系の性能評価

定常特性
 過渡特性 { 時間応答, 周波数応答 } に基づく性能評価 → 速応性, 減衰特性

過渡特性
 時間応答に基づく性能評価 (§ 3.4)

立上り時間 T_r
 遅れ時間 T_d
 行過ぎ時間 T_p
 オーバーシュート A_{max}
 整定時間 T_s
 減衰比

図3.10 過渡応答と諸特性値

制御系の性能評価

定常特性
 過渡特性 { 時間応答, 周波数応答 } に基づく性能評価 → 速応性, 減衰特性

過渡特性
 時間応答に基づく性能評価 (§ 3.3)

2次系 $P = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$ ω_n : 自然角周波数
 ζ : 減衰係数 (2次系)

図3.7 2次系のステップ応答

図3.8 2次系の極の位置

制御系の性能評価

定常特性
 過渡特性 { 時間応答, 周波数応答 } に基づく性能評価 → 速応性, 減衰特性

過渡特性
 時間応答に基づく性能評価 (続き) (§ 3.4)

図3.9 極の位置とインパルス応答

制御系の性能評価

定常特性
 過渡特性 { 時間応答, 周波数応答 } に基づく性能評価 → 速応性, 減衰特性

閉ループ伝達関数に基づく性能評価 (p.147) $|T(0)|=1$ の場合

バンド幅 ω_{bw} : -3dB ($\frac{1}{\sqrt{2}}$ 倍) 速応性

ピークゲイン M_r : $M_r = 1.1 \sim 1.5$ ($M_r = 1.3$) 減衰特性

共振周波数 ω_r

図8.1 閉ループゲイン特性

感度関数 S についても: $M_r < 2$

制御系の性能評価

定常特性
 過渡特性 { 時間応答
 周波数応答 }

閉ループ 伝達関数に基づく性能評価
 開ループ

閉ループ伝達関数に基づく性能評価

バンド幅 $\omega_{bwS} : -3\text{dB} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \text{倍} \right)$
 ピークゲイン $M_{rS} : M_{rS} < 2$
 共振周波数 ω_{rS}

感度関数ゲイン特性

13

制御系の性能評価

定常特性 { 時間応答
 周波数応答 }

閉ループ 伝達関数に基づく性能評価
 開ループ

閉ループ伝達関数に基づく性能評価 (p.148)

安定余裕 [ゲイン余裕 / 位相余裕]
 [ゲイン/位相] 交差周波数
 (速応性): ゲイン交差周波数 $\omega_{gc} \leq \omega_{bw}$ ($PM \leq 90^\circ$)
 (減衰特性): 位相余裕 PM
 $PM \geq 2 \sin^{-1} \left(\frac{1}{2M_r} \right)$

経験的指針
 追従制御: $PM = 40 \sim 60^\circ, GM = 10\text{dB} \sim 20\text{dB}$
 定置制御: $PM \geq 20^\circ, GM = 3\text{dB} \sim 10\text{dB}$
 2次系の場合: $PM \approx 100 \times \zeta$

14

制御系の性能評価 LTIview

ボード線図 (Bode Diagram)
 ナイキスト線図 (ベクトル軌跡) (Nyquist Diagram)
 ステップ応答 (Step Response)
 閉ループゲイン特性 (Bode Magnitude Diagram)
 極・零点配置 (Pole-Zero Map)

15

第8章: フィードバック制御系の設計法

8.1 設計手順と性能評価
 キーワード: 設計手順, 性能評価

8.2 PID 補償による制御系設計
 キーワード: P (比例), I (積分), D (微分)

8.3 位相進み-遅れ補償による制御系設計
 キーワード: 位相遅れ補償, 位相進み補償

学習目標: 一般的な制御系設計における手順と制御系の性能評価について学ぶ。ループ整形の考え方をを用いて、位相遅れ補償、位相進み補償による制御系設計を習得する。

16

8.2 PID補償による制御系設計

(偏差の) 比例 (Proportional) 積分 (Integral) 微分 (Derivative)

PID 補償

図2.2 PID 補償

P 補償
 コントローラ $K_p(s) = K_p$ 比例ゲイン (定数)
 ・定常位置偏差を(必ずしも) 0 にできない (積分器が必要: 型)
 ・ゲインの増大 → 不安定になり得る

17

PI 補償

コントローラ $K_{PI}(s) = K_p + \frac{K_I}{s} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right)$
 $T_I = \frac{K_p}{K_I}$ (積分時間)

定常特性の改善
 低周波: -20dB/dec , ゲイン大, $\omega \rightarrow 0$ で ∞

“偏差が残っている限り、これが積分されて操作量に反映される”

図3.3 PI 補償のボード線図

18

[例 8.1]

