

フィードバック制御

2019年度 3Q

担当教員: 藤田政之 教授 (S5-303B)

第14回講義

11月18日(月) 13:20~15:50, S224講義室

第 8 章 : フィードバック制御系の設計法

8.3 位相進み一遅れ補償による制御系設計 (pp.156~166)

キーワード : 位相進み一遅れ補償

第 9 章 : 2 自由度制御系

9.1 フィードフォワードとフィードバックの役割 (pp.168~170)

キーワード : フィードフォワード, フィードバック

9.2 2 自由度制御系の構造と設計法 (pp.P171~175)

キーワード : 2 自由度制御

学習目標 : ループ整形の考え方をを用いて, 位相進み一遅れ補償による制御系設計ができる. フィードフォワードとフィードバックの役割を理解し, これら 2つの長所を併せ持つ 2 自由度制御系の構造と設計について説明できる.

位相進み-遅れ補償

$$K(s) = K \underbrace{\left(\frac{T_1 s + 1}{\alpha_1 T_1 s + 1} \right)}_{\text{位相進み}} \underbrace{\left(\frac{\alpha_2 (T_2 s + 1)}{\alpha_2 T_2 s + 1} \right)}_{\text{位相遅れ}}$$

$$(\alpha_1 < 1, \alpha_2 > 1)$$

[注] 多段にしても良い

定常特性・過渡特性の改善

$$+ 20 \log \alpha_2 \text{ [dB]}$$

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

[注] 位相遅れ, 高周波ゲイン

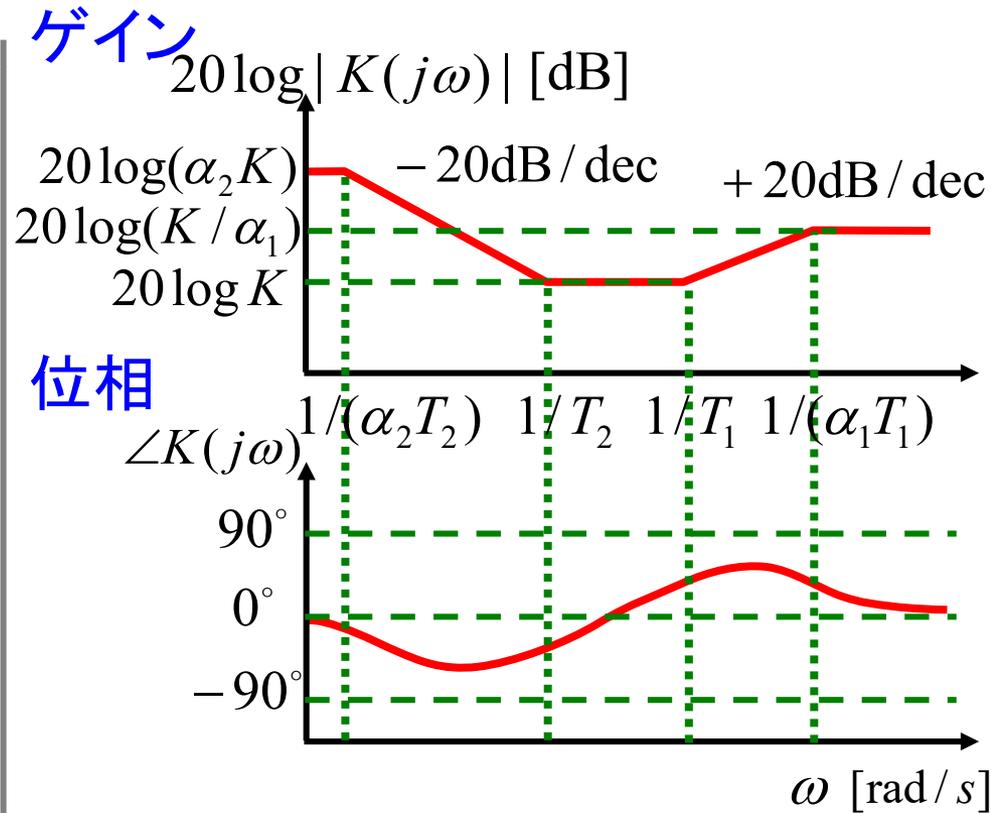
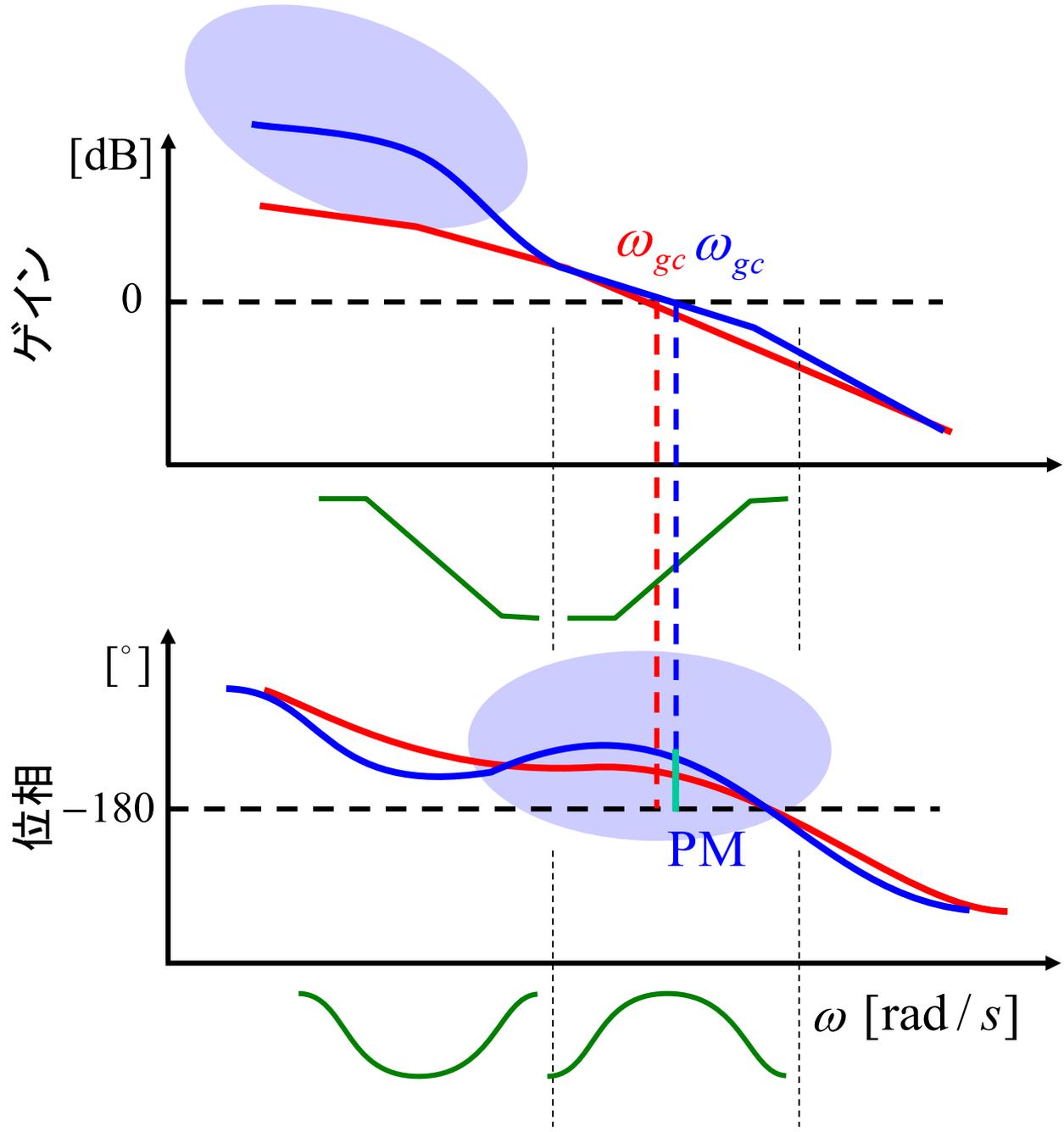


