



ExAO進捗 (Woofers system AO)

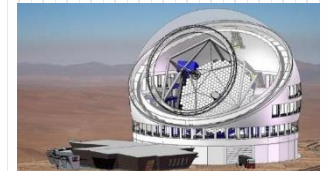
○藤田 勝(大阪電気通信大学)

入部 正継, 中村 祐一(大阪電気通信大学)

山本 広大, 木野 勝(京都大学)

森本悠介, 栗田 光樹夫(京都大学)

松尾 太郎(大阪大学), 衣笠 哲也(岡山理科大学)

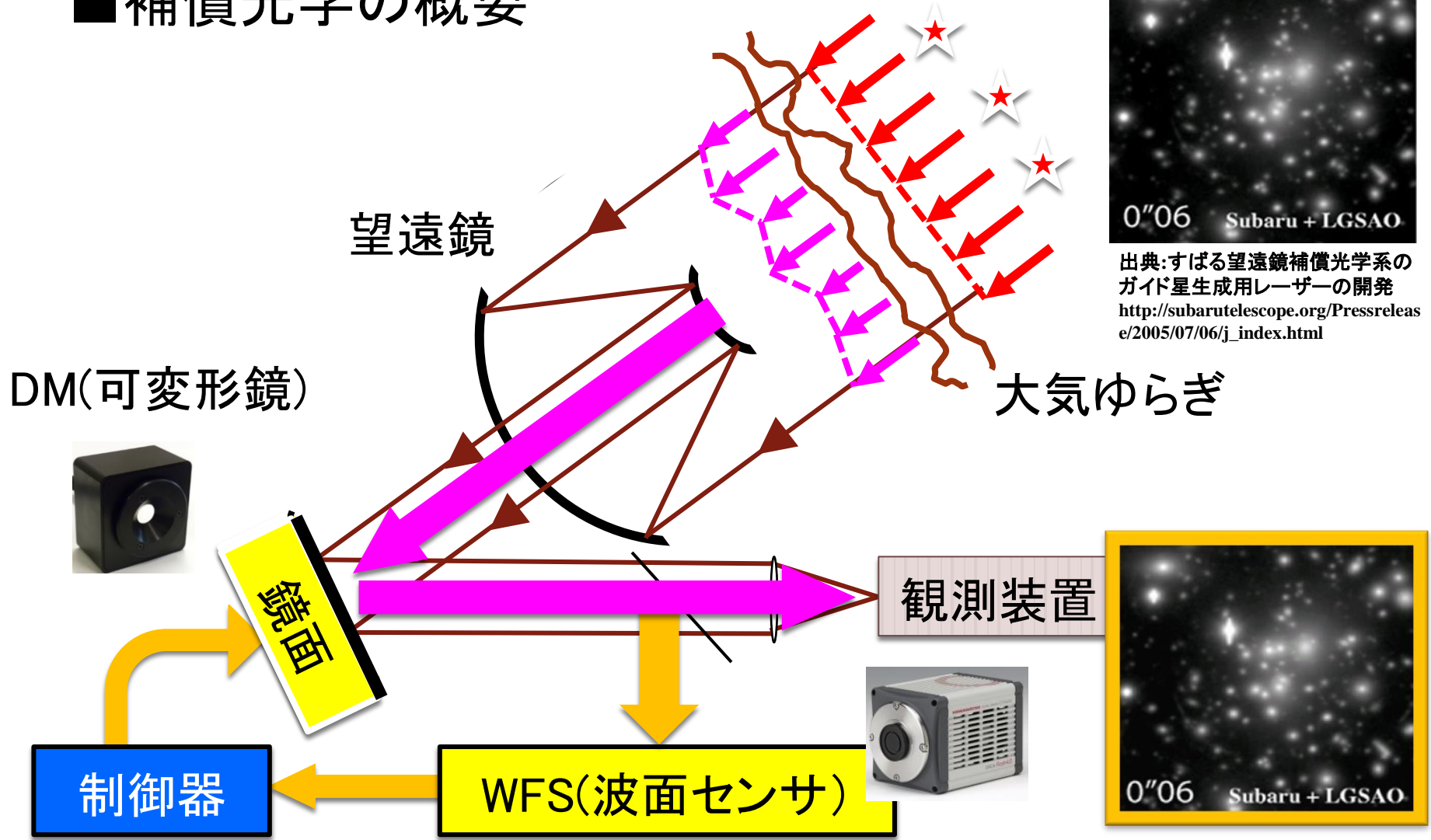


アジェンダ

1. はじめに
2. 補償光学の概要(一般論)
3. 制御システムの設計(Woofer system)
4. 実験例と今後の高性能化(Tweeter system)
5. まとめ

2. 補償光学の概要(一般論)

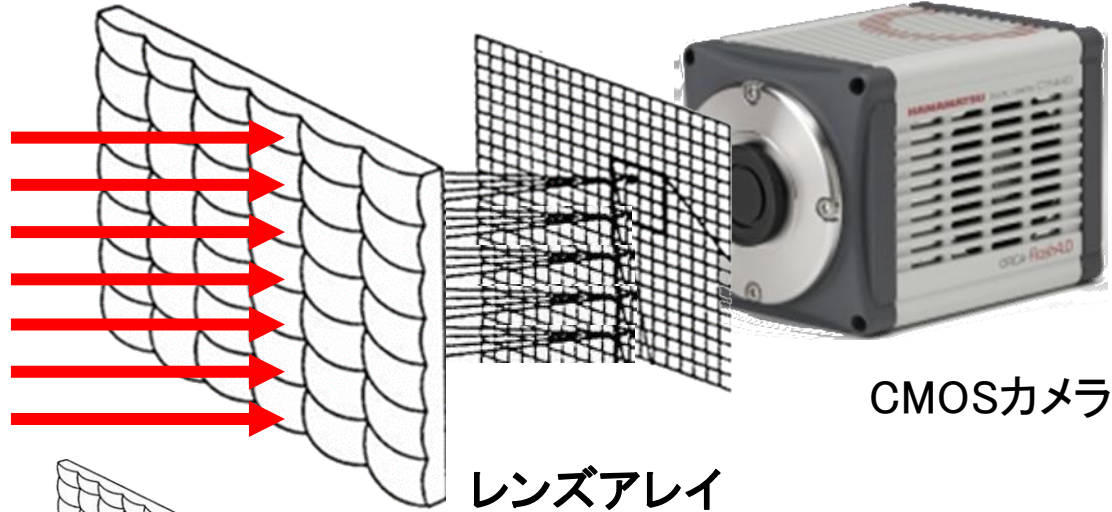
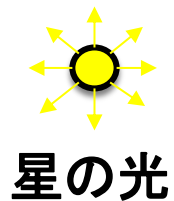
■ 補償光学の概要



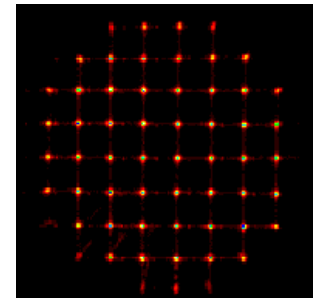
2. 補償光学の概要(一般論)

■ 波面センサ(WFS : Wave Front Sensr)

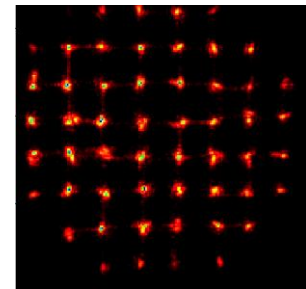
- ・波面センサ(WFS)の空間分解能をはレンズアレイとカメラ解像度で決まる
- ・波面センサ(WFS)の時間分解能は観測光の明るさに依存



結像情報



大気乱流が無い時



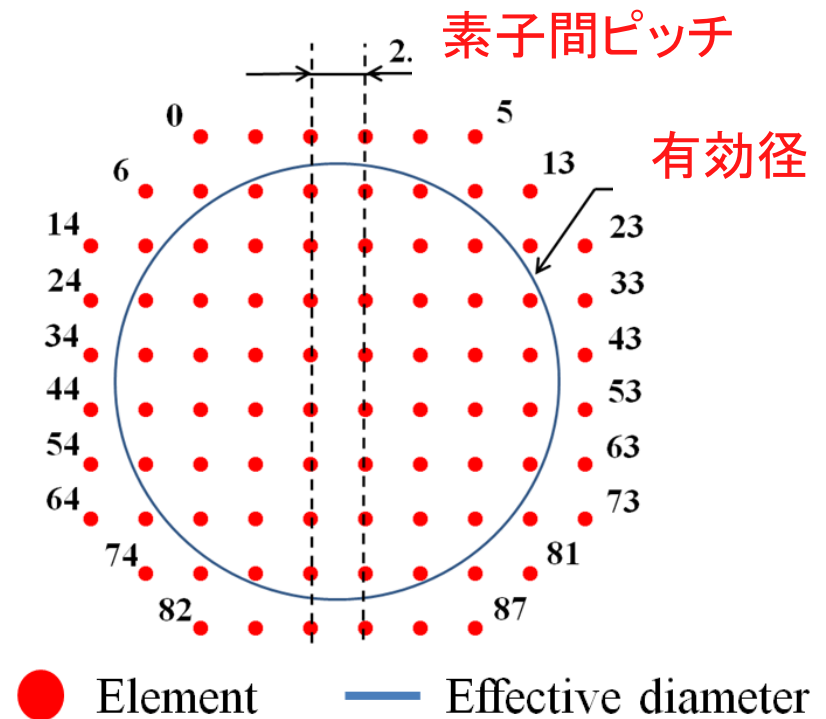
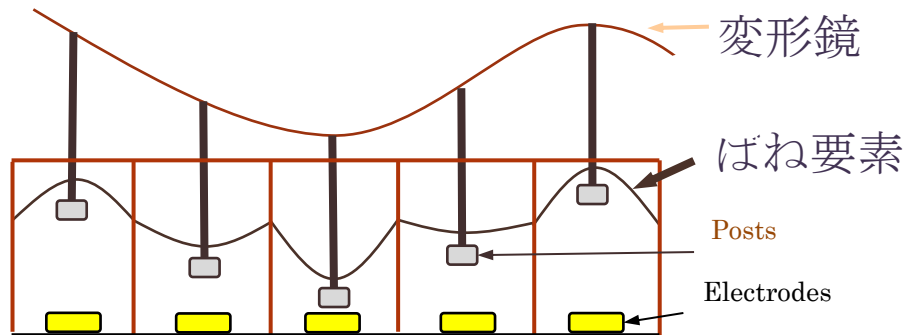
大気乱流を通った時

・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

2. 補償光学の概要(一般論)

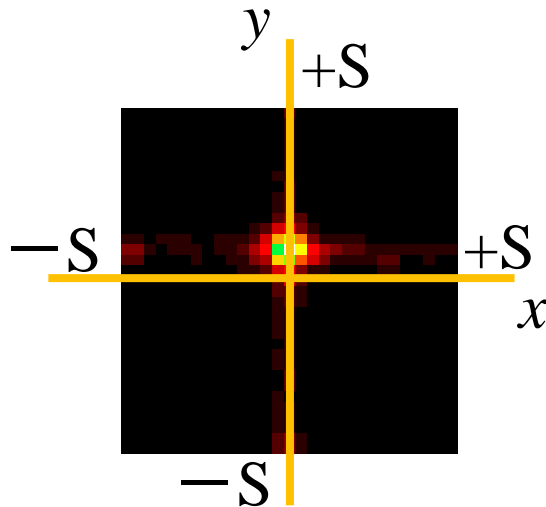
■ 可変形鏡(DM: Deformable Mirror)

- ・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



2. 補償光学の概要(一般論)

■ 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)

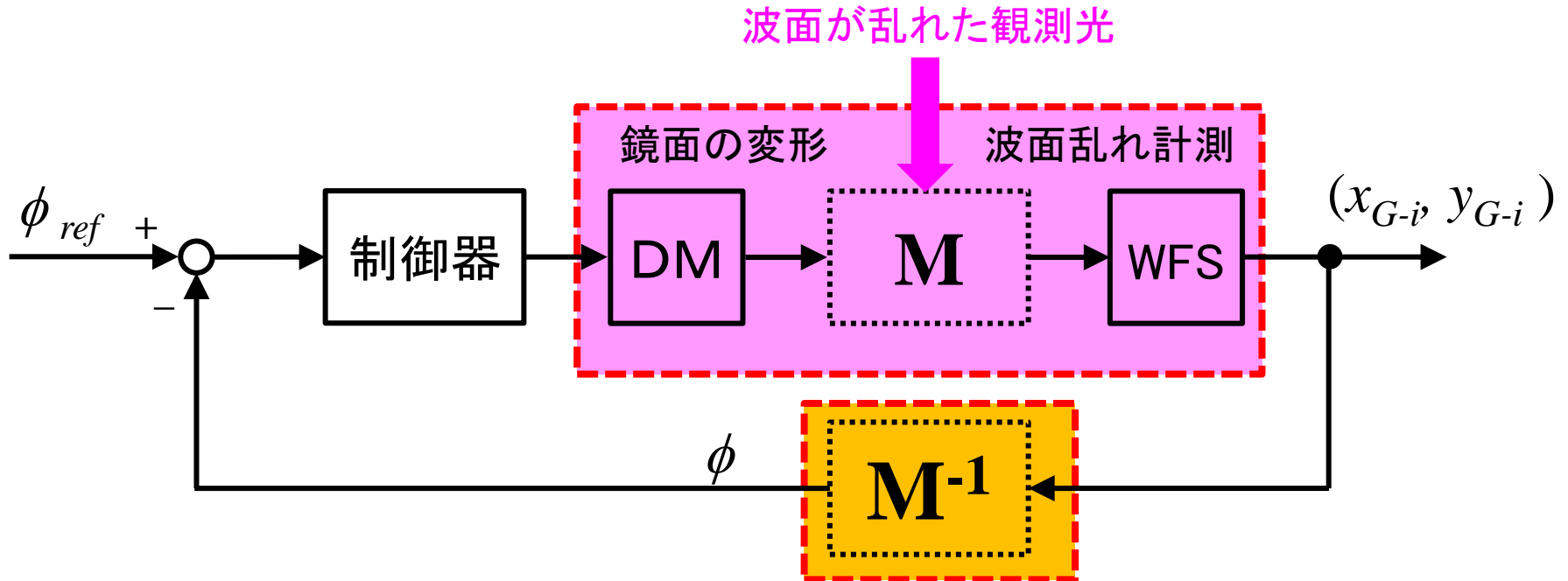
dark : 黒色の明るさレベル

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

2. 補償光学の概要(一般論)

