

# 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

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。

## 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

#### 制御系の種類

##### レギュレータ問題(定置制御)

一定の値に保持 (制)

例: 人工衛星の姿勢制御など



##### サーボ問題(追従制御)

目標値に良好に追従 (御)

例: 航空機の自動操縦など



## 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]

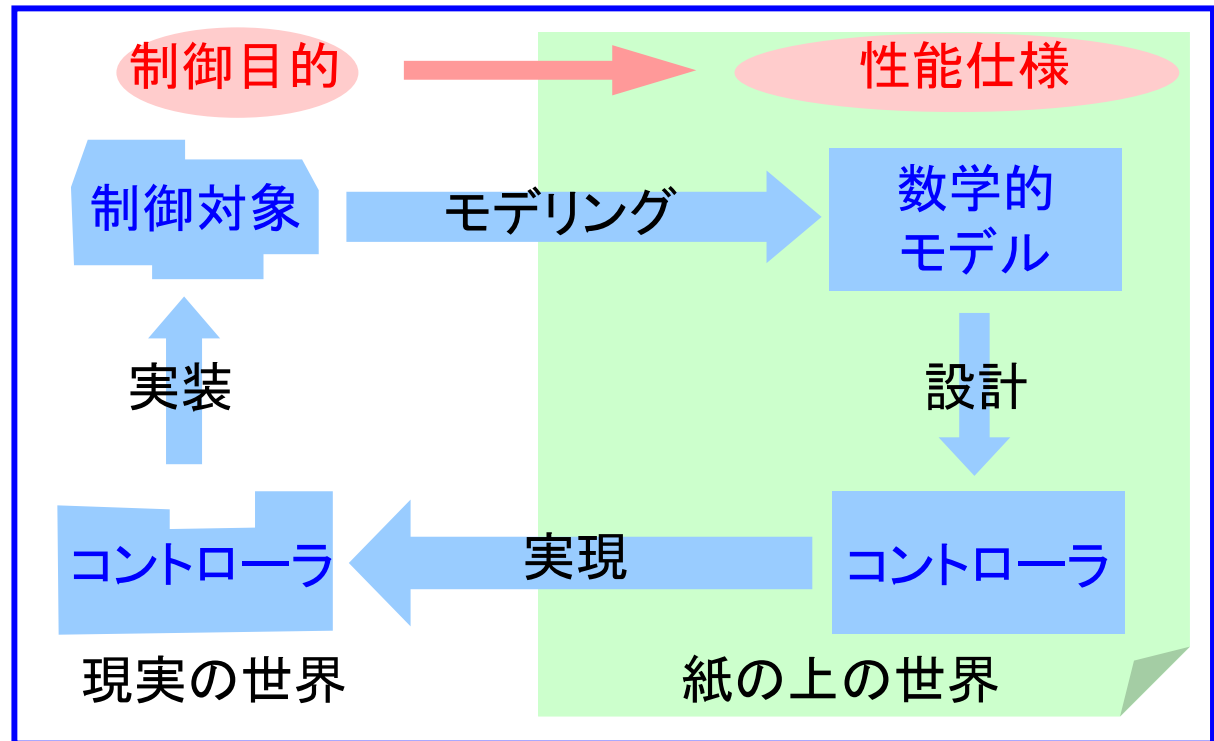
性能仕様を満たすように、コントローラを設計する。

### [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。

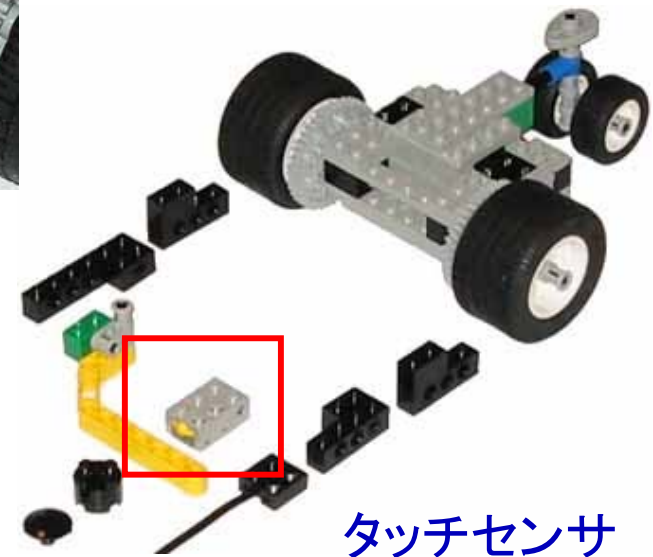
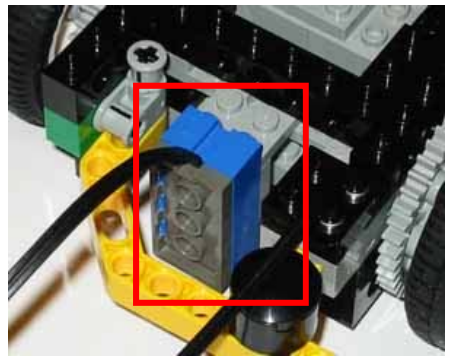


