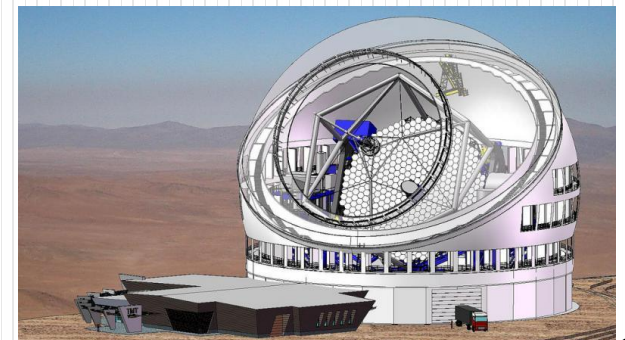




補償光学装置のフィードバック制御系の仕様設計

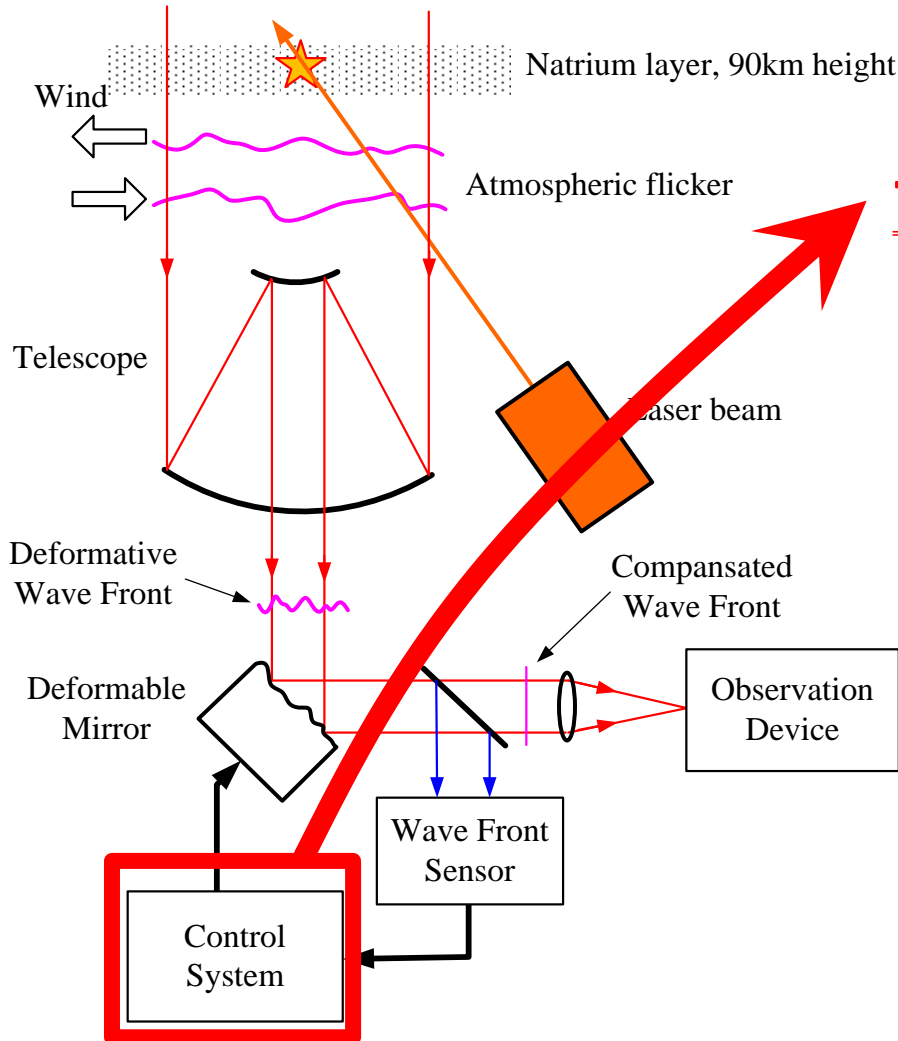
Feedback Control Specification design of Adaptive Optics

○入部 正継 西田 秀哉 三好 祐希 (大阪電気通信大学)
松尾 太郎 夏目 典明 木野 勝 (京都大学)
衣笠 哲也 (岡山理科大学) 大須賀公一 (大阪大学)



1. 緒言

■ 研究の背景：系外惑星の直接観測



フィードバック制御装置の設計問題

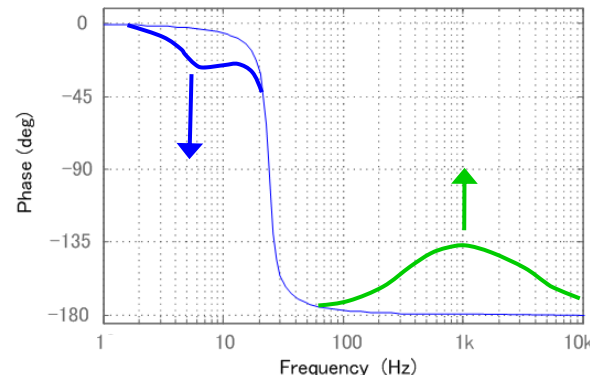
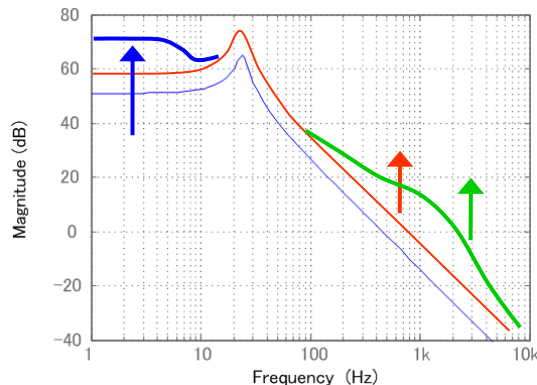
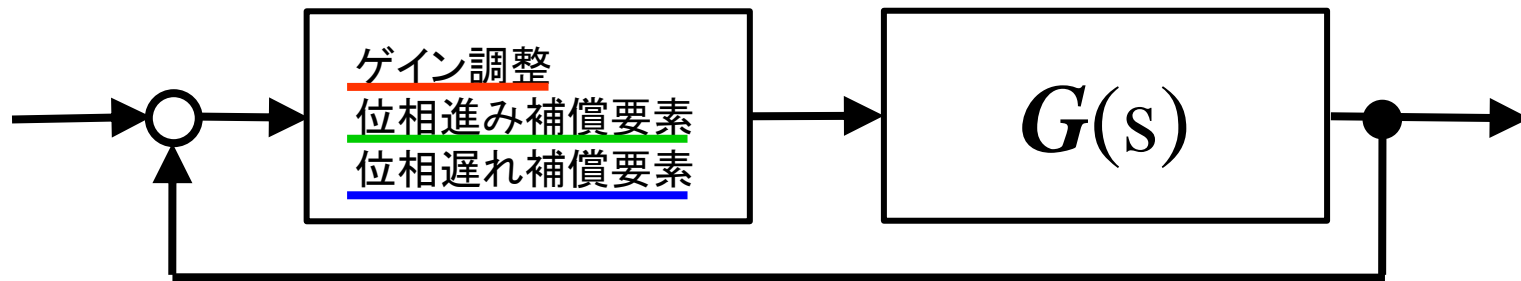
- ・・仕様が無いと設計できない
- ・・・仕様の定量化
- ・・・仕様に対する制御系設計