■ 制御系としての補償光学



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

疑似逆行列

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

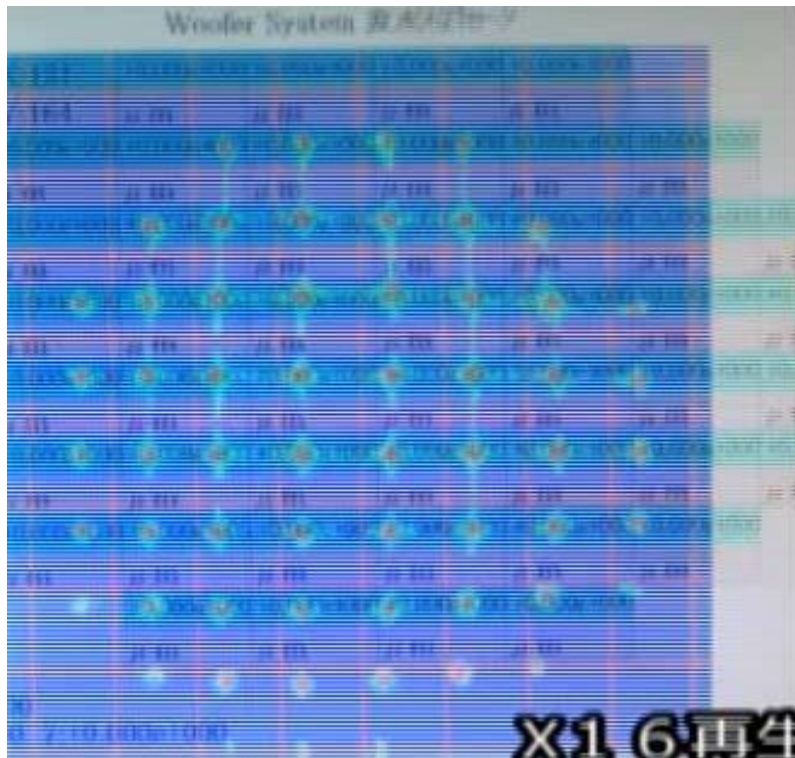
非正則な写像

2. 補償光学の概要(一般論)

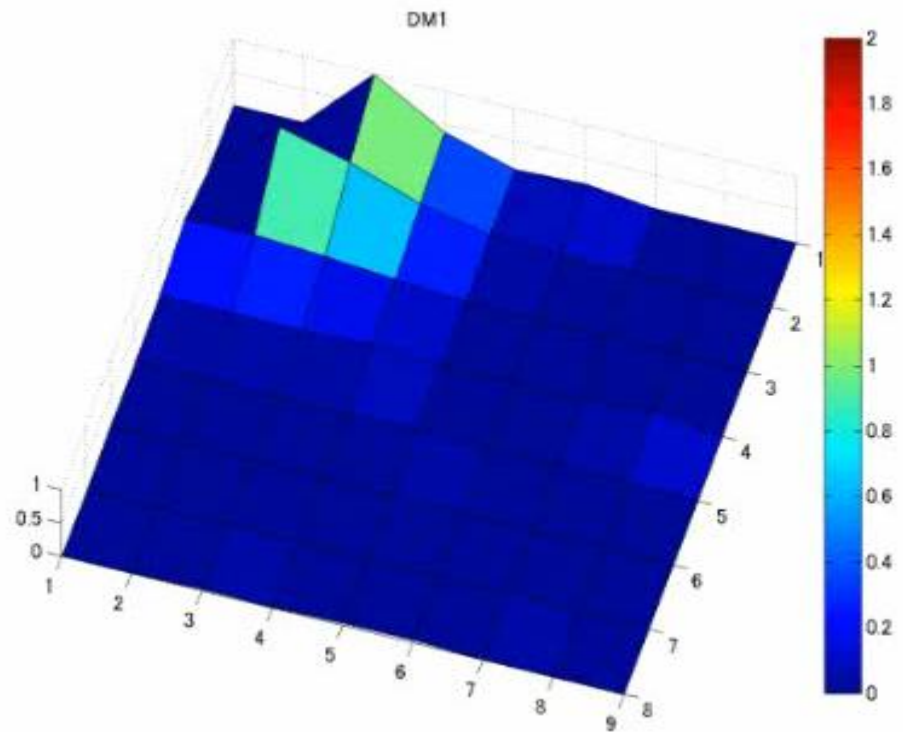
■ 制御系としての補償光学

DMとWFSの間の相関を測定し多項式近似する

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)



3. 制御システムの設計 (Woofers system)

■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

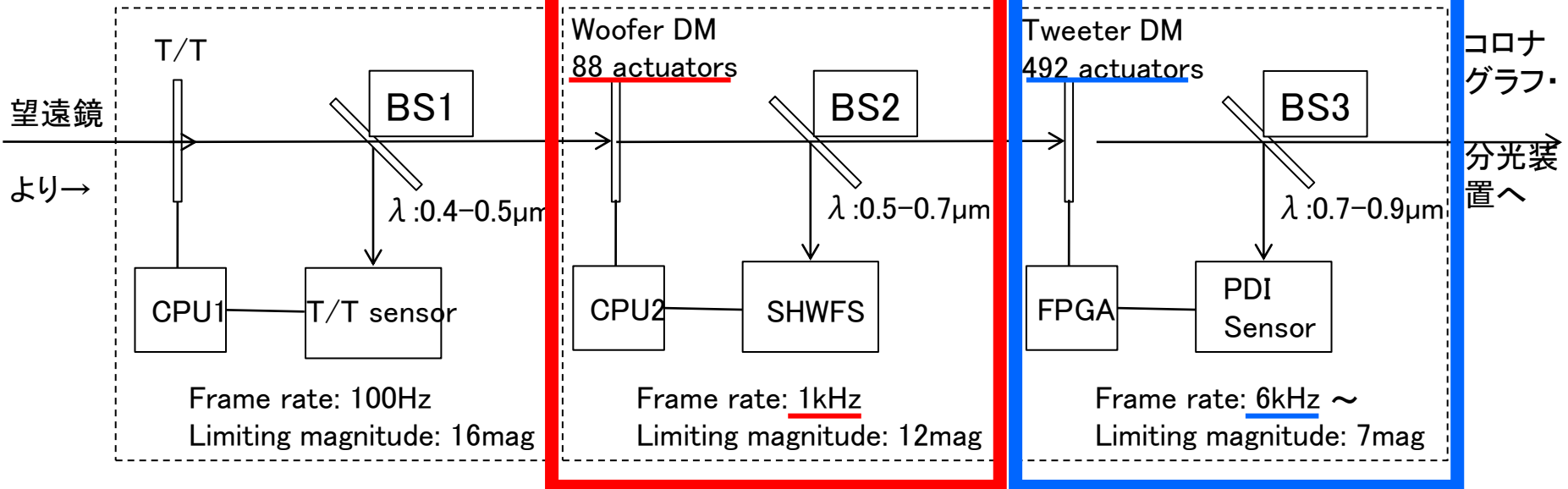
Tweeters

高速、高精度波面制御

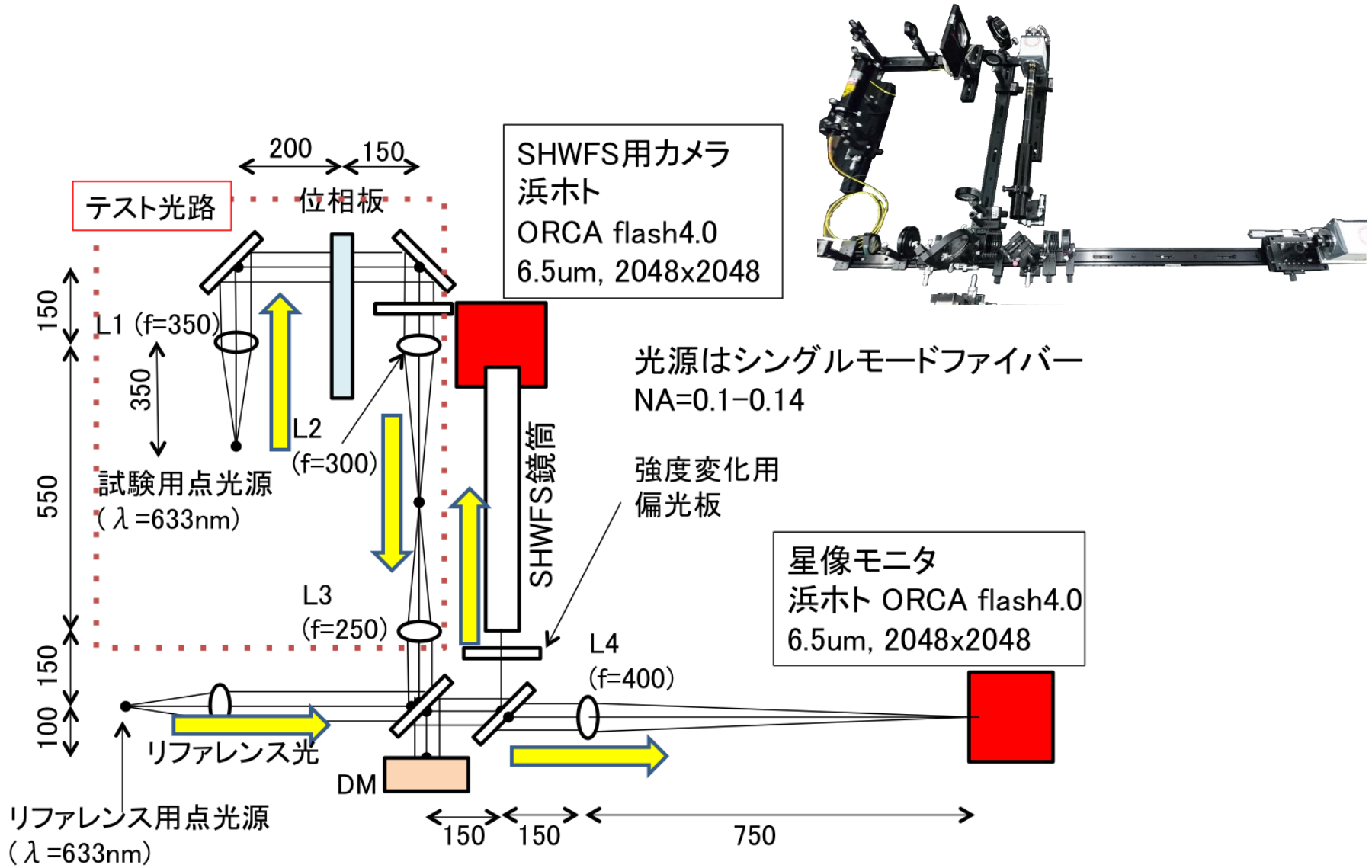
Tip/Tilt部 視野内で星像を安定させる

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

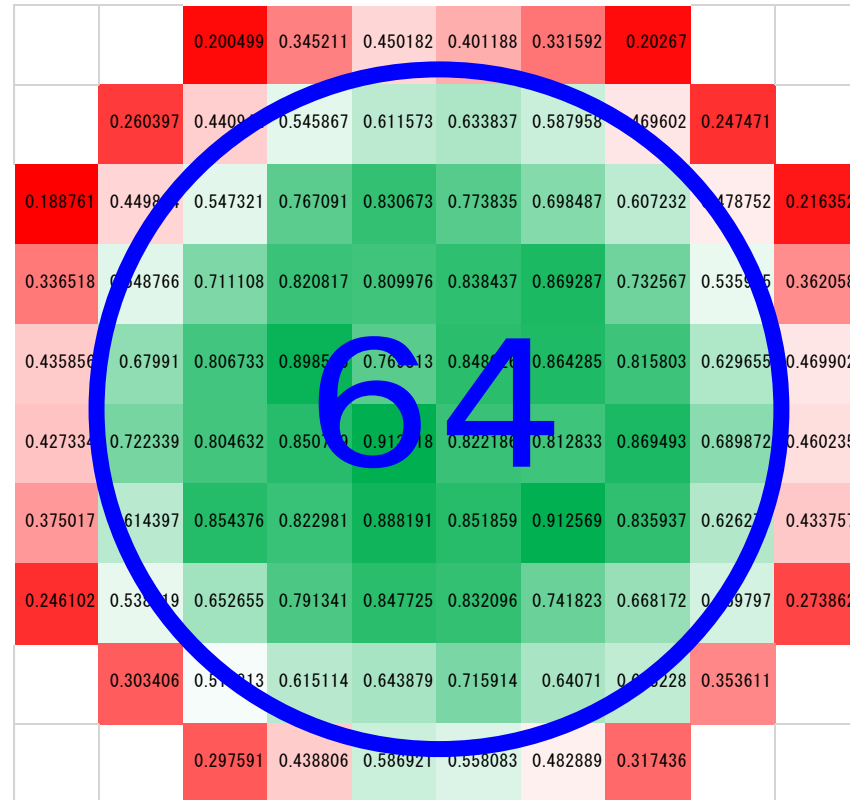


4. 実験例と今後の高性能化 (Tweeter system)



4. 実験例と今後の高性能化 (Tweeter system)

■ Woofer システムでの実験結果 (年会発表内容)



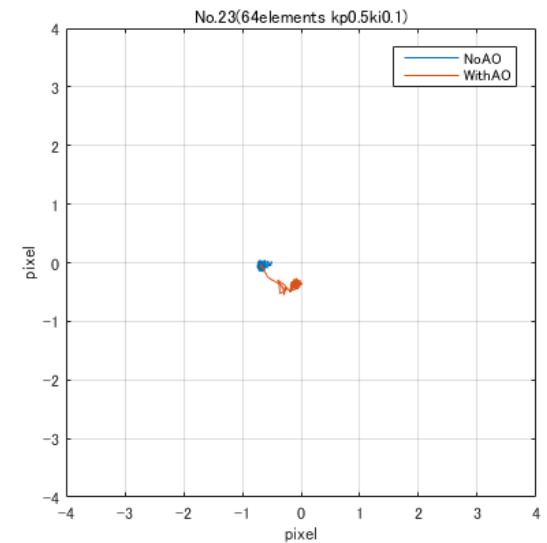
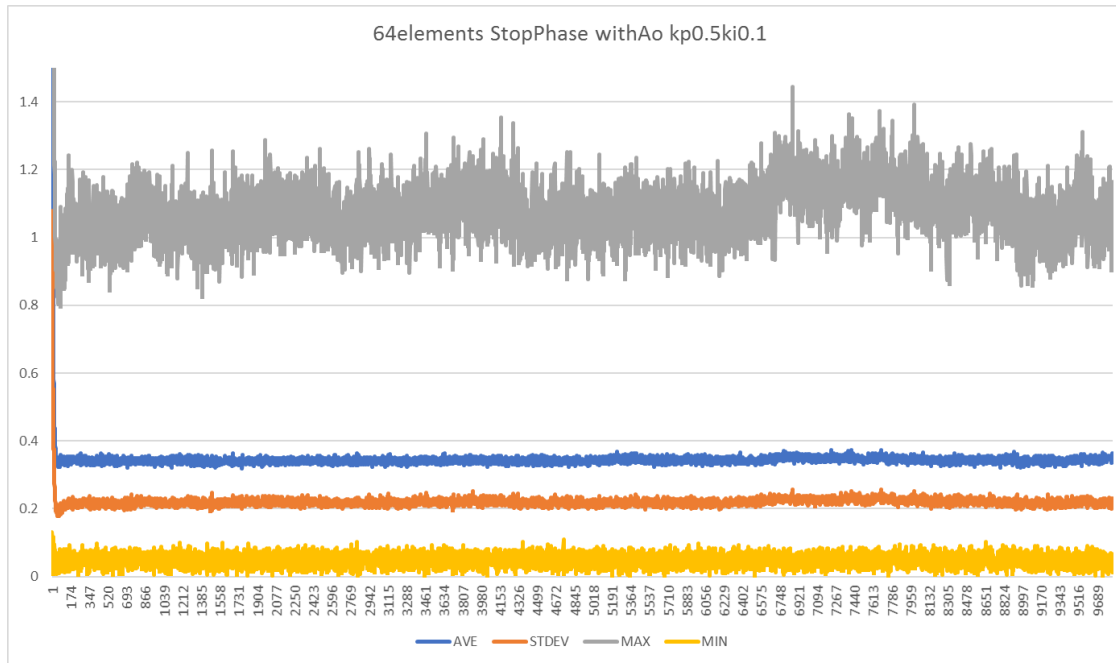
DMに入る観測光の有効な領域の計測結果