( 広い意味では )

- 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



光センサ



タッチセンサ

# 制御系の性能評価

{
定常特性  
過渡特性

## 定常特性 ( § 4.2 )

$$L(s) = P(s)K(s)$$

$$e_s : \text{定常位置偏差} \quad e_s = \frac{1}{1 + L(0)}$$

$$K_p : \text{位置偏差定数} \quad K_p = L(0)$$

表4.1 制御系の型と定常偏差

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

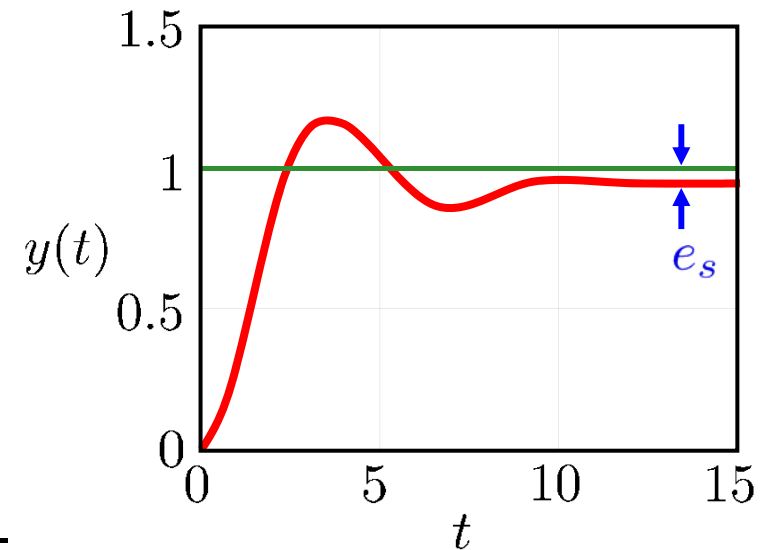
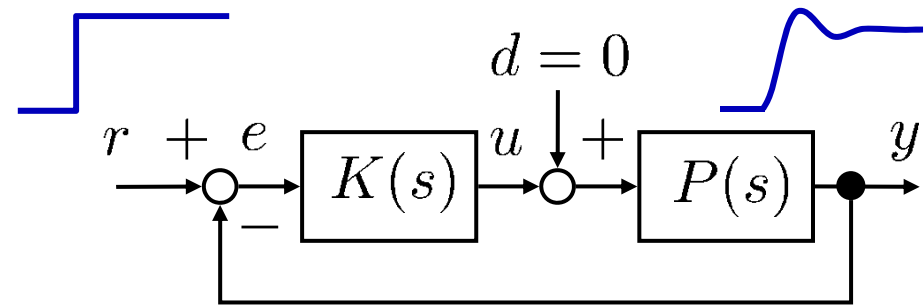