図 8.16 位相進み-遅れ補償のボード線図



位相進み-遅れ補償とPID補償

位相進み-遅れ補償 $(\alpha_1 < 1, \alpha_2 > 1)$

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

$$+ 20 \log \alpha \text{ [dB]}, + \phi_{\max} \text{ [}^\circ\text{]}$$

$$\left[K(0) = \alpha_2 K, K(\infty) = K / \alpha_1 \right]$$

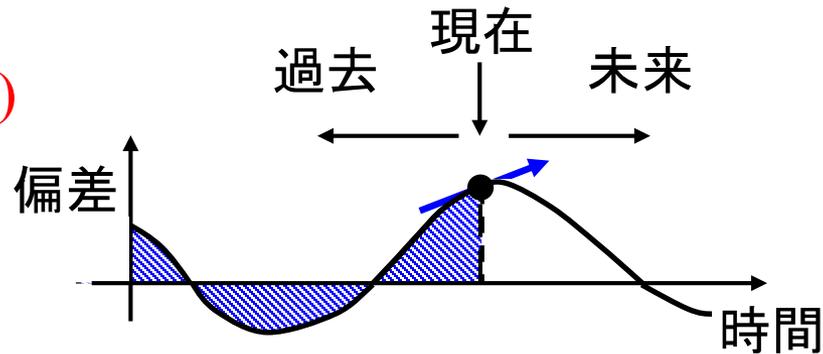
↓ $\alpha_1 \rightarrow 0, \alpha_2 \rightarrow \infty$

$$K(s) = K \frac{(T_1 s + 1)}{\text{PD}} \left(1 + \frac{1}{T_2 s} \right) \text{PI}$$

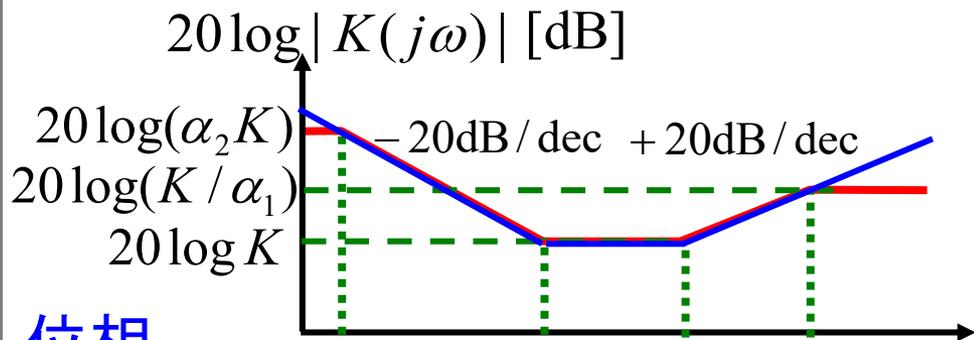
$$= \frac{K(T_1 + T_2)}{T_2} \left(1 + \frac{1}{(T_1 + T_2)s} + \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2} s \right)$$

PID補償

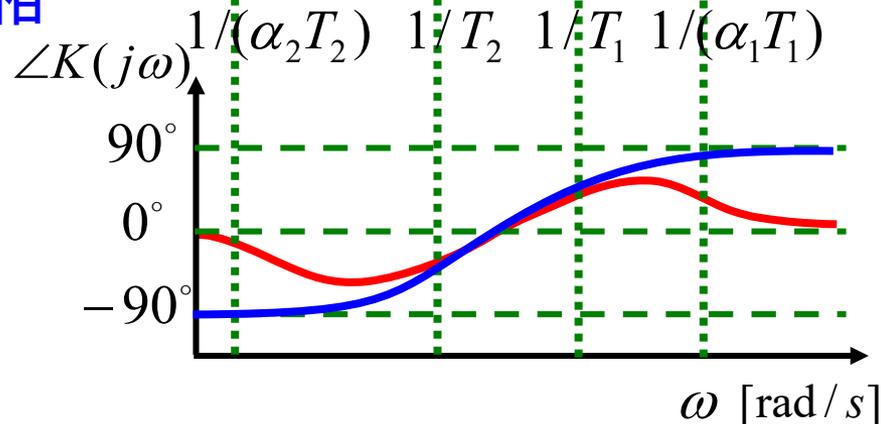
$$K_{PID}(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$



ゲイン



位相



[例 8.5]

制御対象のモデル

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

2次系の
一般形 $\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$

$$\omega_n = 0.1 \text{ rad/s}$$

$$\zeta = 0.2$$

位相遅れ (PI 補償)

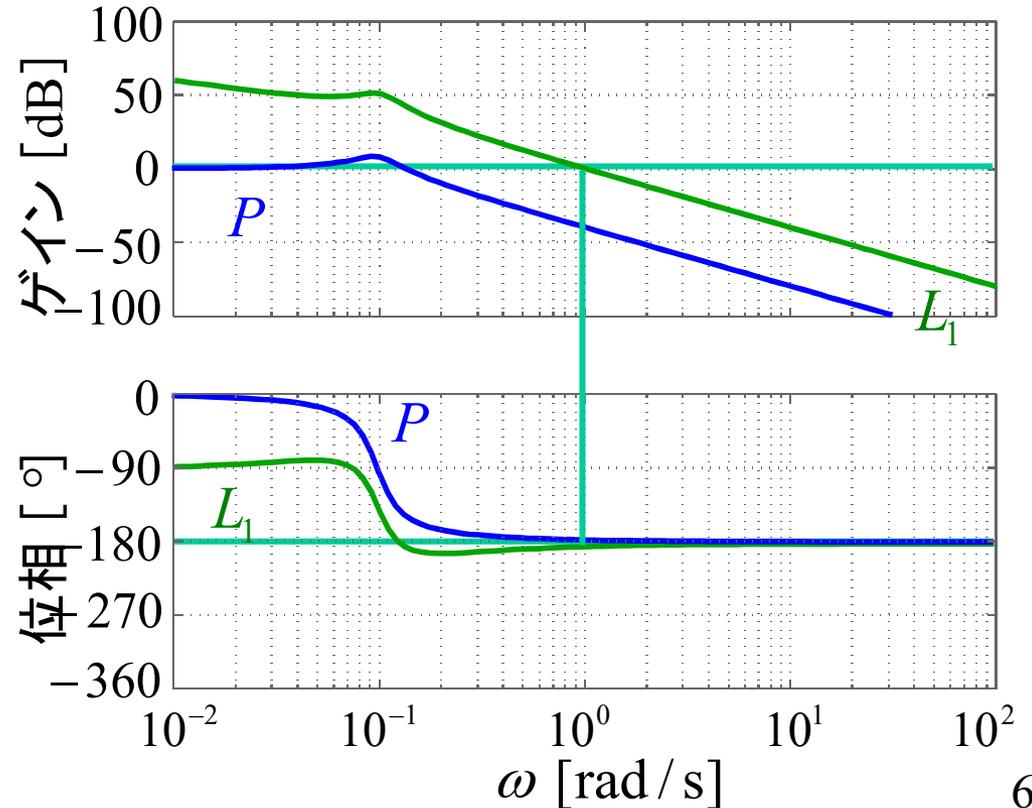
$$K_{PI}(s) = 100 \frac{s + 0.1}{s}$$

$$L_1 = PK_{PI}$$

低周波ゲイン: 大

位相余裕 PM = -3.37 deg

HDD



[例 8.5]

