



ロボットと観測装置の制御技術あれこれ

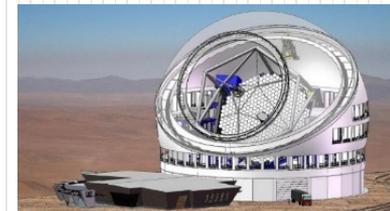
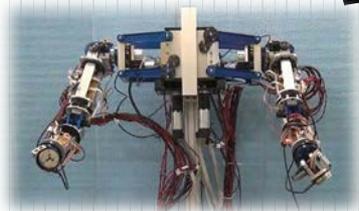
○入部 正継(大阪電気通信大学)

藤田 勝, 中村 祐一(大阪電気通信大学)

松尾 太郎(大阪大学)

山本広大, 森本悠介, 木野 勝, 栗田 光樹夫(京都大学)

衣笠 哲也(岡山理科大学)



アジェンダ

1. はじめに(自己紹介)
2. 機械システムの制御(一般論)
3. 機械システムの制御(ハードウェア)
4. 現在開発中の補償光学システム
5. おわりに

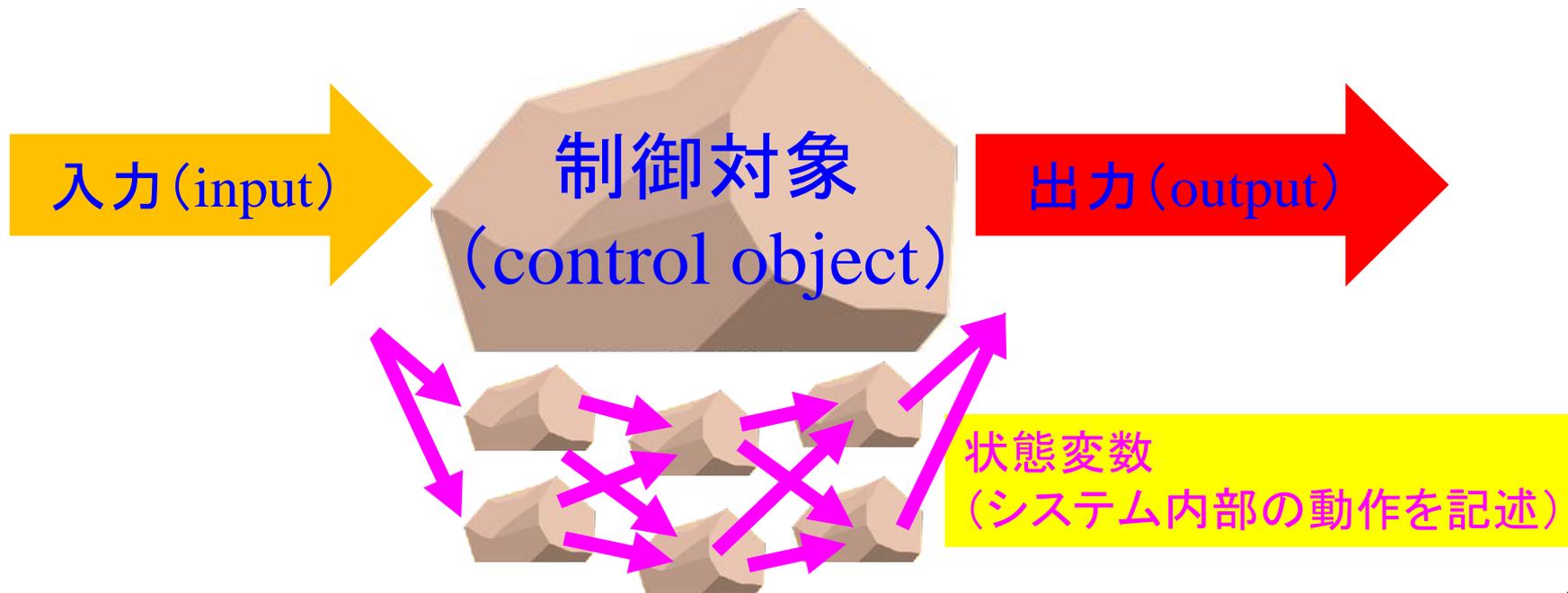
2. 機械システムの制御(一般論)

■ 制御工学(自動制御)

制御工学(Wikipediaでの説明)

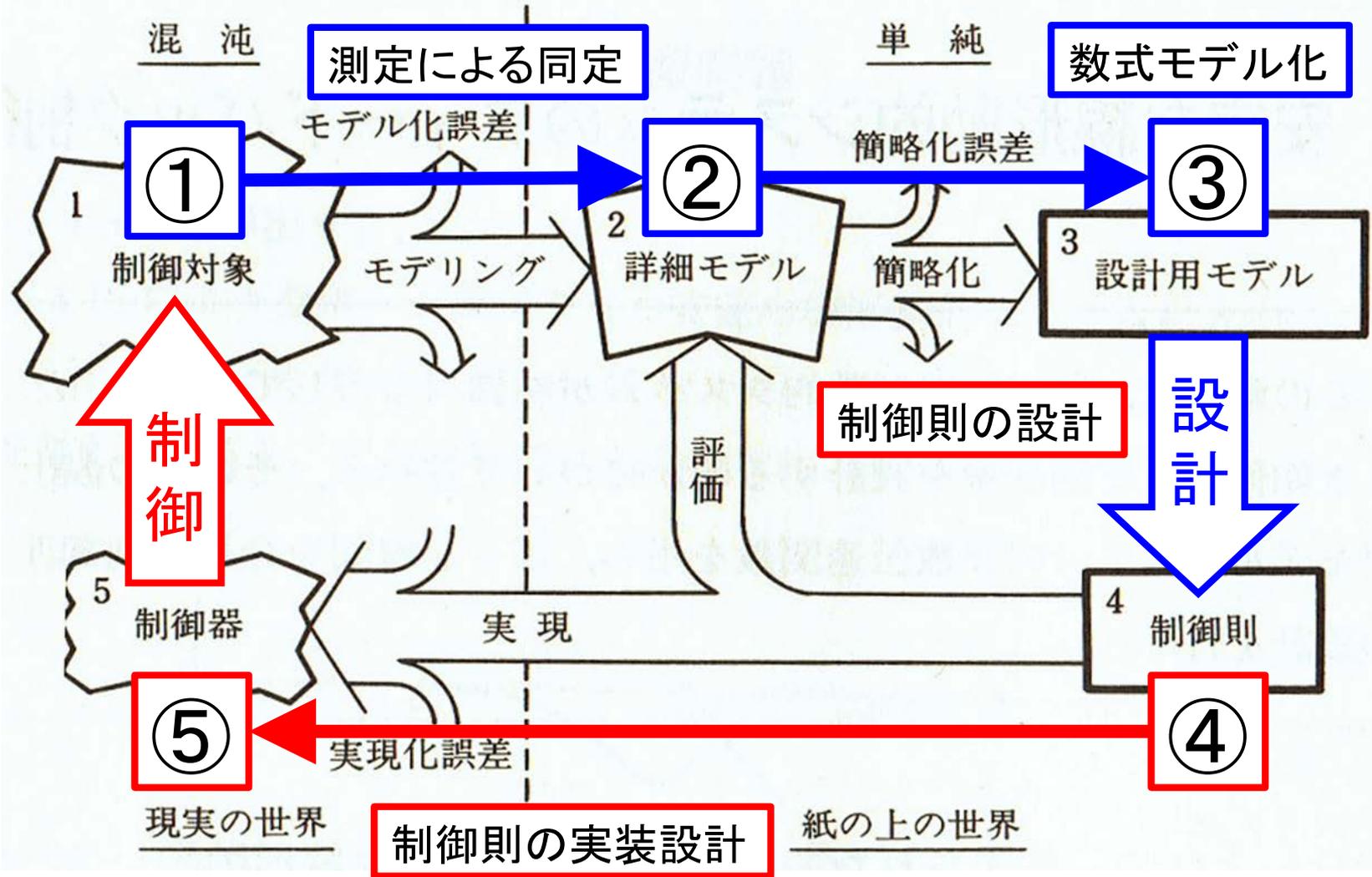
入力および出力を持つシステムにおいて, その(状態変数
ないし)出力を自由に制御する方法全般にかかわる学問
分野を指す.

主にフィードバック制御を対象にした工学である.



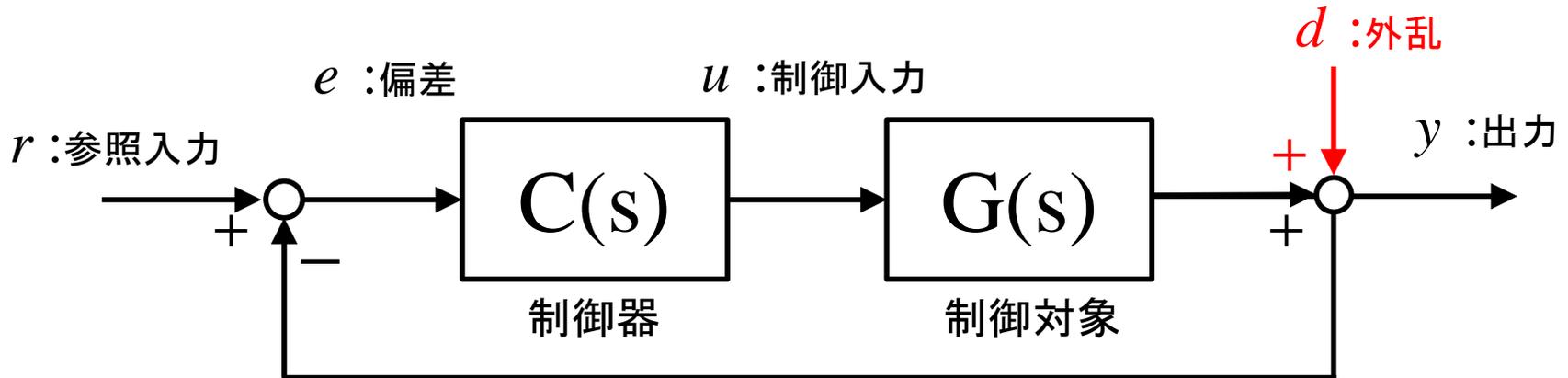
2. 機械システムの制御(一般論)

■ 制御器の設計手順



2. 機械システムの制御(一般論)

■フィードバック制御のシステム構成



$$y(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} r(s) + \frac{1}{1 + C(s)G(s)} d(s)$$

閉ループ伝達関数

感度関数

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

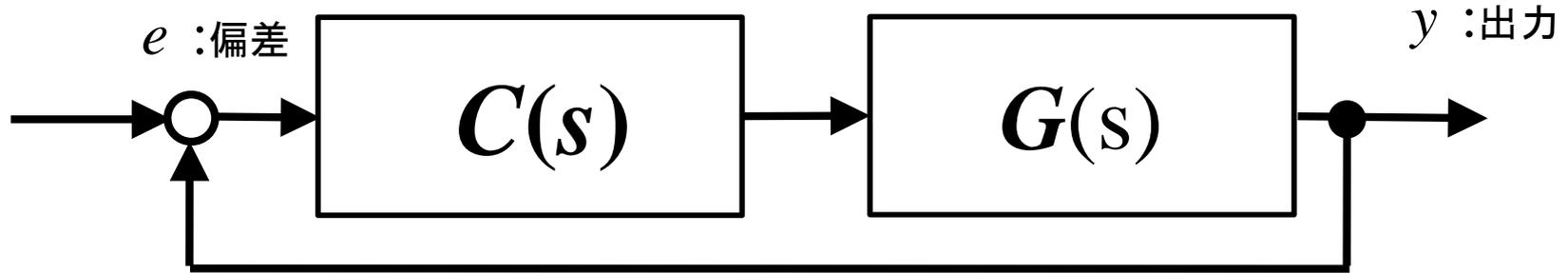
開ループ伝達関数

※ $C(s) \rightarrow \infty$ で概ね解決する話

できる訳がない...

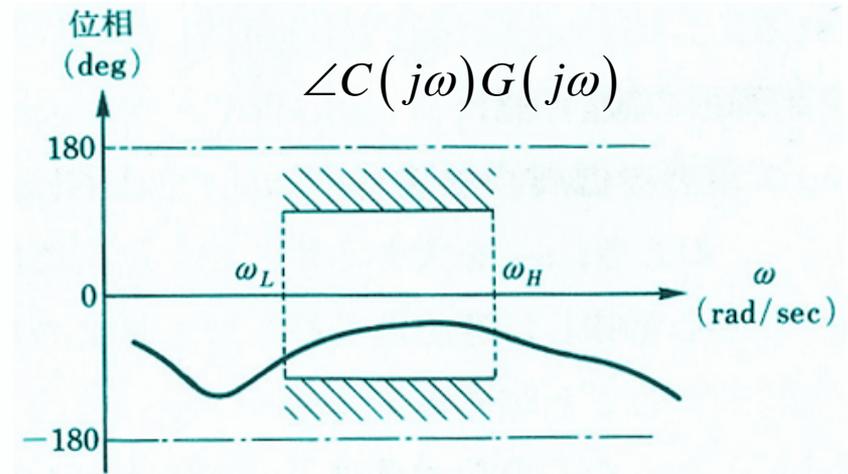
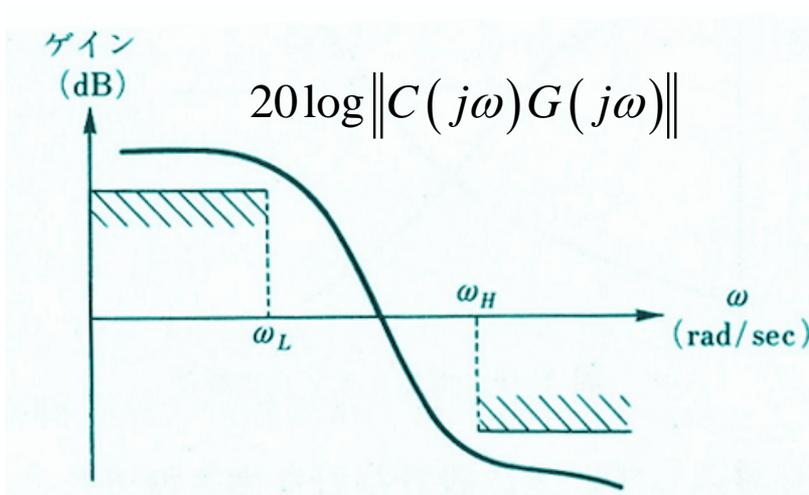
2. 機械システムの制御(一般論)