図4.4 定常位置偏差

0 型の例  $\frac{1}{s+1}$

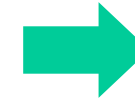
1 型の例  $\frac{1}{s}, \frac{1}{s(s+1)}$

2 型の例  $\frac{1}{s^2}$

# 制御系の性能評価



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  $\frac{b}{a}$

速応性:  $T_r, T_d, T_s, T_p$

減衰特性: オーバシュート, 減衰比

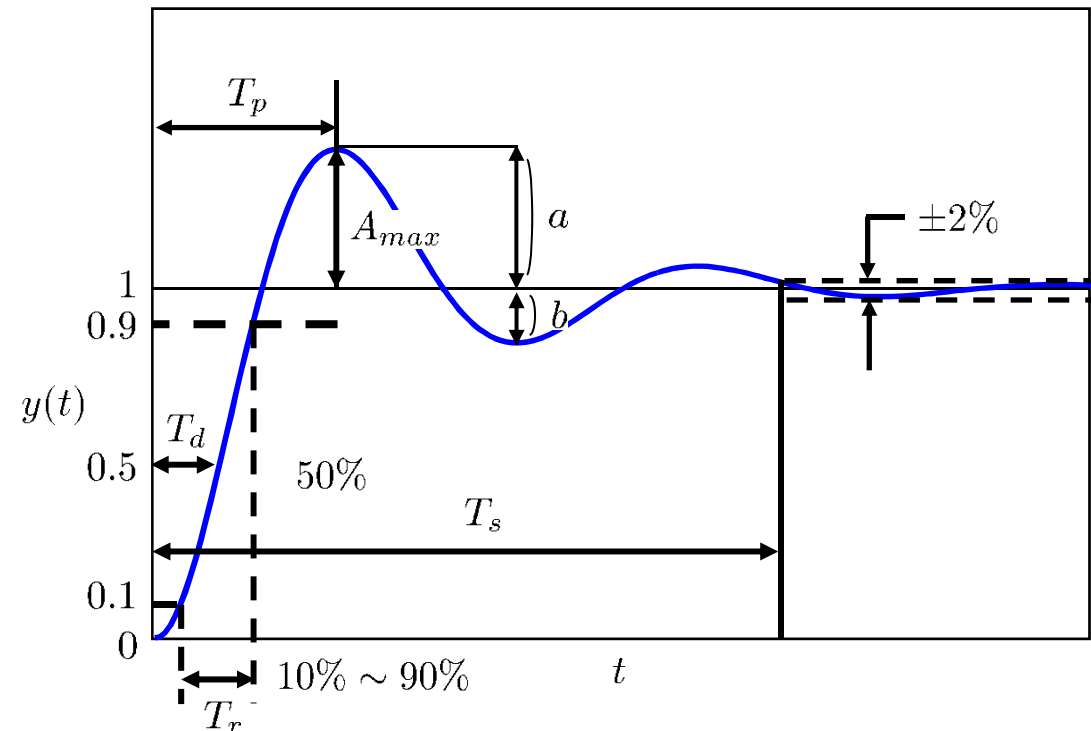


図3.10 過渡応答と諸特性値

# 制御系の性能評価



## 過渡特性

時間応答に基づく性能評価 (§ 3.3)

2次系  $P = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$

$\omega_n$  : 自然角周波数  
 $\zeta$  : 減衰係数(2次系)

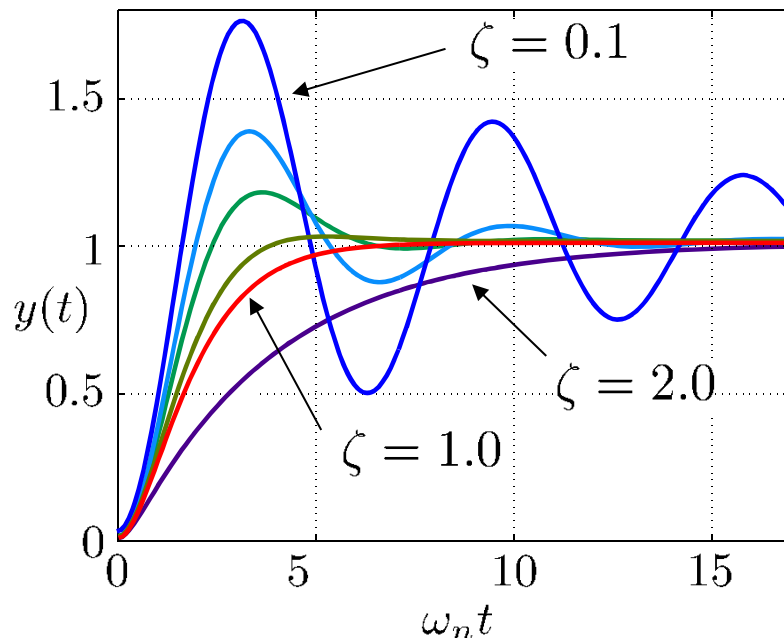


図3.7 2次系のステップ応答

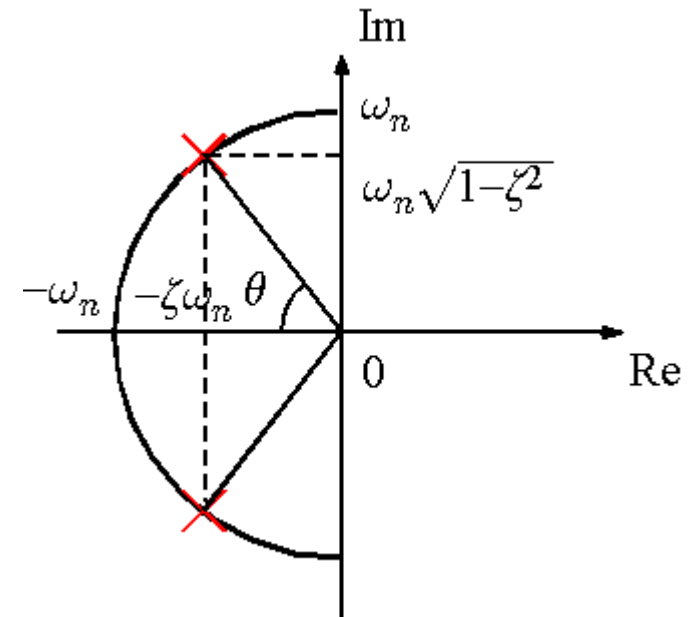


図3.8 2次系の極の位置

# 制御系の性能評価



## 過渡特性

時間応答に基づく性能評価(続き) (§ 3.4)