制御対象 $P(s) = \frac{10}{(s+1)(s+10)}$

P 補償

$$K_p = 10,$$

$$L_p = PK_p = \frac{100}{(s+1)(s+10)}$$

PI 補償

$$K_{PI} = \frac{s+1}{s} = 1 + \frac{1}{s} \quad \left(\begin{matrix} K_p = 1 \\ K_I = 1 \end{matrix} \right)$$

$$L_{PI} = PK_{PI} = \frac{10}{s(s+10)}$$

➡ 定常偏差 = 0
低周波ゲインが大きい
(しかし応答は遅い)
交差周波数が低い

図8.4 開ループゲインとステップ応答 19

PD 補償

コントローラ

$$K_{PD}(s) = K_p + K_D s$$

$$= K_p(1 + T_D s)$$

$$T_D = \frac{K_D}{K_p} \text{ (微分時間)}$$

過渡特性の改善

“偏差が増加(減少)しつつあるとき、その先を越えて操作量を大きく(小さく)する”

[注] 理想的な微分器は実現困難

$$K'_{PD} = \frac{K_p(1 + T_D s)}{1 + (T_D/N)s} \quad (-3 \leq N \leq 20)$$

図8.5 PD 補償のボード線図

PID 補償

コントローラ

$$K_{PID}(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s$$

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

$$T_I = \frac{K_p}{K_I} \text{ (積分時間)}$$

$$T_D = \frac{K_D}{K_p} \text{ (微分時間)}$$

定常特性と過渡特性を改善

図8.6 PID 補償のボード線図

[例 8.2]

制御対象 $P(s) = \frac{10}{(s+1)(s+10)}$

コントローラ

$$K_{PID}(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s$$

$$= \frac{1}{s} \frac{(s+1)(s+10)}{(s+1)(s+10)}$$

$$= \frac{4}{s} \frac{s}{(s+1)(s+10)}$$

$[K_p = 2.75, K_I = 2.5, K_D = 0.25]$

$$L_{PID} = PK_{PID} = \frac{2.5}{s}$$

定常特性: $L(0) = \infty$
低周波ゲインが大きい

過渡特性(速応性):
ゲイン交差周波数 ω_{gc}
PI 補償と比べて高い

図8.7 開ループゲインとステップ応答 22

[例 8.2] (続き)

定常特性:
 $L(0) = \infty$
低周波ゲインが大きい

過渡特性(速応性):
ゲイン交差周波数 ω_{gc}
 ω_{gc} を大きくする

減衰特性:
位相余裕 PM
PM を十分に確保する

23

第 8 章 : フィードバック制御系の設計法

8.1 設計手順と性能評価
キーワード: 設計手順, 性能評価

8.2 PID 補償による制御系設計
キーワード: P(比例), I(積分), D(微分)

8.3 位相進み-遅れ補償による制御系設計
キーワード: 位相遅れ補償, 位相進み補償

学習目標: 一般的な制御系設計における手順と制御系の性能評価について学ぶ。ループ整形の考え方をを用いて、位相遅れ補償, 位相進み補償による制御系設計を習得する。

24

8.3 位相進み-遅れ補償による制御系設計

感度関数 $S(s)$ (§ 4.1)

- 低感度特性 (パラメータ変動): $\Delta y = S\Delta p$
- 外乱抑制: $y = Sd$
- 目標値追従: $e = Sr$

$$S(s) = \frac{1}{1 + P(s)K(s)}$$

相補感度関数 $T(s)$

- 目標値追従: $y = Tr$
- ロバスト安定性: $|W_2 T| < 1$
- 雑音除去: $y = -Tn$

$$T(s) = \frac{P(s)K(s)}{1 + P(s)K(s)}$$

拘束 $S(s) + T(s) = 1 \Rightarrow$ 同時に 0 に近づけることは出来ない

周波数帯を分ける

- 低周波数帯: S を小さくする
- 高周波数帯: T を小さくする

感度関数

相補感度関数

26

$S = \frac{1}{1+L}$ より, 低周波域で $|L|$ を大きく ($|L| \gg 1$) $\Rightarrow S$: 小

$T = \frac{L}{1+L}$ より, 高周波域で $|L|$ を小さく ($|L| \ll 1$) $\Rightarrow T$: 小

(閉ループ伝達関数から, 開ループ伝達関数へ)

図8.9 ループ整形

27

【Key Points】

- 定常特性: 低周波ゲイン $L(0)$ を大きくとる
- 速応性: ゲイン交差周波数 ω_{gc} を高くする
- 減衰特性: 位相余裕 PM を確保する

[復習] 位相余裕

28

【Key Points】
(交差周波数付近)

ゲインの傾きが急 ($-40\text{dB}/\text{dec}$ 以下)

- ゲインと位相の関係 (§ 5.4)
- 最小位相系

好ましくない位相遅れ

- $-20\text{dB}/\text{dec} \rightarrow -90^\circ$
- $-40\text{dB}/\text{dec} \rightarrow -180^\circ$ (不安定)

緩やかなゲインの傾き ($-20\text{dB}/\text{dec}$)

29

【Key Points】
(低周波域)