位相進み

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

$K = 1,$
 $\alpha = 0.07,$
 $T = 1.9$

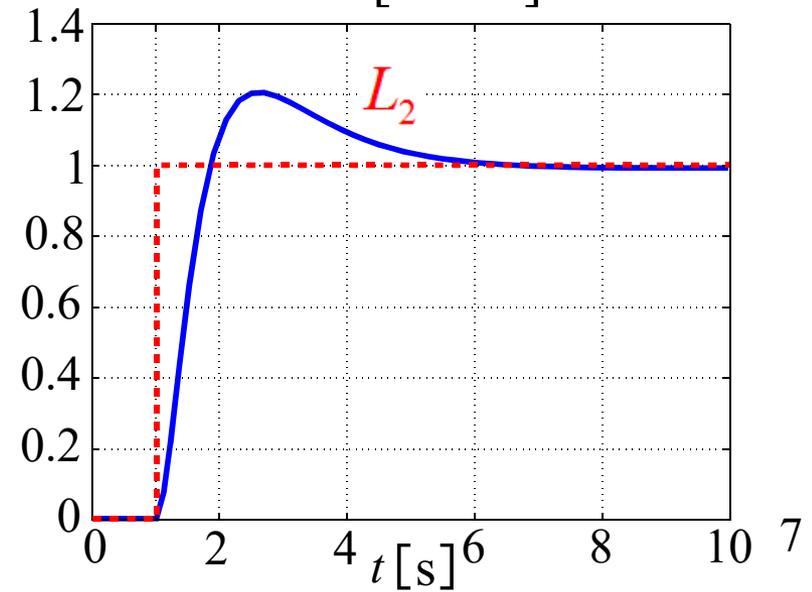
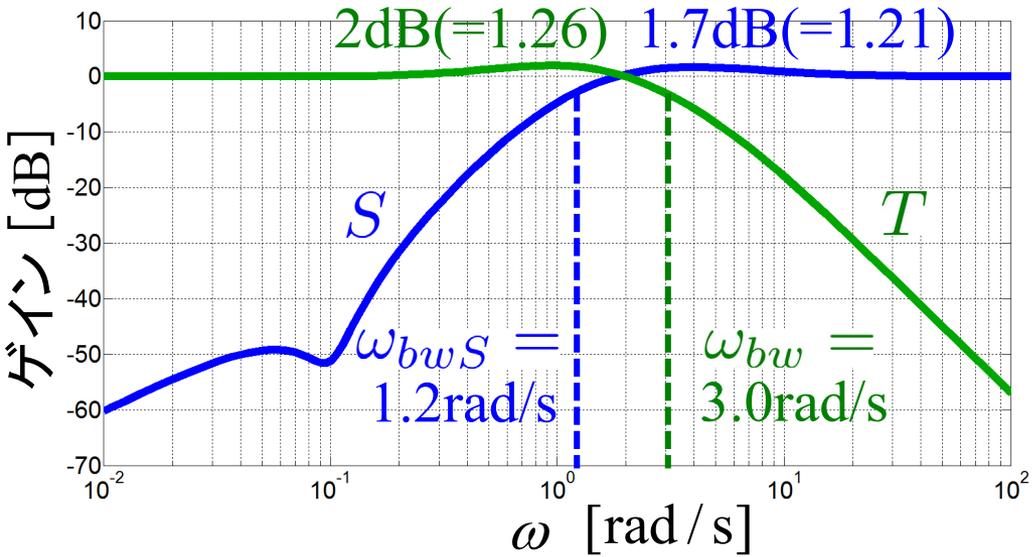
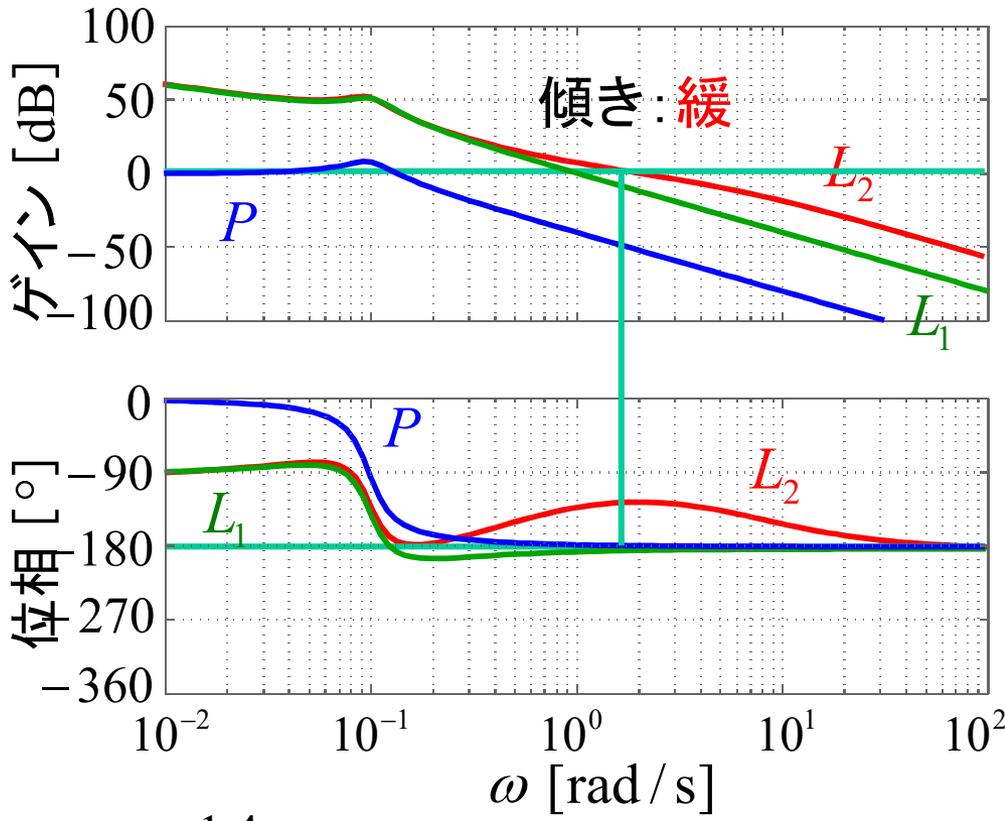
位相進み一遅れ補償

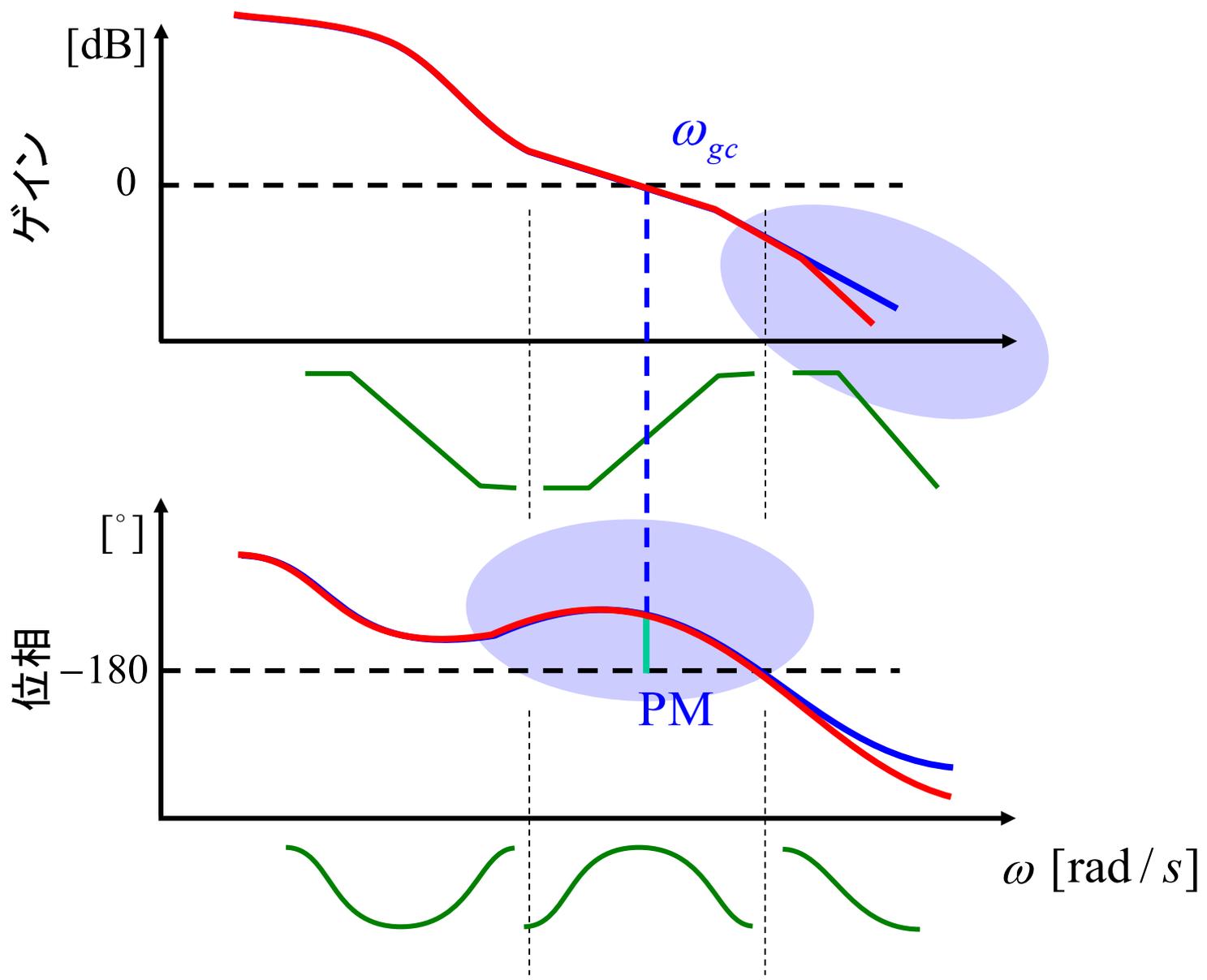
$$K_{LL}(s) = \frac{1430(s+0.1)(s+0.53)}{s(s+7.52)}$$