■フィードバック制御の設計方法



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

開ループ伝達関数で設計する

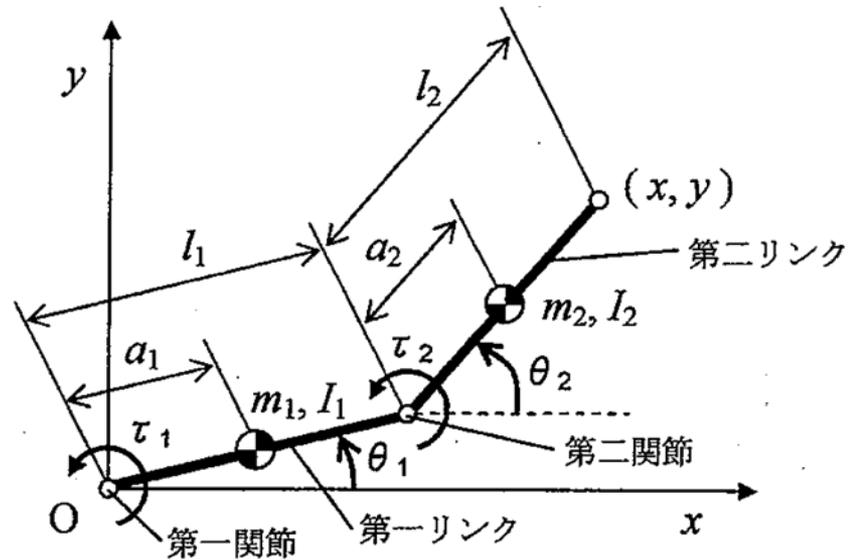


3. 機械システムの制御(ハードウェア)

■ ロボットの制御の場合



産業用ロボットマニピュレータ



$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{N}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}) = \boldsymbol{\tau}$$

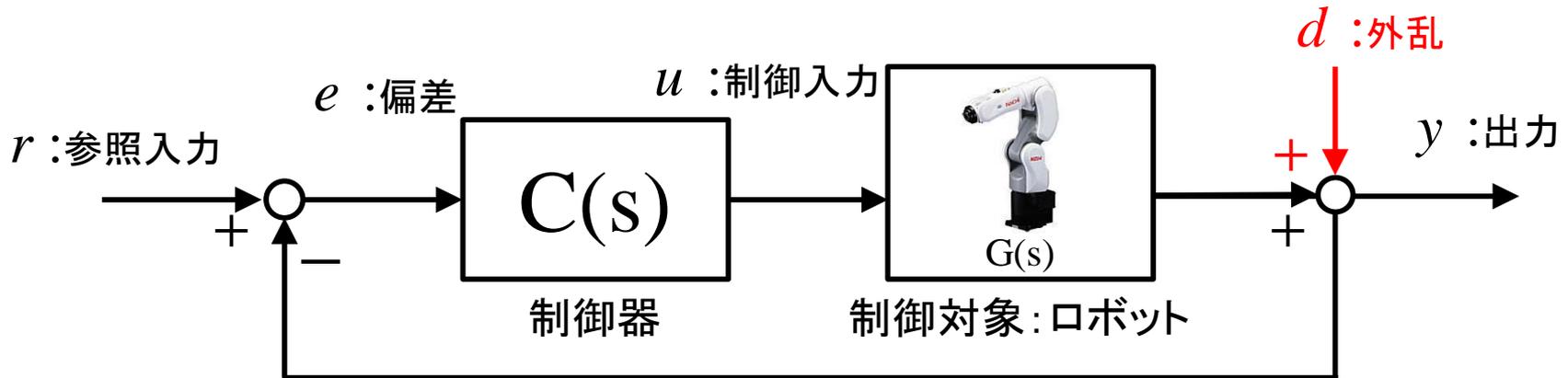
$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} m_1 l_{g1}^2 + m_2 l_1^2 + m_2 l_{g2}^2 + I_1 + I_2 + 2m_2 l_1 l_{g2} \cos \theta_2 & m_2 l_{g2}^2 + I_2 + m_2 l_1 l_{g2} \cos \theta_2 \\ m_2 l_{g2}^2 + I_2 + m_2 l_1 l_{g2} \cos \theta_2 & m_2 l_{g2}^2 + I_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{N}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) = \begin{bmatrix} -m_2 l_1 l_{g2} (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \\ m_2 l_1 l_{g2} \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} (m_1 g l_{g1} + m_2 g l_1) \cos \theta_1 + m_2 g l_{g2} \cos (\theta_1 + \theta_2) \\ m_2 g l_{g2} \cos (\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}$$

3. 機械システムの制御(ハードウェア)

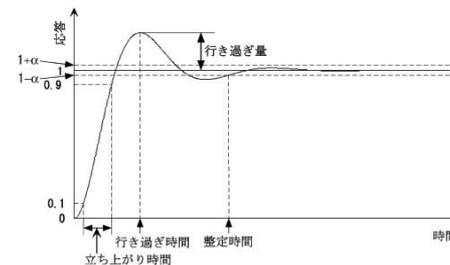
■ ロボットの制御の場合



$$y(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} r(s) + \frac{1}{1 + C(s)G(s)} d(s)$$

閉ループ伝達関数が所望の時間周波数領域で安定で“1”になるように調整

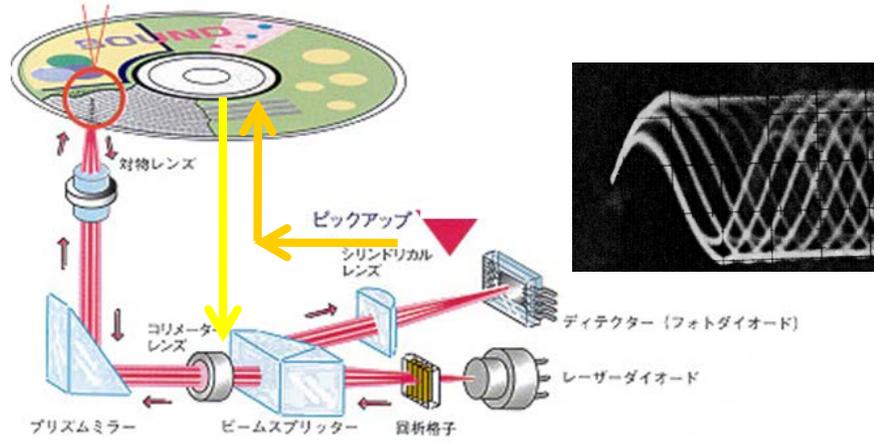
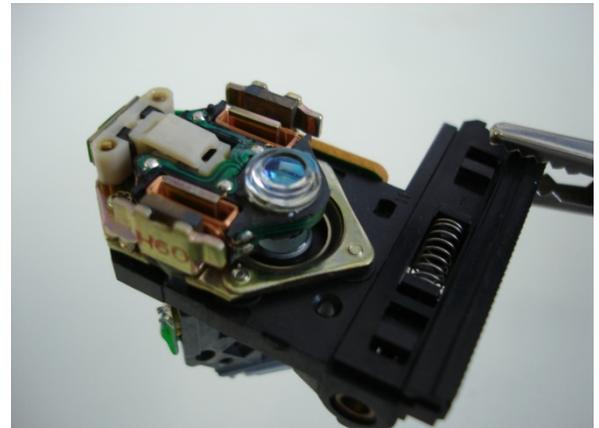
追従性重視 (servo control)



3. 機械システムの制御(ハードウェア)

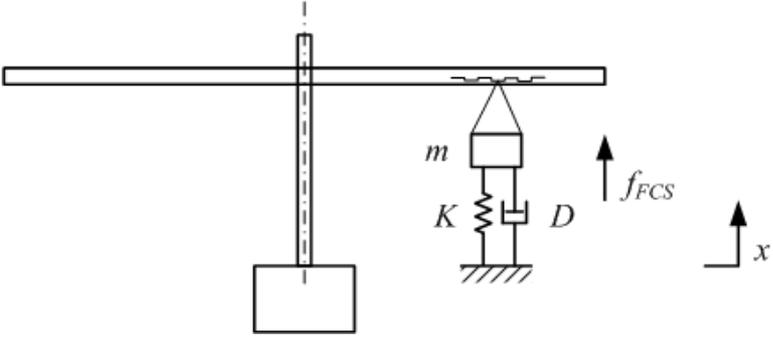
■ 機械システムの制御の場合

光ディスクドライブ装置

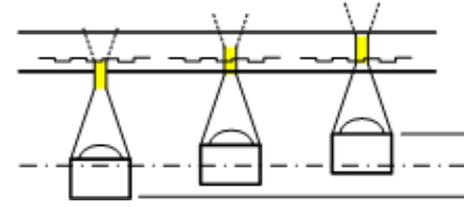


3. 機械システムの制御(ハードウェア)

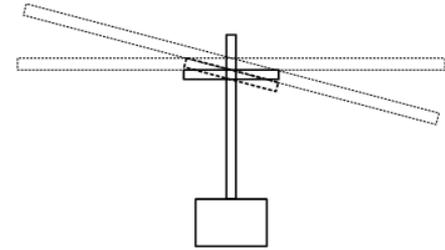
■ 機械システムの制御の場合



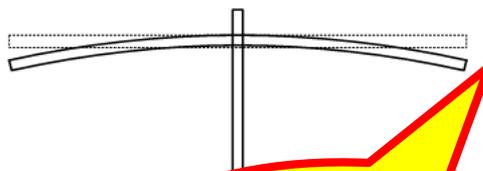
フォーカスサーボ制御系
ディスク記録面に焦点を合わせる



フォーカスずれ



ターンテーブル面ぶれ



これだけの
ぶれ量を

ここに
収める!

焦点深度
 $\pm 0.8 \mu m$

ディスクの面ぶれ量
 $\pm 0.6^\circ$

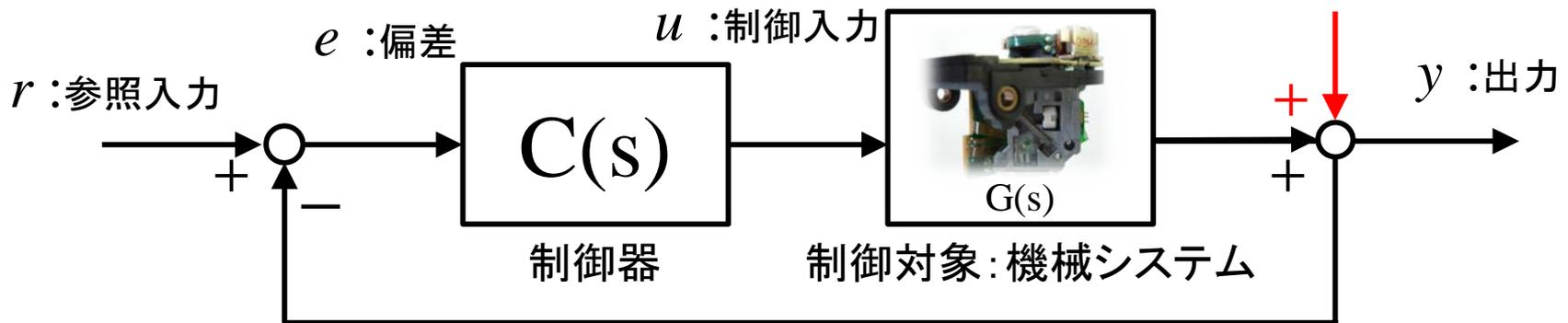
軸倒れ: $\pm 0.1^\circ$

最大面ぶれ加速
 $10 m/s^2$

ディスクの反り量
 $\pm 300 \mu m$

3. 機械システムの制御(ハードウェア)

■ 機械システムの制御の場合



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

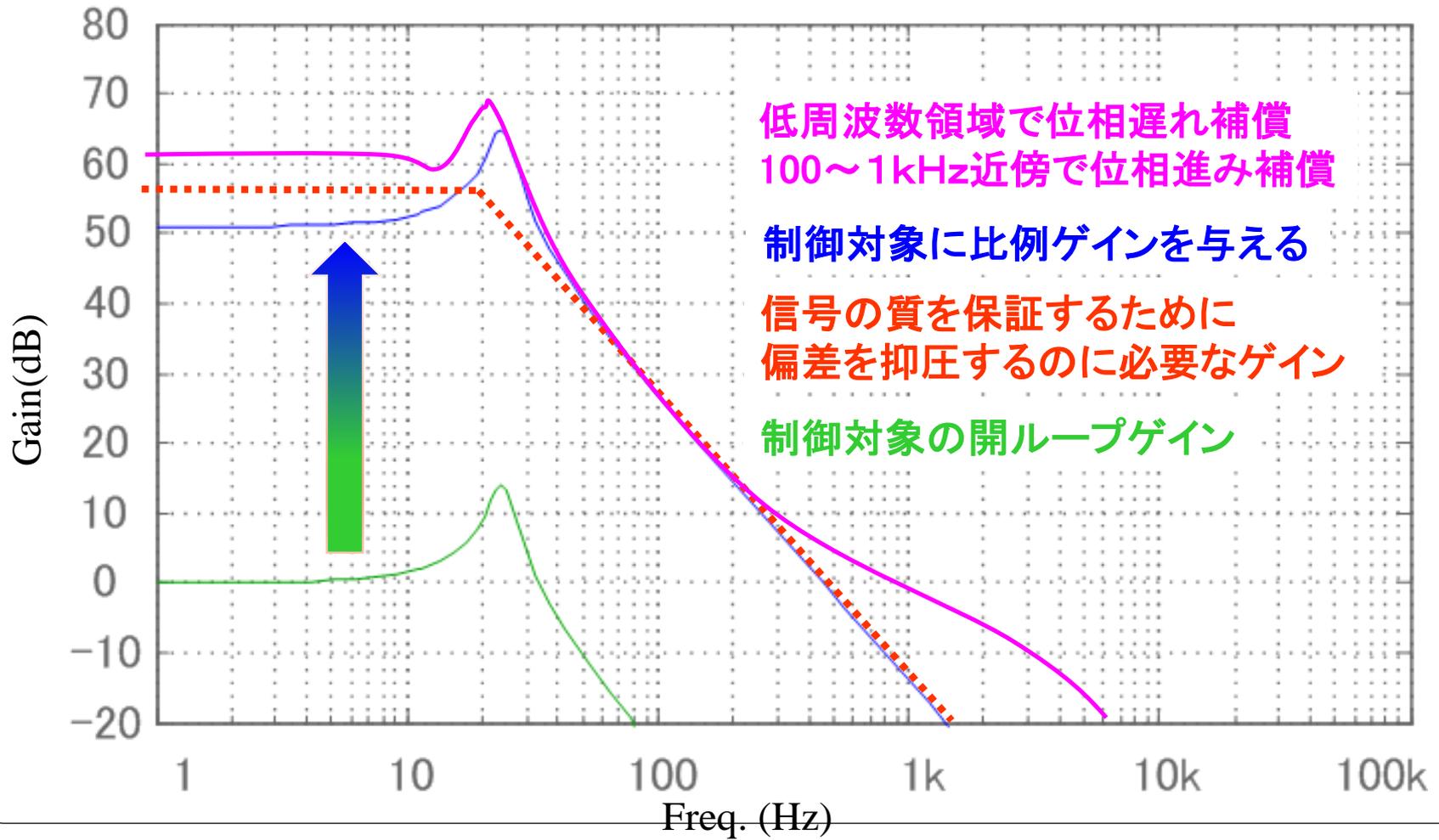
開ループ伝達関数が所望の時間周波数領域での抑圧比を満たすよう設計

安定・外乱抑圧性重視

3. 機械システムの制御(ハードウェア)