1. 緒言

■ 課題: フィードバック制御部の定量設計

制御器の具体的な実現方法

一般的に用いられている方法: ボード線図を用いた設計方法
位相補償法、PID制御



1. 緒言

■ 課題: フィードバック制御部の定量設計

制御器の具体的な実現方法

一般的に用いられている方法: ボード線図を用いた設計方法

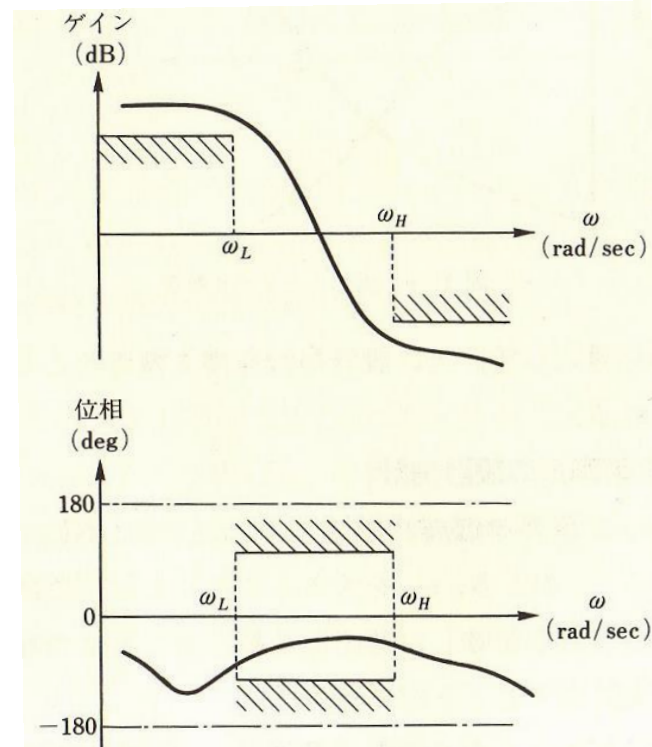