$$L_2 = PK_{LL}$$

位相余裕 PM = 58.5deg

ゲイン交差周波数: $\omega_{gc} = 1.92\text{rad/s}$



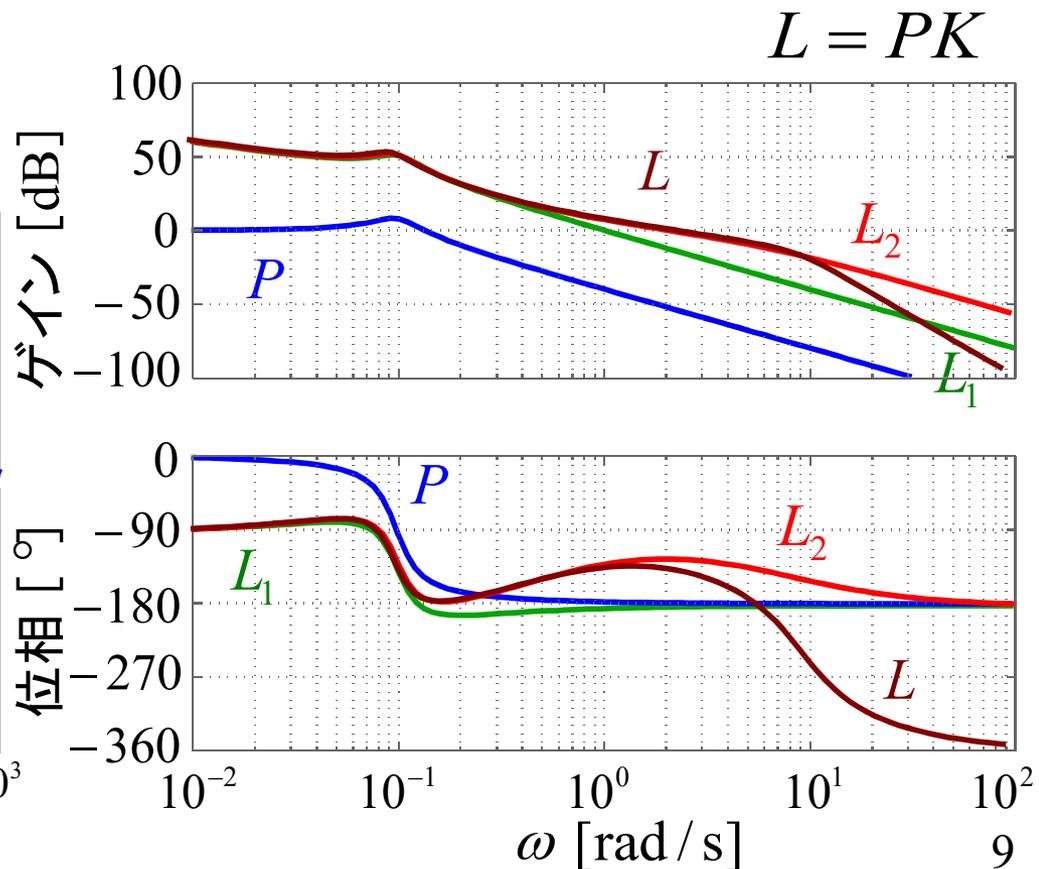
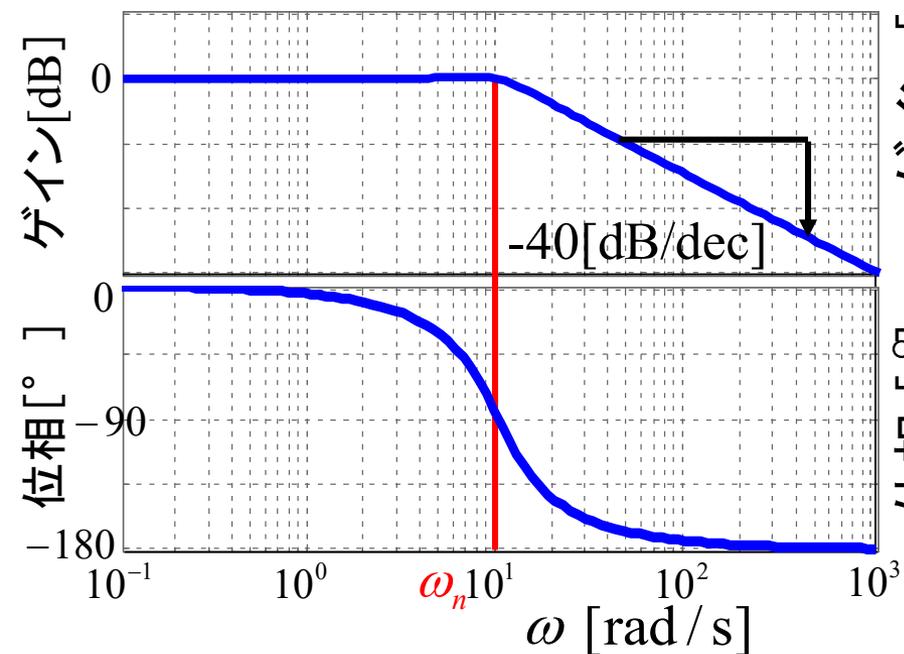


ロール・オフ フィルタ

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

2次系の一般形 $\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$ $\omega_n = 10 \quad \zeta = 0.5$

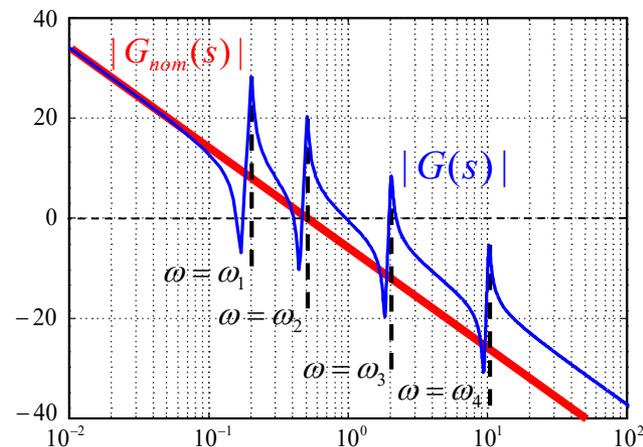
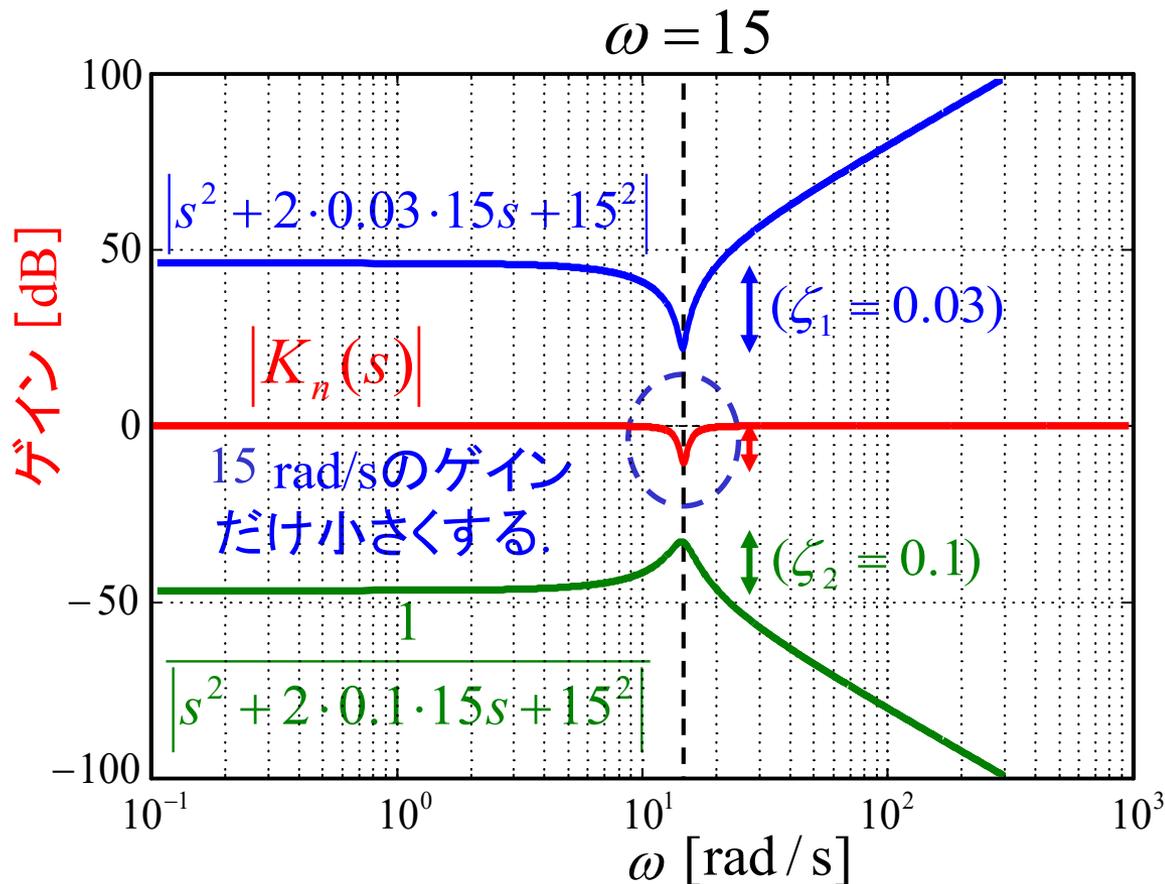
ω_n 以上の周波数帯の
ゲインを下げる.