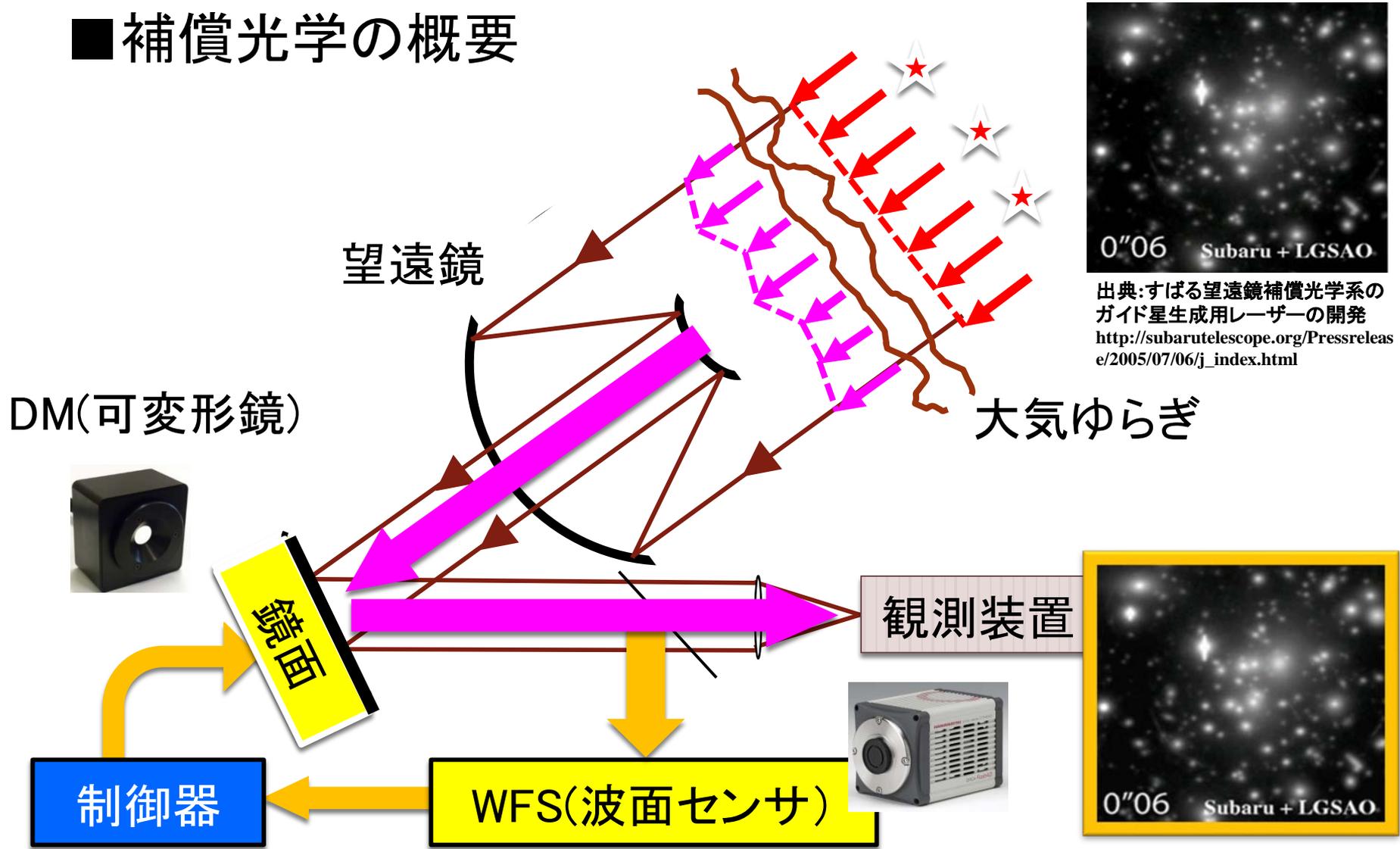
■ 機械システムの制御の場合

規格を考慮した制御系設計



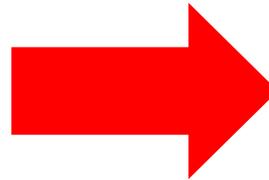
4. 現在開発中の補償光学システム

■ 補償光学の概要



4. 現在開発中の補償光学システム

■我々が目指す補償光学：極限補償光学



◆木星型太陽系外惑星の直接撮像：**SEICA**

→ $0''.2-0''.3$ で $10^{-5} \sim 10^{-6}$ のコントラスト



◆地球型太陽系外惑星の直接撮像：**SEIT**

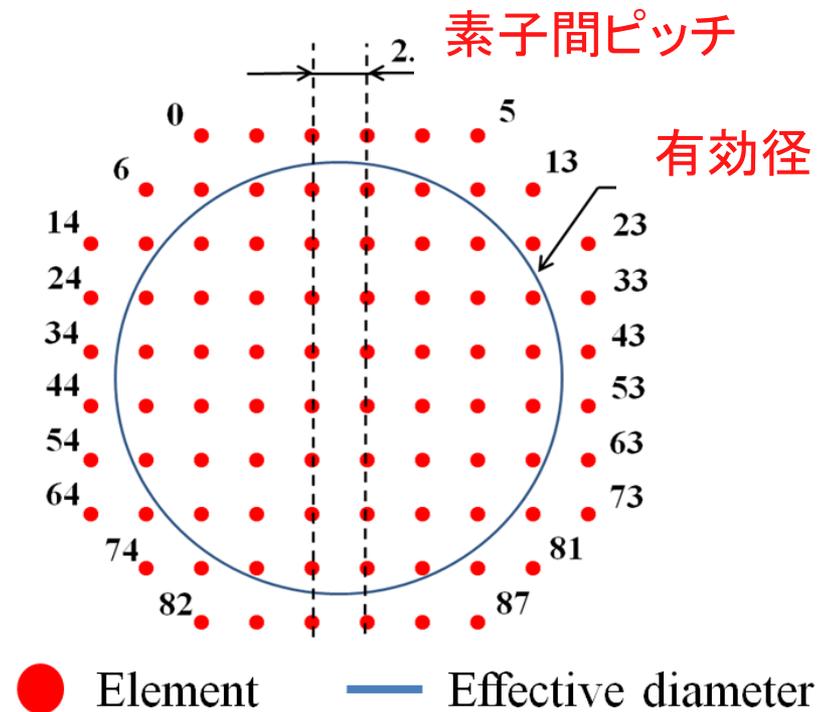
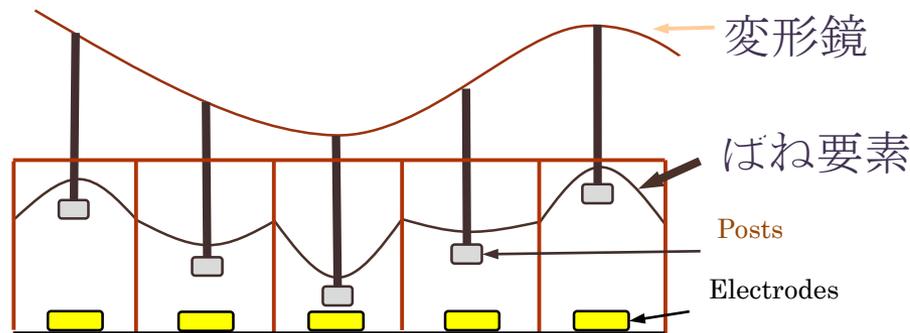
→ $0''.1$ で $10^{-8} \sim$ のコントラスト



4. 現在開発中の補償光学システム

■ 可変形鏡 (DM: Deformable Mirror)

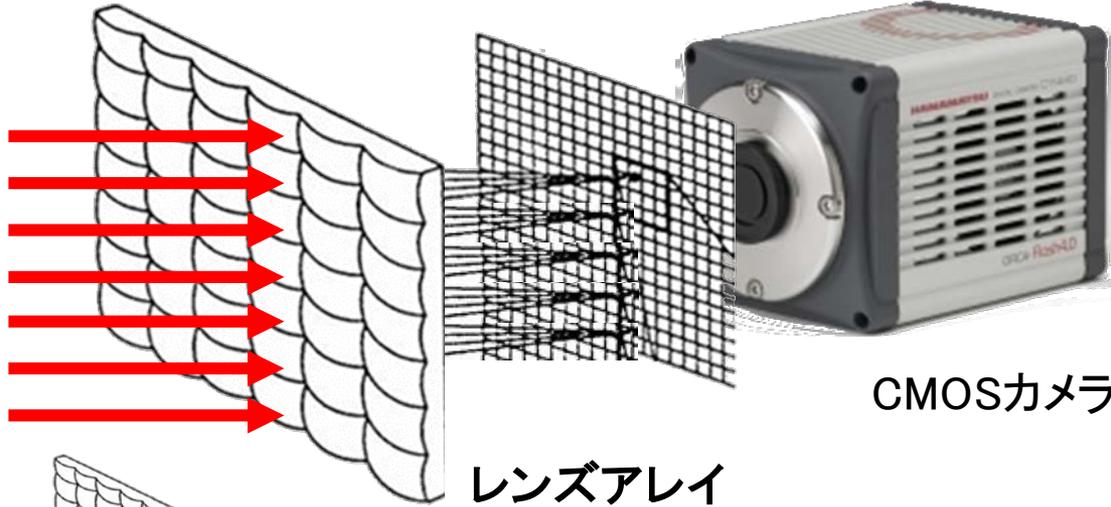
- ・鏡可変形 (DM) の空間分解能はアクチュエータ (駆動素子) 数で決まる
- ・可変形鏡 (DM) の時間分解能は鏡面の特性とデータ通信速度で決まる



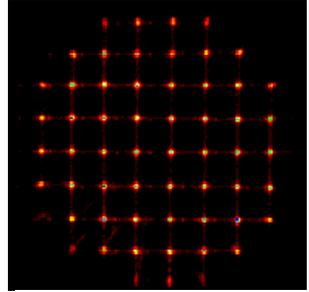
4. 現在開発中の補償光学システム

■ 波面センサ (WFS : Wave Front Sensr)

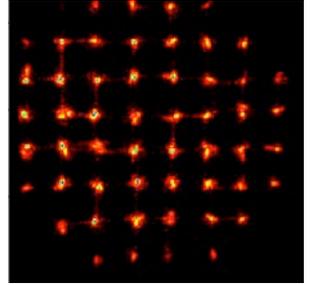
- ・波面センサ (WFS) の空間分解能をはレンズアレイとカメラ解像度で決まる
- ・波面センサ (WFS) の時間分解能は観測光の明るさに依存



結像情報



大気乱流が無い時

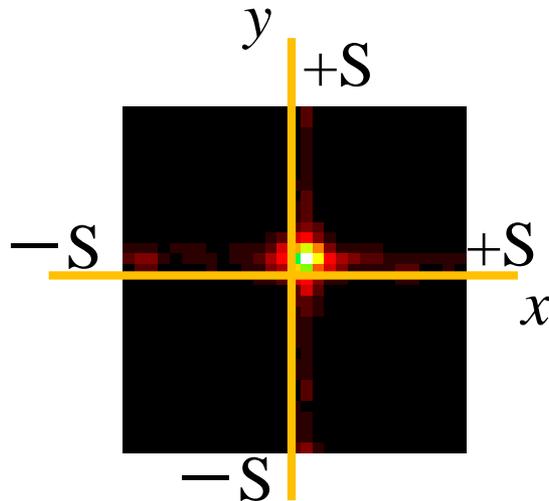


大気乱流を通った時

・レンズアレイのレンズ数を増やす
(小開口を増やす)と分解能は向上する

4. 現在開発中の補償光学システム

■ 観測光の強度分布から焦点位置を求める



$$Moment_x = \frac{\sum_{x=-s}^s \sum_{y=-s}^s \{ x(Pxy - dark) \}}{\sum_{x=-s}^s \sum_{y=-s}^s (Pxy - dark)} \dots (1)$$

$$Moment_y = \frac{\sum_{x=-s}^s \sum_{y=-s}^s \{ y(Pxy - dark) \}}{\sum_{x=-s}^s \sum_{y=-s}^s (Pxy - dark)} \dots (2)$$