開ループゲイン $|L|$ を大きく

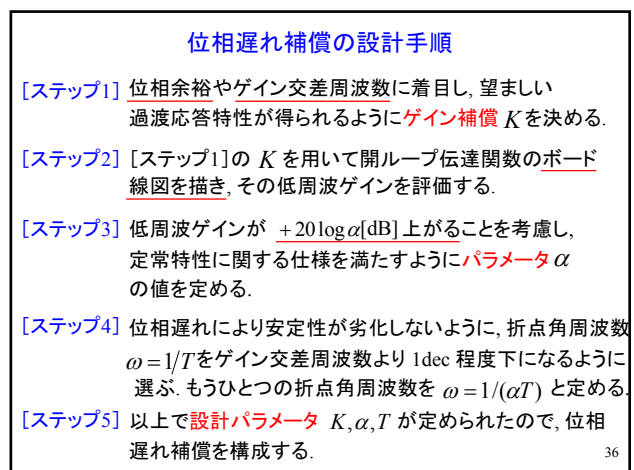
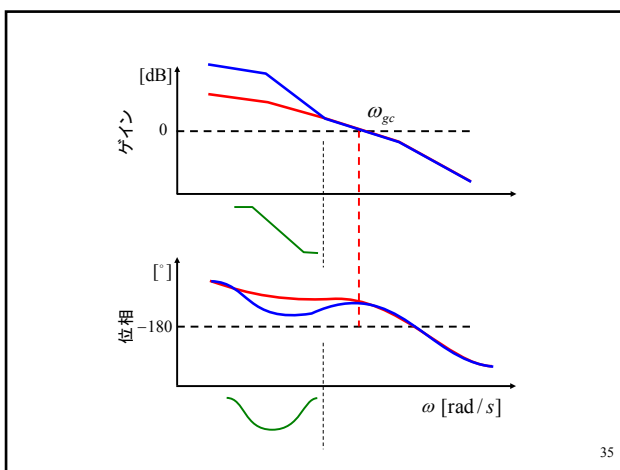
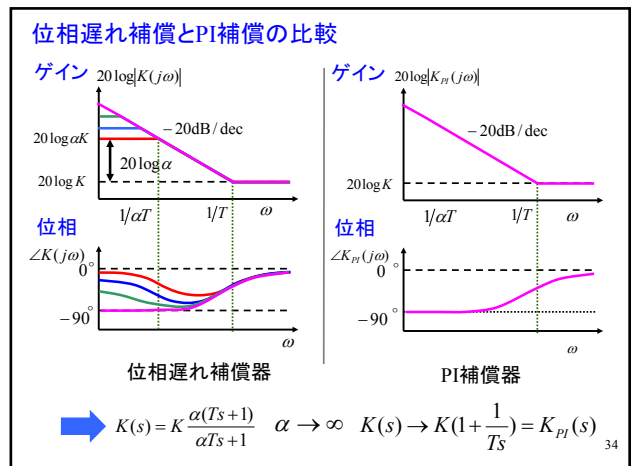
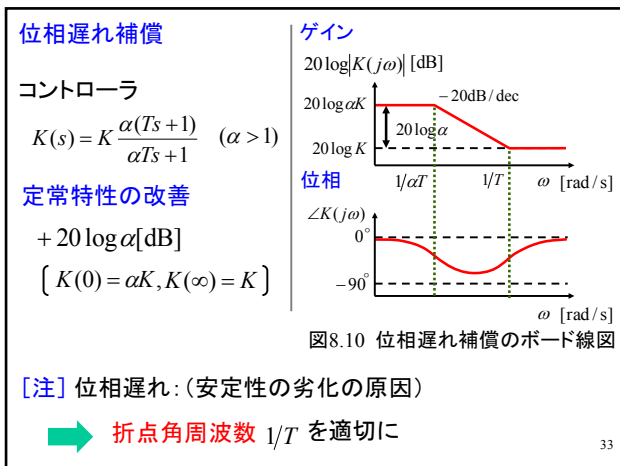
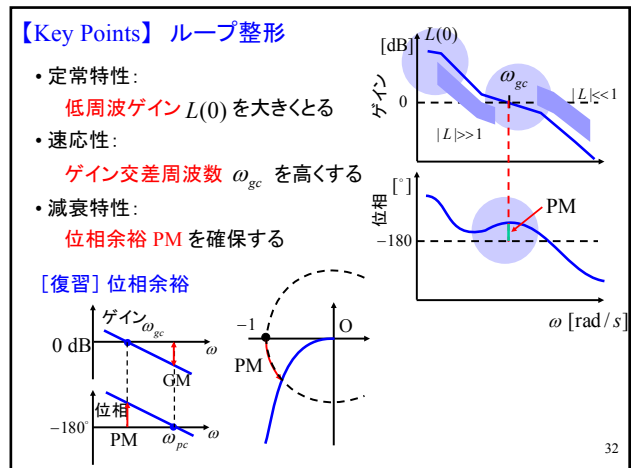
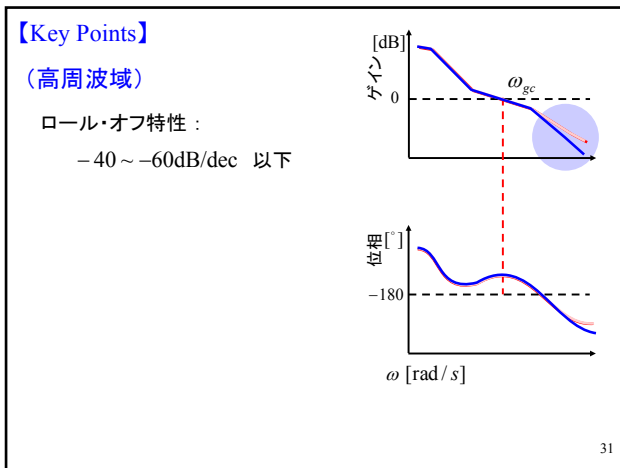
偏差定数 K_p, K_v が大