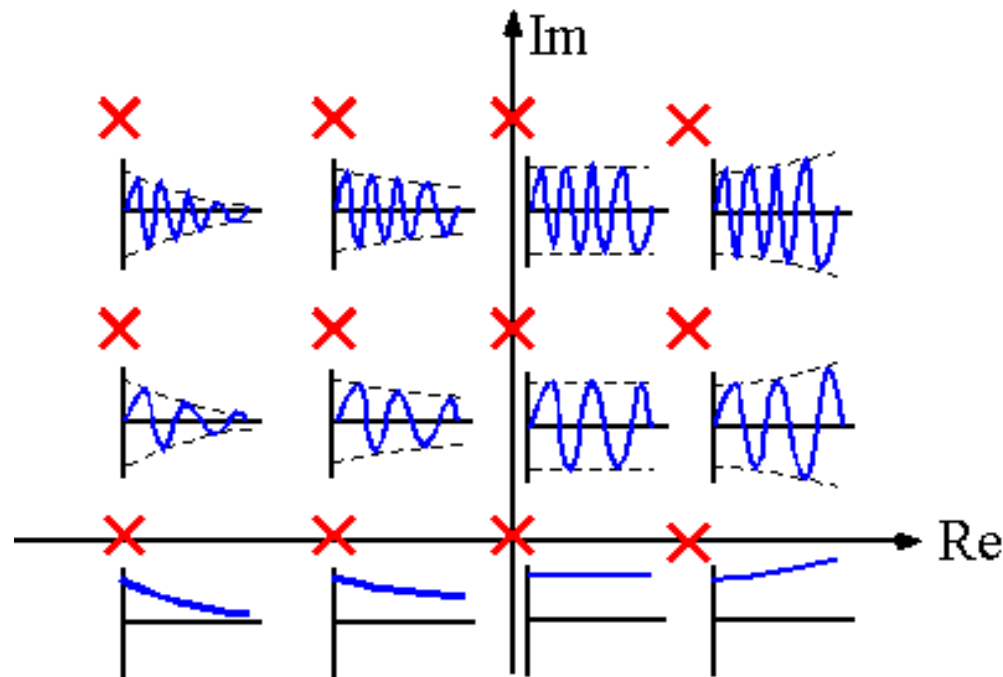


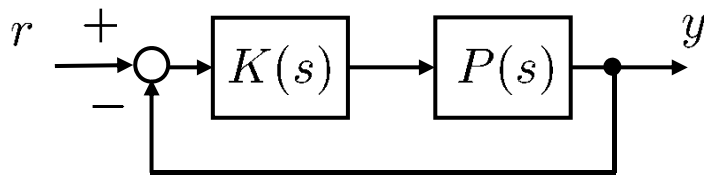
図 3.9 極の位置とインパルス応答



# 制御系の性能評価



## 閉ループ伝達関数に基づく性能評価



バンド幅  
 $\omega_{bw} -3 \text{ dB} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ 倍} \right)$  速応性

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

共振周波数  $\omega_r$

$|T(0)| = 0$  の場合

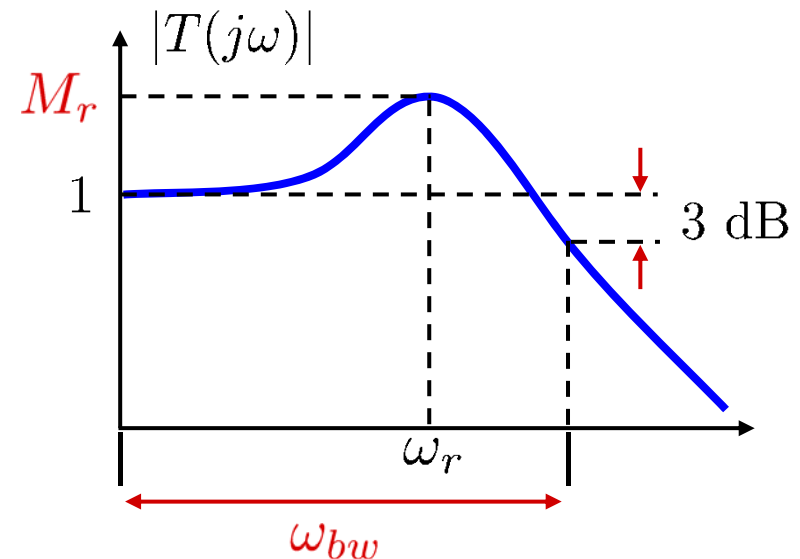


図8.1 閉ループゲイン特性

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  
開ループ

伝達関数に基づく性能評価

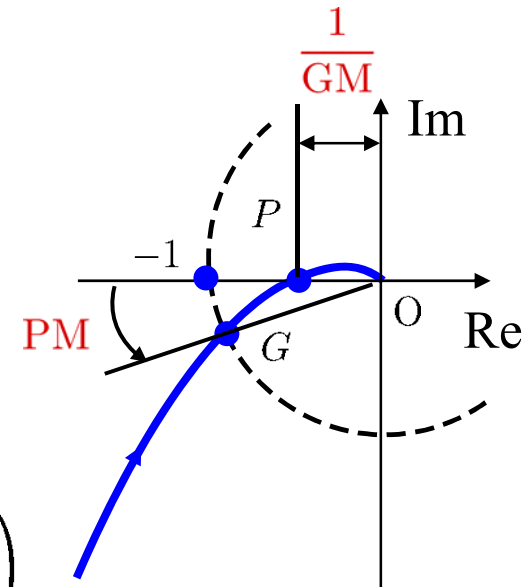
## 開ループ伝達関数に基づく性能評価

安定余裕 [ゲイン余裕 / 位相余裕]