4. 実験例と今後の高性能化 (Tweeter system)

■ Woofer システムでの実験結果 (年会発表内容)

大気位相板を挿入, 位相板は動作せず (無風状態)

全64素子の標準偏差平均は0.021[pixel], Peak-Peakの平均は1.079-0.063[pixel]

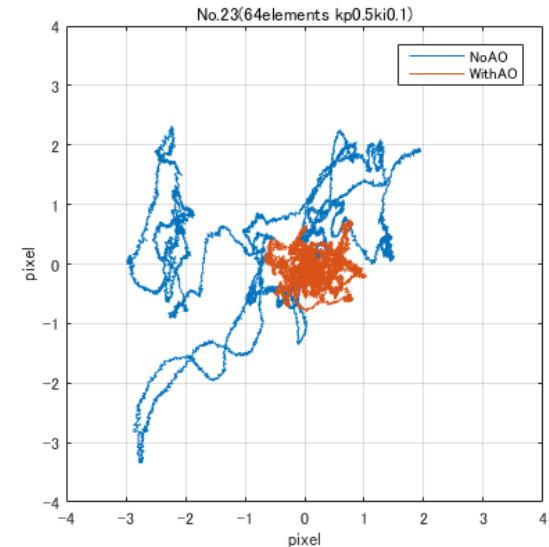
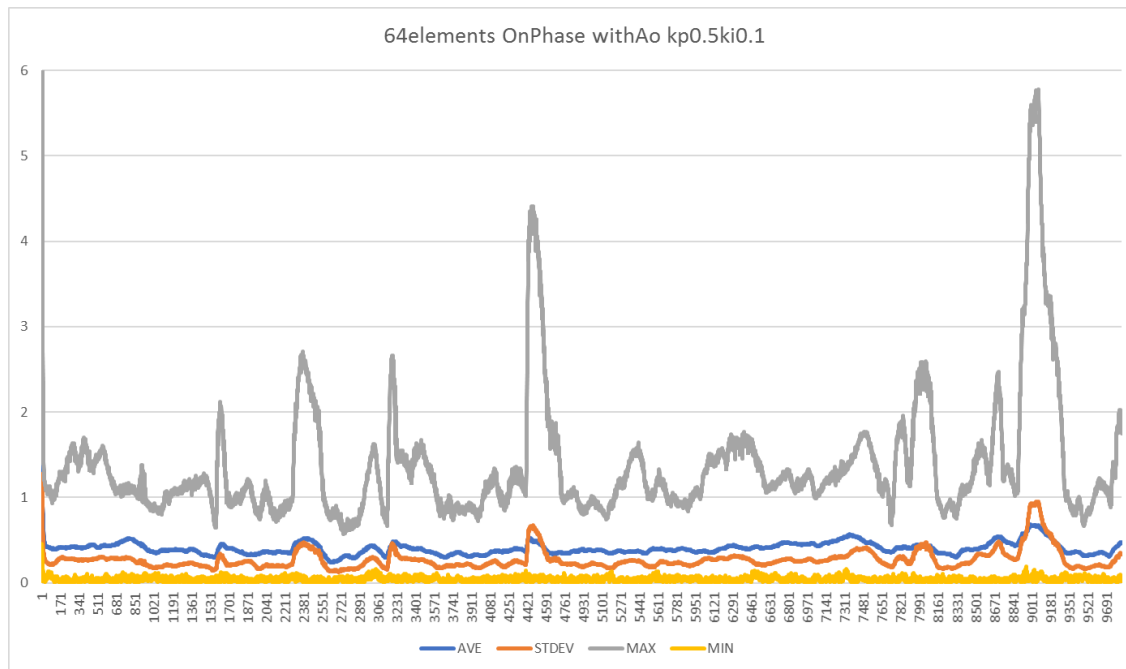


4. 実験例と今後の高性能化 (Tweeter system)

■ Woofer システムでの実験結果 (年会発表内容)

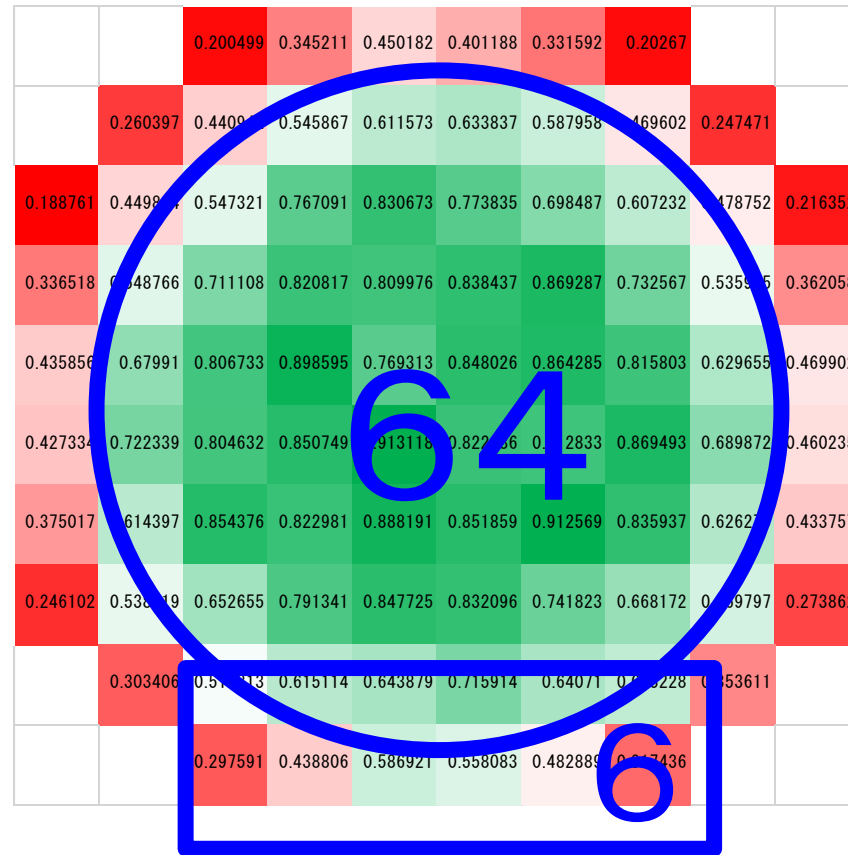
大気位相板を挿入, 位相板を動作させる (風速10m/s)

全64素子の標準偏差平均は0.134[pixel], Peak-Peakの平均は0.743-0.199[pixel]



4. 実験例と今後の高性能化 (Tweeter system)

■ Woofer システムでの実験結果 (年会発表内容)



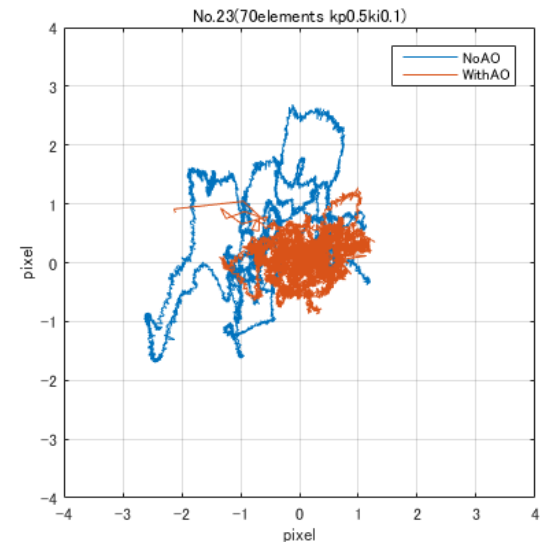
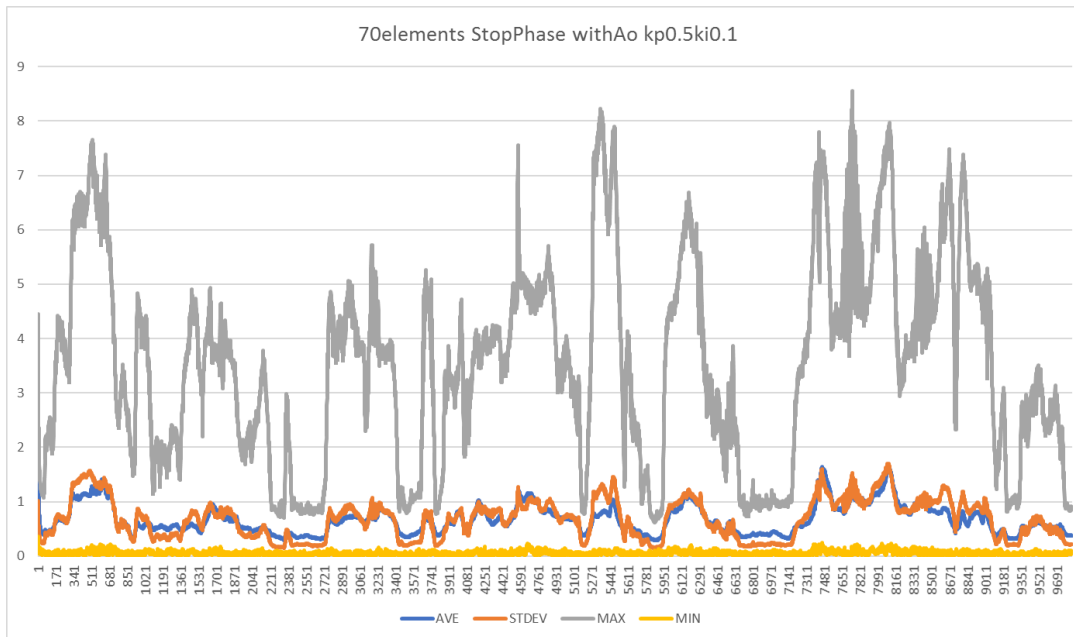
DMに入る観測光の有効な領域の計測結果

4. 実験例と今後の高性能化 (Tweeter system)

■ Woofer システムでの実験結果 (年会発表内容)

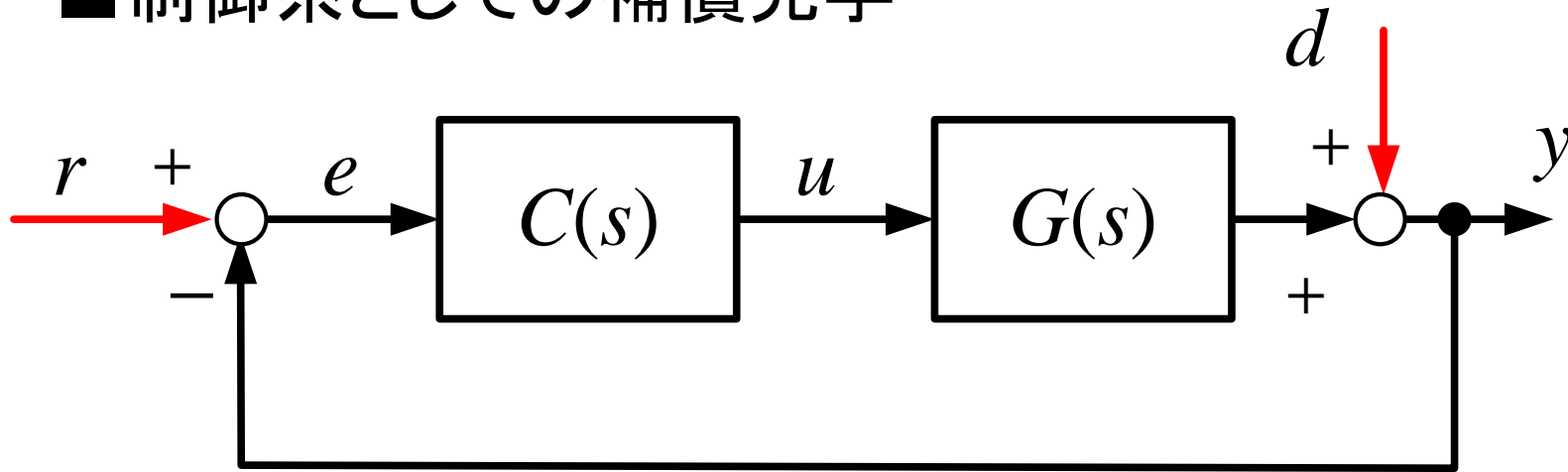
大気位相板を挿入, 位相板を動作させる (風速10m/s)

全64素子の標準偏差平均は0.453[pixel], Peak-Peakの平均は1.841-0.280[pixel]



3. 制御システムの設計 (Woofer system)

■ 制御系としての補償光学



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

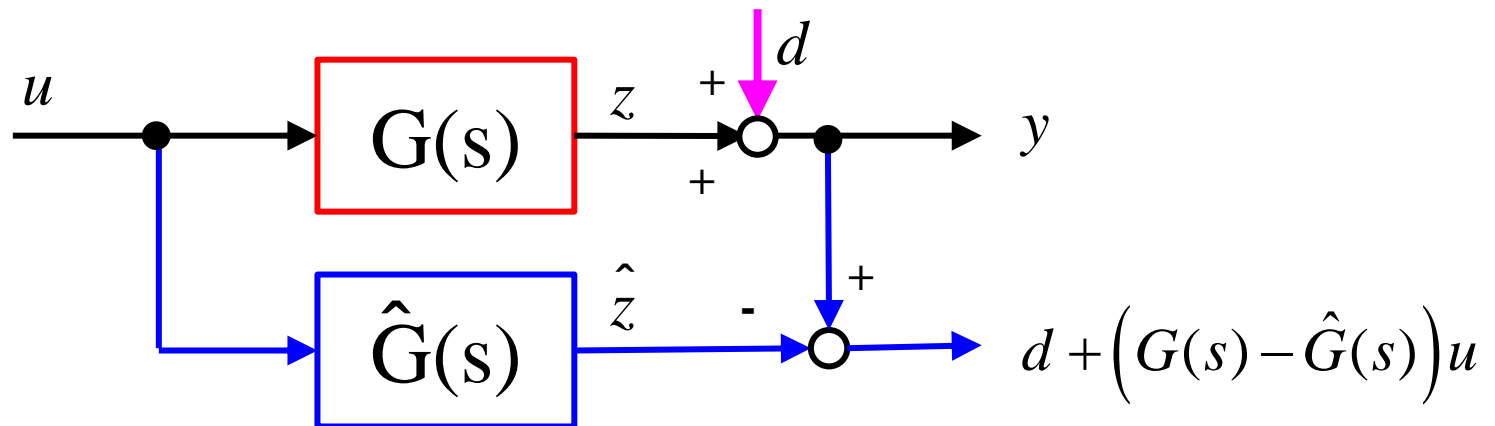
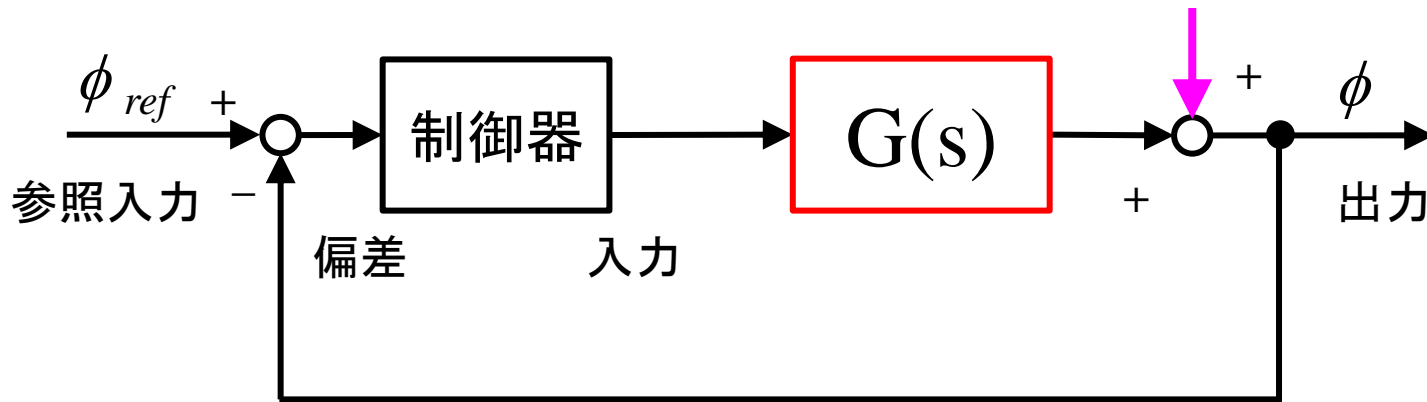
■ 一般的なロボット・メカの制御: $r \rightarrow y$ の応答改善を意識して設計

■ 一般的なプラント等の制御: $d \rightarrow y$ の感度を抑えるように設計

4. 現在設計しているシステム

■ 強力な演算リソースによる大量の演算を実行

強力な演算リソースで波面乱れを推定する



4. 現在設計しているシステム

■強力な演算リソースによる大量の演算を実行

その結果...