定常偏差: 小 $\frac{1}{1+K_p}, \frac{1}{K_v}$

目標値

- ステップ状 \rightarrow 1型 ($1/s$ を含む) $\rightarrow -20\text{dB}/\text{dec}$
- ランプ状 \rightarrow 2型 ($1/s^2$ を含む) $\rightarrow -40\text{dB}/\text{dec}$

30



[例 8.3]

制御対象 $P(s) = \frac{10}{s(s+1)(s+10)}$ 性能仕様
 速度偏差定数 (定常特性) $K_v \geq 10$
 位相余裕 (減衰特性) $PM \geq 40^\circ$

[ステップ1] 位相余裕やゲイン交差周波数に着目し、望ましい過渡応答特性が得られるようにゲイン補償 K を決める。

ゲイン交差周波数 $\omega_{gc} \approx 0.8$ [rad/sec]
 位相余裕 $PM = 47^\circ$
 $PM \geq 40^\circ$ を満たす **OK**

$\rightarrow K = 1$

図8.11 位相遅れ補償と開ループ特性

[ステップ2] [ステップ1]の K を用いて開ループ伝達関数のボード線図を描き、その低周波ゲインを評価する。

開ループ伝達関数 $L' = PK = \frac{10}{s(s+1)(s+10)}$ ($K=1$)

速度偏差定数 $K_v' = \lim_{s \rightarrow 0} sL'(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{10}{(s+1)(s+10)} = 1$

性能仕様は $K_v \geq 10$

低周波ゲイン10倍以上必要

図8.11 位相遅れ補償と開ループ特性

[ステップ3] 低周波ゲインが $+20 \log \alpha$ [dB] 上がることを考慮し、定常特性に関する仕様を満たすようにパラメータ α の値を定める。

低周波ゲイン10倍で **速度偏差定数 $K_v = 10$**
 $\rightarrow \alpha = 10$

ゲイン $20 \log K(j\omega)$ [dB]
 $20 \log \alpha K$
 $20 \log K$
 -20 dB/dec
 $1/\alpha T$ $1/T$ ω [rad/s]

位相 $\angle K(j\omega)$
 0° -90°
 ω [rad/s]

図8.11 位相遅れ補償と開ループ特性

[ステップ4] 位相遅れにより安定性が劣化しないよう、折点角周波数 $\omega = 1/T$ をゲイン交差周波数より 1dec 程度下になるよう選ぶ。もうひとつの折点角周波数を $\omega = 1/(\alpha T)$ と定める。

$T = 10$ ($\omega = 0.1$) と選べば、ゲイン交差周波数 ω_{gc} より十分に小さい。

折点角周波数 $\frac{1}{\alpha T} = 0.01, \frac{1}{T} = 0.1$

図8.11 位相遅れ補償と開ループ特性

[ステップ5] 以上で設計パラメータ K, α, T が定められたので、位相遅れ補償を構成する。

位相遅れ補償 $K(s) = K \frac{\alpha(Ts+1)}{\alpha Ts+1}$

$K=1, \alpha=10, T=10$

$K(s) = 1 \cdot \frac{10(10s+1)}{10 \cdot 10s+1} = \frac{s+0.1}{s+0.01}$

ゲイン交差周波数 $\omega_{gc} \approx 0.8$
 位相余裕 $PM \geq 40^\circ$

41

[CHECK]

性能仕様
 速度偏差定数 (定常特性) $K_v \geq 10$
 位相余裕 (減衰特性) $PM \geq 40^\circ$

$L(s) = P(s)K(s) = \frac{10(s+0.1)}{s(s+0.01)(s+1)(s+10)}$

$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} sL(s) = \frac{1}{0.1} = 10$ **OK**