交差周波数 [ゲイン/位相]

(速応性): ゲイン交差周波数  $\omega_{gc}$   $\omega_{gc} \leq \omega_{bw}$   
( $PM \leq 90^\circ$ )

(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

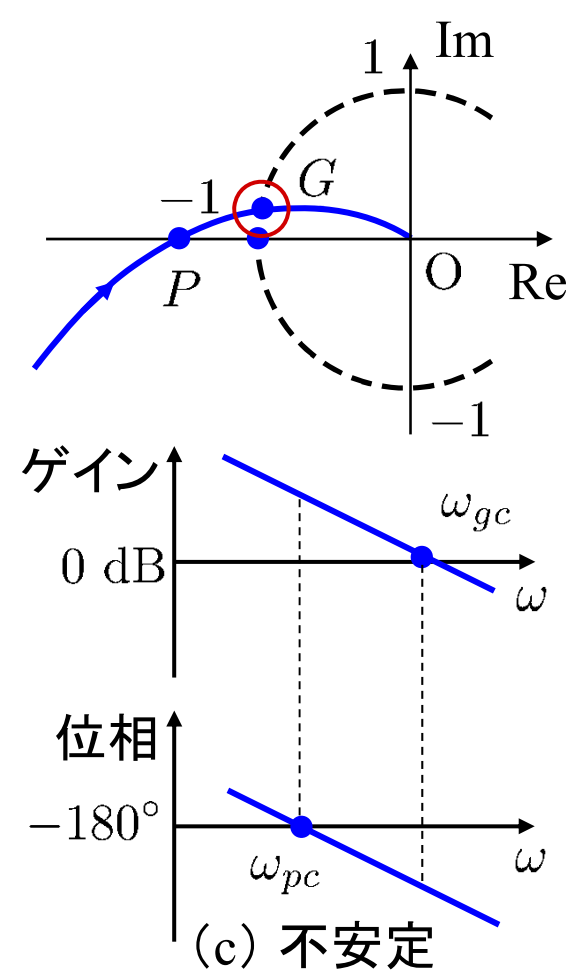
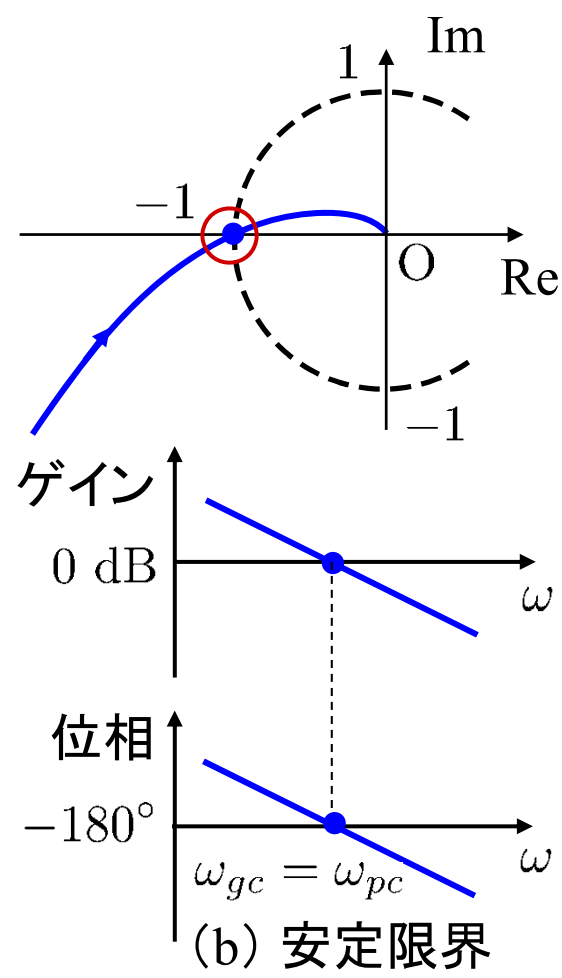
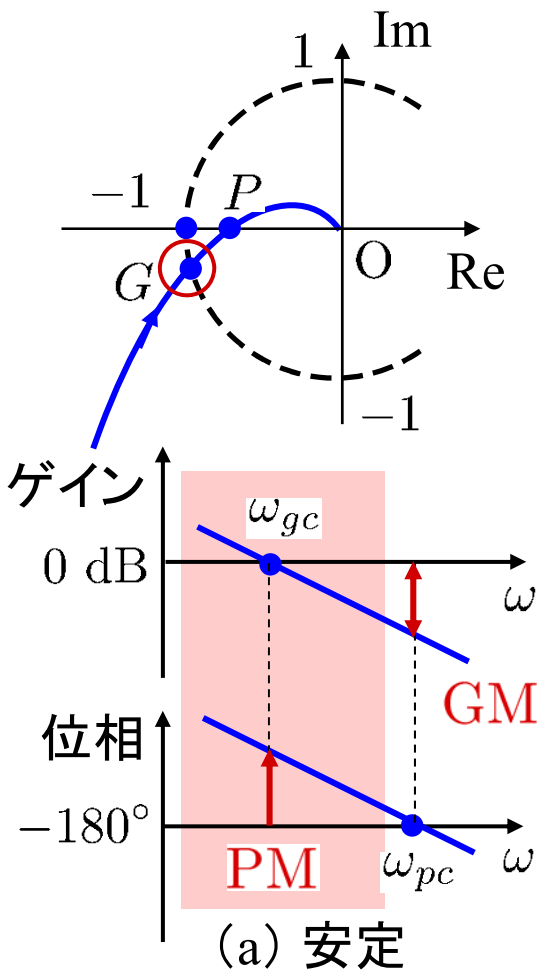
追従制御 :  $PM = 40 \sim 60^\circ$ ,  $GM = 10 \text{ dB} \sim 20 \text{ dB}$