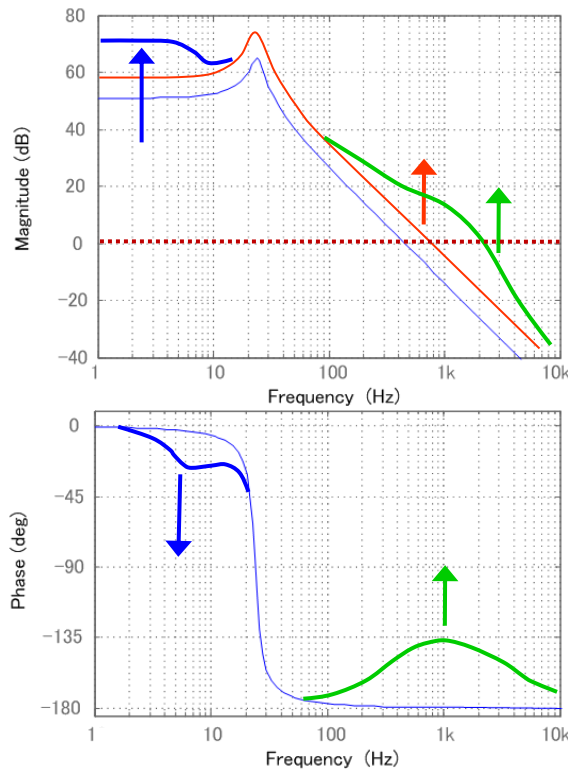
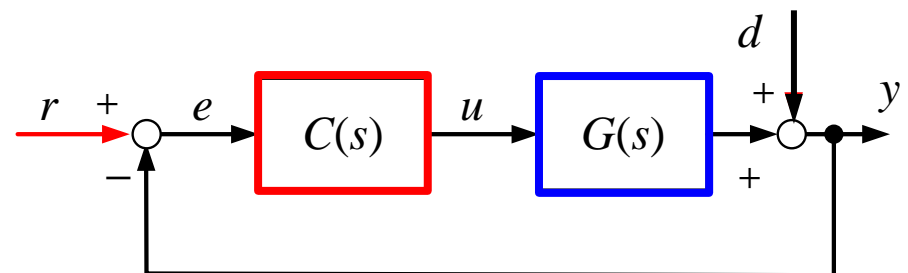
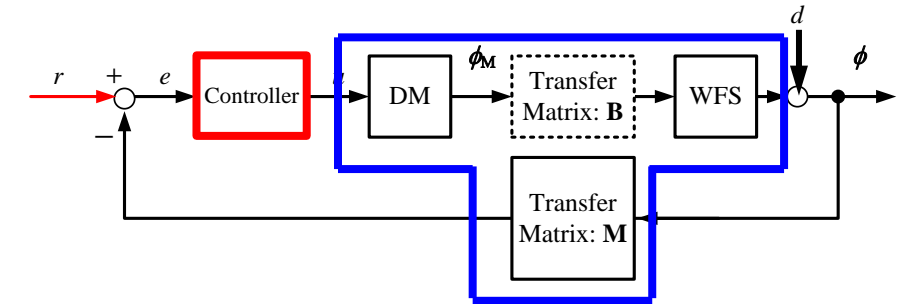
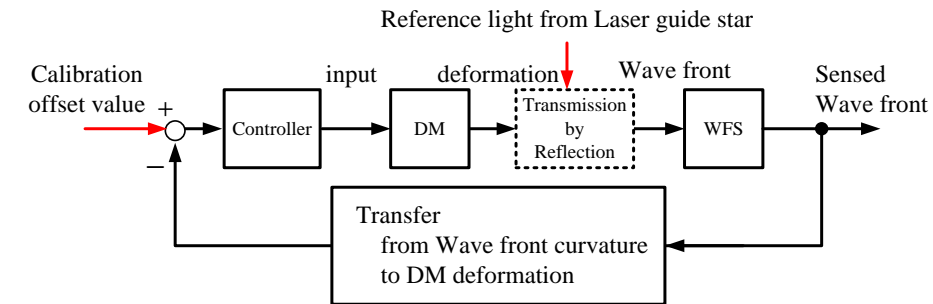
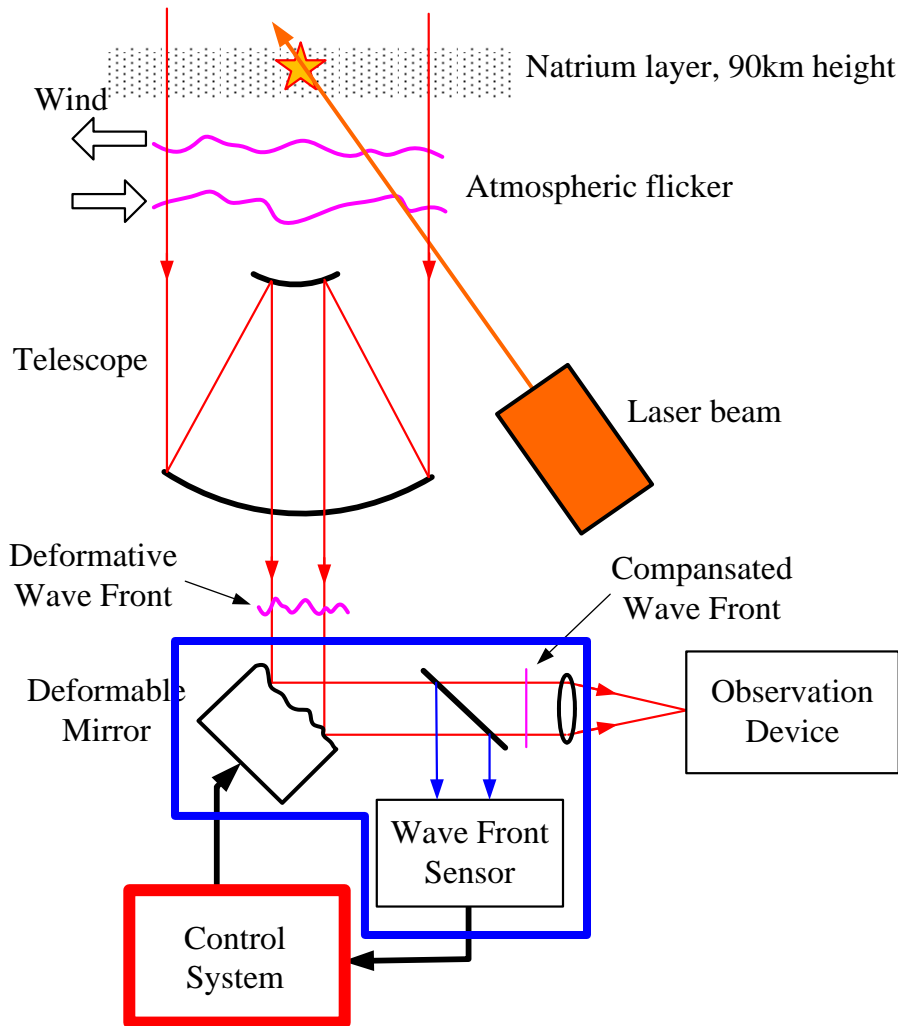