WFSの小開口内の結像

参照光で調整し、焦点が原点上にあるときは波面ずれは無い

(S=10 ピクセル)

dark : 黒色の明るさレベル

Pxy : 各ピクセルの明るさレベル

リアルタイムで開口数の合計分(52×2)の値を算出する

4. 現在開発中の補償光学システム

■我々が目指す補償光学：極限補償光学

Woofers

低速、粗い波面制御

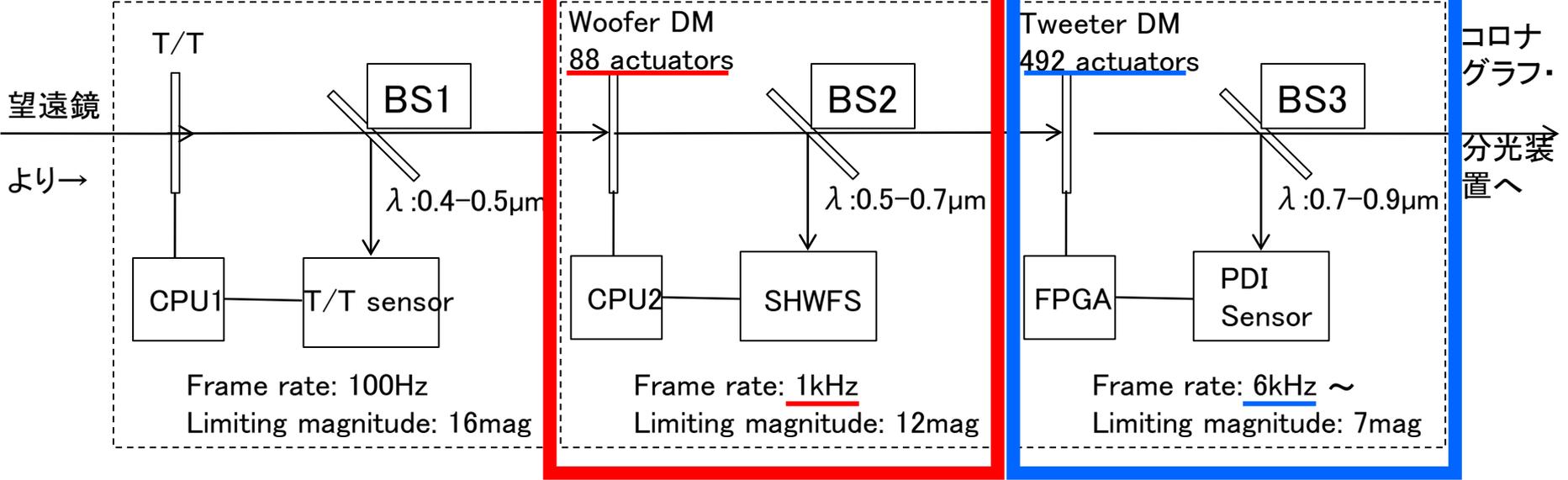
Tweeters

高速、高精度波面制御

Tip/Tilt部 視野内で星像を安定させる

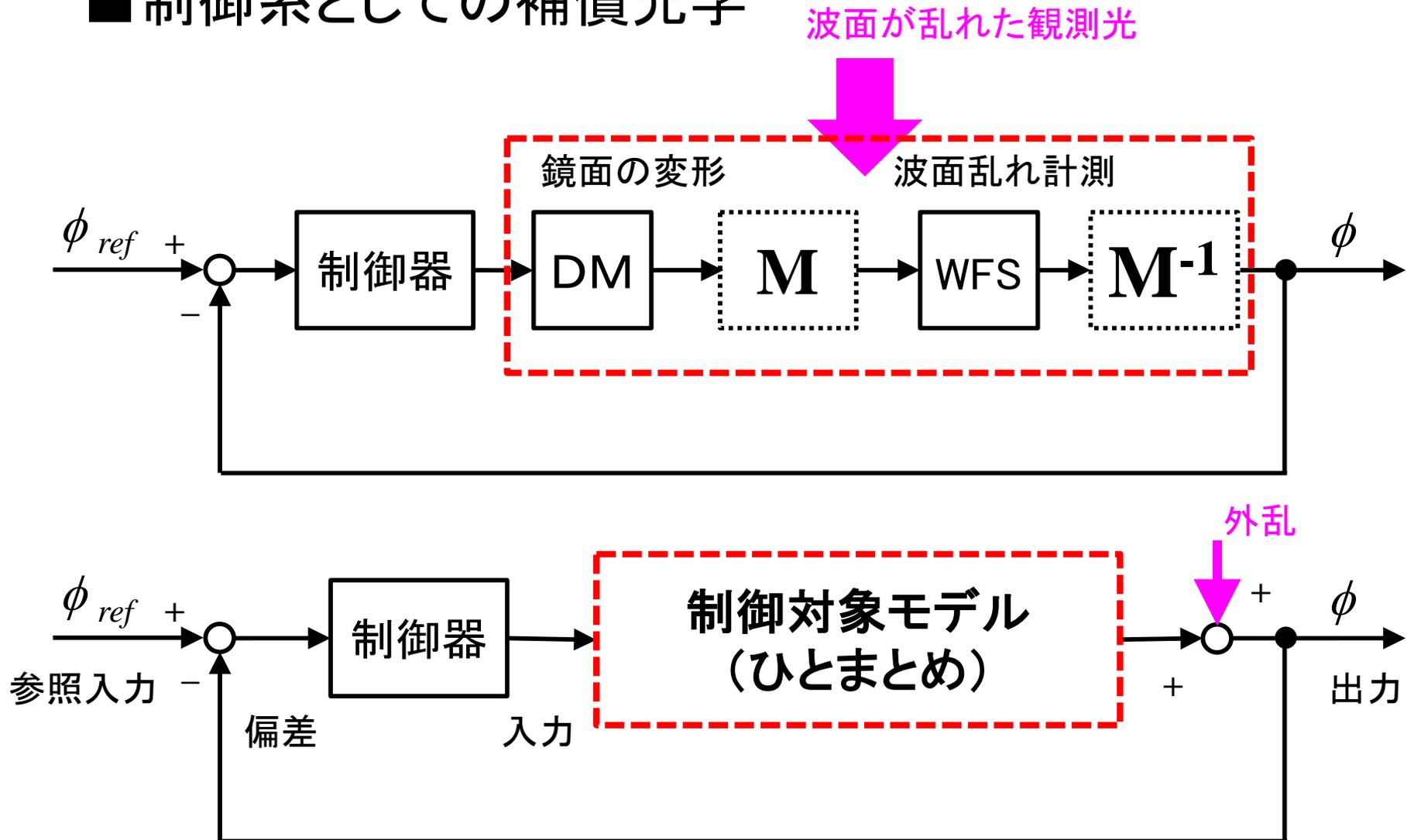
Woofers部： $\lambda / 4$ 程度まで波面補償する

Tweeters部： $\lambda / 20$ 程度まで波面補償する



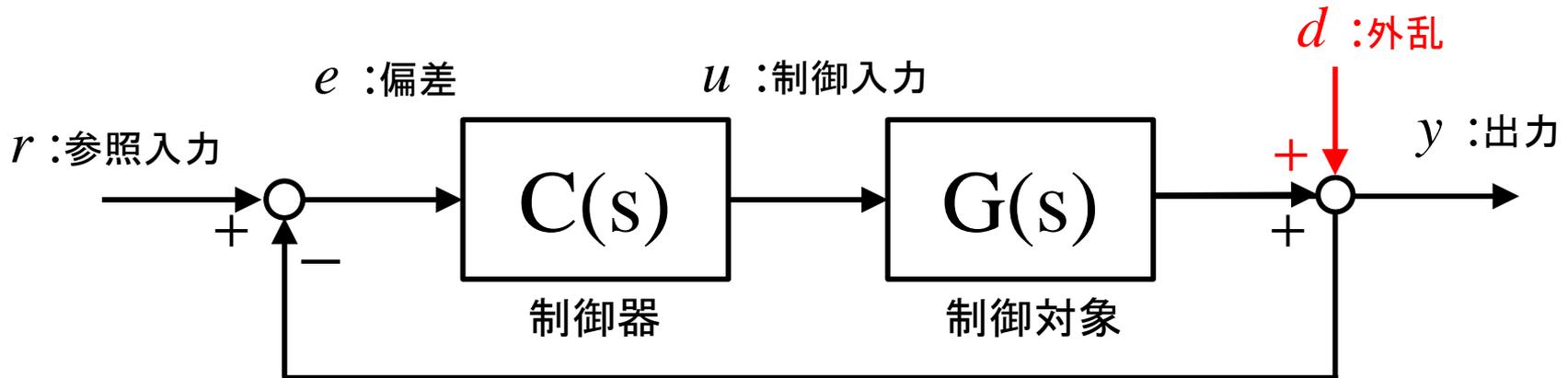
4. 現在開発中の補償光学システム

■ 制御系としての補償光学



2. 機械システムの制御(一般論)

■フィードバック制御のシステム構成



$$y(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} r(s) + \frac{1}{1 + C(s)G(s)} d(s)$$

閉ループ伝達関数

感度関数

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

開ループ伝達関数

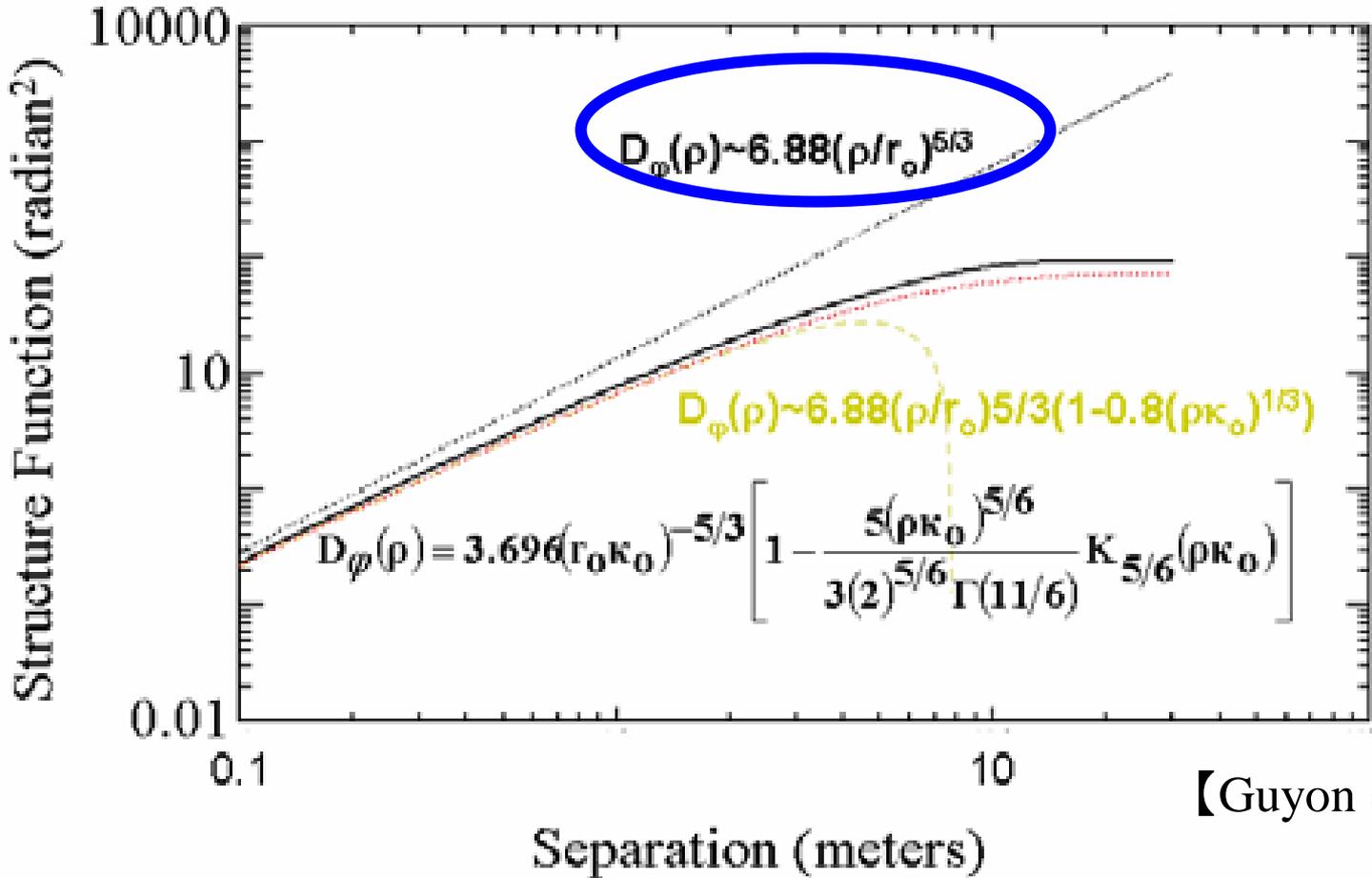
※ $C(s) \rightarrow \infty$ で概ね解決する話

できる訳がない...

4. 現在開発中の補償光学システム

■ 制御系の定量設計：波面残差をどの程度許容するか

波面の乱れ量の算出：Kolomogorovの乱流モデル

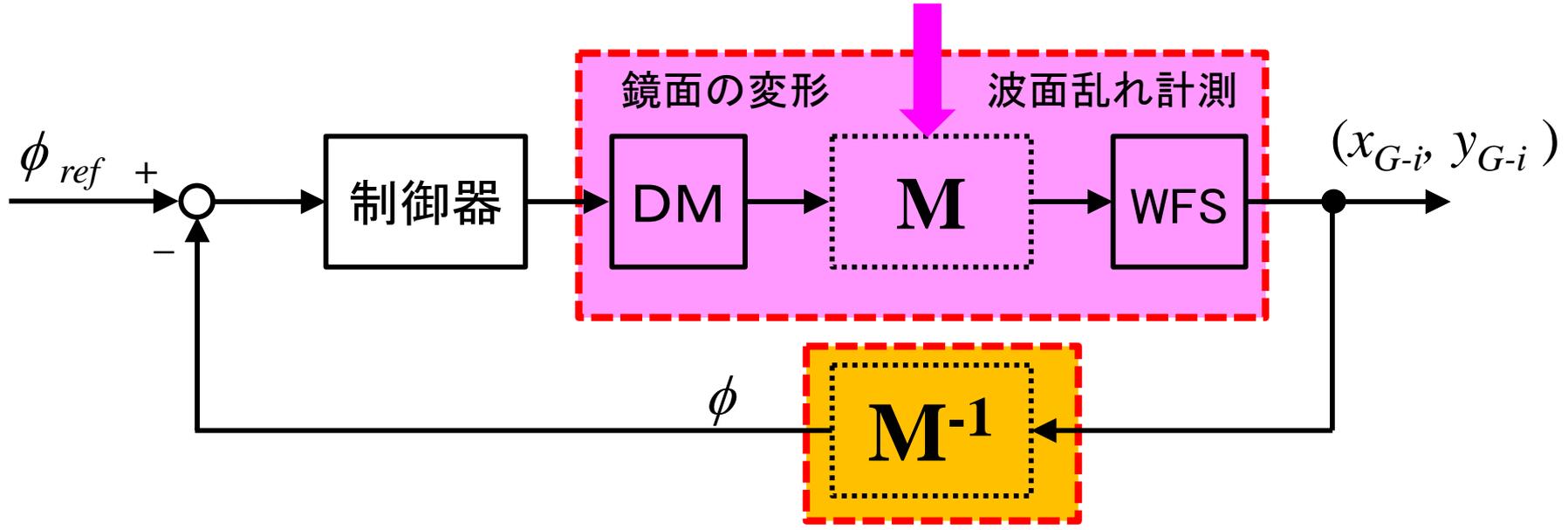


【Guyon (2005)】

4. 現在開発中の補償光学システム

■ 相関が強い系なので作用行列Mでシステムモデル化

波面が乱れた観測光



M⁻¹ : 492 × 984

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{inv-11} & M_{inv-12} & \cdots & M_{inv-1,2m} \\ M_{inv-21} & M_{inv-22} & \cdots & M_{inv-2,2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ M_{inv-n,1} & M_{inv-n,2} & \cdots & M_{inv-n,2m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \\ y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix}$$