定置制御 :  $PM \geq 20^\circ$ ,  $GM = 3 \text{ dB} \sim 10 \text{ dB}$

2次系の場合 :  $PM \approx 100 \times \zeta$

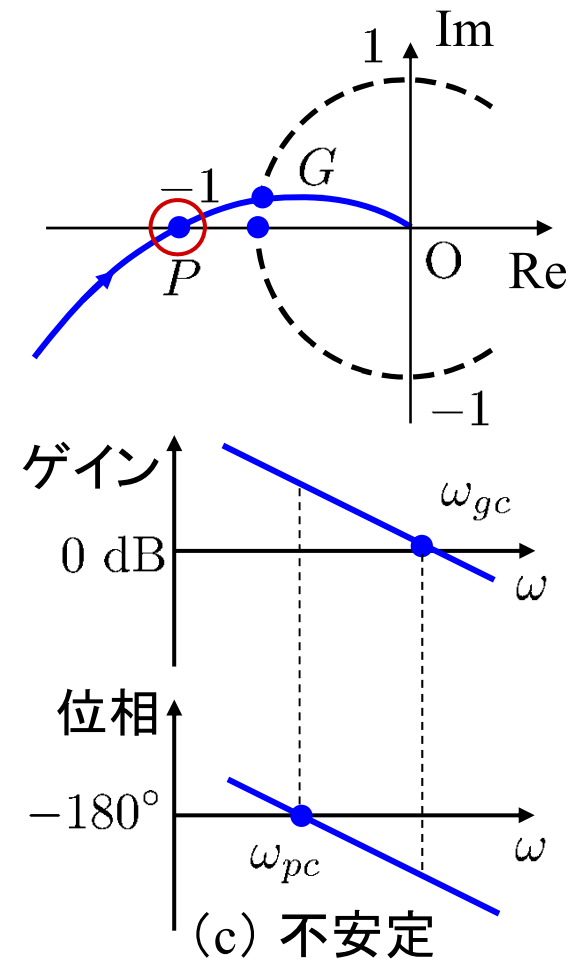
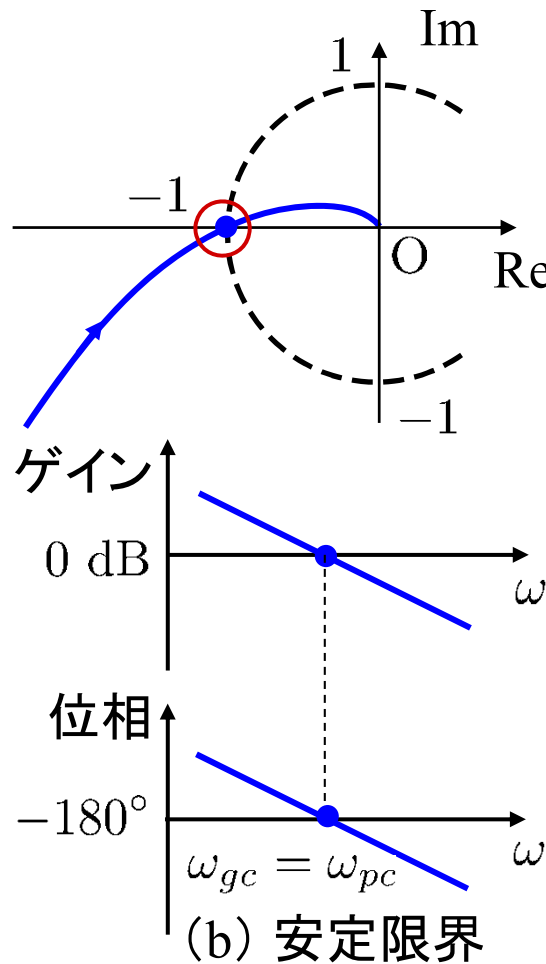
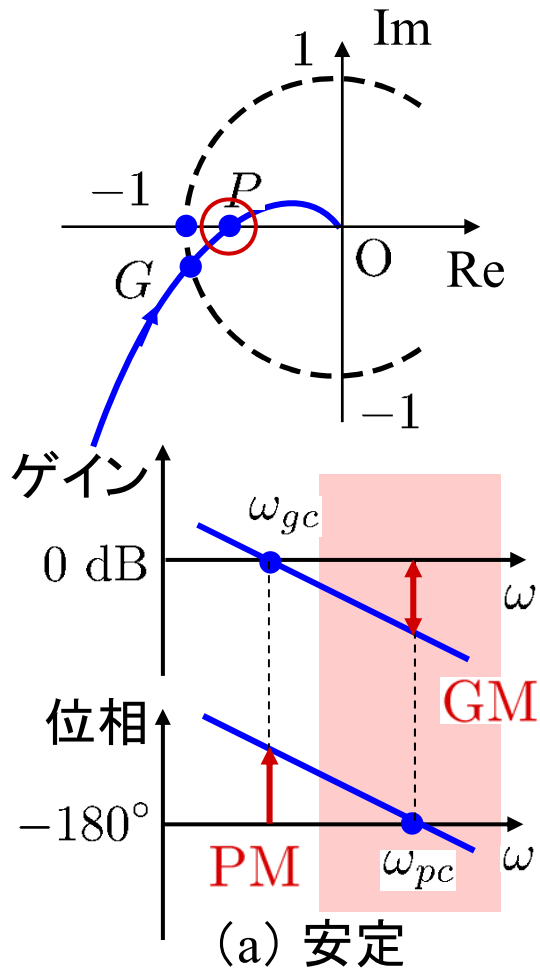
ボード線図での読み取り (a) 位相が  $-180^\circ$  より進む  $\Rightarrow$  安定  
 (b) 位相が  $-180^\circ$  ちょうど  $\Rightarrow$  安定限界  
 (c) 位相が  $-180^\circ$  より遅れる  $\Rightarrow$  不安定