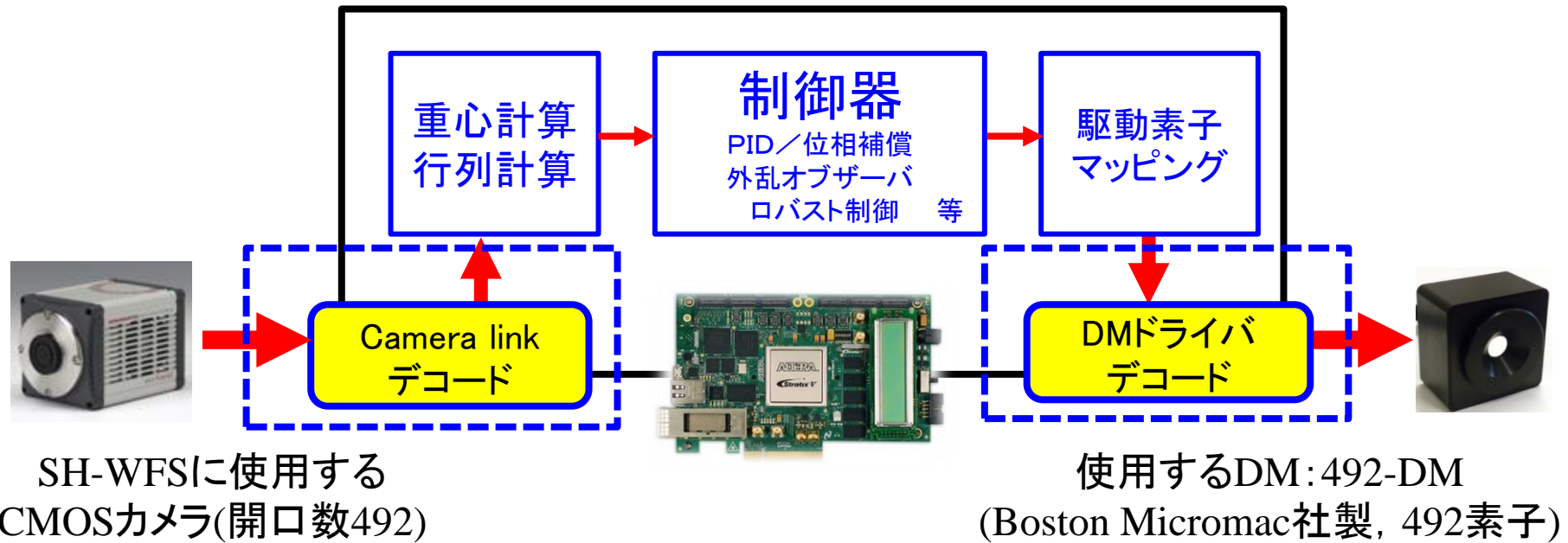
$$y = \frac{CG}{1+CG} r + \frac{1}{1+CG} d$$

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

パラメータKを調整し、強引に外乱の影響をキャンセル

4. 現在設計しているシステム

■ シリアル通信起因のボトルネックを解消する



WFS

- ・CMOS回路の読出し(各ピクセル毎の入射光の強度:フォトン数)データを直接読む
- ・各ピクセル毎の入射光の強度データをカメラリンクデータになる前に直接読む
- ・各ピクセル毎の入射光の強度データのカメラリンクデータを直接読む

DM

- ・各アクチュエータ素子への入力値をDMドライバ形式に変換して直接吐き出す



ExAO進捗 (Woofers system AO)

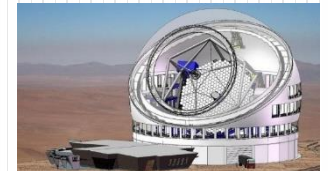
○藤田 勝(大阪電気通信大学)

入部 正継, 中村 祐一(大阪電気通信大学)

山本 広大, 木野 勝(京都大学)

森本悠介, 栗田 光樹夫(京都大学)

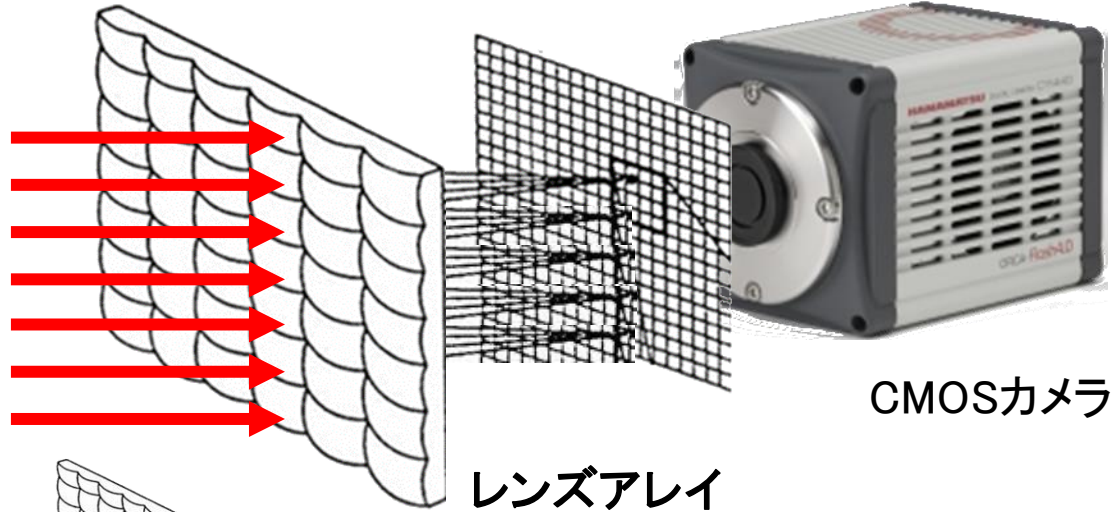
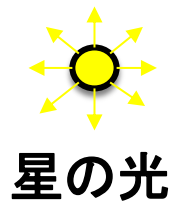
松尾 太郎(大阪大学), 衣笠 哲也(岡山理科大学)



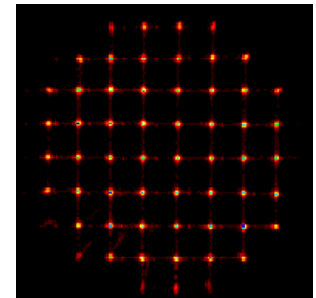
2. 補償光学の概要(一般論)

■ 波面センサ(WFS : Wave Front Sensr)

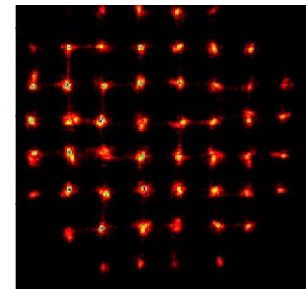
- ・波面センサ(WFS)の空間分解能をはレンズアレイとカメラ解像度で決まる
- ・波面センサ(WFS)の時間分解能は観測光の明るさに依存



結像情報



大気乱流が無い時



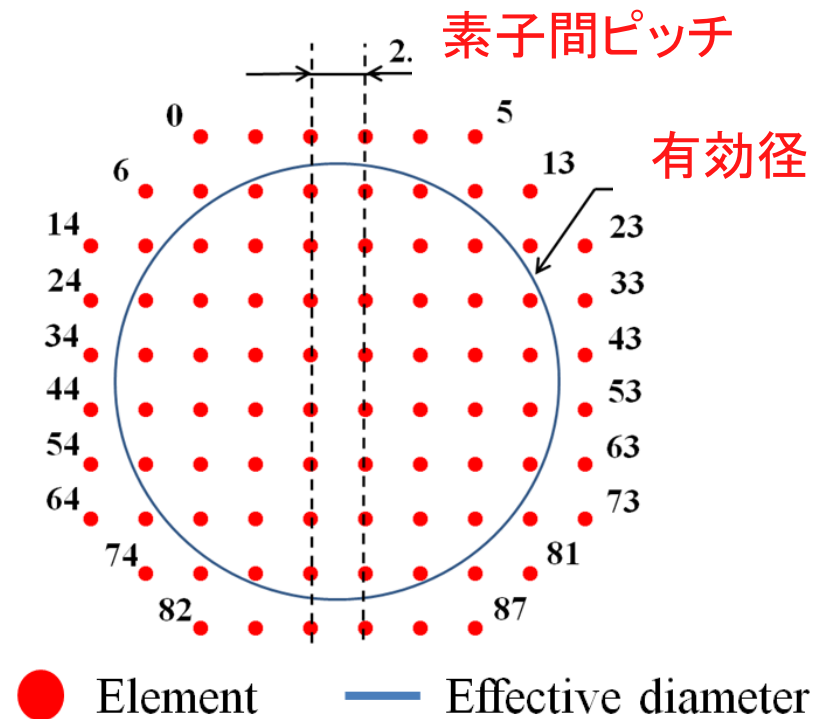
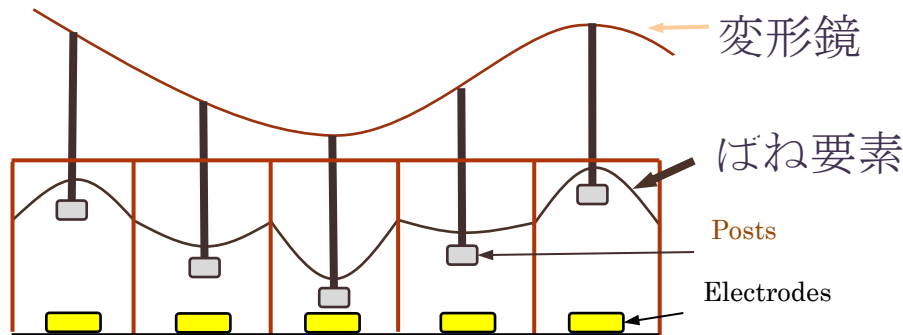
大気乱流を通った時

・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

2. 補償光学の概要(一般論)

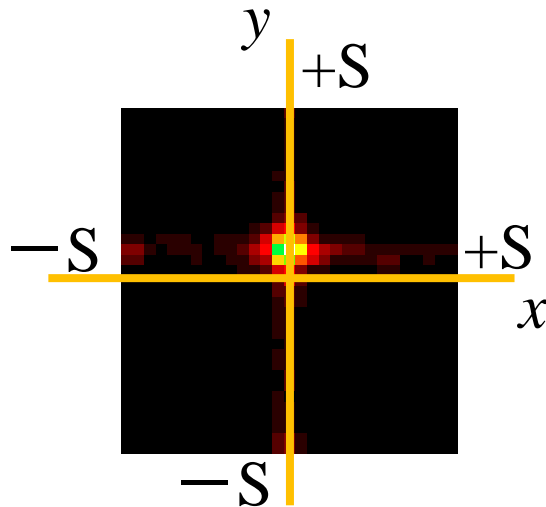
■ 可変形鏡(DM: Deformable Mirror)

- ・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



2. 補償光学の概要(一般論)

■ 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)

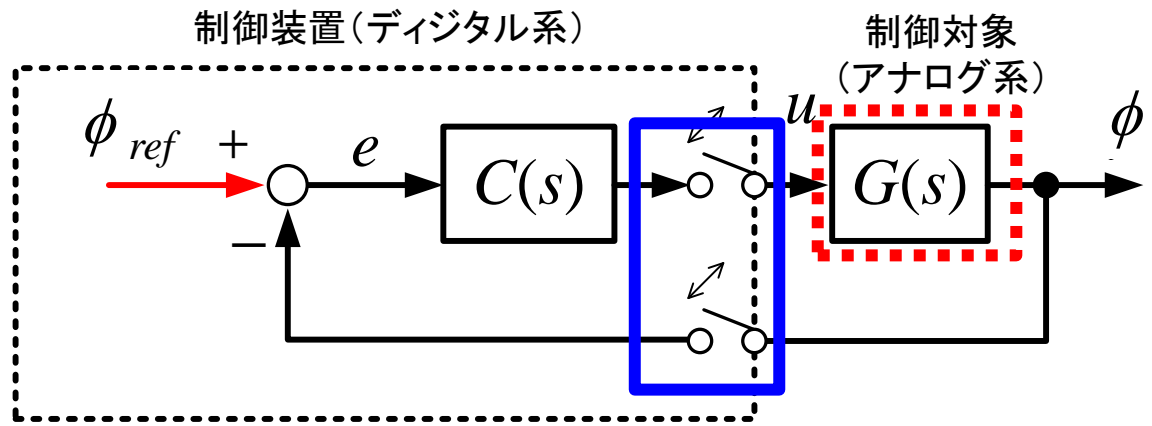
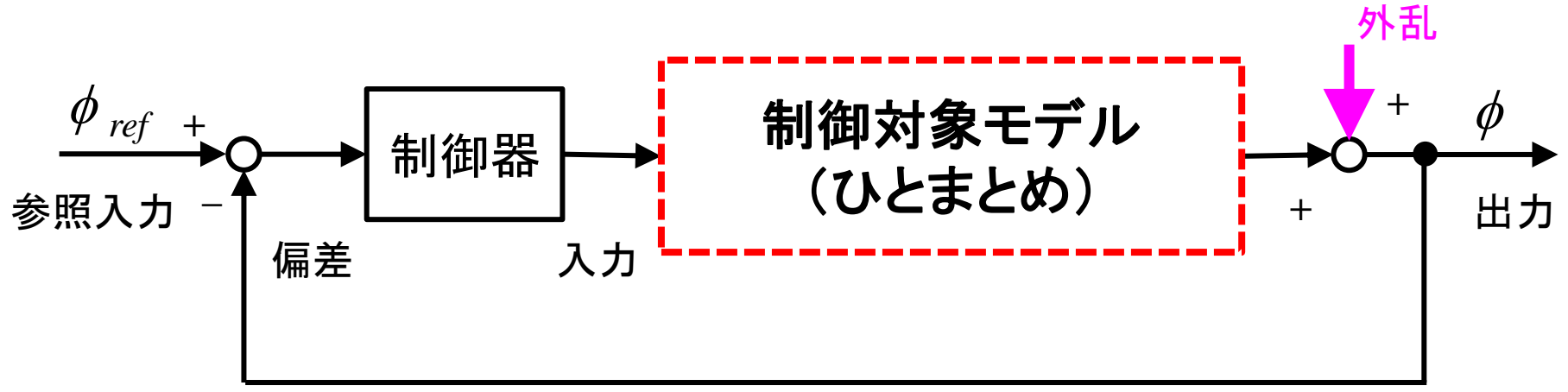
dark : 黒色の明るさレベル