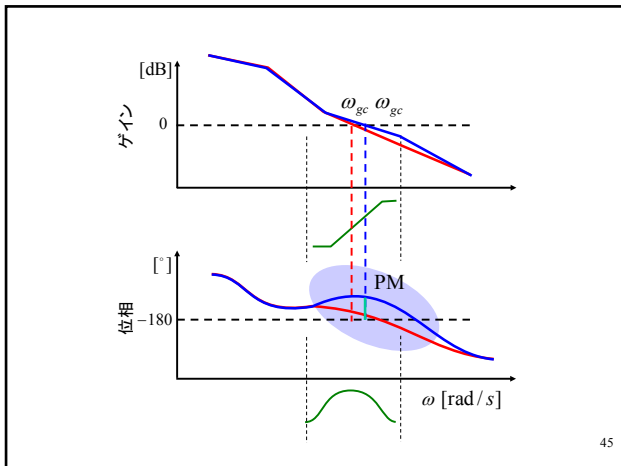
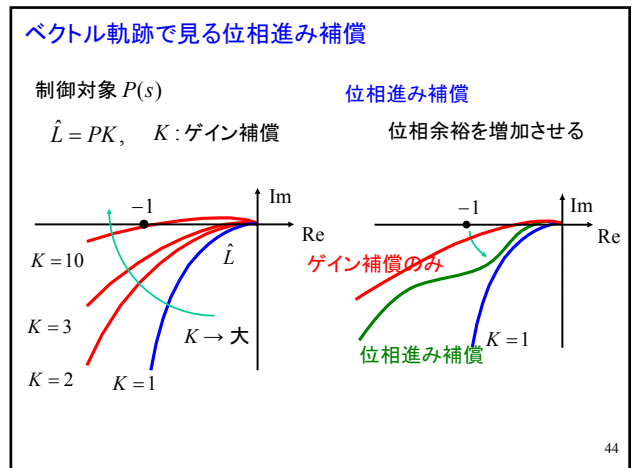
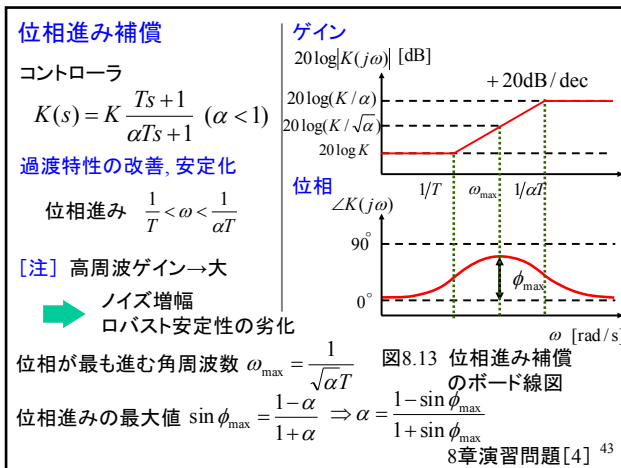
$PM \geq 40^\circ$ $\omega_{gc} \approx 0.8$ **OK**

ステップ応答, ランプ応答 **OK**

ステップ応答

ランプ応答

42



位相進み補償の設計手順

[ステップ1] 速応性や定常特性に対する仕様が満たされるように、**ゲイン補償 K**の値を決める。

[ステップ2] [ステップ1]の K を用いて開ループ伝達関数 $\hat{L}(s) = KP(s)$ のボード線図を描き、その位相余裕 \widehat{PM} を評価する。

与えられた位相余裕 PM とこの \widehat{PM} との差 $\hat{\phi} = PM - \widehat{PM}$ が、必要な位相進み量となる。

これに適当な (例えば 5° 以上の) 余裕を考慮し、 $(\phi_{\max} = \hat{\phi} + 5^\circ \text{ 以上})$ と定める。

[ステップ3] $\alpha = \frac{1 - \sin \phi_{\max}}{1 + \sin \phi_{\max}}$ から、**パラメータ α**の値を決める。

46

[ステップ4] 位相進み補償では最も位相が進む角周波数で、ゲインが $1/\sqrt{\alpha}$ 倍に上がる。

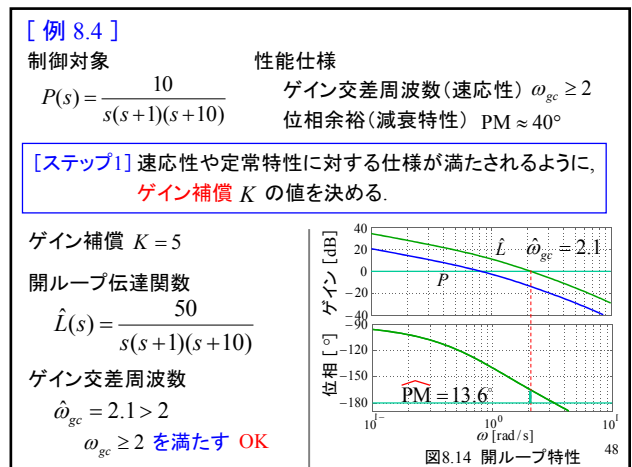
そこで $|\hat{L}(j\omega)|$ が $\sqrt{\alpha}$ ($= 20 \log \sqrt{\alpha}$ [dB]) である角周波数を、補償後の新しいゲイン交差周波数 ω_{\max} とおく。