疑似逆行列

M : 984 × 492

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \\ y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & \cdots & M_{1n} \\ M_{21} & M_{22} & \cdots & M_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ M_{m1} & M_{m2} & \cdots & M_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix}$$

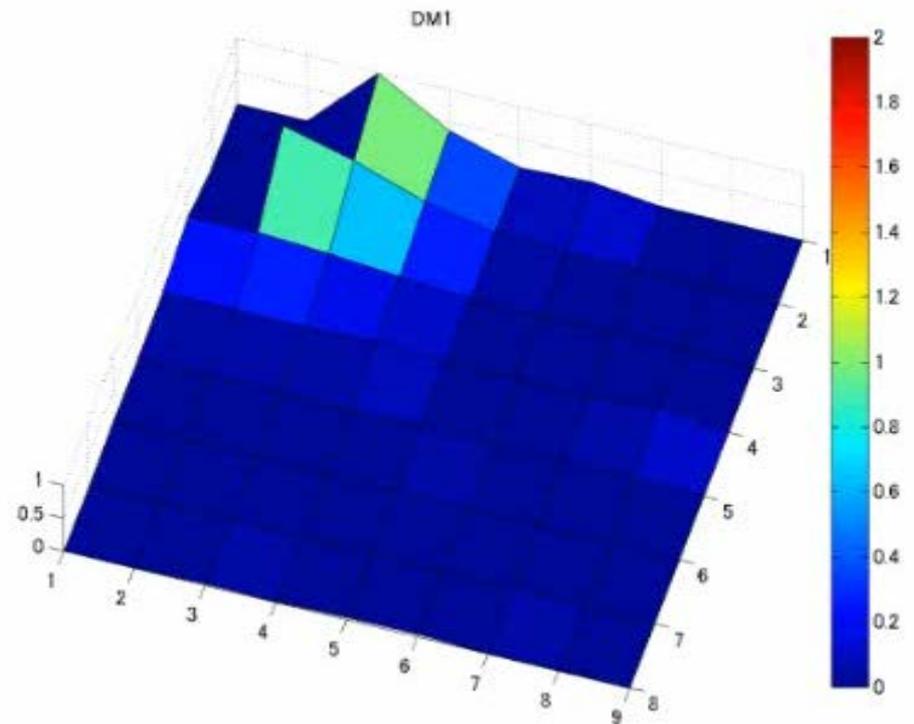
非正則な写像

4. 現在開発中の補償光学システム

■ 相関が強い系なので作用行列Mでシステムモデル化

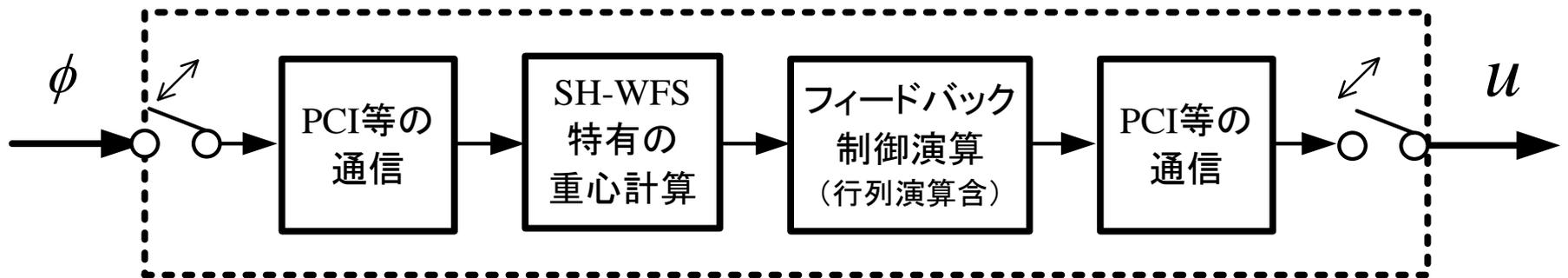
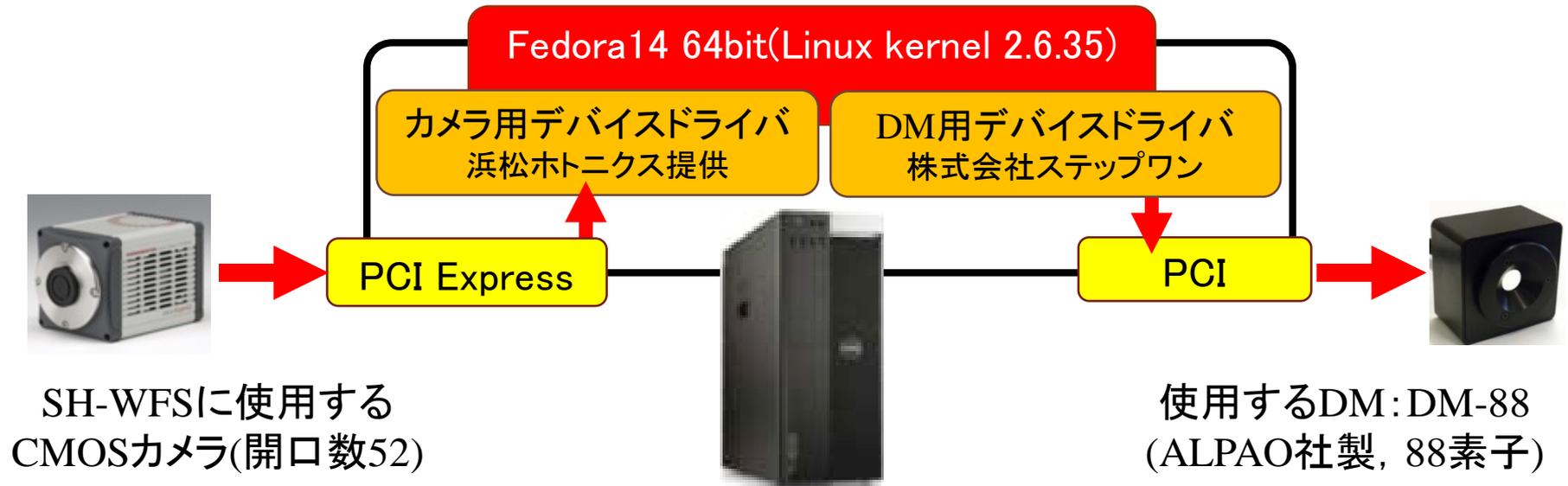
DMの変位にともなうWFSのセンシング

DMの変位(一つずつ一定時間変位)

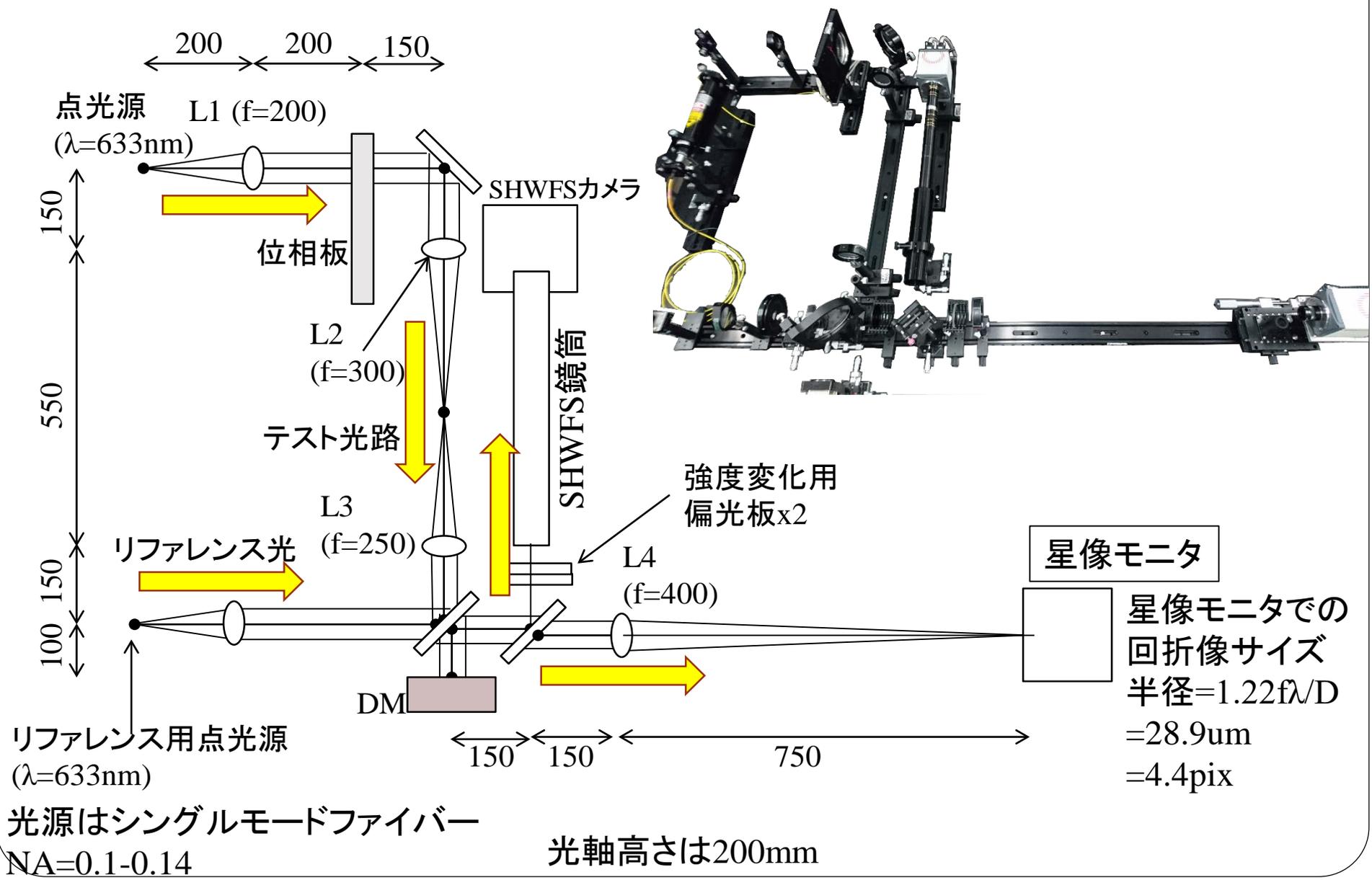


4. 現在開発中の補償光学システム

■ Wooferシステムの構成



実験環境



4. 現在開発中の補償光学システム

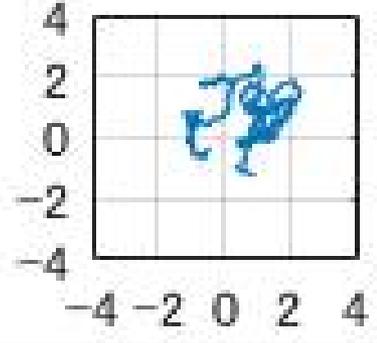
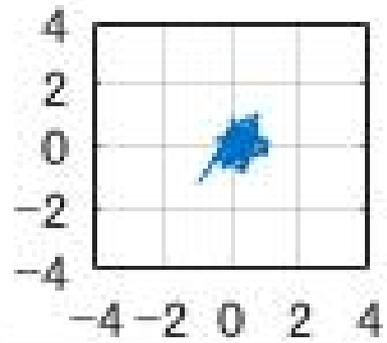
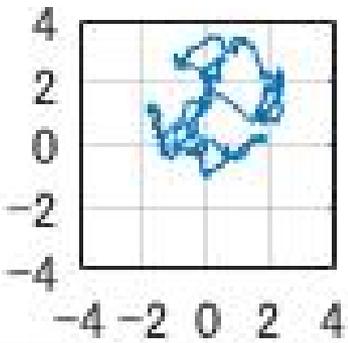
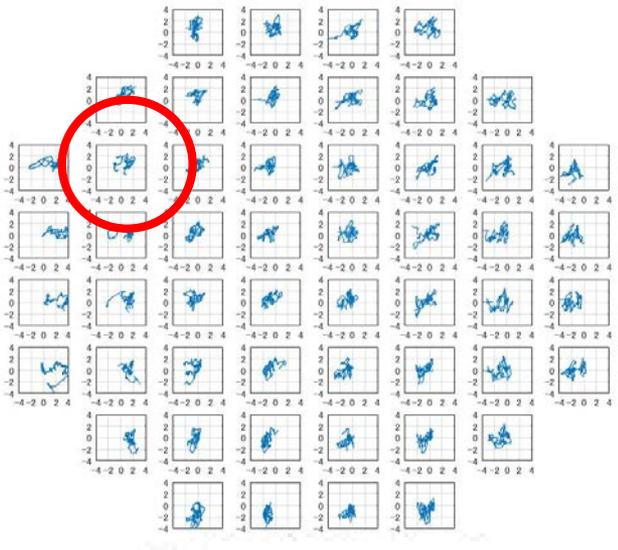
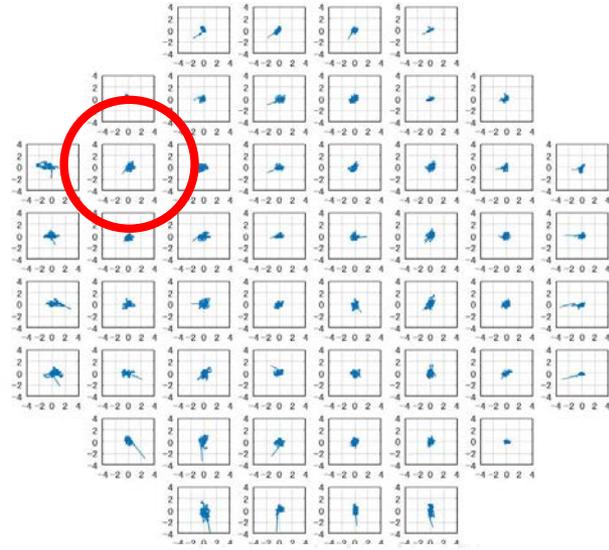
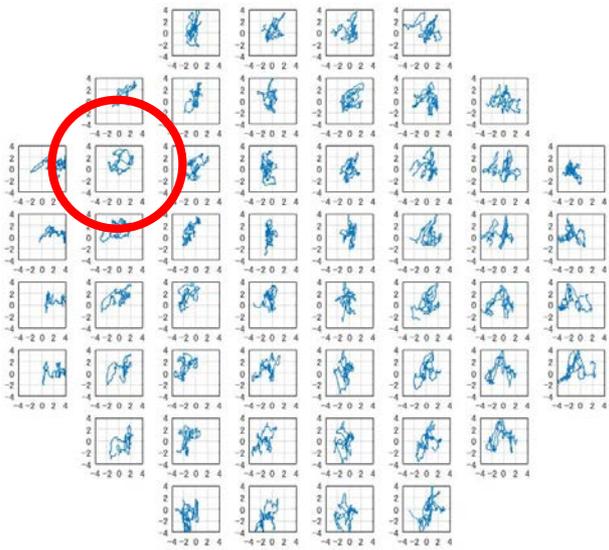
■ Wooferシステムの補償の効果