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

3. 極限補償光学とシステムの高性能化

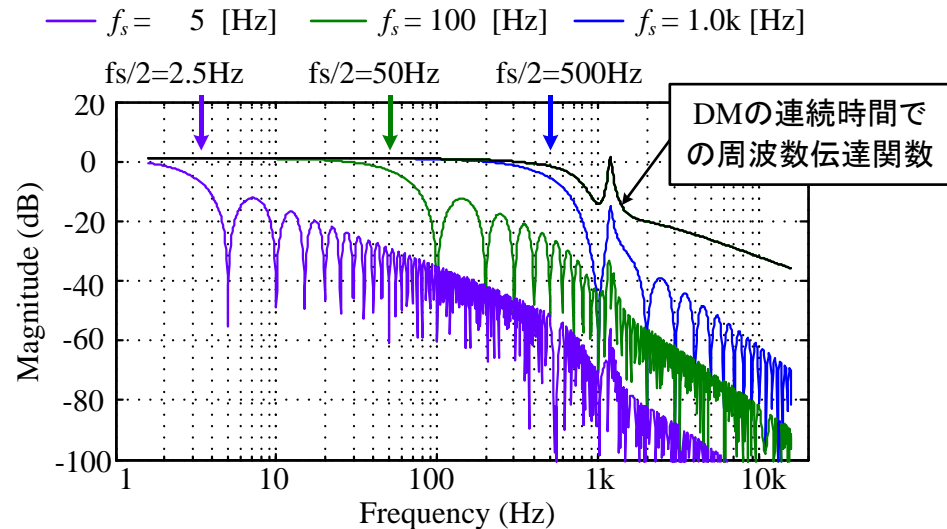
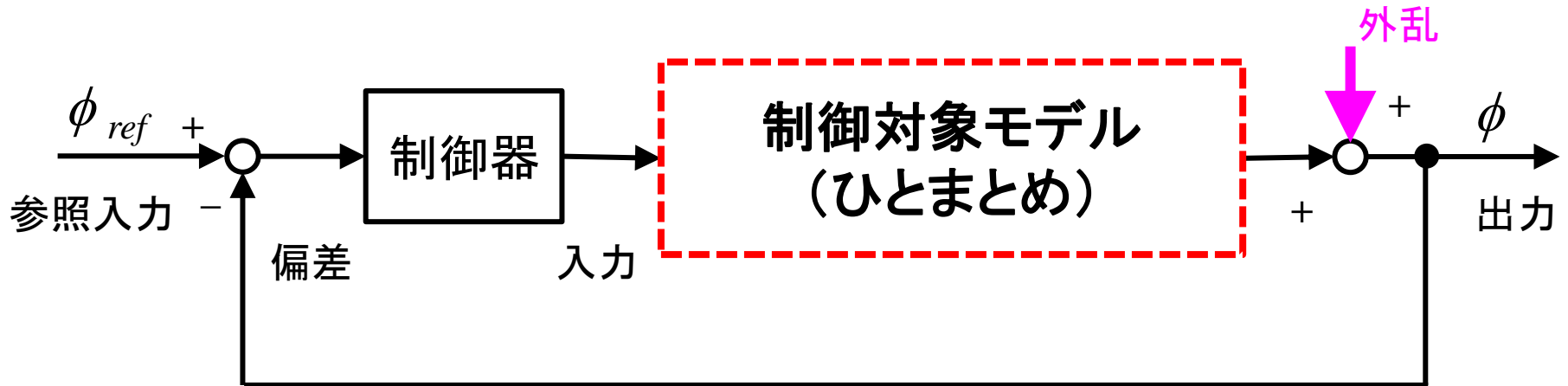
■ 制御系としての補償光学：リアルタイム性を意識する



★ 制御器のサンプルホールドの周期を高速かつ一定にする

3. 極限補償光学とシステムの高性能化

■ 制御系としての補償光学：サンプリング周期を高速に

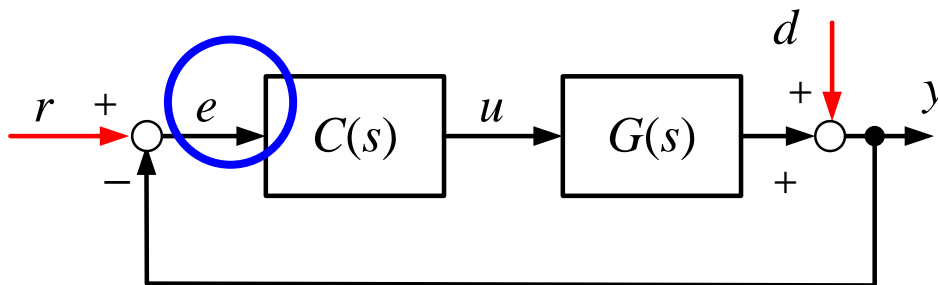


★ 制御器のサンプルホールドの周期を高速かつ一定にする

3. 極限補償光学とシステムの高性能化

■ 制御系の定量設計：波面残差をどの程度許容するか

目標となる波面残差量：Strehl Ratioから算出



$$SR = \exp(-\sigma^2) \quad \sigma : \text{波面の偏差 (制御偏差)}$$

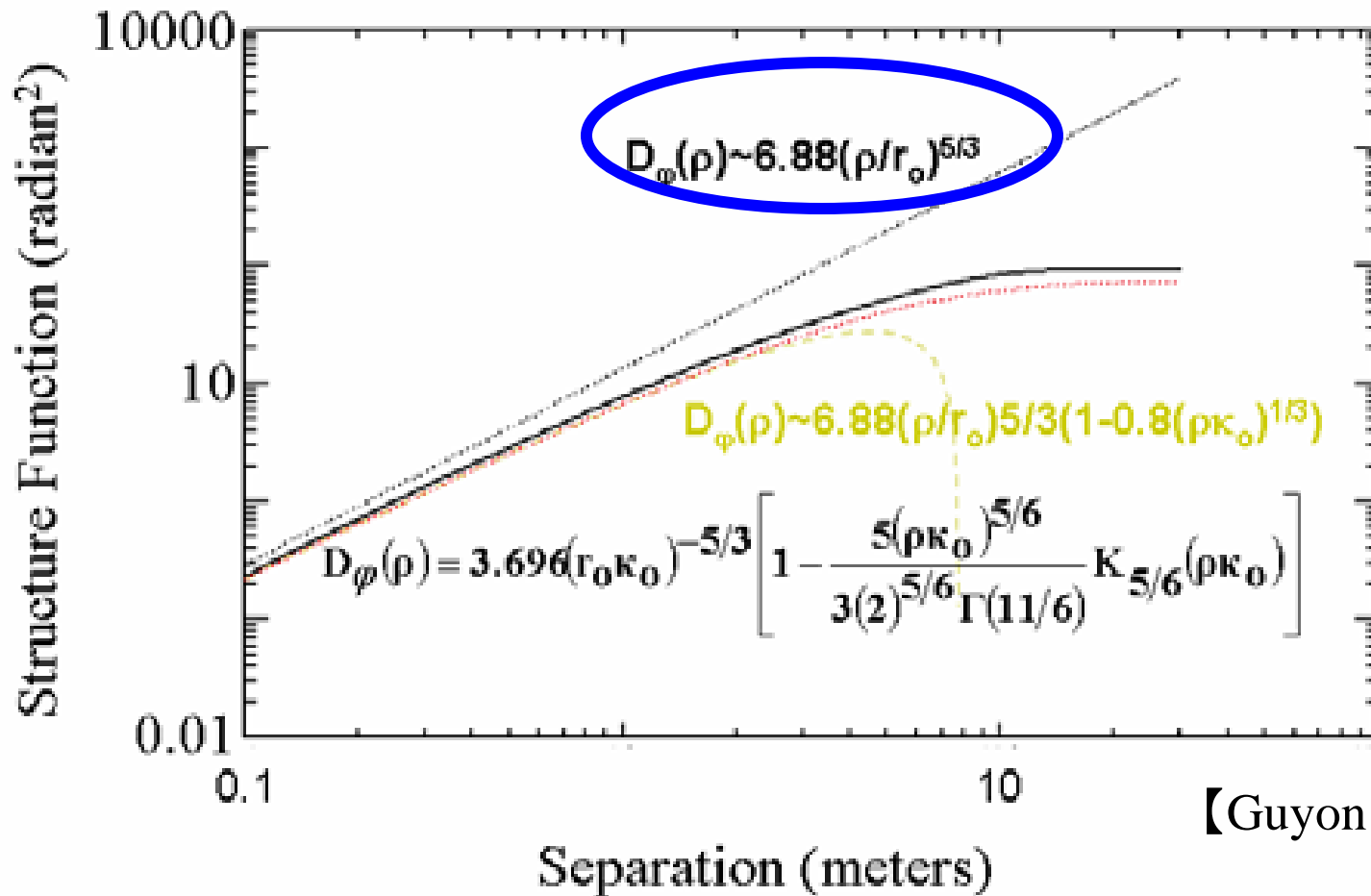
$$SR_{ref} \leq \exp(-\sigma^2)$$

$$\sqrt{-\ln(SR_{ref})} \geq \sigma \quad \therefore e \leq \frac{\lambda_o}{2\pi} \sqrt{-\ln(SR_{ref})} [m]$$

3. 極限補償光学とシステムの高性能化

■ 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

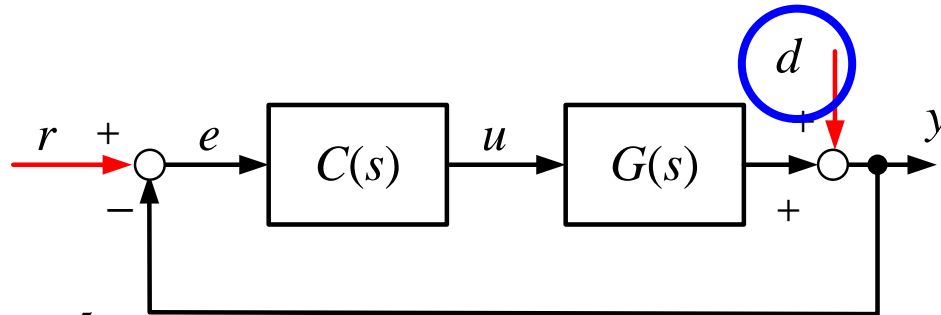


【Guyon (2005)】

3. 極限補償光学とシステムの高性能化

■ 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の乱流モデルを利用



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

ρ : 開口

r_0 : フリード長

$$Df = 6.88 \left(\frac{D_{Telescope} / N_{WFS}}{r_0} \right)^{\frac{5}{3}}$$

$D_{Telescope}$: 望遠鏡主鏡の直径

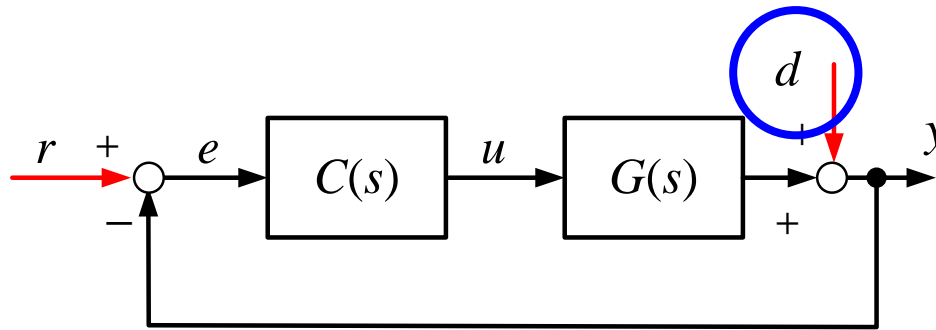
N_{WFS} : WFSのArray分割数

$$\therefore d_{DC} = \frac{\lambda_o}{2\pi} \sqrt{Df} = \frac{\sqrt{6.88} \lambda_o}{2\pi} \left(\frac{D_{Telescope}}{N_{WFS} r_0} \right)^{\frac{5}{6}} \quad [m]$$

3. 極限補償光学とシステムの高性能化

■ 制御系の定量設計：波面残差をどの程度許容するか

時間周波数に依存する波面ずれ量の計算



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

$$\therefore d(F) = \frac{0.22\lambda_0 N_{WFS} v^{\frac{11}{6}}}{D_{Telescope} r_0^{\frac{5}{6}}} F^{-\frac{11}{6}} \quad [m]$$

f : 光の空間周波数 [1/m]

λ_0 : 観測光の波長 [m]

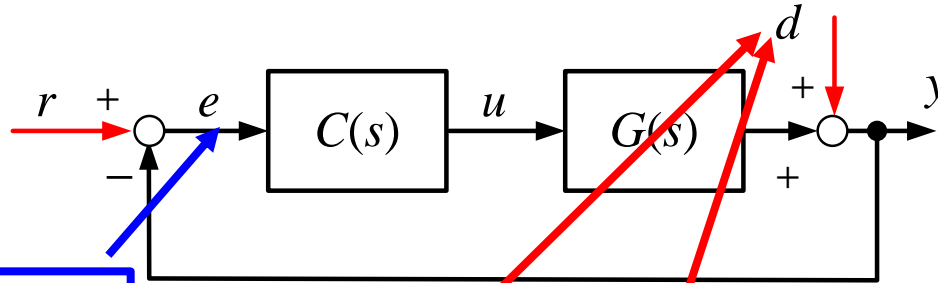
v : 最大風速 [m/s]

F : 時間周波数 [1/s, Hz]

($\because F = f v$)

3. 極限補償光学とシステムの高性能化

■ 制御系の定量設計：波面残差をどの程度許容するか
 数値のまとめ：設計目標と最悪の想定



e : 波面残差

$$e \leq \frac{\lambda_o}{2\pi} \sqrt{-\ln(SR_{ref})}$$

d_{DC} : 定常的な波面の乱れ

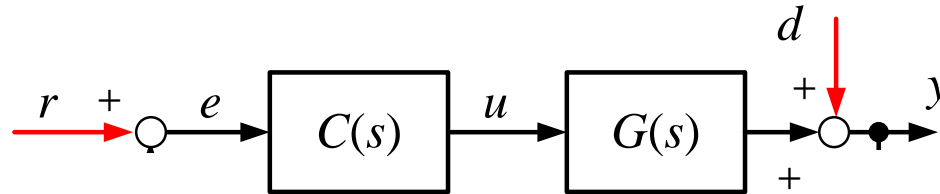
$$d_{DC} = \frac{\sqrt{6.88}}{2\pi} \lambda_o \left(\frac{D_{Telescope}}{N_{WFS} r_0} \right)^{\frac{5}{6}}$$