図 5.17 望ましい $G(j\omega)C(j\omega)$ のボード線図

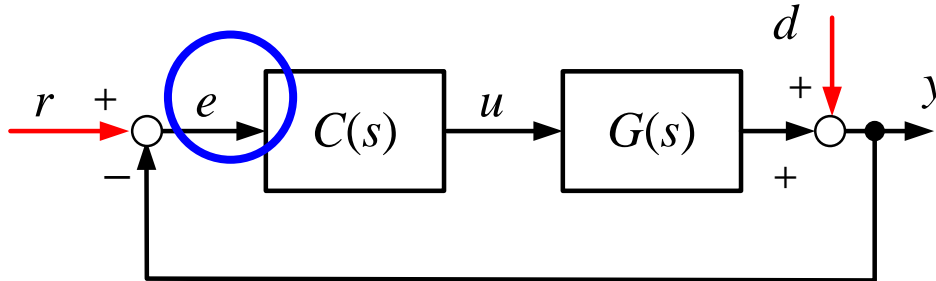
2. 制御器に必要な制御仕様の定式化

■ 補償光学系を一般的な制御系へ



2. 制御器に必要な制御仕様の定式化

■ 目標となる波面残差量：Strehl Ratioから算出



$$SR = \exp(-\sigma^2)$$

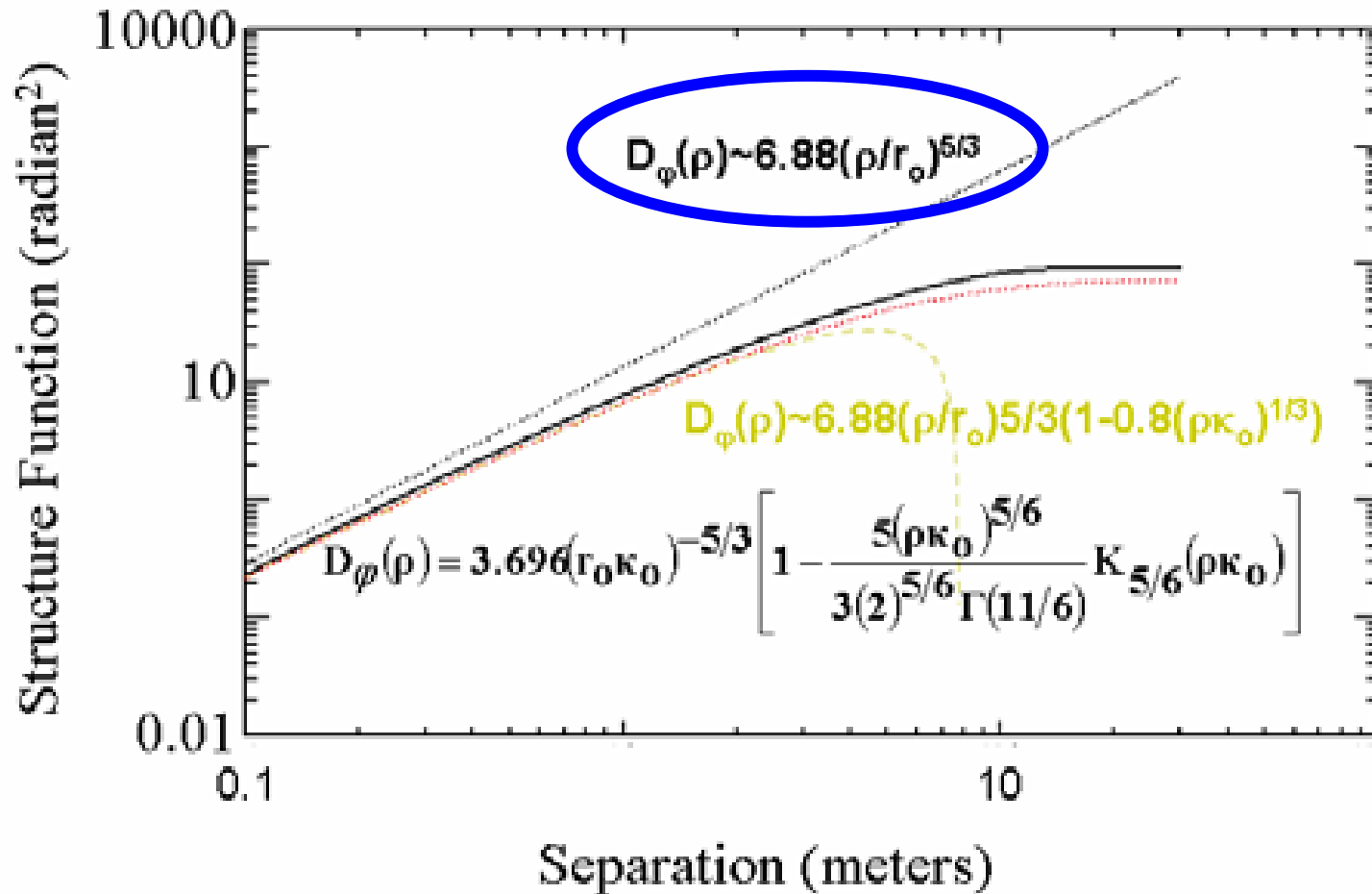
σ : 波面残差 (制御偏差に相当)

$$SR = \exp(-\sigma^2) \geq 0.8$$

$$\therefore e \leq \frac{\sigma}{2\pi} = 0.07518\lambda \quad [m] = 45.11 \quad [nm]$$