PIDゲインのうち
Iゲインを省略

風速10m/sの大気速度
AO無し ($T_s = 1.25ms$)

風速10m/sの大気速度
AO有 ($T_s = 1.25ms$)

風速10m/sの大気速度
AO有 ($T_s = 1.25ms$)



4. 現在開発中の補償光学システム

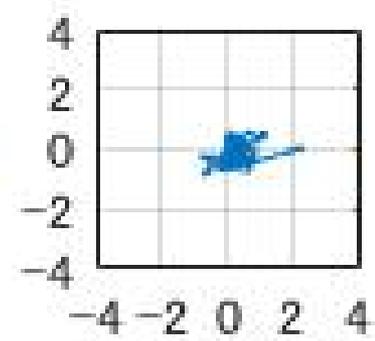
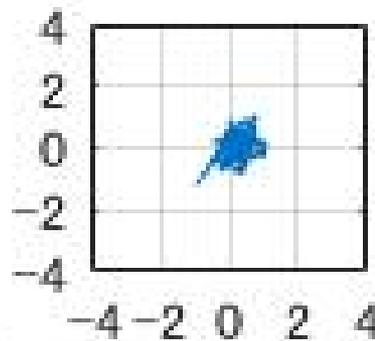
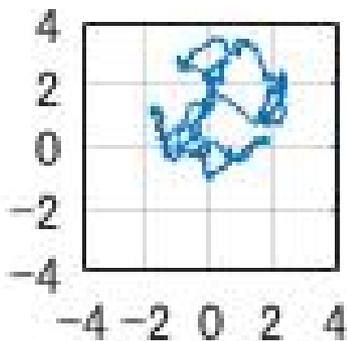
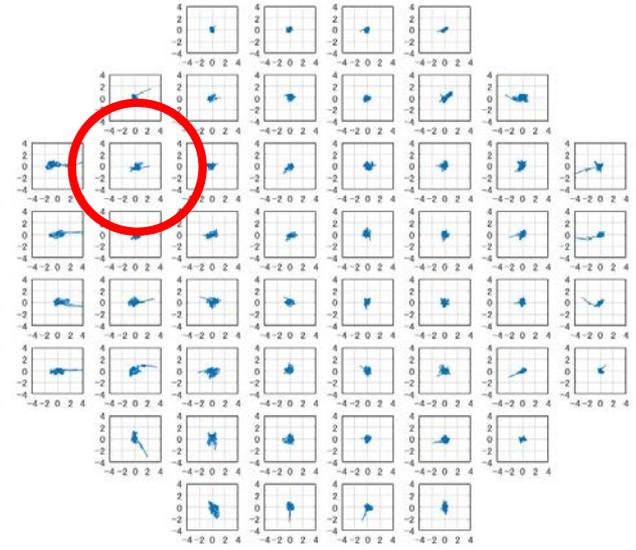
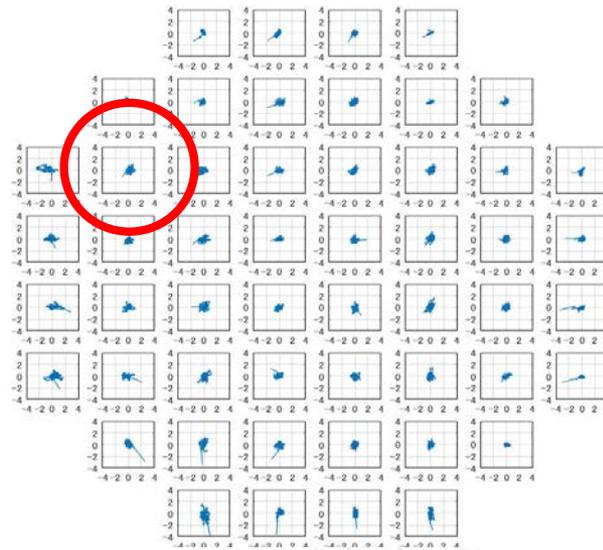
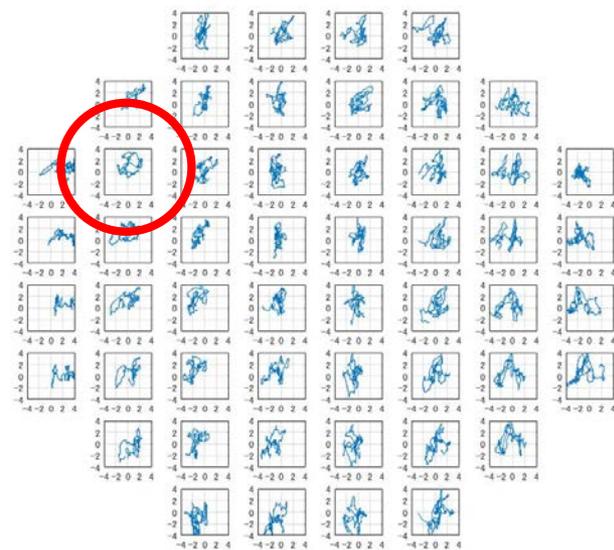
■ Wooferシステムの補償の効果

風速10m/sの大気速度
AO無し ($T_s = 1.25ms$)

風速10m/sの大気速度
AO有 ($T_s = 1.25ms$)

サンプリング周期が2倍
(制御速度が半分)

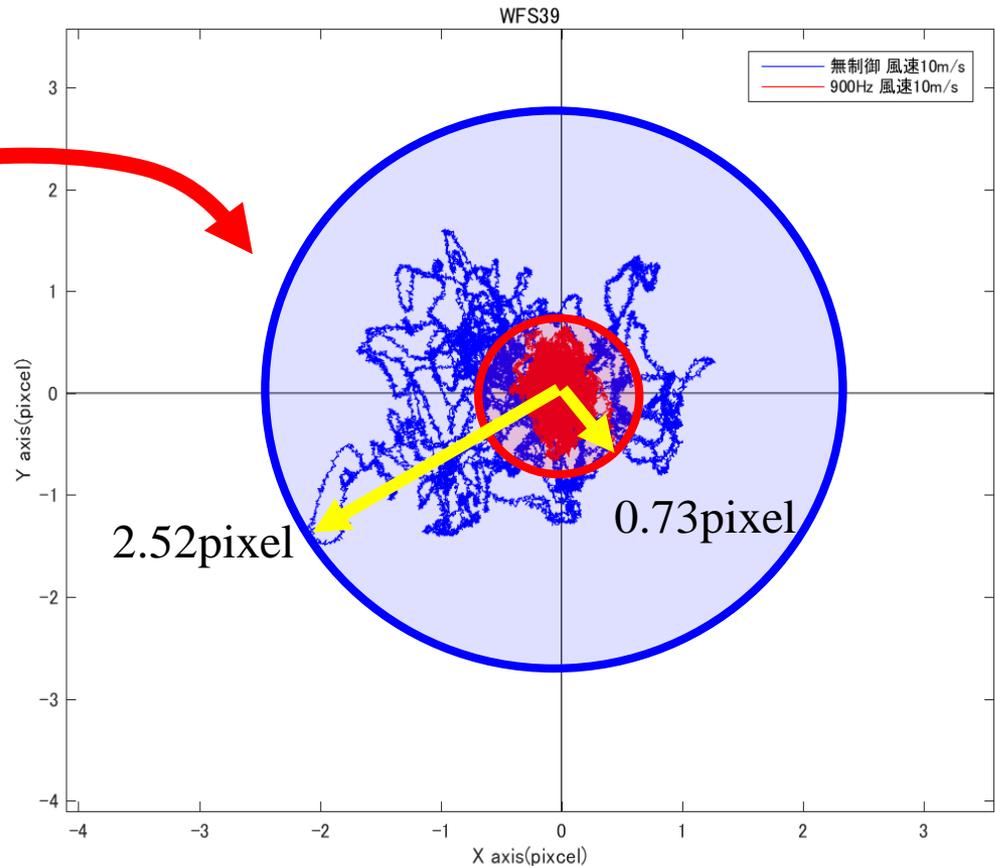
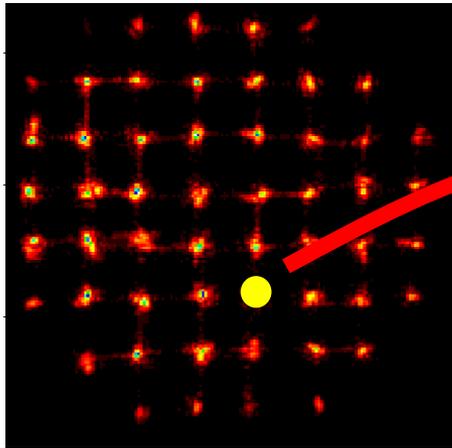
風速10m/sの大気速度
AO有 ($T_s = 2.5ms$)



4. 現在開発中の補償光学システム

■ Wooferシステムの補償の効果

補償光学による波面補償の結果

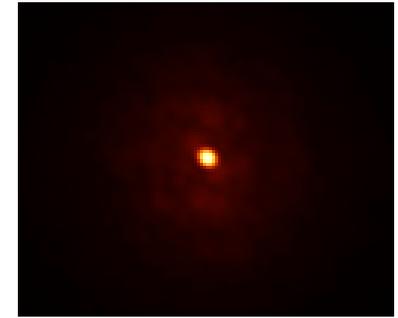
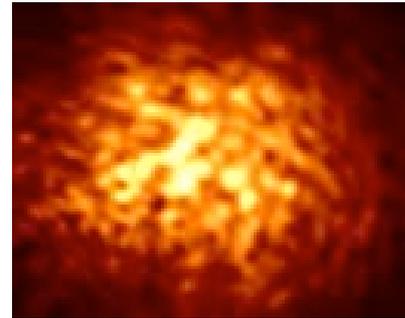
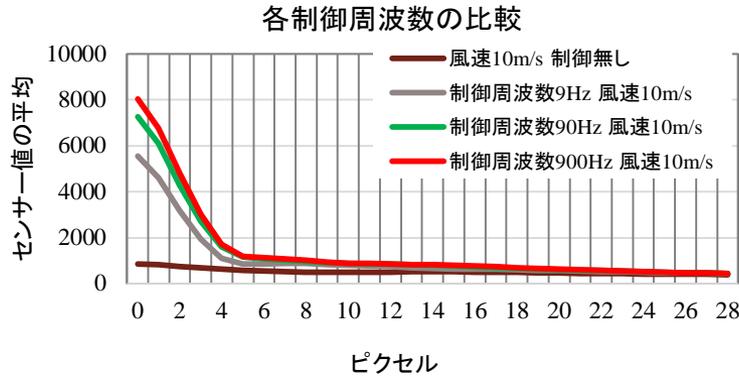


$$\frac{r_{peak-controlled}}{r_{peak-not-controlled}} = \frac{0.73}{2.52} = 28.968\%$$

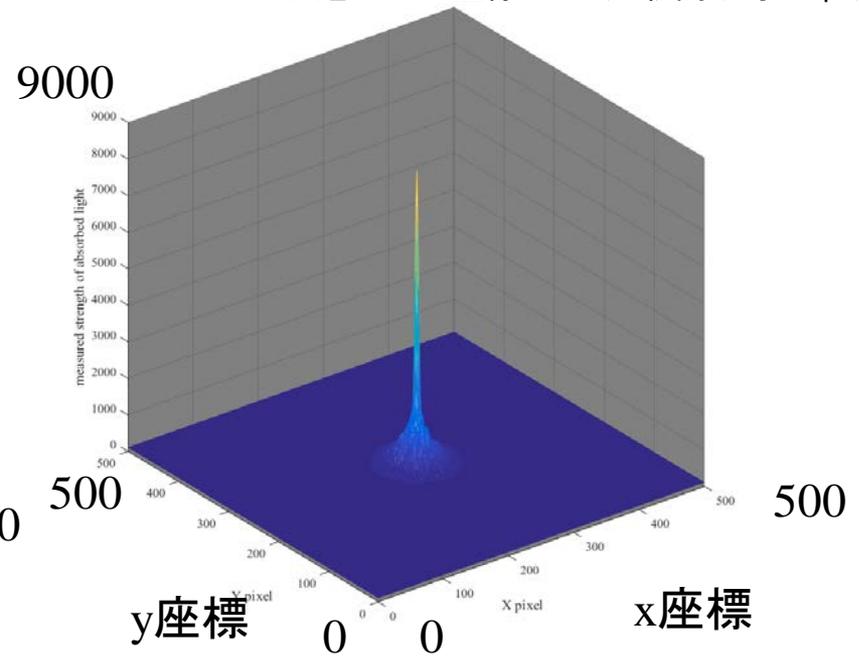
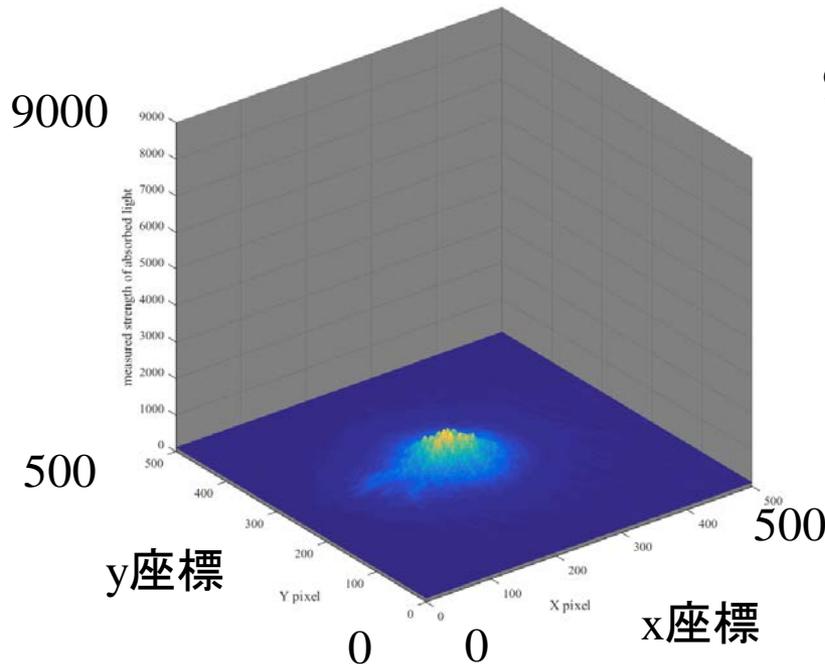
$$\frac{r_{rms-controlled}}{r_{rms-not-controlled}} = \frac{0.23}{0.82} = 28.048\%$$