ノッチフィルタ

特定の周波数のゲインを下げる(上げる)フィルタ

$$K_n(s) = \frac{s^2 + 2 \cdot 0.03 \cdot 15s + 15^2}{s^2 + 2 \cdot 0.1 \cdot 15s + 15^2} \quad (\zeta_1 = 0.03)$$
$$\quad \quad (\zeta_2 = 0.1)$$



スミス補償器

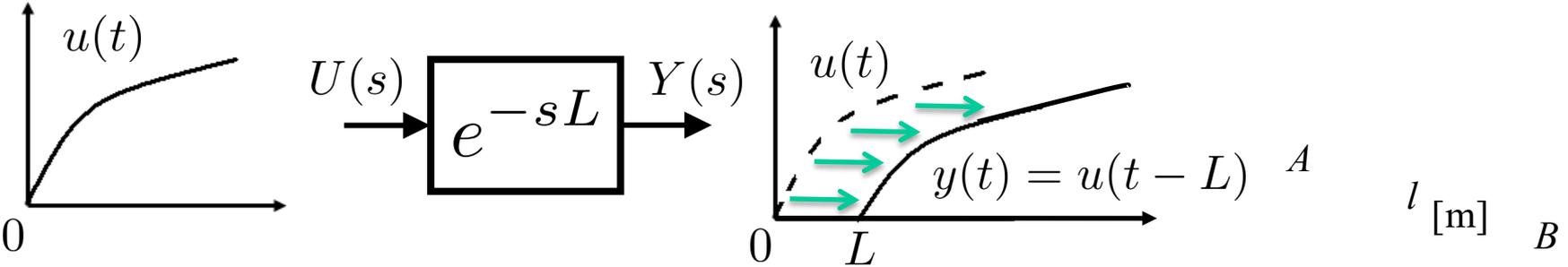
むだ時間をもつ制御対象の補償

$$u(t) \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

$$v \quad [\text{m}/\text{s}]$$

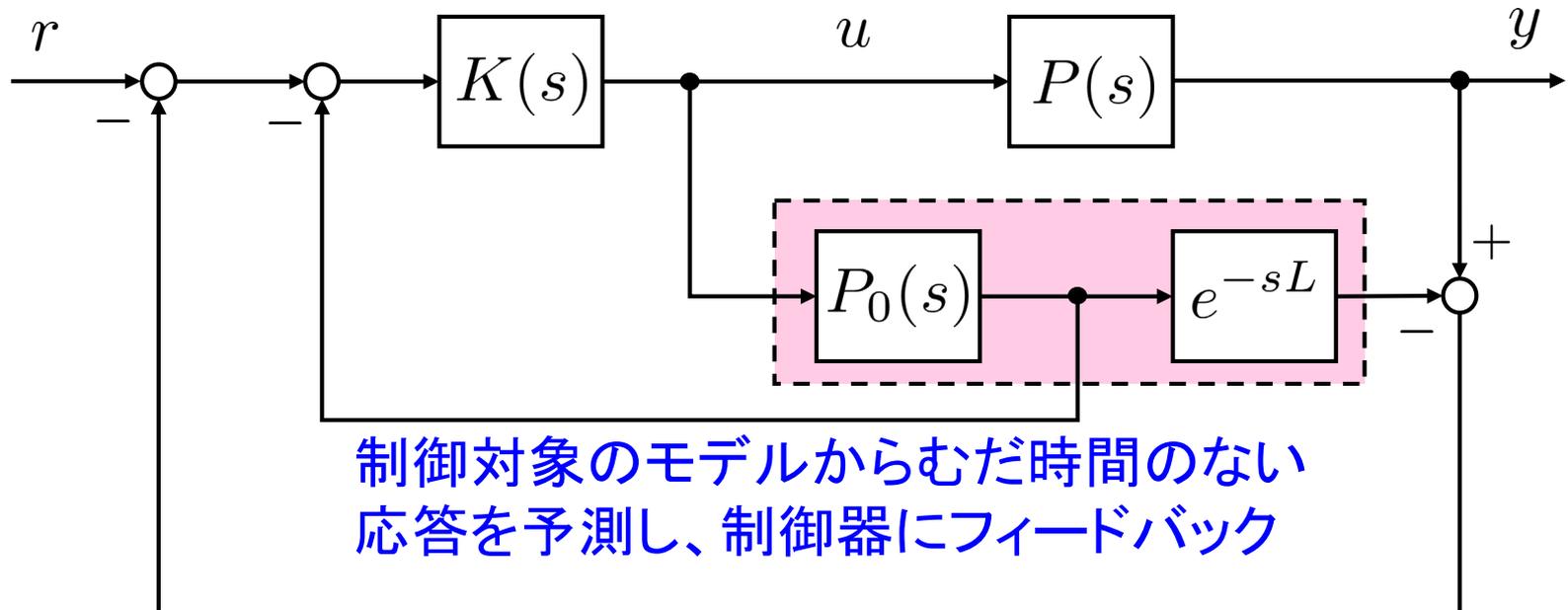
$$y(t) \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

$$l \quad [\text{m}] \quad B$$



制御対象 $P(s) = P_0(s)e^{-sL}$

むだ時間 $L = l/v \quad [\text{s}]$



制御対象のモデルからむだ時間のない
応答を予測し、制御器にフィードバック

Control System Toolbox: Control System Designer

Click !

9. 2自由度制御系

9.1 フィードフォワードとフィードバックの役割

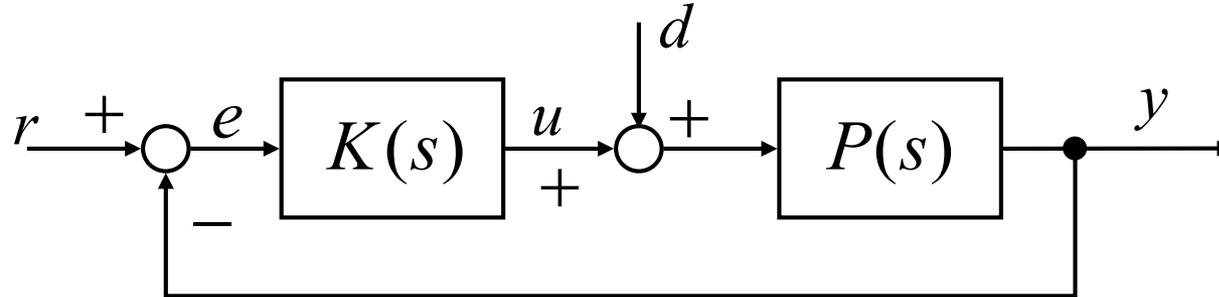


図 9.1 フィードバック制御系

フィードバックの利点

- 外乱の影響を抑制
- 特性変動の影響を低減
- 不安定系を安定化
- 目標値応答の整形？

[例 9.1]