2. 制御器に必要な制御仕様の定式化

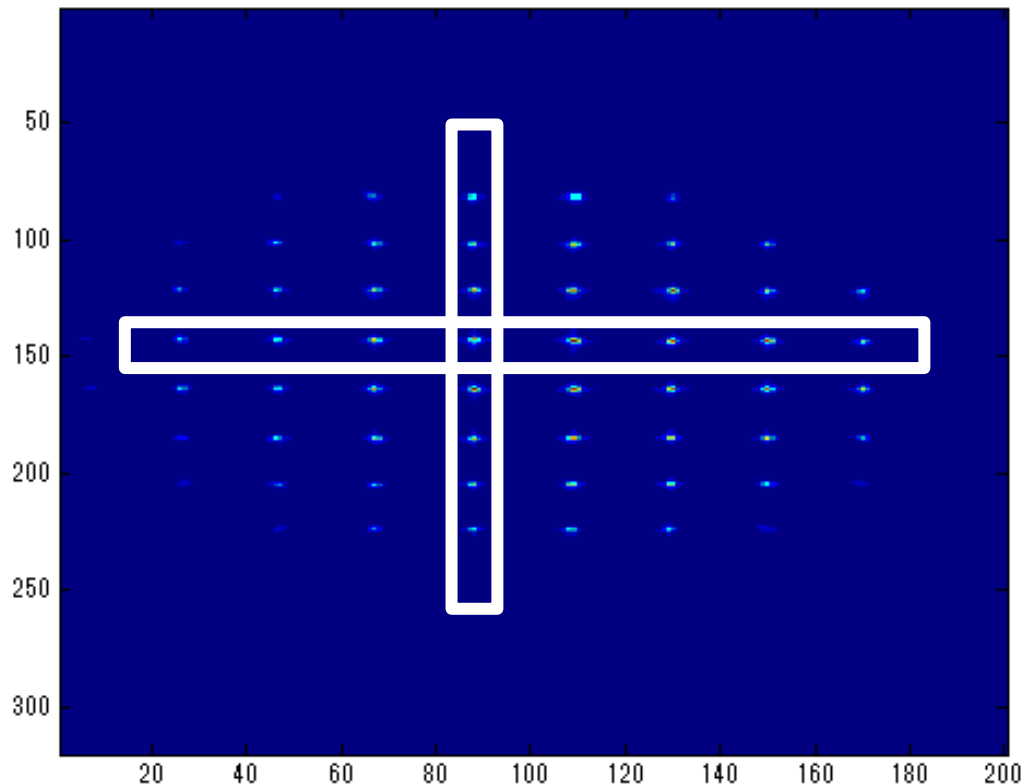
■ 波面の乱れ量の算出: Kolomogorovの乱流モデル



2. 制御器に必要な制御仕様の定式化

■ 波面の乱れ量の算出: Kolomogorovの乱流モデル

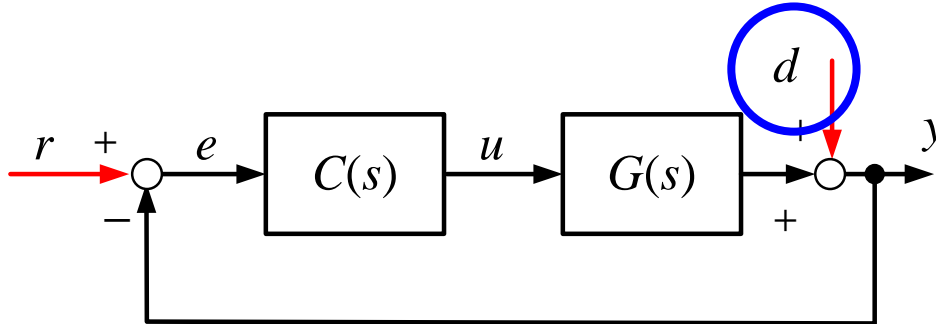
波面センサ (Wave Front Sensor) の配置素子数: 8×8 ヶ



WFSの撮像データ

2. 制御器に必要な制御仕様の定式化

■ 波面の乱れ量の算出: Kolomogorovの乱流モデル



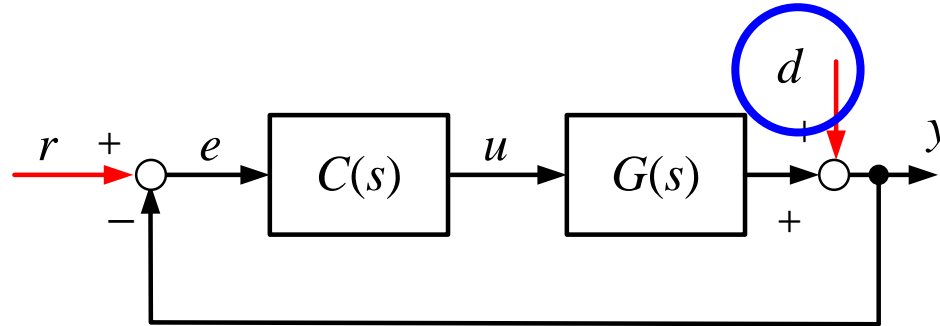
$$Df = 6.88 \left(\frac{\rho}{r_0} \right)^{\frac{5}{3}} \quad [rad^2]$$

ρ : WFS素子の検出範囲 (3.8m/8列)
 r_0 : フリード長 (岡山で0.1mと仮定)

$$\therefore d = \sqrt{Df} = 1.529\lambda \quad [m] = 920 \quad [nm]$$

2. 制御器に必要な制御仕様の定式化

■ 波面の乱れ量の算出: **時間周波数**に依存する波面ずれ



$$h(f) = \frac{0.22\lambda_0}{f^{\frac{11}{6}} \rho r_0^{\frac{5}{6}}} \quad [m]$$

ρ : WFS素子の検出範囲 (3.8m/8列)

r_0 : フリード長 (岡山で0.1mと仮定)

f : 光の空間周波数

$$d(F) = \frac{0.22\lambda_0}{\rho r_0^{\frac{5}{6}}} \left(\frac{v}{F} \right)^{\frac{11}{6}} \quad [m]$$

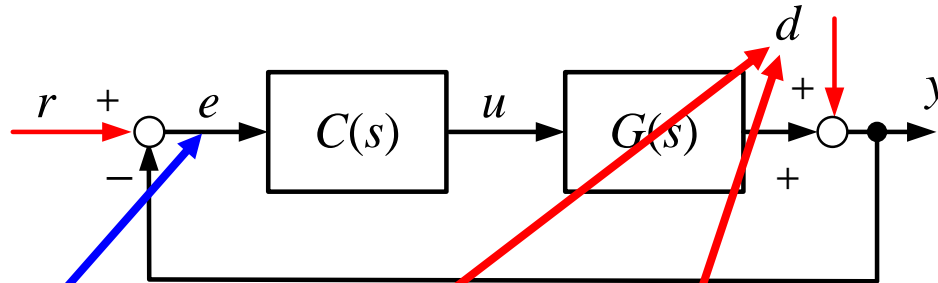
F : 時間周波数

$= f \cdot v$, v は風速

$$\therefore d(F) = (459.7 \times 10^{-6}) \left(\frac{1}{F} \right)^{\frac{11}{6}} \quad [m]$$

2. 制御器に必要な制御仕様の定式化

■ 各部の数値のまとめ：設計目標と最悪の想定



e : 波面残差
 $e \leq 45$ [nm]

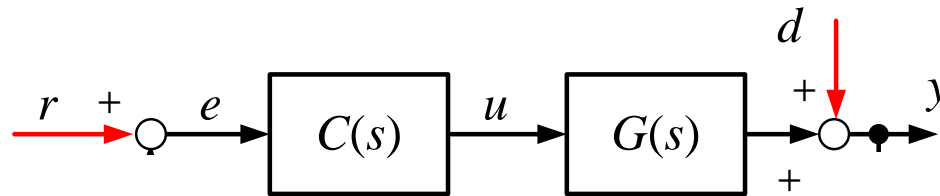
d_{DC} : 定常的な波面の乱れ
 $d_{DC} = 1.529\lambda = 920$ [nm]

$d(F)$: 時間周波数毎の波面の乱れ

$$d(F) = (459.7 \times 10^{-6}) \left(\frac{1}{F} \right)^{\frac{11}{6}} \text{ [m]}$$