ゲイン交差周波数  $\omega_{gc}$  で PM を読み取る.



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

位相交差周波数  $\omega_{pc}$  で GM を読み取る。



## [例 6.6] (虚軸上に極がある場合)

$$L(s) = \frac{K}{s(s+1)(s+2)} \quad (K=3)$$

ゲイン交差周波数

$$\omega_{gc} \simeq 0.97$$

位相余裕

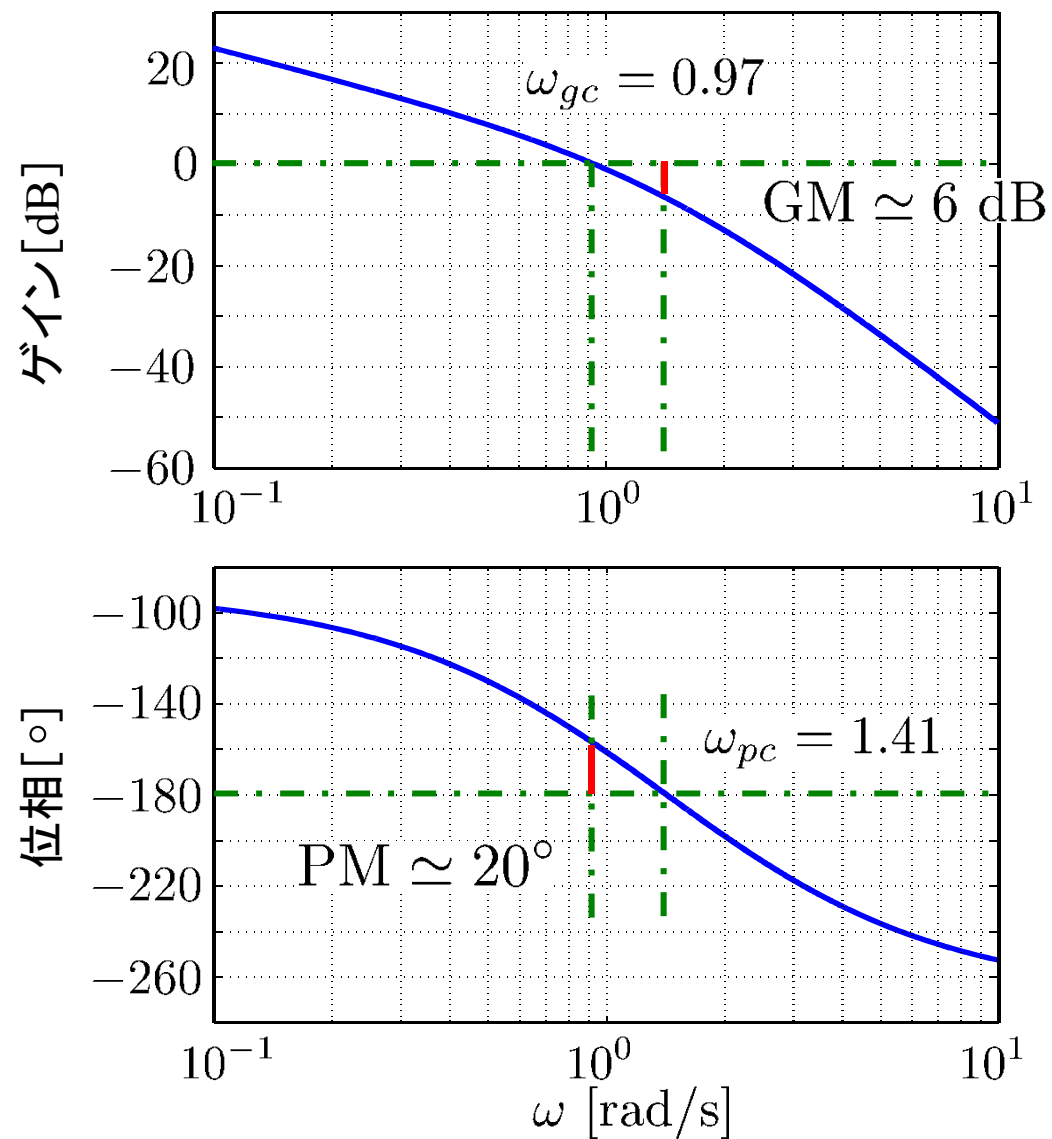