$d(F)$: 時間周波数毎の波面の乱れ

$$d(F) = \frac{0.22 \lambda_o N_{WFS}^{\frac{11}{6}} \nu^{\frac{11}{6}}}{D_{Telescope} r_0^{\frac{5}{6}}} F^{-\frac{11}{6}}$$

3. 極限補償光学とシステムの高性能化

■ 抑圧比: 発生する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

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

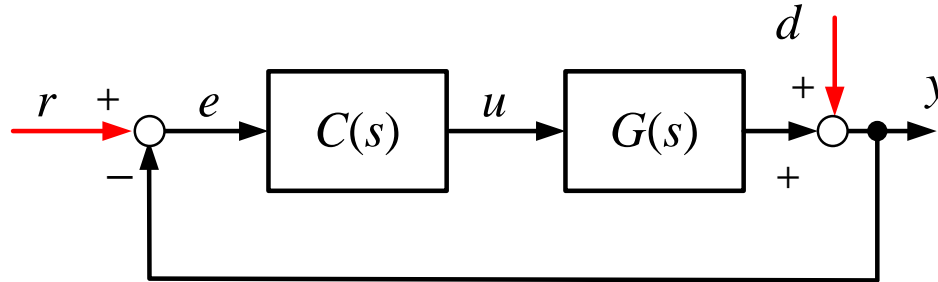
なる関係で, キャリブレーションが済んでいれば $y = 0$ なので, 抑圧比は

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

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

3. 極限補償光学とシステムの高性能化

■ **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: $D_{Telescope}=3.8\text{m}$, $N_{WFS}=8$

- $\lambda_o = 600\text{nm}$, $r_o = 0.1\text{ m}$ (観測波長 $1.5\mu\text{m}$ に影響が無いように)

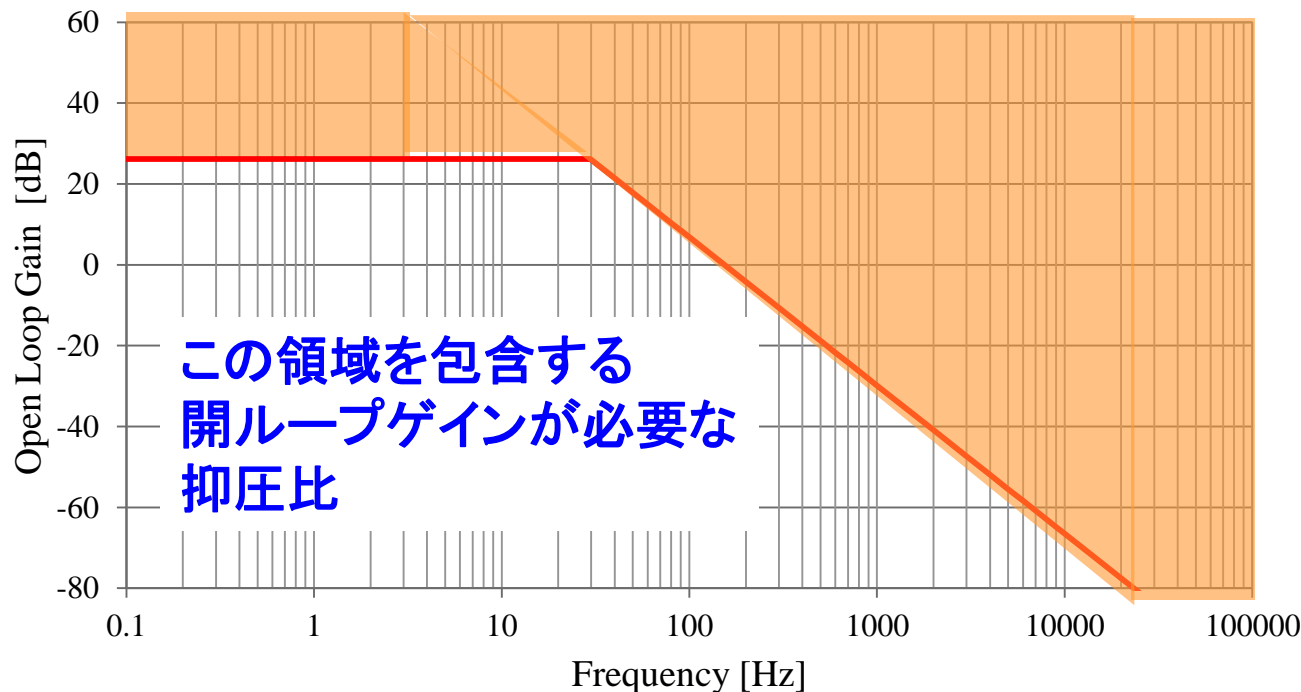
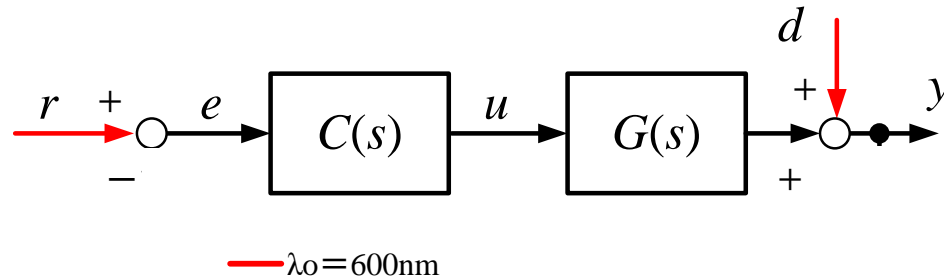
大域的な領域での抑圧比

周波数特性を有する抑圧比

$$20\log\left|\frac{d_{DC}}{e}\right| \geq 26.17 \text{ [dB]} \quad 20\log\left|\frac{d(F)}{e}\right| \geq 80.2 - 36.7\log_{10} F \text{ [dB]}$$

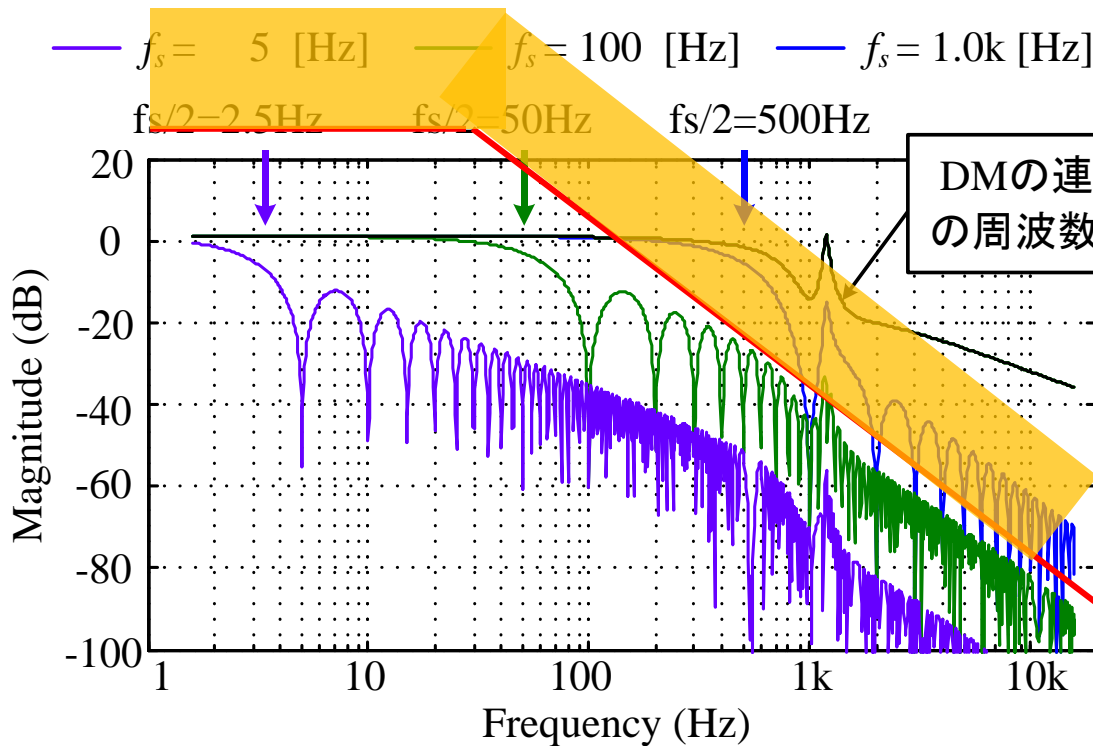
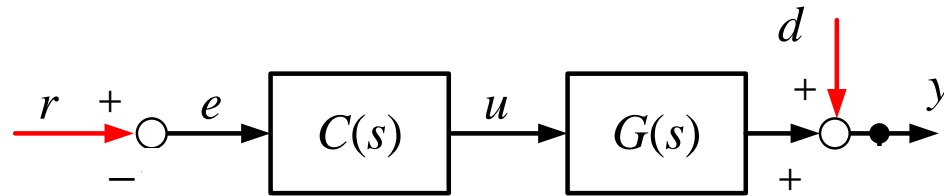
3. 極限補償光学とシステムの高性能化

■ **設計仕様の定量化**: ストレール比 (SR) で0.8以上



3. 極限補償光学とシステムの高性能化

■ **設計仕様の定量化**: ストレール比 (SR) で0.8以上



※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
 → サンプリングは5kHz~

3. 極限補償光学とシステムの高性能化

■ システムの高性能化についてまとめしてみる

・ システム全体で高時間分解能化

DM: 高速動作 / WFS: 高速撮像 / 制御器: 高速サンプリング

・ システム全体で高空間分解能化

DM : アクチュエータ数増加

WFS : カメラ素子数増加, MLAの小開口数増加

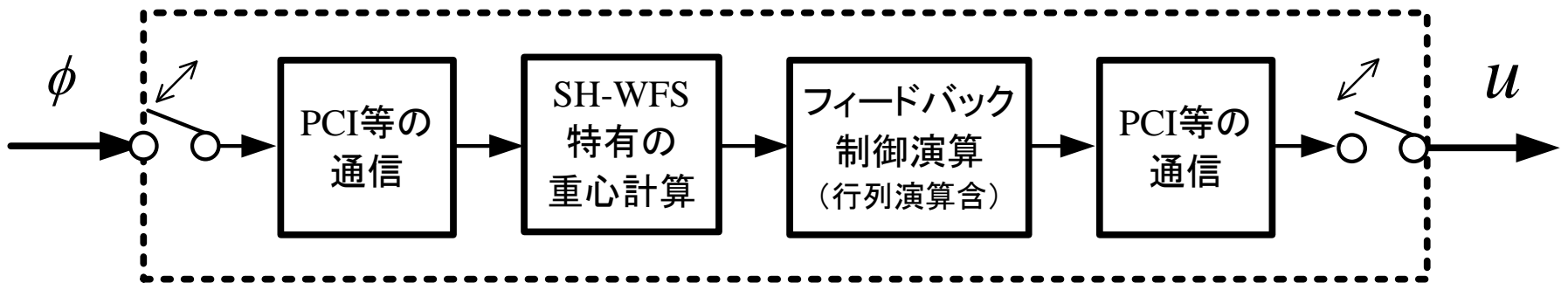
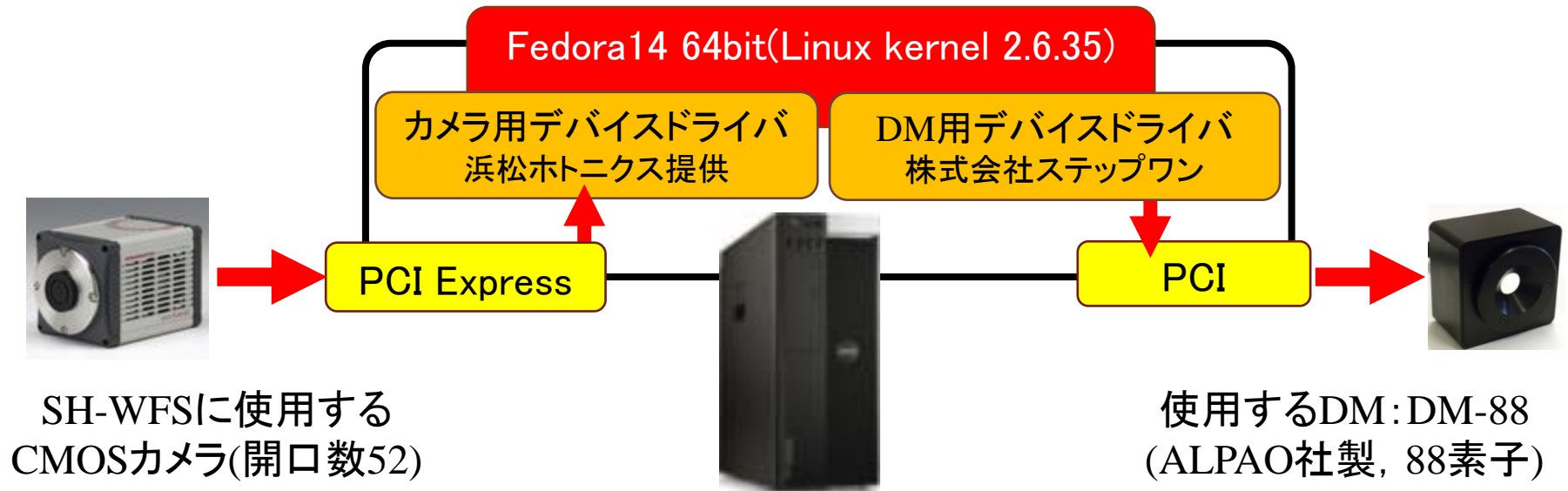
制御器 : データ通信量増加