2. 制御器に必要な制御仕様の定式化

■ 抑圧比の算出：波面乱れと制御後の波面残差の比



※抑圧比：入ってくるズレ量を圧縮（抑圧）する比率

$$y = C(s)G(s)e + d$$

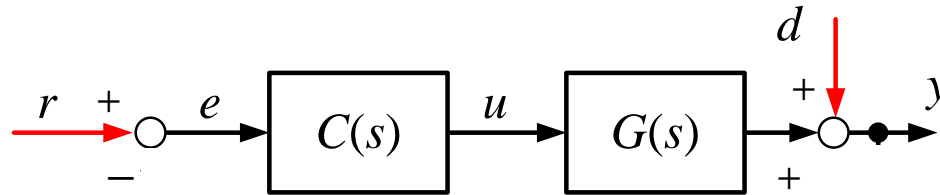
なる関係で、キャリブレーションが済んでいれば $y = 0$ なので、抑圧比は

$$\left| \frac{y}{e} \right| = \left| \frac{d}{e} \right| = |C(s)G(s)|$$

として算出できる。この抑圧比は“開ループ伝達関数”と呼ばれるもの

2. 制御器に必要な制御仕様の定式化

■ 設計仕様の定量化: ストレール比 (SR) で0.8以上



・ 抑圧比 ($|C(s)G(s)|$) を算出

大域的な領域での抑圧比

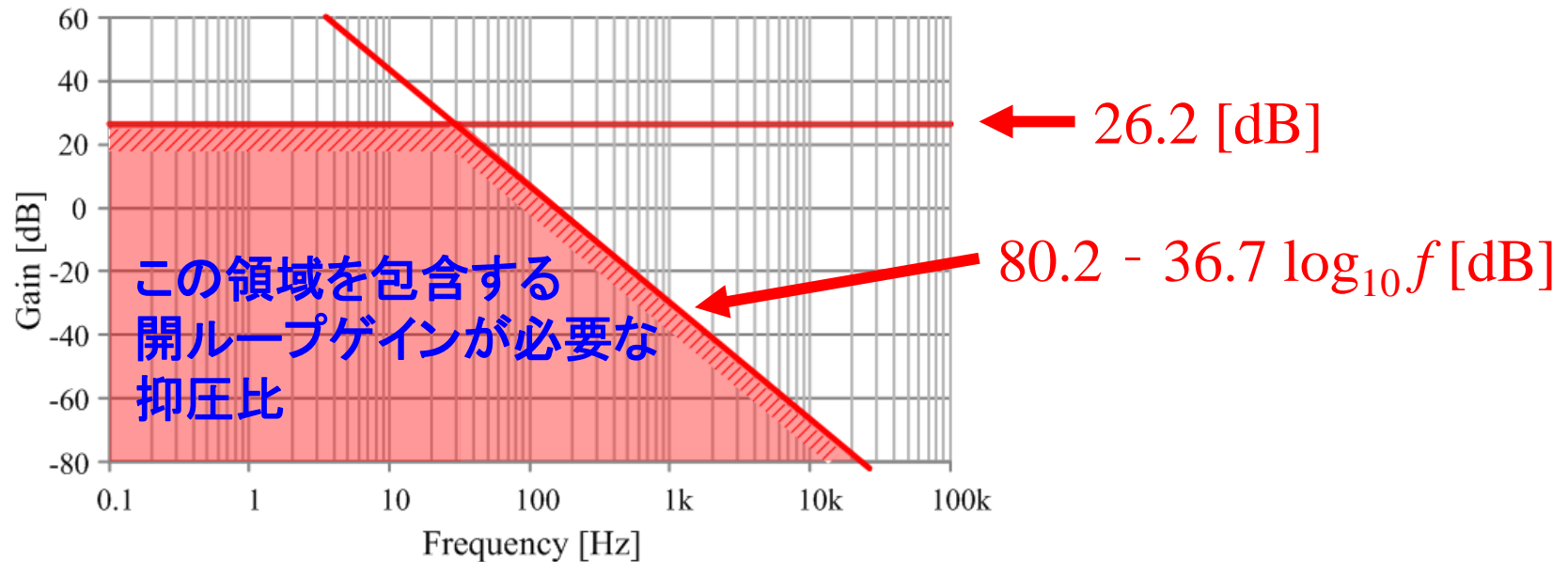
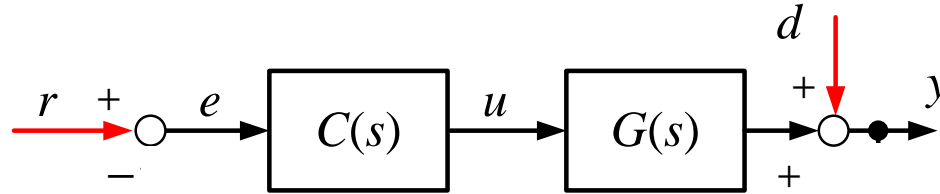
$$20 \log \left| \frac{d_{DC}}{e} \right| = 20 \log |C(s)G(s)| = 20 \log \left| \frac{920 \times 10^{-9}}{45 \times 10^{-9}} \right| = 26.2 \text{ [dB]}$$

周波数特性を有する抑圧比

$$20 \log \left| \frac{d(F)}{e} \right| = 20 \log \left| \frac{(459.7 \times 10^{-6})(1/F)^{\frac{11}{6}}}{45 \times 10^{-9}} \right| = 80.2 - 36.7 \log_{10} F \text{ [dB]}$$