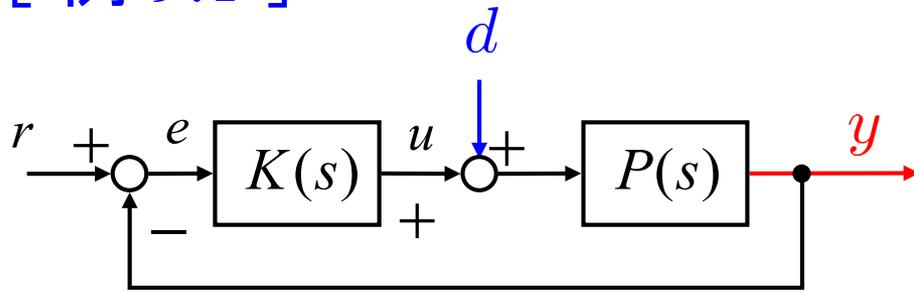


図 9.1 フィードバック制御系

制御対象

$$P(s) = \frac{1}{s-1} \quad (\text{不安定系})$$

コントローラ

$$K(s) = \frac{4s+6}{s} \quad (\text{PI補償})$$

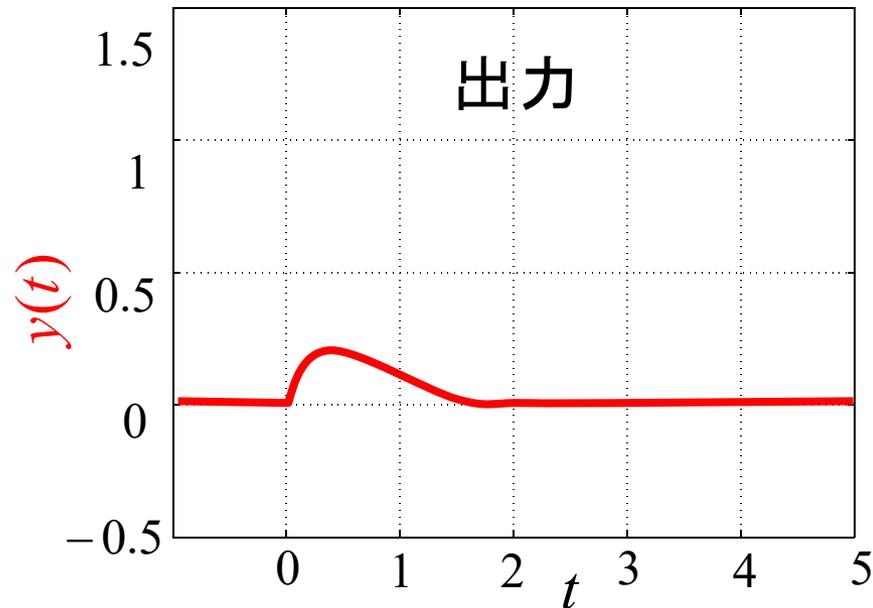
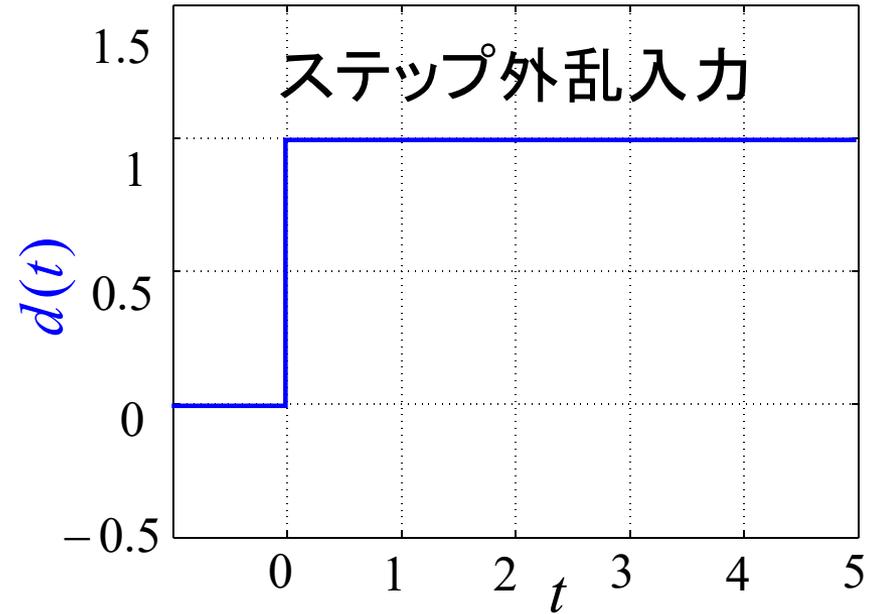


図 9.2 (a) ステップ外乱応答 14

[例 9.1]

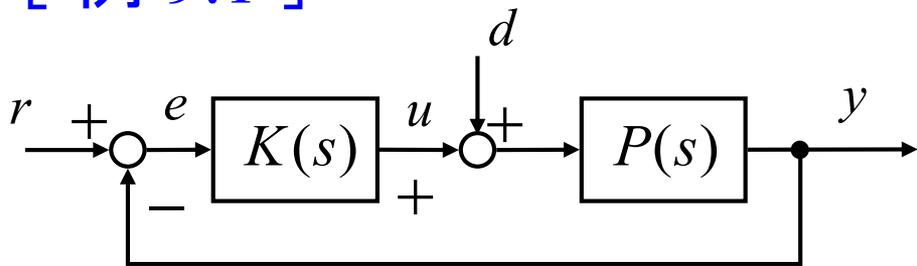


図 9.1 フィードバック制御系

制御対象

$$P(s) = \frac{1}{s-1} \quad (\text{不安定系})$$

コントローラ

$$K(s) = \frac{4s+6}{s} \quad (\text{PI補償})$$

b. 特性変動の影響を低減

c. 不安定系を安定化

$$P \rightarrow \tilde{P}(s) = \frac{20}{(s-1)(s+20)}$$

変動

オーバーシュート大

$K(s)$ は r を情報として使わず
 $e = r - y$ のみ用いている!!

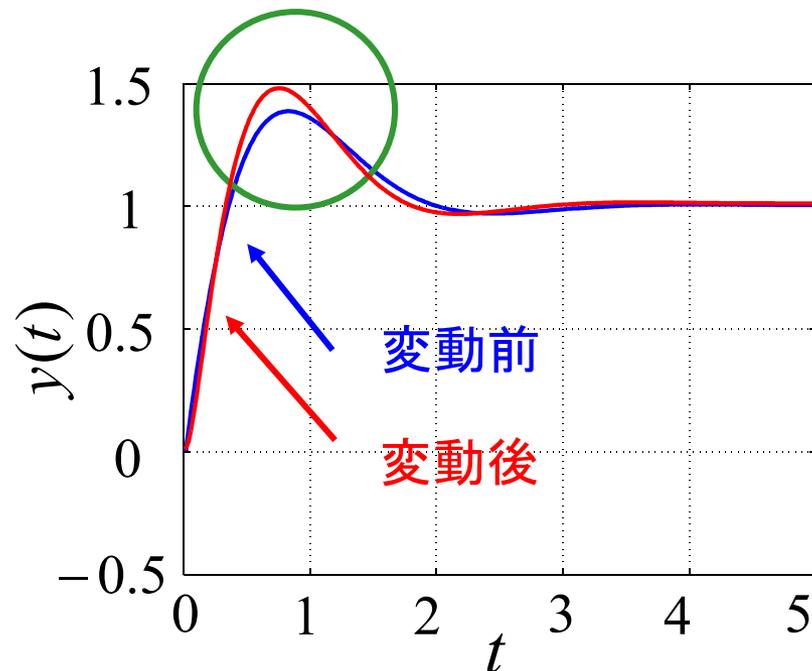


図 9.2 (b) 目標値応答 ($r = 1$)₁₅

フィードフォワードの利点

$G_M(s)$: 望ましい目標値応答を有するモデル伝達関数

$$u(s) = \frac{G_M(s)}{P(s)} r(s) : r \text{ のみ用いる}$$

$$\therefore y(s) = G_M(s)r(s)$$

d: 目標値応答の整形

a. 外乱の影響を抑制

b. 特性変動の影響を低減

c. 不安定系を安定化

➡ 2自由度制御系へ

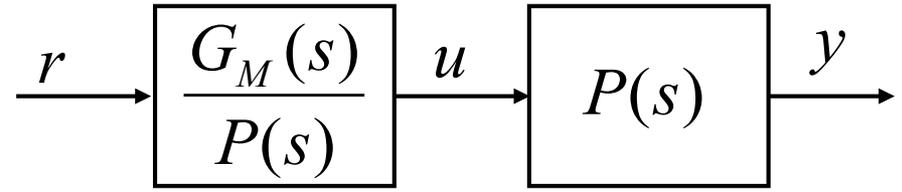


図 9.3 フィードフォワード制御系

例: $G_M(s) = \frac{1}{Ts + 1}$

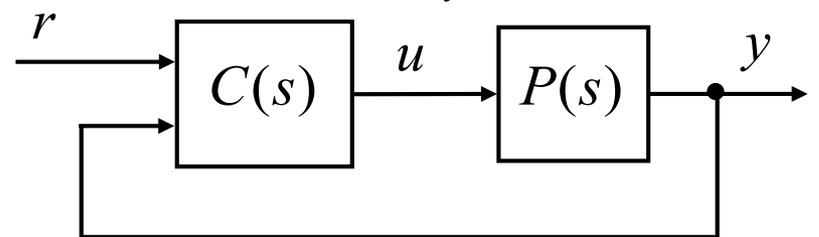
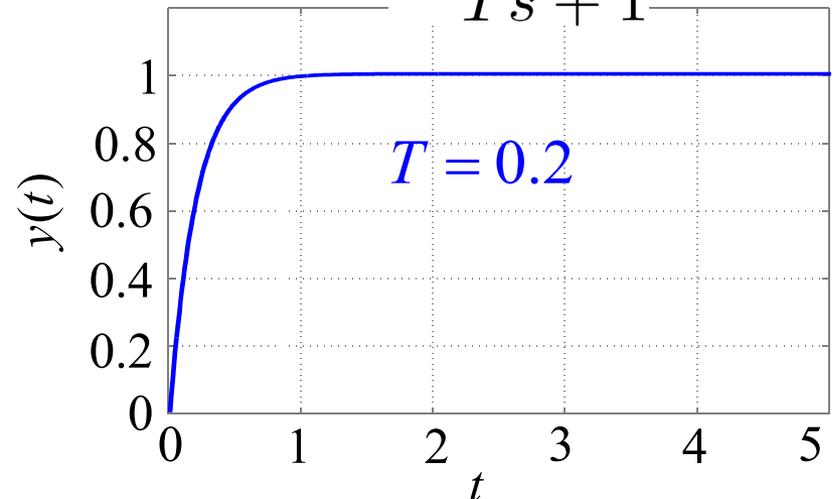