4. 現在開発中の補償光学システム

■ 現在の実験システム (Woofer システム) の例

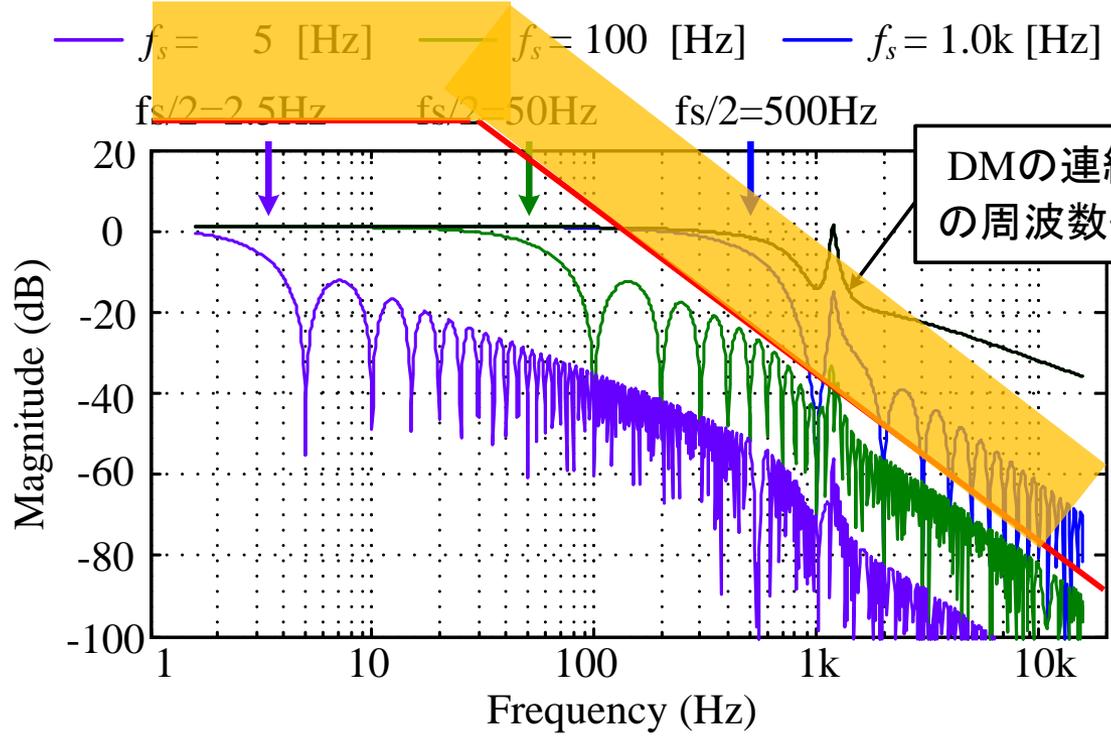
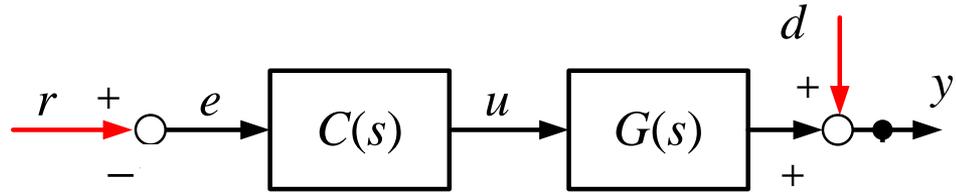


風速 10m/s 制御無し 風速 10m/s 制御周波数900Hz
 $\lambda = 633\text{nm}$ 風速10m/s 星像モニタ(16秒間平均 26fps)



4. 現在開発中の補償光学システム

■ **設計仕様**: フィードバックゲインはどこまで必要？



※ 比例要素 (比例ゲイン) では対処できない世界

※ 積分のみが効果がある世界

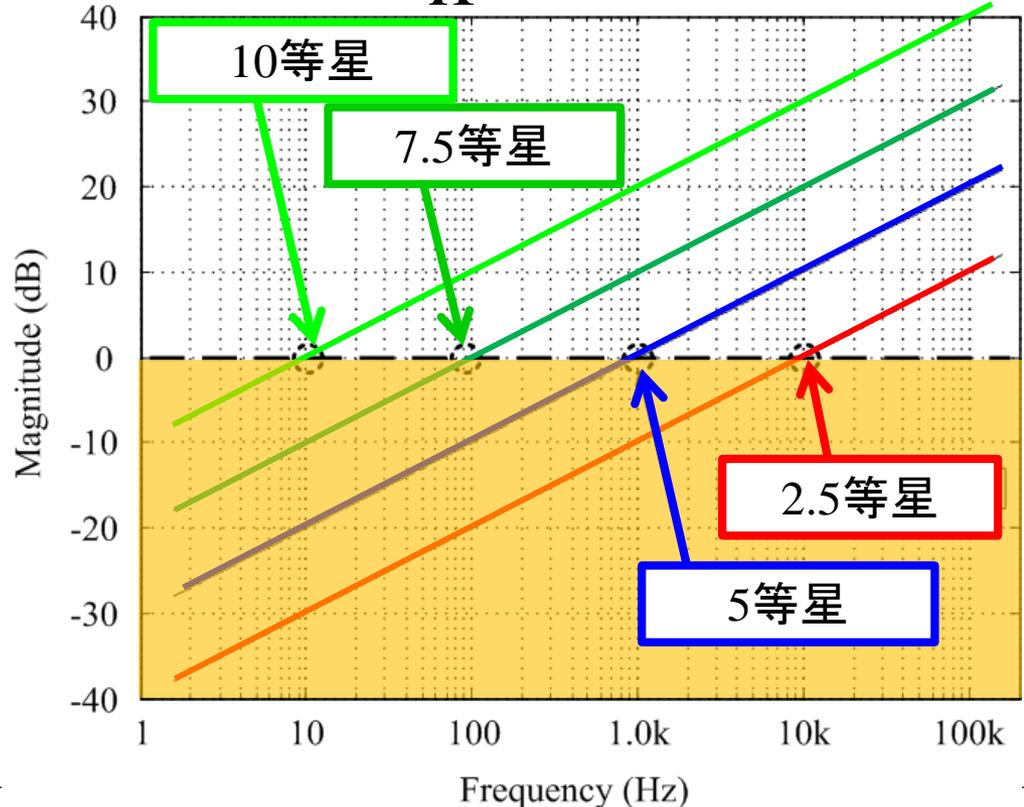
1.0 kHzまで帯域が欲しい
→ サンプルングは5kHz~

4. 現在開発中の補償光学システム

■ WFSセンサに使用するカメラの感度限界

- ・ 浜松ホトニクス社製 ORCA-Flash4.0 V2, CMOS

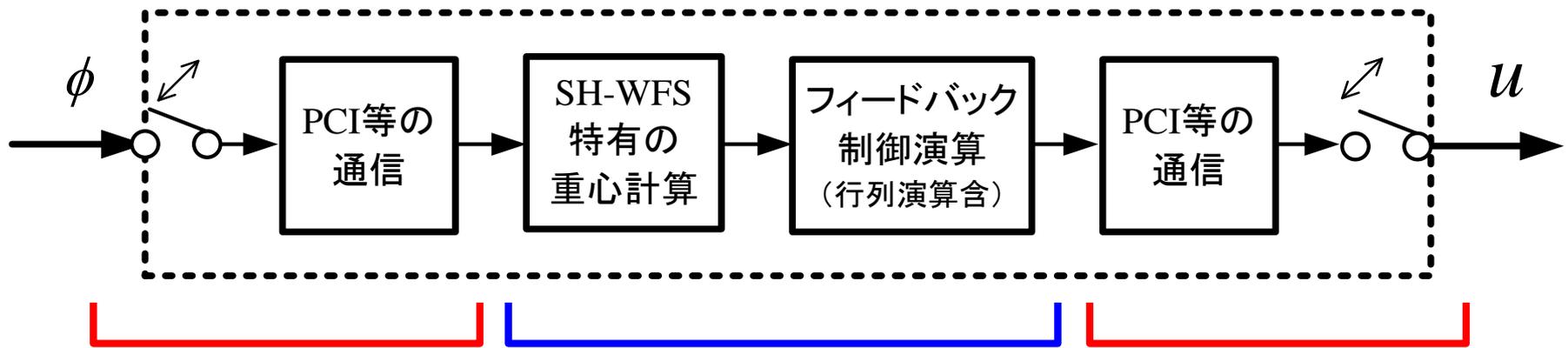
$$0 \geq 20 \log_{10} \frac{\lambda}{K} + 10 \log_{10} F_s \quad [dB]$$



@京大3.8m
岡山観測所

4. 現在開発中の補償光学システム

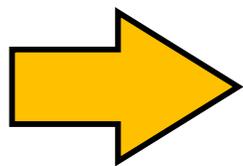
■ 制御装置の高性能化をどのように実現するか？



★ PCI/ PCIeによるデータ通信のボトルネックを解消する

★ 強力な演算リソースによる大量の演算を実行

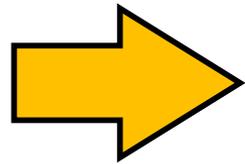
★ 複雑だが効果が大きい制御アルゴリズムの実装



専用の演算回路 (ASIC)が欲しくなる

4. 現在開発中の補償光学システム

■ 制御装置の高性能化をどのように実現するか？



専用の演算回路(ASIC)が欲しくなる

FPGA (Field Programmable Gate Array) を
使用した制御器を提案



- ・設計者が内部構成を設計できる集積回路
- ・プログラマブルなデジタル論理回路IC
- ・HDL (Hardware Description language) で設計
- ・高いScalabilityを有するので規模の大小に柔軟に対応可能