[ステップ5] $\omega_{\max} = \frac{1}{\sqrt{\alpha T}}$ から、**パラメータ T**の値を決める。

このとき位相進み補償の折点角周波数は、 $1/T = \omega_{\max} \sqrt{\alpha}$, $1/(\alpha T) = \omega_{\max} / \sqrt{\alpha}$ となる。

[ステップ6] 以上で設計パラメータ K, α, T が定められたので、 $K(s) = K \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1}$ から、位相進み補償を構成する。

47



[ステップ2] [ステップ1]の K を用いて開ループ伝達関数 $\hat{L}(s) = KP(s)$ のボード線図を描き、その位相余裕 \widehat{PM} を評価する。
与えられた位相余裕 PM とこの \widehat{PM} との差 $\hat{\phi} = PM - \widehat{PM}$ が、必要な位相進み量となる。
これに適当な(例えば 5° 以上の)余裕を考慮し、
 $(\hat{\phi}_{\max} = \hat{\phi} + 5^\circ \text{以上})$ と定める。

位相余裕 $\widehat{PM} = 13.6^\circ$
性能仕様は $PM \approx 40^\circ$

➡ $\hat{\phi} = PM - \widehat{PM} = 40 - 13.6 = 26.4^\circ$
(必要な位相進み量)

➡ $\hat{\phi}_{\max} = \hat{\phi} + 10^\circ = 36.4^\circ$
(マージン)

図8.14 開ループ特性 49

[ステップ3] $\alpha = \frac{1 - \sin \hat{\phi}_{\max}}{1 + \sin \hat{\phi}_{\max}}$ から、パラメータ α の値を決める。

$$K(s) = K \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1}$$

$$\alpha = \frac{1 - \sin \hat{\phi}_{\max}}{1 + \sin \hat{\phi}_{\max}}$$

$$\hat{\phi}_{\max} = 36.4^\circ$$

➡ $\alpha = 0.255$

図8.14 開ループ特性 50

[ステップ4] 位相進み補償では最も位相が進む角周波数で、ゲインが $1/\sqrt{\alpha}$ 倍になる。
そこで $|\hat{L}(j\omega)|$ が $\sqrt{\alpha}$ ($= 20 \log \sqrt{\alpha}$ [dB]ある角周波数を、補償後の新しいゲイン交差周波数 と置く。

$|\hat{L}(j\omega_{\max})| = \sqrt{\alpha} = 0.505$
に下がっている。
(後で 0dB に上がる。)

➡ $\omega_{\max} = 3.0$

図8.14 開ループ特性 51

[ステップ5] $\omega_{\max} = \frac{1}{\sqrt{\alpha T}}$ から、パラメータ T の値を決める。
このとき位相進み補償の折点角周波数は、
 $1/T = \omega_{\max} \sqrt{\alpha}$, $1/(\alpha T) = \omega_{\max} / \sqrt{\alpha}$ となる。

$$\omega_{\max} = \frac{1}{\sqrt{\alpha T}} \Rightarrow T = \frac{1}{\sqrt{\alpha} \omega_{\max}}$$

$$\omega_{\max} = 3.0, \alpha = 0.255$$

➡ $T = 0.660$

折点角周波数
 $\frac{1}{T} = 1.52, \frac{1}{\alpha T} = 5.94$

図8.14 開ループ特性 52

[ステップ6] 以上で設計パラメータ K, α, T が定められたので、
 $K(s) = K \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1}$ から、位相進み補償を構成する。

位相進み補償

$$K(s) = K \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1}$$

$$K = 5, \alpha = 0.255, T = 0.660$$

$$K(s) = 5 \cdot \frac{0.66s + 1}{0.255 \cdot 0.66s + 1} = \frac{19.6(s + 1.52)}{s + 5.94}$$

ゲイン交差周波数 $\omega_{gc} = 3.0$
位相余裕 $PM = 38^\circ$

図8.14 開ループ特性 53

[CHECK]

性能仕様

ゲイン交差周波数(速応性)
 $\omega_{gc} \geq 2$

位相余裕(減衰特性)
 $PM \approx 40^\circ$

$\omega_{gc} = 3.0 (= \omega_{\max})$ OK
 $PM \approx 38^\circ$ OK
ステップ応答 OK

図8.14 開ループ特性 54

位相進み-遅れ補償

$$K(s) = K \left(\frac{T_1 s + 1}{\alpha_1 T_2 s + 1} \right) \left(\frac{\alpha_2 (T_2 s + 1)}{\alpha_2 T_2 s + 1} \right)$$