図 9.4 2自由度制御系 (一般系)

9.2 2自由度制御系の構造と設計法

$$y(s) = P(s)u(s)$$

フィードフォワード制御

$$u_{ff}(s) = \frac{F(s)}{P(s)} r(s)$$

$F(s)$: 設計パラメータ

(望ましい目標値応答 $r \rightarrow y$)

$u = u_{ff}$ とすれば

$$y = \cancel{P} \cdot \frac{F}{\cancel{P}} r = Fr$$

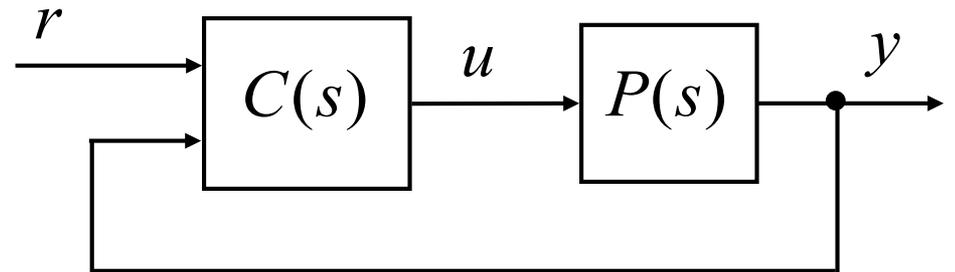


図 9.4 2自由度制御系 (一般系)

フィードバック制御

$$u_{fb}(s) = K(s)(F(s)r(s) - y(s))$$

以上より

$$u(s) = u_{ff}(s) + u_{fb}(s)$$

とおく

$$\left[u_{ff}(s) = \frac{F(s)}{P(s)} r(s) \right]$$

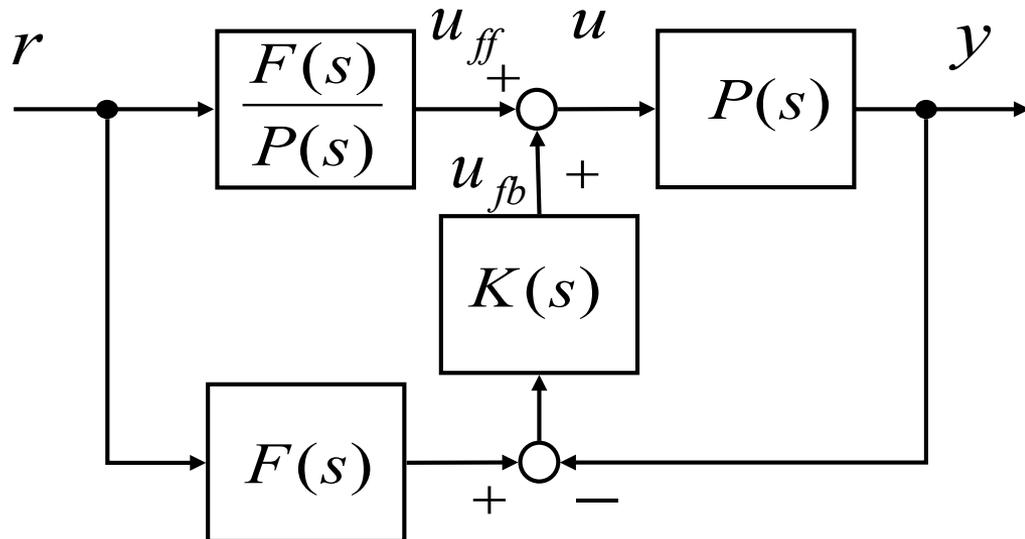
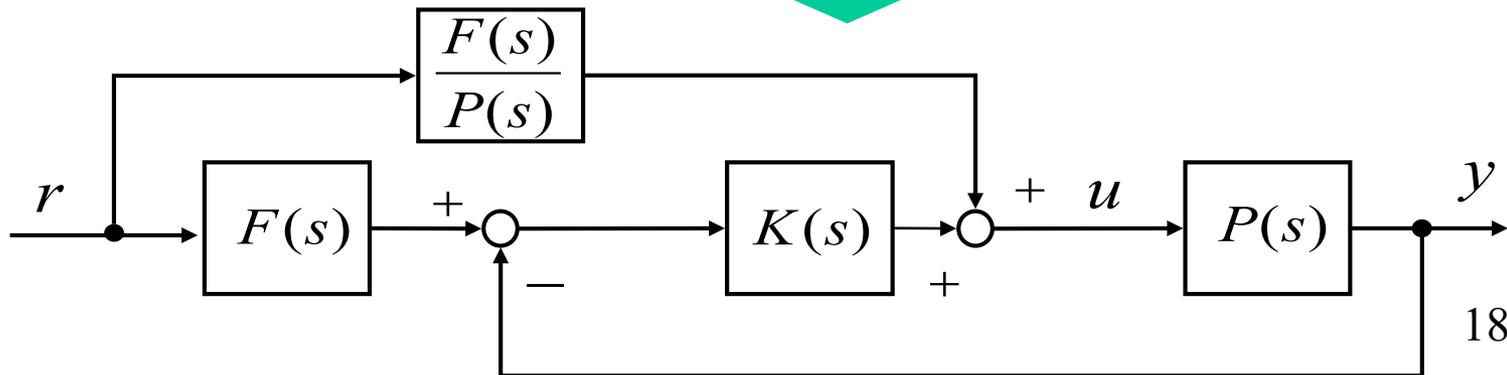


図 9.5 条件付きフィードバック構造



モデル化誤差がない場合

$$y = Fr \text{ より}$$

$$u_{fb} = K(Fr - Fr) = 0$$

$$\therefore G_{yr}(s) = F(s)$$

$$u(s) = u_{ff}(s) + u_{fb}(s)$$

$$u_{fb}(s) = K(s)(F(s)r(s) - y(s))$$

$$u_{ff}(s) = \frac{F(s)}{P(s)}r(s)$$

モデル化誤差がある場合

$$y \neq Fr \text{ より}$$

フィードバック K の効果

- ・ $F(s)$: 目標値応答を指定
- ・ $K(s)$: フィードバック特性を指定
- ・ 互いに独立

条件付きフィードバック構造

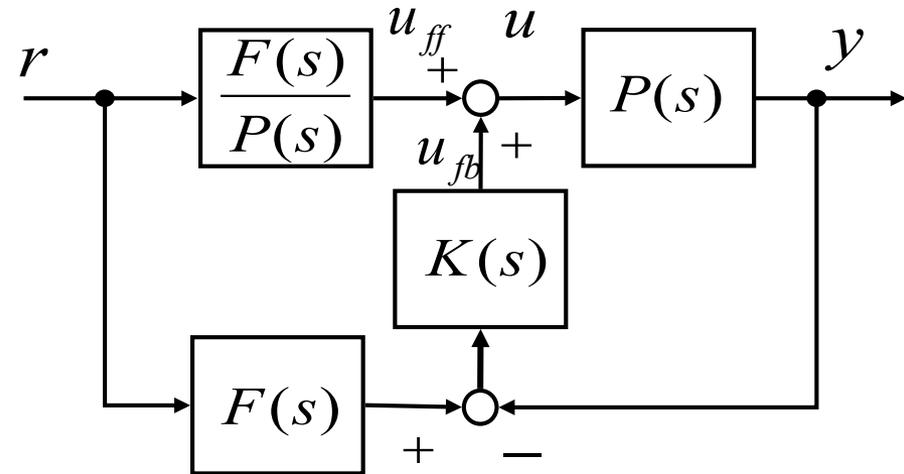


図 9.5 条件付きフィードバック構造

[例 9.2]