2. 制御器に必要な制御仕様の定式化

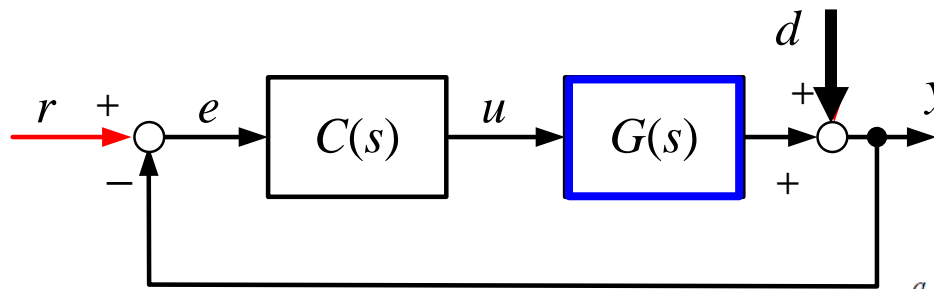
■ **設計仕様の定量化**: ストレール比 (SR) で0.8以上



3. 制御系設計：同定とシミュレーション

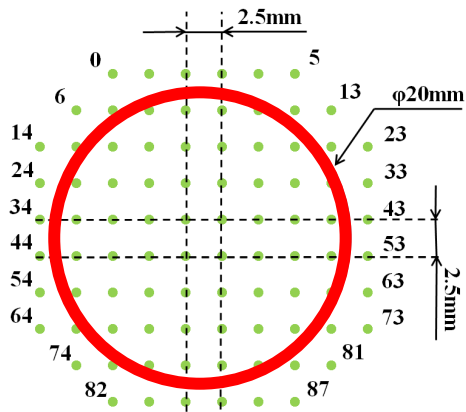
■ 制御対象のシステム同定：可変形鏡の特性測定

・ 動的な特性の測定

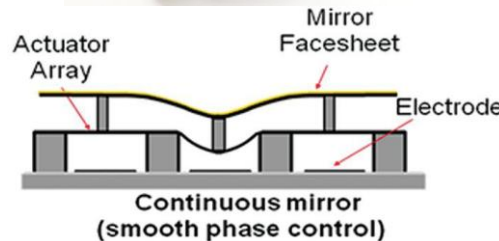


$$G(s) = \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \quad (2)$$

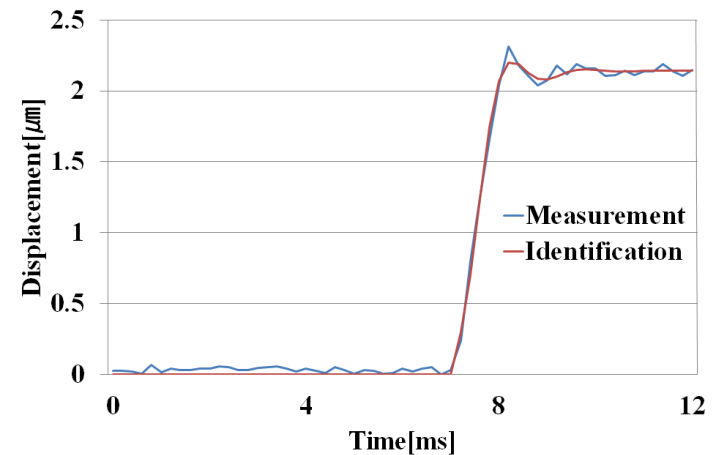
$$a_0 = 72668909500, \quad a_1 = 2579049, \quad a_2 = 2424.941, \\ b_0 = 64282000000, \quad b_1 = 258900000, \quad b_2 = 4412, \quad b_3 = 1.$$



アクチュエータ
(素子)配置図



可変形鏡(DM)の
外観と動作原理

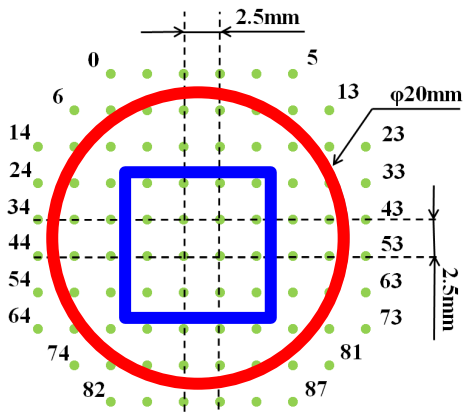
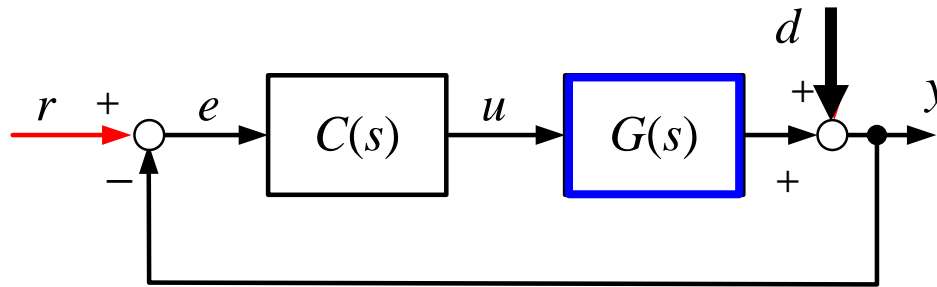


ステップ応答法による
動的特性の測定

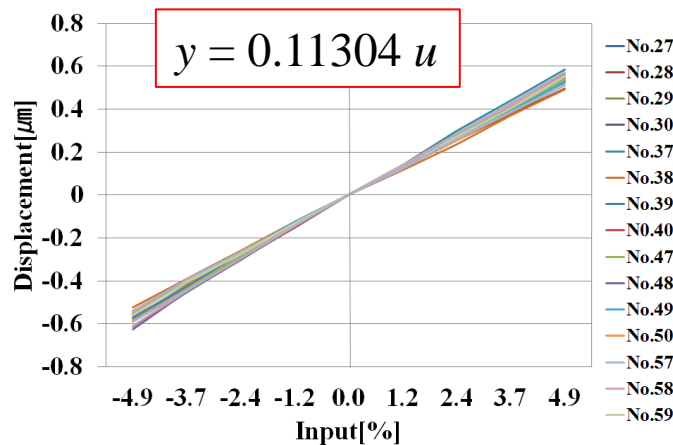
3. 制御系設計：同定とシミュレーション

■ 制御対象のシステム同定：可変形鏡の特性測定

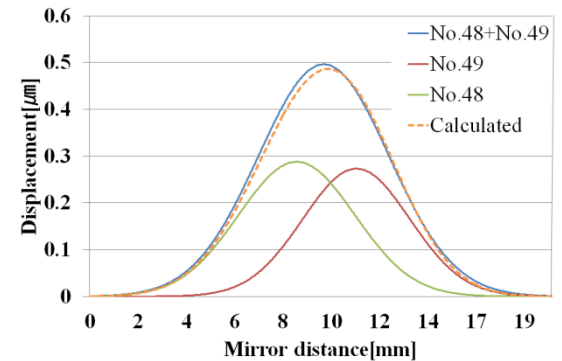
・ 静的な特性の測定



アクチュエータ
(素子)配置図



静的測定結果(強い線形性)