4. 現在開発中の補償光学システム

■ Tweeterシステムの開発

Woofers

低速、粗い波面制御

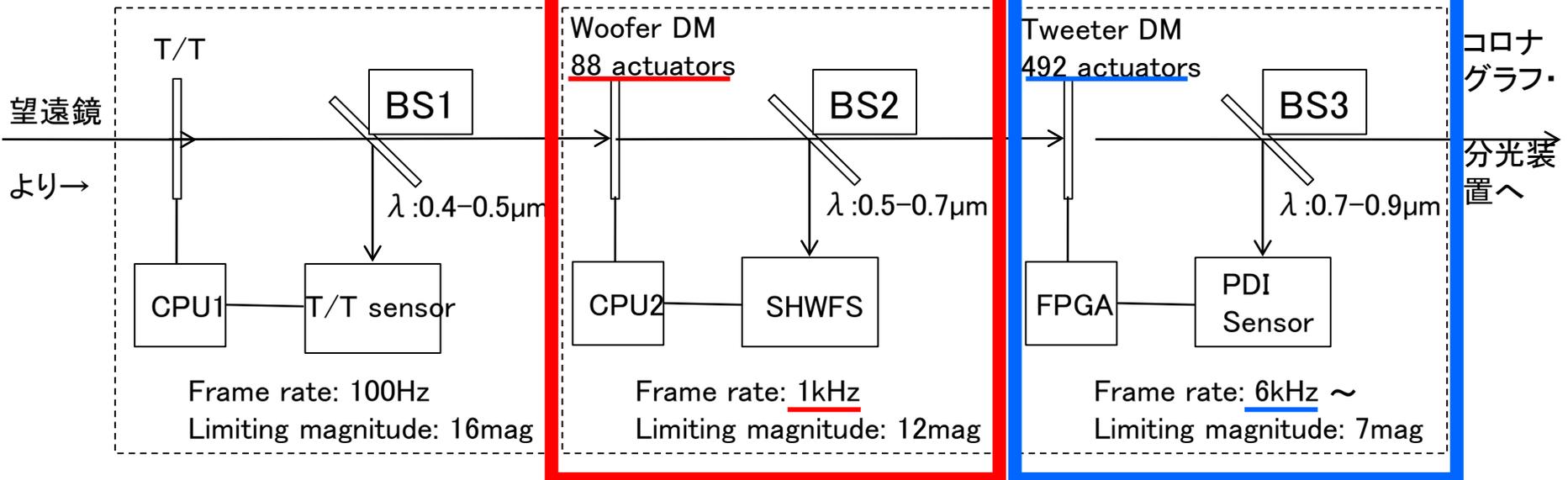
Tweeters

高速、高精度波面制御

Tip/Tilt部 視野内で星像を安定させる

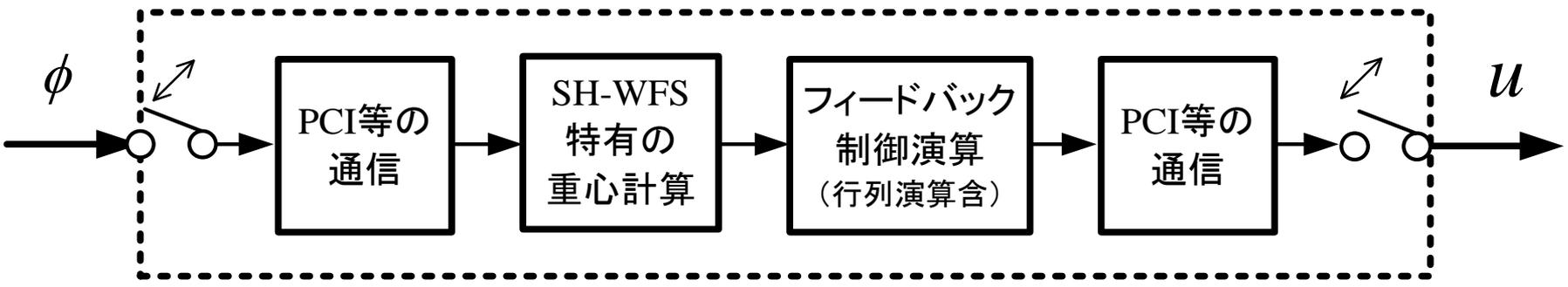
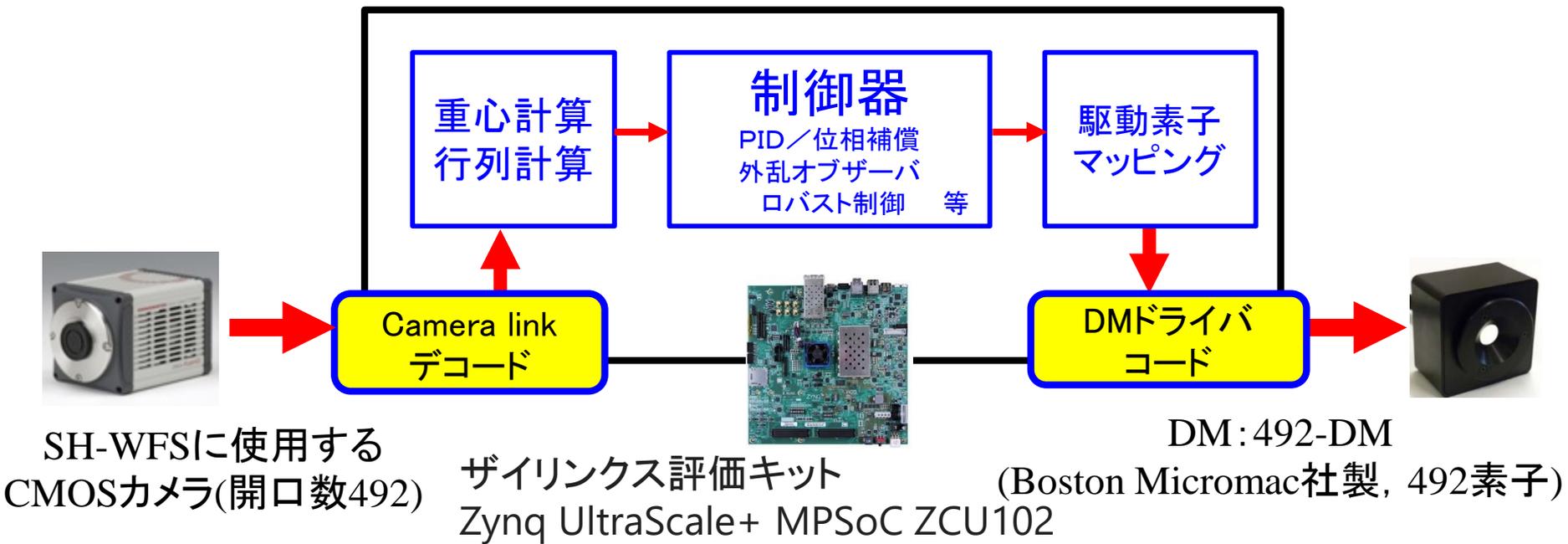
Woofers部: $\lambda / 4$ 程度まで波面補償する

Tweeters部: $\lambda / 20$ 程度まで波面補償する



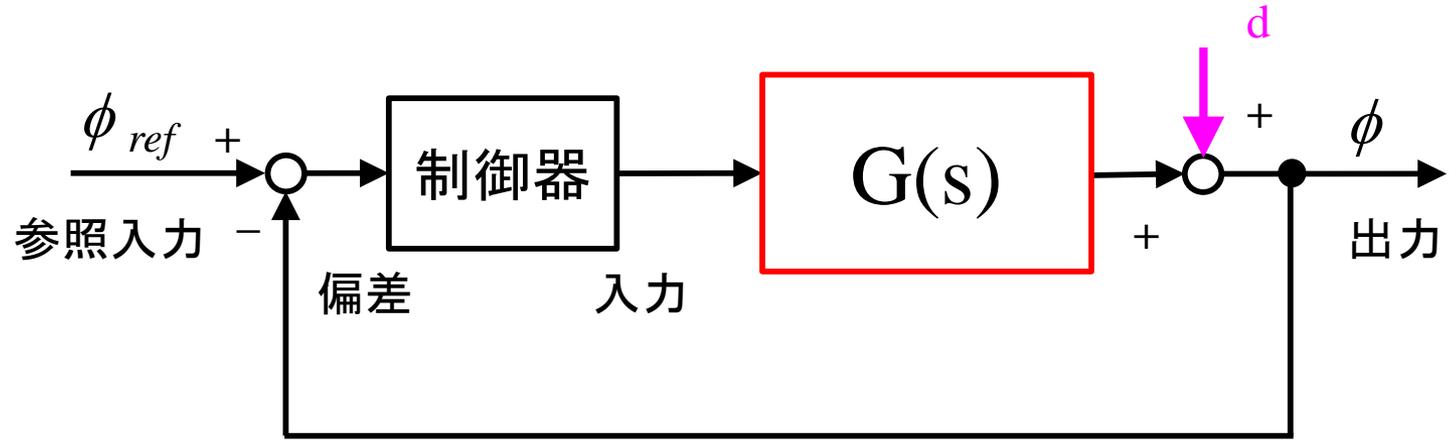
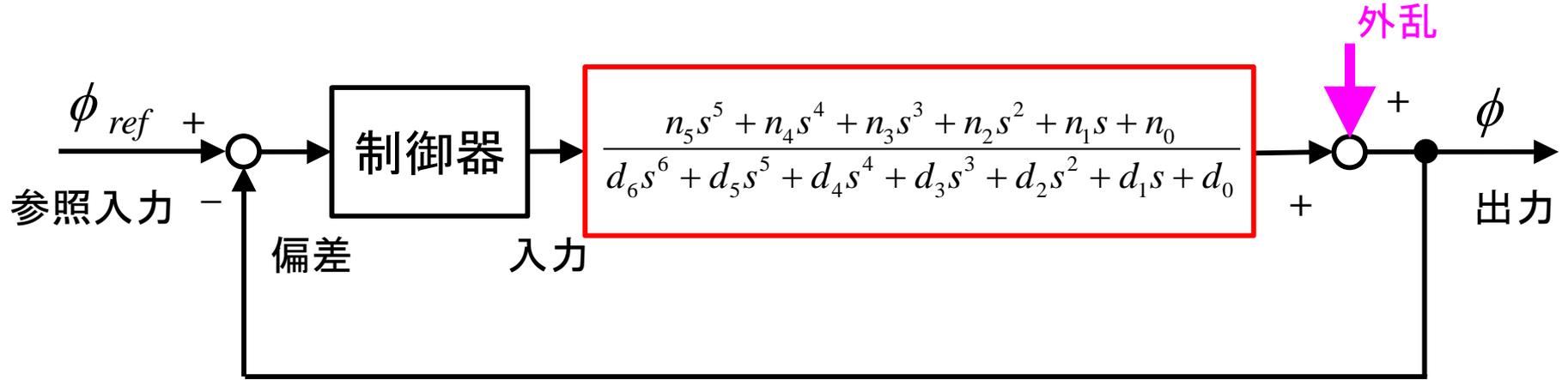
4. 現在開発中の補償光学システム

■FPGAを採用した専用回路を使用する



4. 現在開発中の補償光学システム

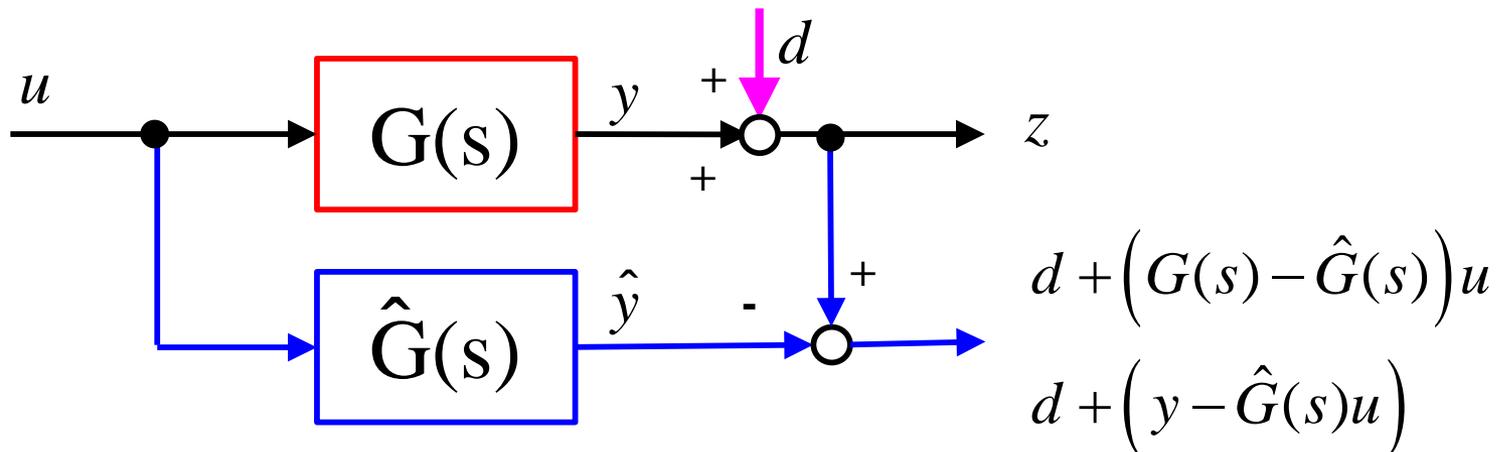
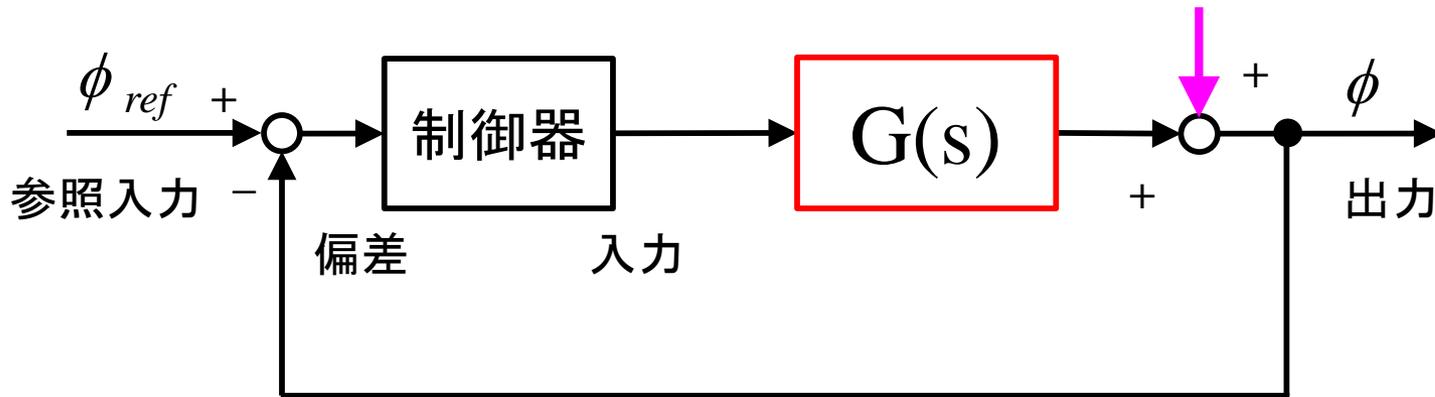
■強力な演算リソースによるオブザーバ演算を実行



4. 現在開発中の補償光学システム

■ 強力な演算リソースによるオブザーバ演算を実行

波面乱れをオブザーバで推定 (強力な演算リソースで)



4. 現在開発中の補償光学システム

■強力な演算リソースによる大量の演算を実行

その結果...

$$z = \frac{CG}{1+CG} r + \frac{1}{1+CG} d$$

$$z = \frac{CG}{1+CG} r + (1-GK) d$$

パラメータKを調整し、強引に外乱の影響をキャンセル

5. おわりに

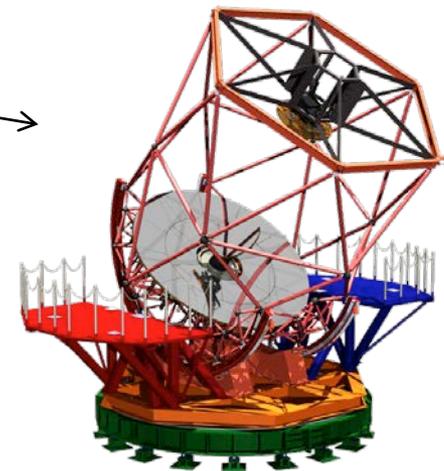
- ・制御工学の実装の観点で概略をお話ししました
- ・どういう方針で設計するのが良いかはモノ次第
- ・これからは制御器に使用するハードウェアの性能で理論の実装量が大きく変わるでしょう



SEICA



SEIT





ロボットと観測装置の制御技術あれこれ

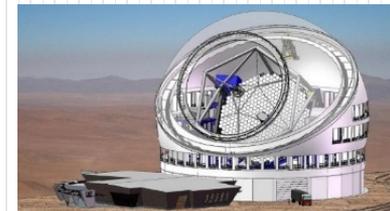
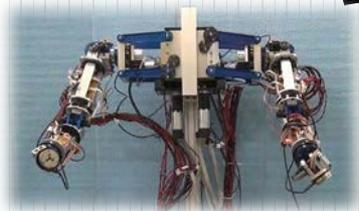
○入部 正継(大阪電気通信大学)

藤田 勝, 中村 祐一(大阪電気通信大学)

松尾 太郎(大阪大学)

山本広大, 森本悠介, 木野 勝, 栗田 光樹夫(京都大学)

衣笠 哲也(岡山理科大学)



告知

■工学領域とのコラボレーション活動

計測自動制御学会

システムインテグレーション(SI)部門



- ・2012年：天体観測に関する技術調査研究委員会設立
- ・2016年：天体観測技術部会に昇格
- ・SI部門講演会でOSを毎年実施
- ・2017年は他部会OSに殴り込み
日時：2017年12月20-22日
場所：仙台