$$PM \simeq 20^\circ$$

位相交差周波数

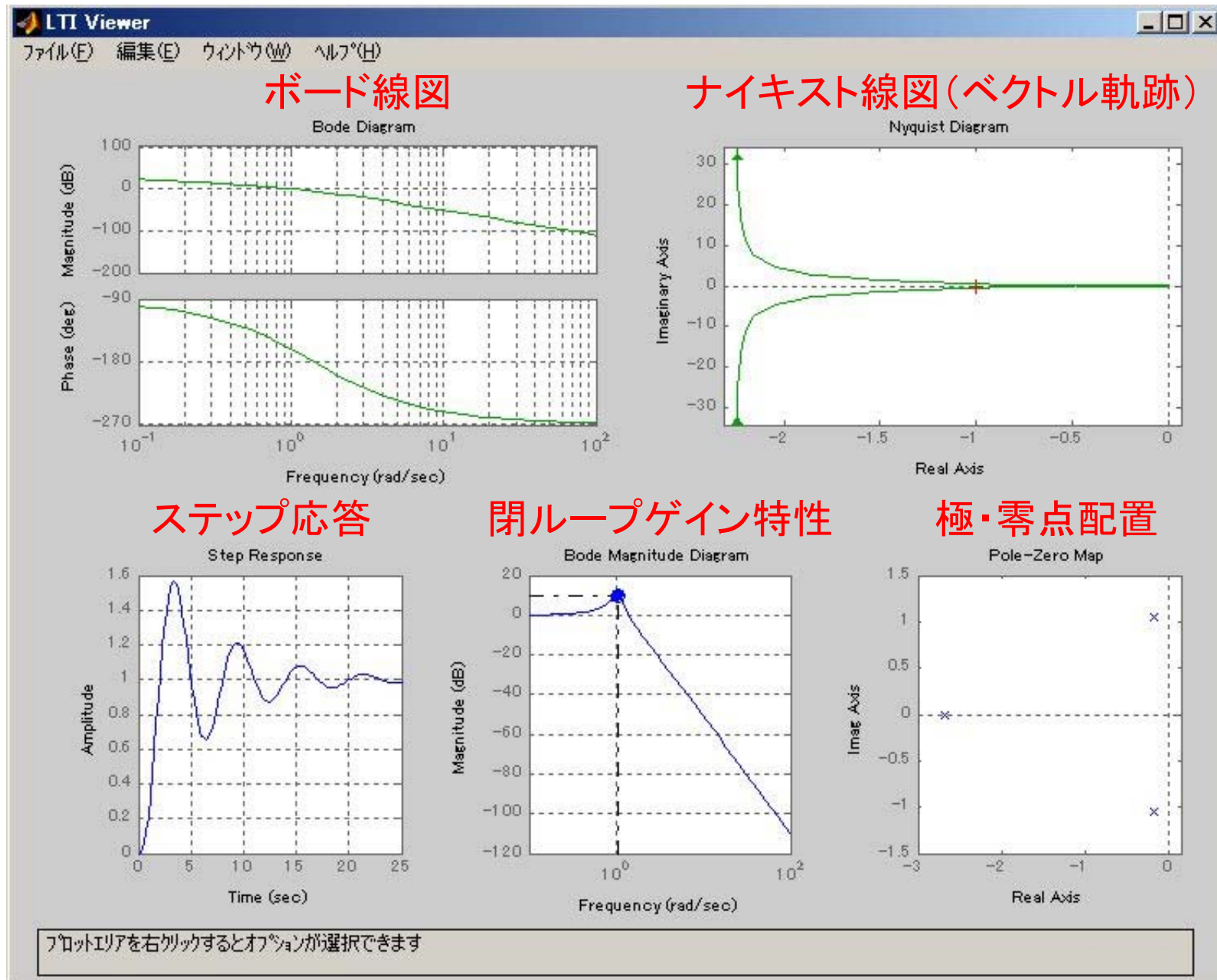
$$\omega_{pc} \simeq 1.41$$

ゲイン余裕

$$GM \simeq 6 \text{ dB}$$



# 制御系の性能評価 LTIview



# 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

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。