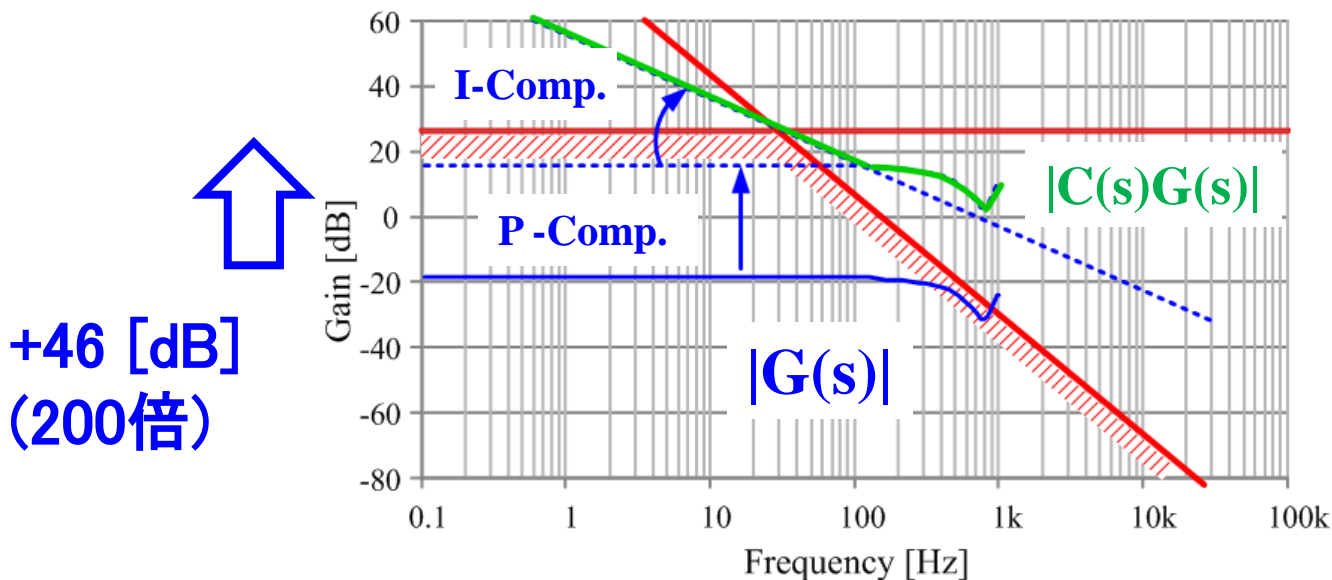
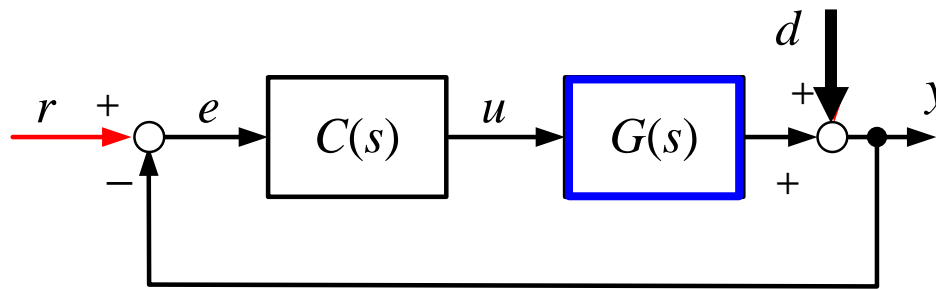


素子間の相互干渉の特性
線形和が成立

3. 制御系設計：同定とシミュレーション

■ 制御系設計シミュレーション：仕様を参考に

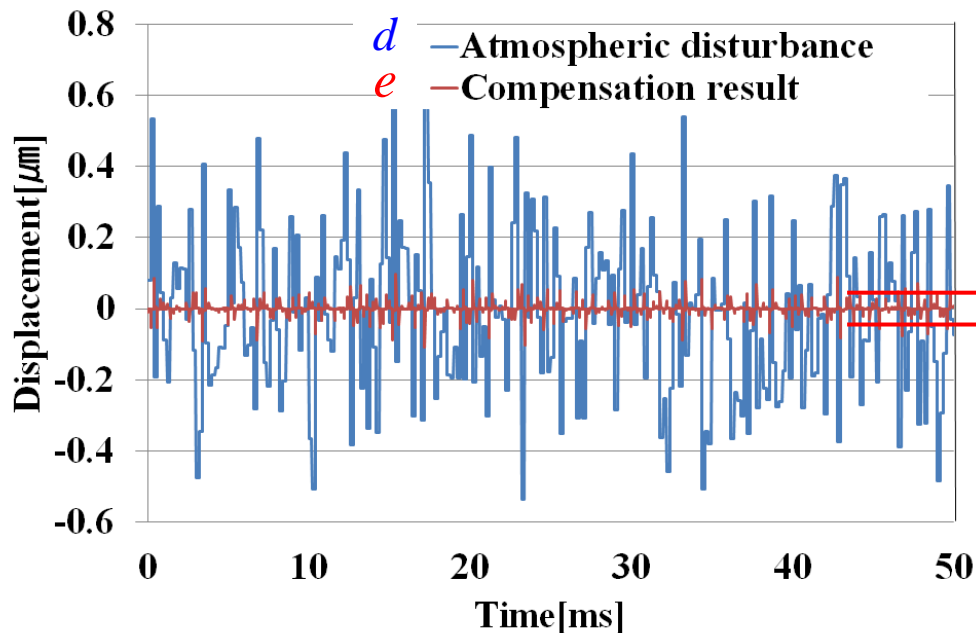
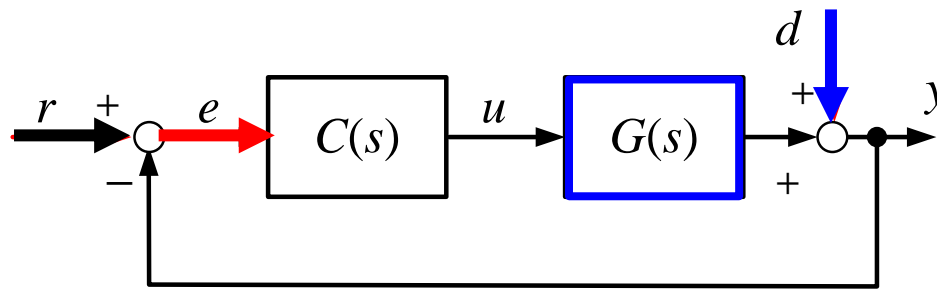
- ・制御系の設計：PI制御器



3. 制御系設計：同定とシミュレーション

■ 制御系設計シミュレーション：仕様を参考に

- ・制御系の設計：PI制御器



外乱を93%以下に抑圧
(-23dB)

5. 結言

■まとめ

- ・サイエンスの要求を制御系の設計仕様へ変換

■課題

- ・本報告の一般化(設計計算式への昇華)
- ・実装試験(7月末~夏休み期間)
- ・時間周波数領域での設計計算式導出