制御対象

$$P(s) = \frac{1}{s-1} \xrightarrow{\text{変動}} \tilde{P}(s) = \frac{20}{(s-1)(s+20)}$$

フィードバックコントローラ

$$K(s) = \frac{4s+6}{s}$$

フィードフォワードコントローラ

$$F(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (\tau = 0.3)$$

[例 9.1] と比べてみると、

a ~ c & d

ステップ応答の速応性を
3倍にするには？ $\tau = 0.1$

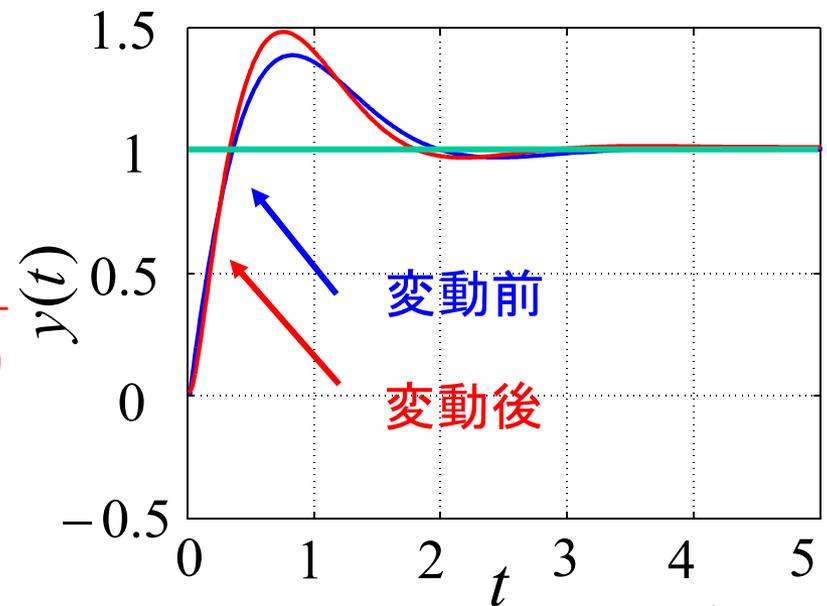


図 9.2 (b) 目標値応答 ($r = 1$)

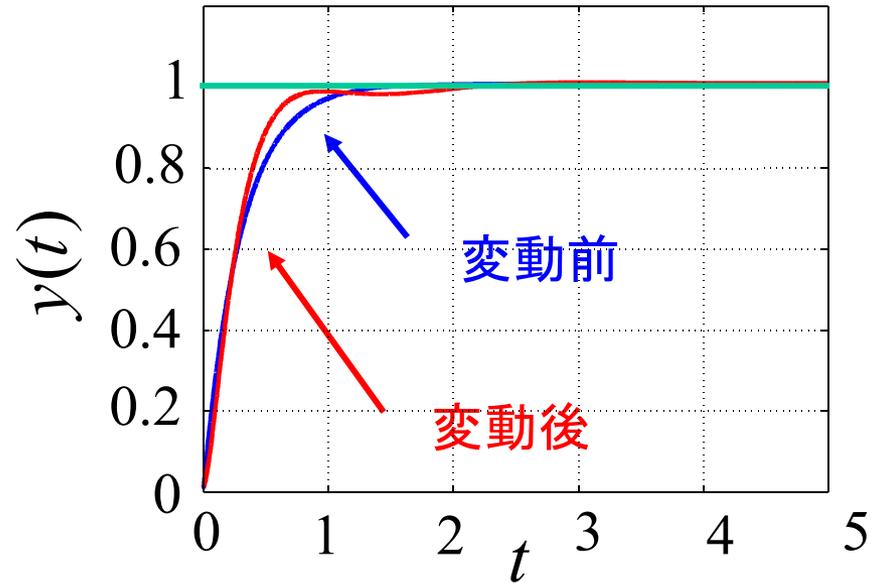
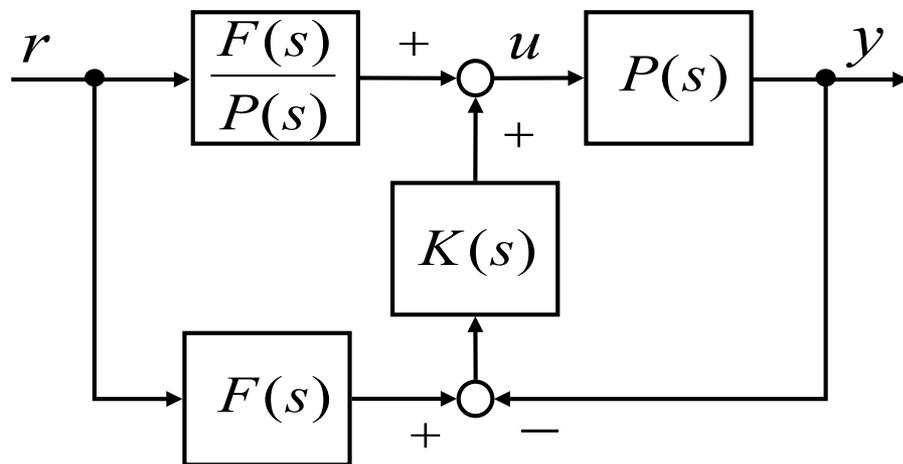


図 9.6 2自由度制御系の
目標値応答例

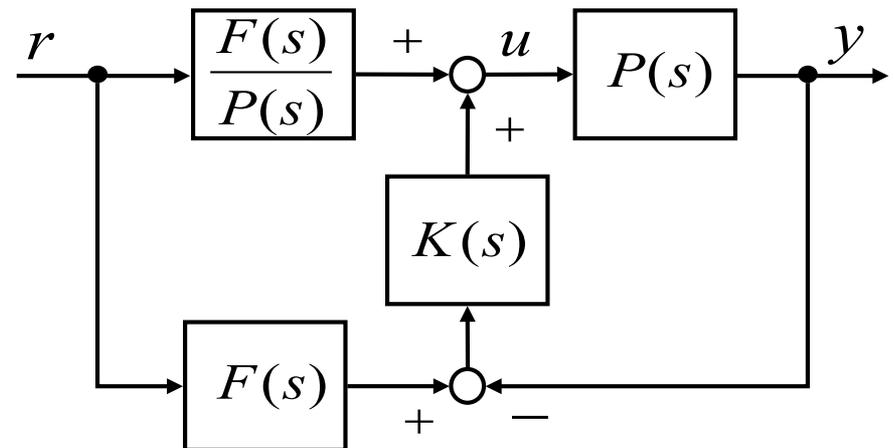
2自由度制御系の安定条件

- (I) $F(s)$ が安定, $P^{-1}(s)F(s)$ が安定 (プロパー)
- (II) $P(s)$ と $K(s)$ からなる閉ループ系が内部安定



2 自由度制御系の設計手順

- [ステップ1] 目標値応答の観点から、 $F(s)$ を安定条件の範囲内で選ぶ。
- [ステップ2] フィードバック特性の観点から、ループ整形法等を用い、 $K(s)$ を内部安定性を満たす範囲で設計する。
- [ステップ3] 上記の $F(s), K(s)$ を、図 9.5 のように組み合わせる。



IEEE CSS Video Clip Contest 2017

2017
Winner

Click !

<https://www.youtube.com/watch?v=484GN4KBQnc>

第 8 章 : フィードバック制御系の設計法

✓ 8.3 位相進み一遅れ補償による制御系設計 (pp. 156~166)

キーワード : 位相進み一遅れ補償

第 9 章 : 2 自由度制御系

✓ 9.1 フィードフォワードとフィードバックの役割 (pp. 168~170)

キーワード : フィードフォワード, フィードバック

✓ 9.2 2 自由度制御系の構造と設計法 (pp. 171~175)

キーワード : 2 自由度制御

学習目標 : ループ整形の考え方をを用いて, 位相進み一遅れ補償による制御系設計ができる. フィードフォワードとフィードバックの役割を理解し, これら 2つの長所を併せ持つ 2 自由度制御系の構造と設計について説明できる.

Control System Toolbox を用いたフィードバック制御系の設計

Control System Designer を用いた制御系設計

8.2 PID 補償による制御系設計 (pp. 149~155)

キーワード : PIDチューニング

8.3 位相進み一遅れ補償による制御系設計

キーワード : 位相進み一遅れ補償 (pp.156~166)

学習目標 : Control System Toolbox のControl System Designer を用いて, 性能要求に沿ったフィードバック制御系が設計できる.