・ システム中の制御器の高性能化

適切なフィードバックゲインの設計 / 制御アルゴリズムの開発

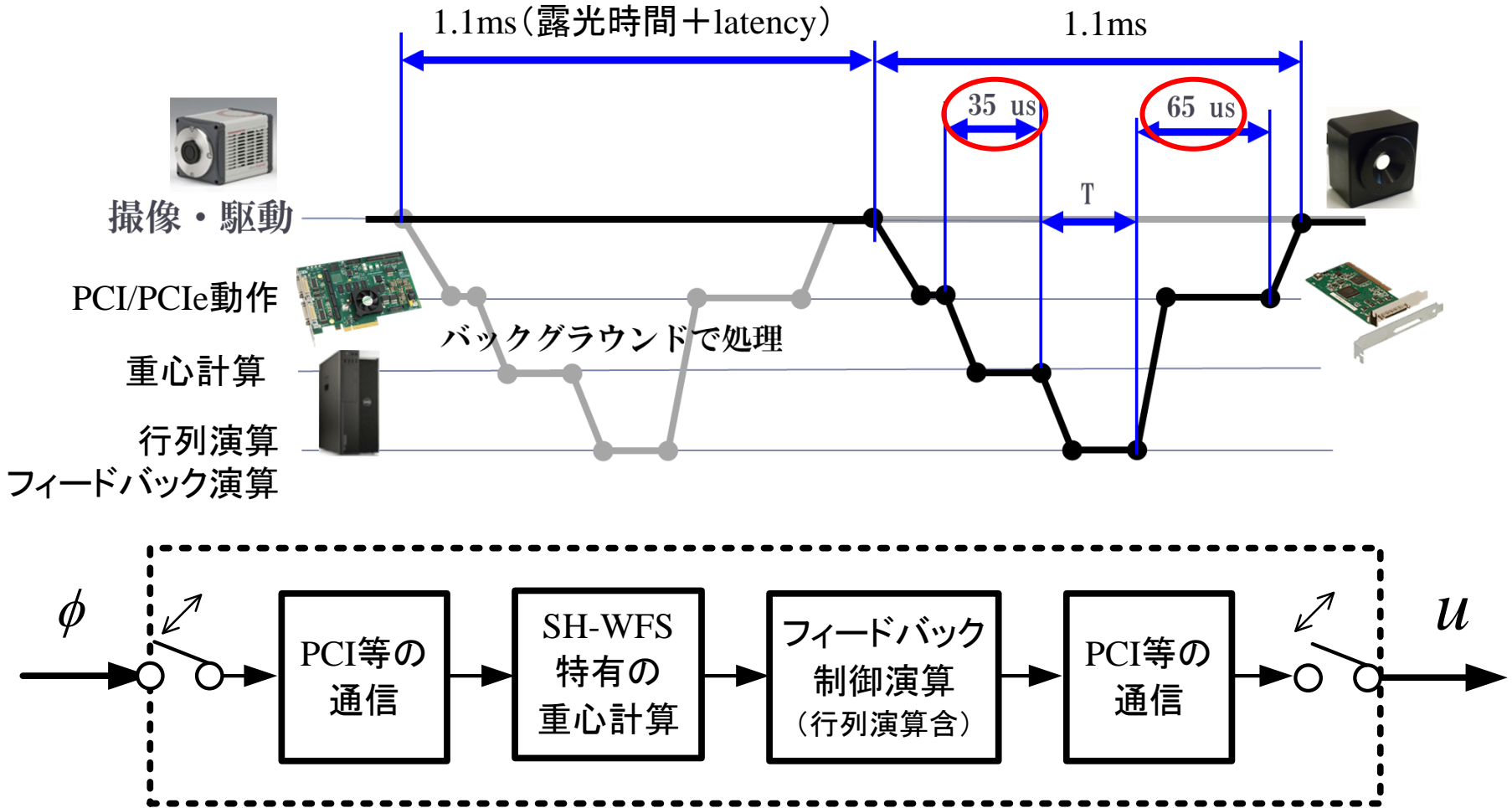
3. 制御システムの設計 (Woofler system)

■ 現在の実験システム (Woofler システム) の例



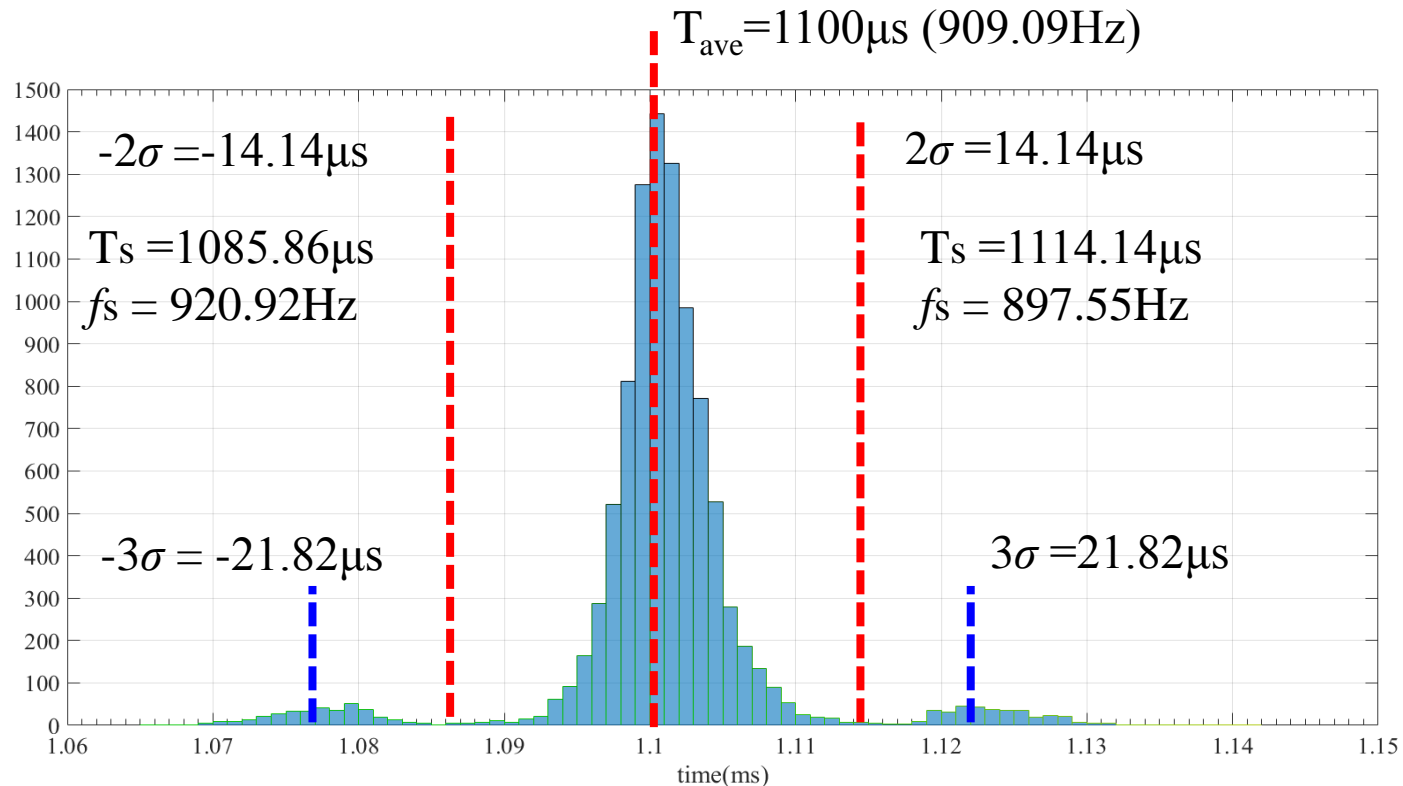
3. 制御システムの設計 (Woofers system)

■ 現在の実験システム (Woofers システム) の例



4. 実験例と今後の高性能化 (Tweeter system)

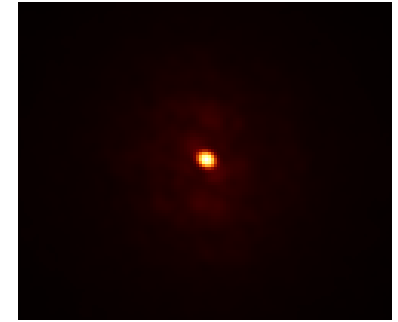
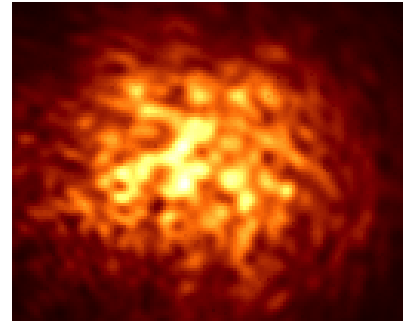
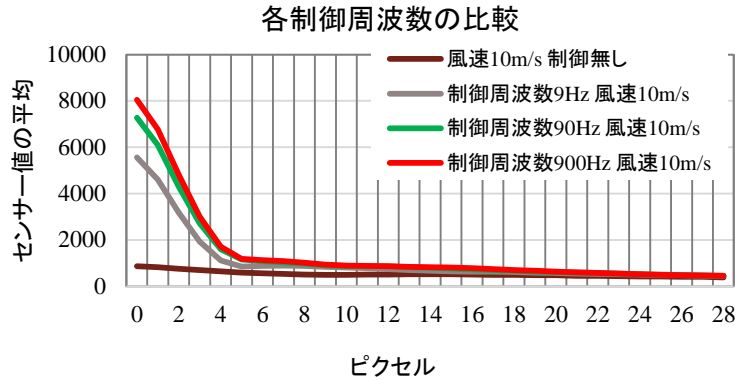
■ 現在の実験システム (Woofer システム) の例



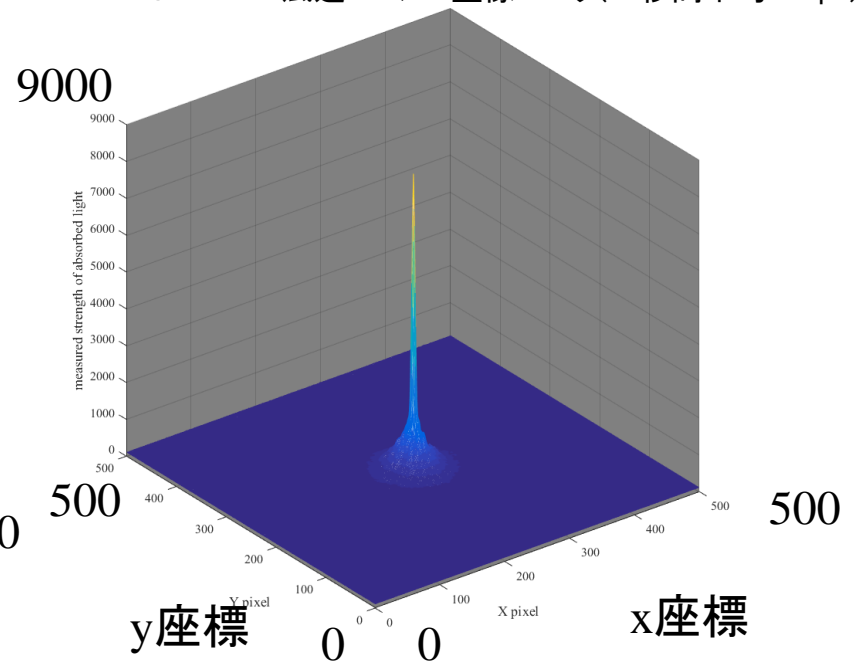
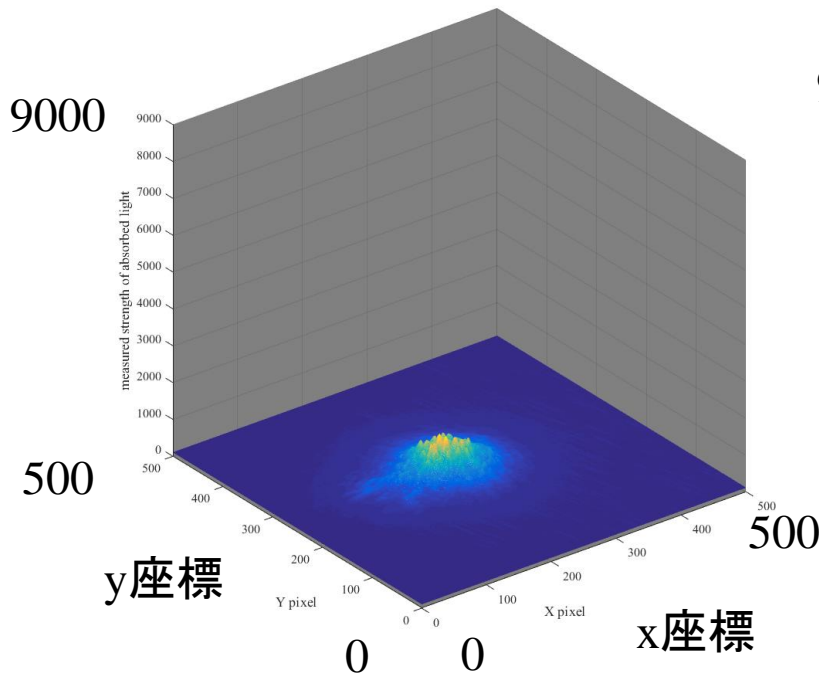
実時間性測定結果 (ヒストグラム)

4. 実験例と今後の高性能化 (Tweeter system)

■ 現在の実験システム (Woofer システム) の例

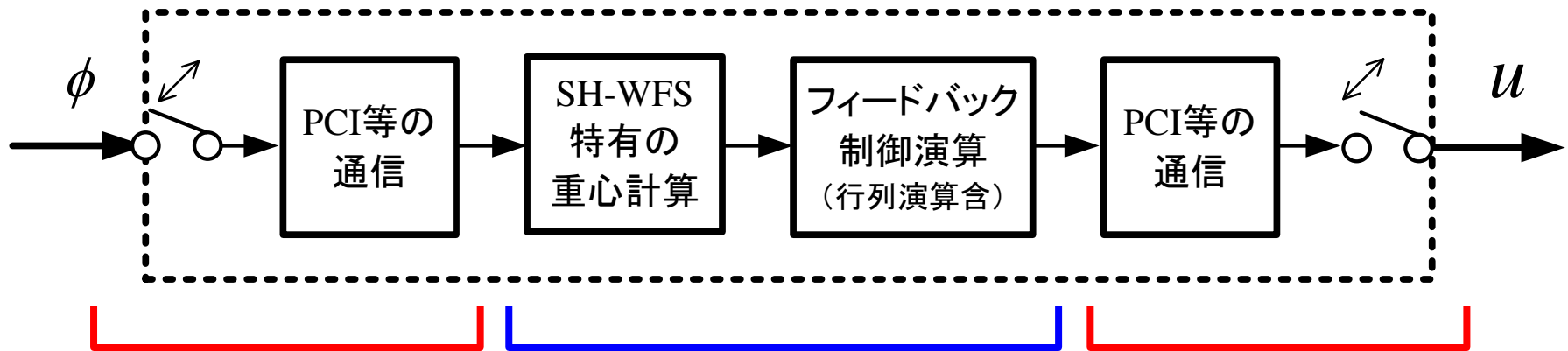


風速 10m/s 制御無し 風速 10m/s 制御周波数 900Hz
 $\lambda = 633\text{nm}$ 風速 10m/s 星像モニタ (16秒間平均 26fps)

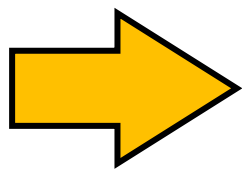


4. 現在設計しているシステム

■ 制御装置の高性能化をどのように実現するか？



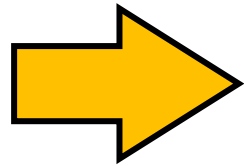
- ★ PCI/PCIeによるデータ通信のボトルネックを解消する
- ★ 強力な演算リソースによる大量の演算を実行
- ★ 複雑だが効果が大きい制御アルゴリズムの実装