位相進み 位相遅れ ゲイン
 $(\alpha_1 < 1, \alpha_2 > 1)$
 [注] 多段にしても良い

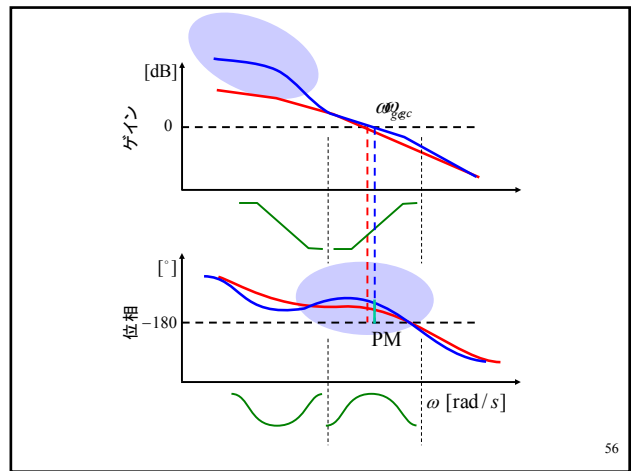
定常特性・過渡特性の改善

+20log α_2 [dB]

位相進み: $\frac{1}{T_1} < \omega < \frac{1}{\alpha_1 T_1}$

[注] 位相遅れ, 高周波ゲイン

図 8.16 位相進み-遅れ補償のボード線図



[例 8.5]

制御対象のモデル

$$P(s) = \frac{0.01}{s^2 + 0.04s + 0.01}$$

位相遅れ (PI 補償)

$$K_{PI}(s) = 100 \frac{s + 0.1}{s}$$

$L_1 = PK_{PI}$ 低周波ゲイン: 大

位相進み

$$K_L(s) = \frac{14.3(s + 0.53)}{s + 7.52}$$

位相進み-遅れ補償

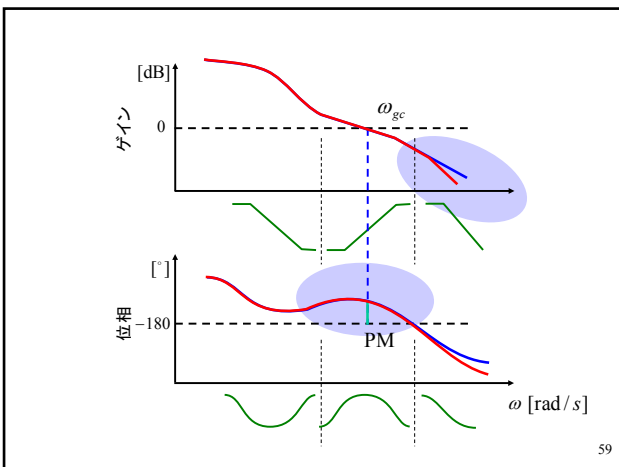
$$K_{LL}(s) = \frac{1430(s + 0.1)(s + 0.53)}{s(s + 7.52)}$$

$L_2 = PK_{LL}$ ゲイン交差周波数: 大
傾き: 緩
位相余裕: 十分

$$K(s) = K_{LL}(s) \times \frac{10}{s^2 + 10s + 100} = \frac{143000(s + 0.1)(s + 0.53)}{s(s + 7.52)(s^2 + 10s + 100)}$$

ロール・オフ特性

$L = PK$



実際の制御対象:

$$\tilde{P}(s) = \frac{0.01}{s^2 + 0.04s + 0.01} \cdot \frac{15^2}{s^2 + 2 \times 0.01 \times 15s + 15^2}$$

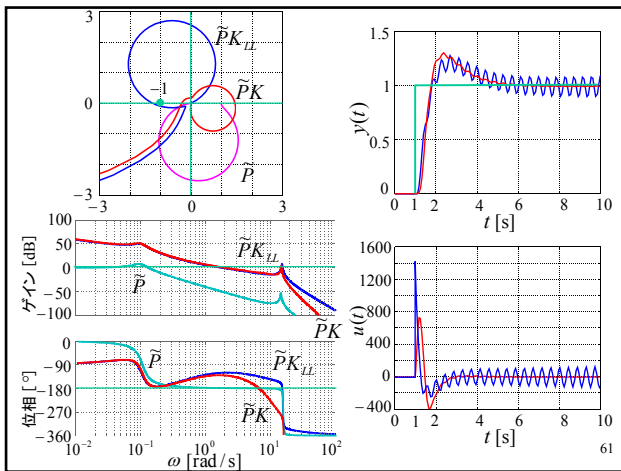
振動モード

a) 位相進み-遅れ補償: K_{LL}

$$K_{LL}(s) = \frac{1430(s + 0.1)(s + 0.53)}{s(s + 7.52)}$$

b) ローラ・オフ特性を有する
位相進み-遅れ補償: K

$$K(s) = K_{LL}(s) \times \frac{10}{s^2 + 10s + 100}$$



実際の制御対象:

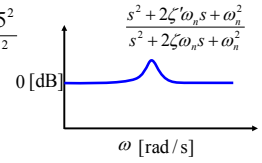
$$\tilde{P}(s) = \frac{0.01}{s^2 + 0.04s + 0.01} \cdot \frac{15^2}{s^2 + 2 \times 0.01 \times 15s + 15^2}$$