専用の演算回路 (ASIC)が欲しくなる

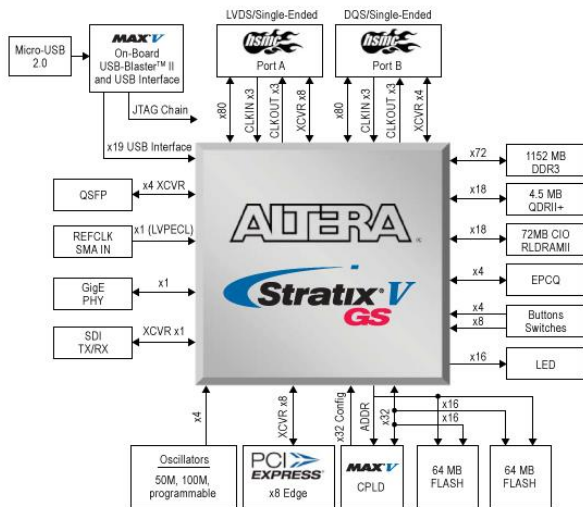
4. 現在設計しているシステム

■ 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

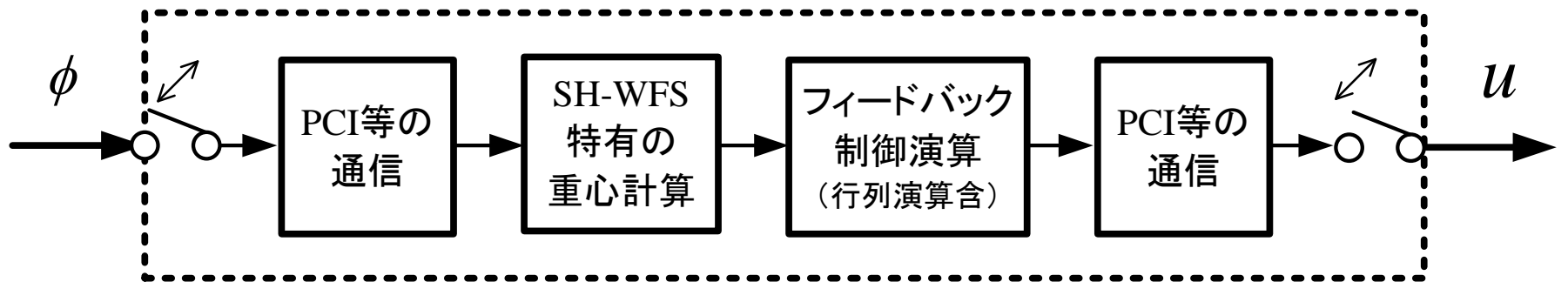
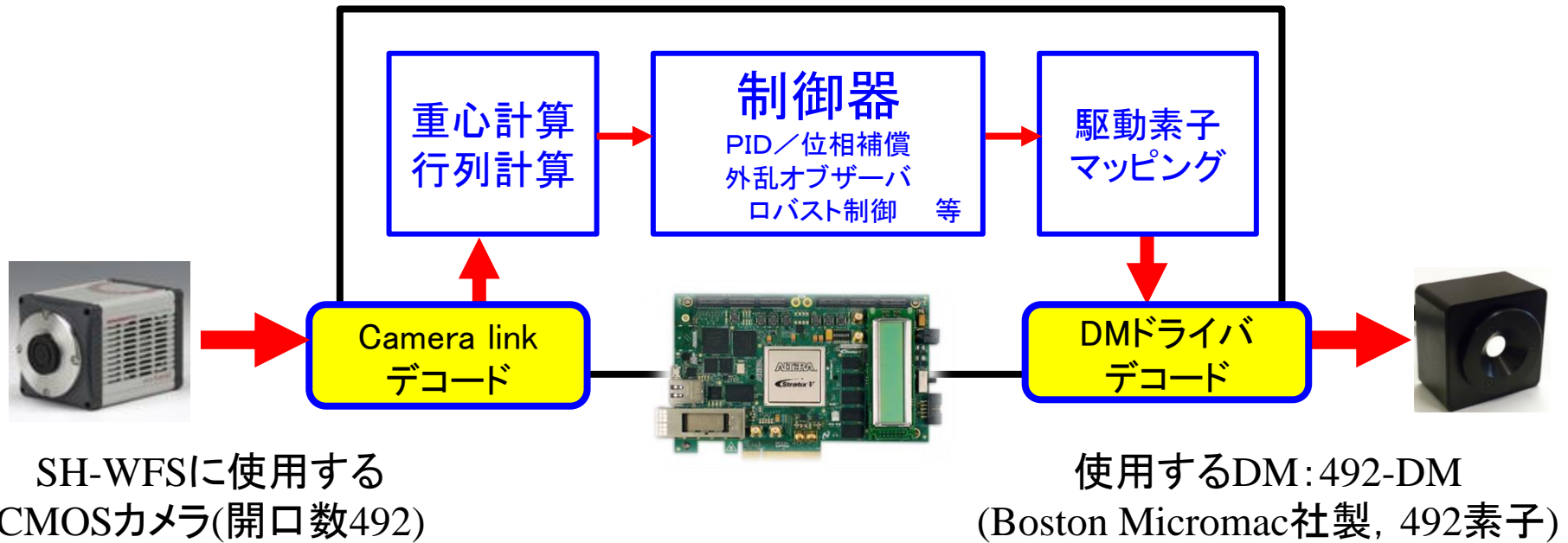
FPGA (Field Programmable Gate Array) を
使用した制御器を提案



- ・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 Lescription 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

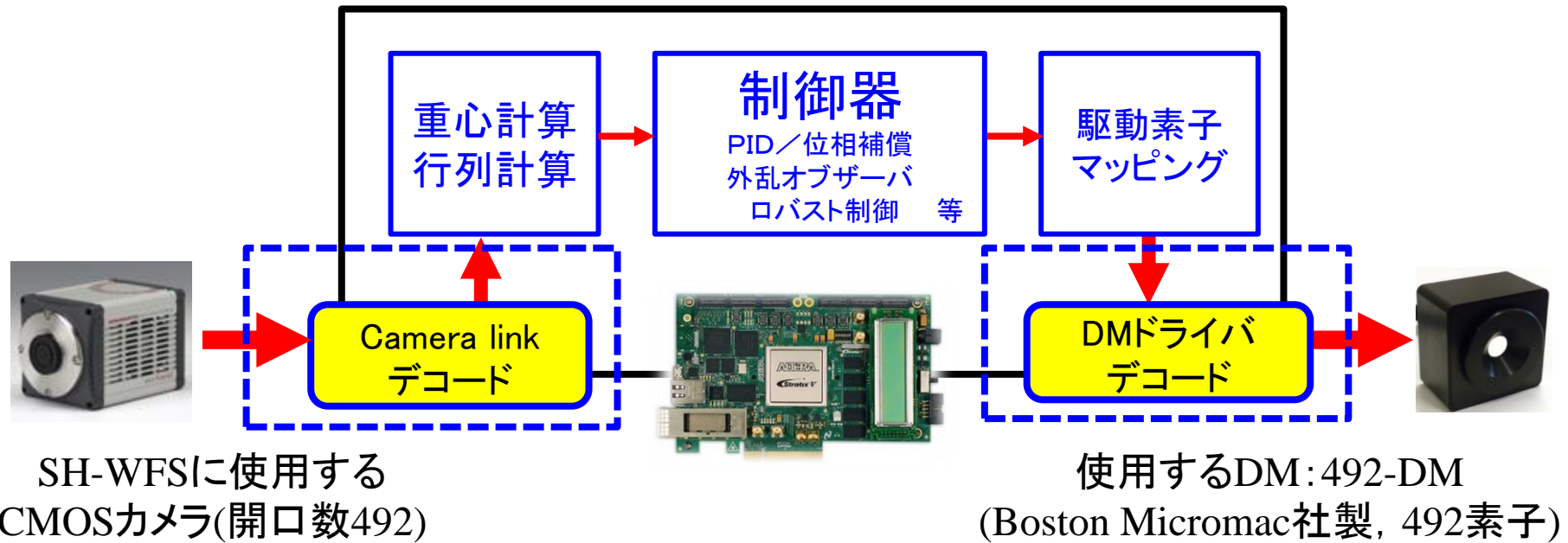
4. 現在設計しているシステム

■ Teeter系ではFPGAを採用した専用回路を使用する



4. 現在設計しているシステム

■ シリアル通信によるボトルネックを解消する



WFS

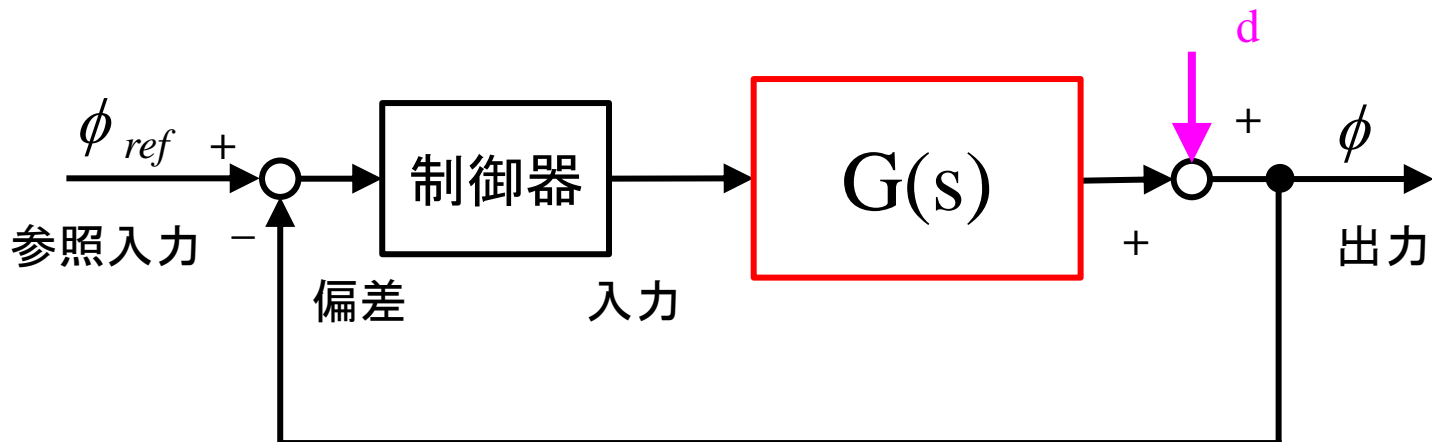
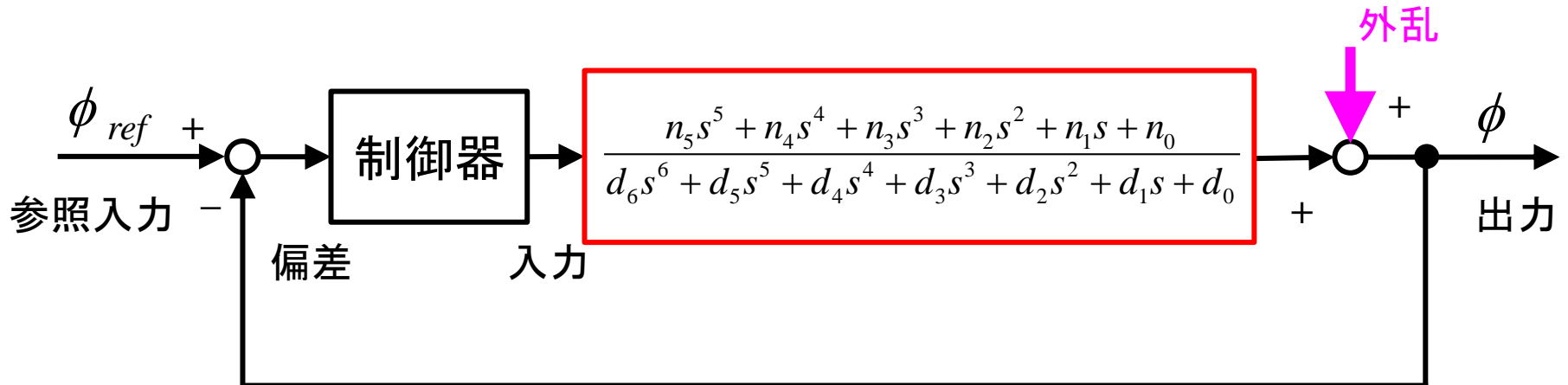
- ・CMOS回路の読出し(各ピクセル毎の入射光の強度:フォトン数)データを直接読む
- ・各ピクセル毎の入射光の強度データをカメラリンクデータになる前に直接読む
- ・各ピクセル毎の入射光の強度データのカメラリンクデータを直接読む

DM

- ・各アクチュエータ素子への入力値をDMドライバ形式に変換して直接吐き出す

4. 現在設計しているシステム

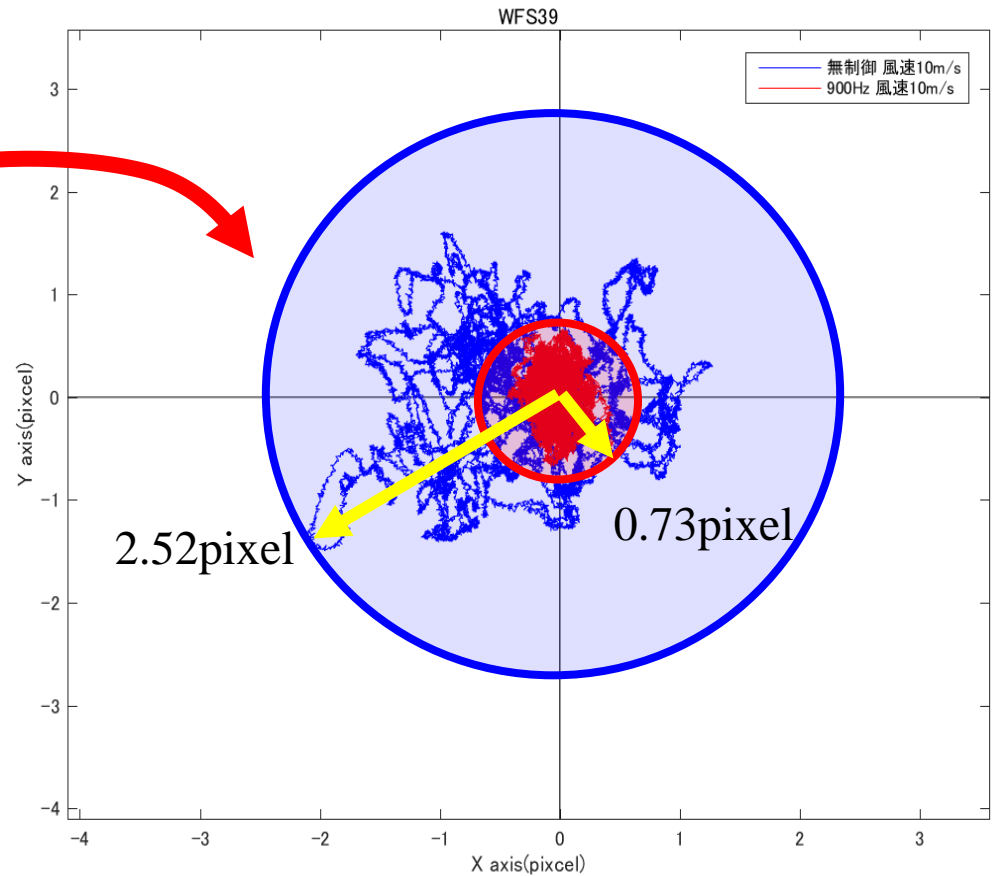
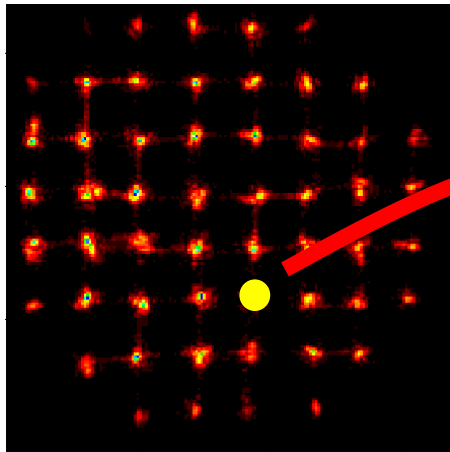
■ 強力な演算リソースによる大量の演算を実行



4. 実験例と今後の高性能化 (Tweeter system)

■ 現在の実験システム (Woofers システム) の例

補償光学による波面補償の結果



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

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