振動モード

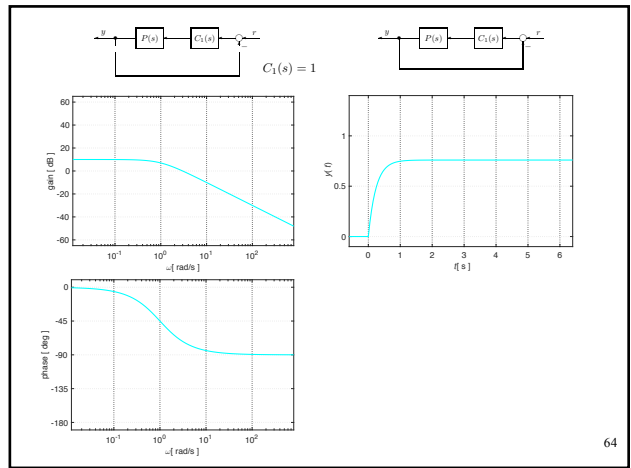
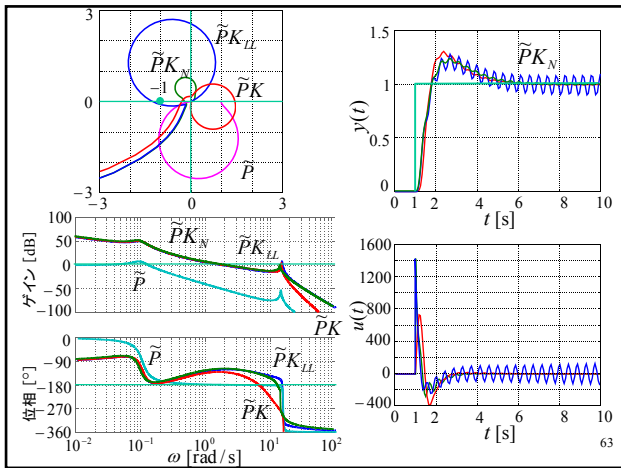
a) 位相進み-遅れ補償: K_{LL} $K_{LL}(s) = \frac{1430(s+0.1)(s+0.53)}{s(s+7.52)}$

c) ノッチフィルタを備えた位相進み-遅れ補償:

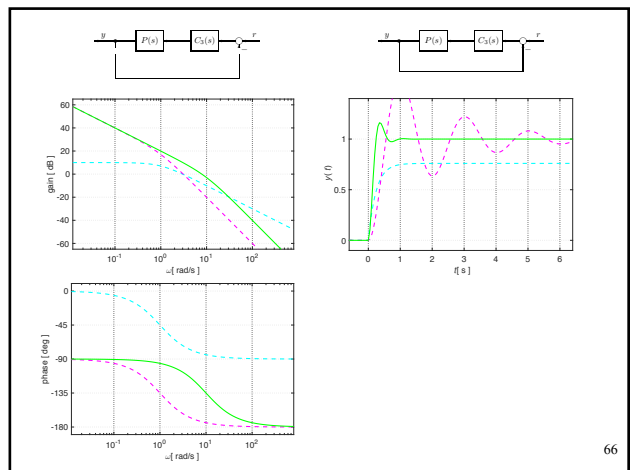
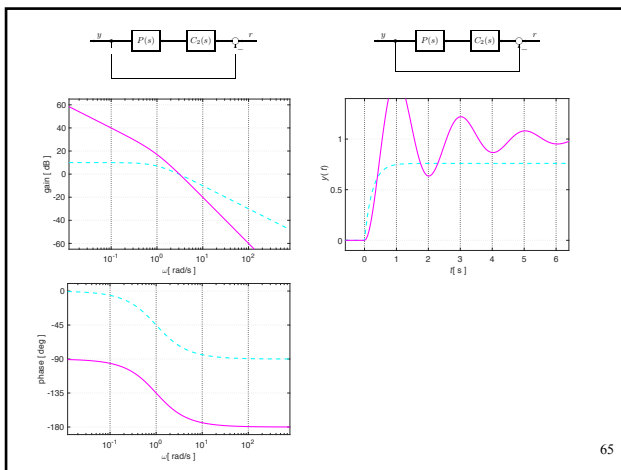
$$K_N(s) = K_{LL} \cdot \frac{s^2 + 2 \times 0.03 \times 15s + 15^2}{s^2 + 2 \times 0.1 \times 15s + 15^2}$$



62



64



66

第 8 章 : フィードバック制御系の設計法

8.1 設計手順と性能評価

キーワード : 設計手順, 性能評価

8.2 PID 補償による制御系設計

キーワード : P(比例), I(積分), D(微分)

8.3 位相進み-遅れ補償による制御系設計

キーワード : 位相遅れ補償, 位相進み補償

学習目標 : 一般的な制御系設計における手順と制御系の性能評価について学ぶ。ループ整形の考え方を用いて, 位相遅れ補償, 位相進み補償による制御系設計を習得する。

67