



TOHOKU
UNIVERSITY

多天体補償光学に向けた Open-Loop 補償光学系 での波面補償の性能評価

東北大学 理学研究科 天文学専攻
秋山研究室 修士2年 鈴木元気

1. 多天体補償光学の課題
2. 東北大51cm 望遠鏡用 開ループ制御補償光学系の開発
3. 開ループ制御のためのCalibration手法
4. 波面補償の実験結果
5. まとめ

1. 多天体補償光学の課題

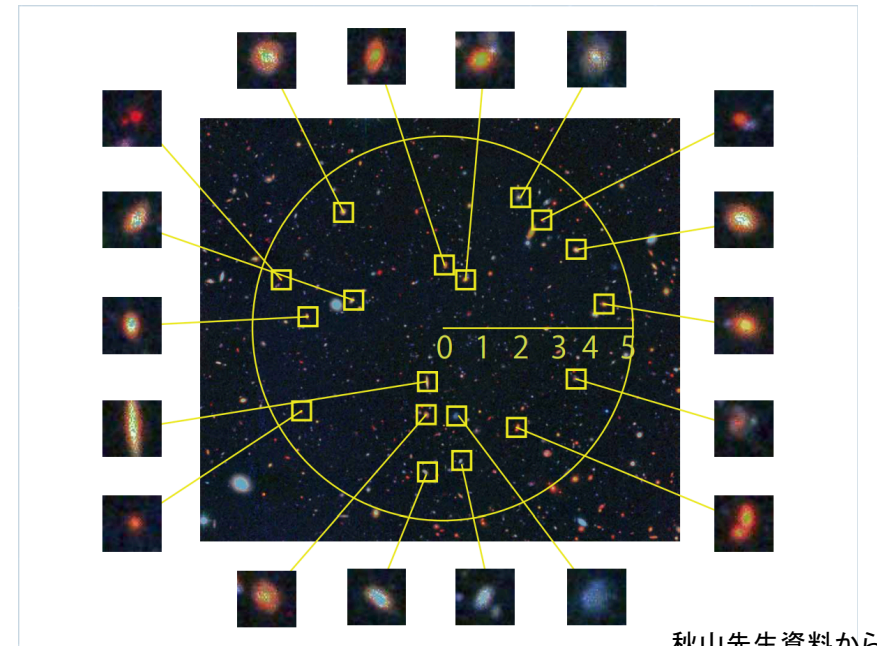
2. 東北大51cm 望遠鏡用 開ループ制御補償光学系の開発

3. 開ループ制御のためのCalibration手法

4. 波面補償の実験結果

5. まとめ

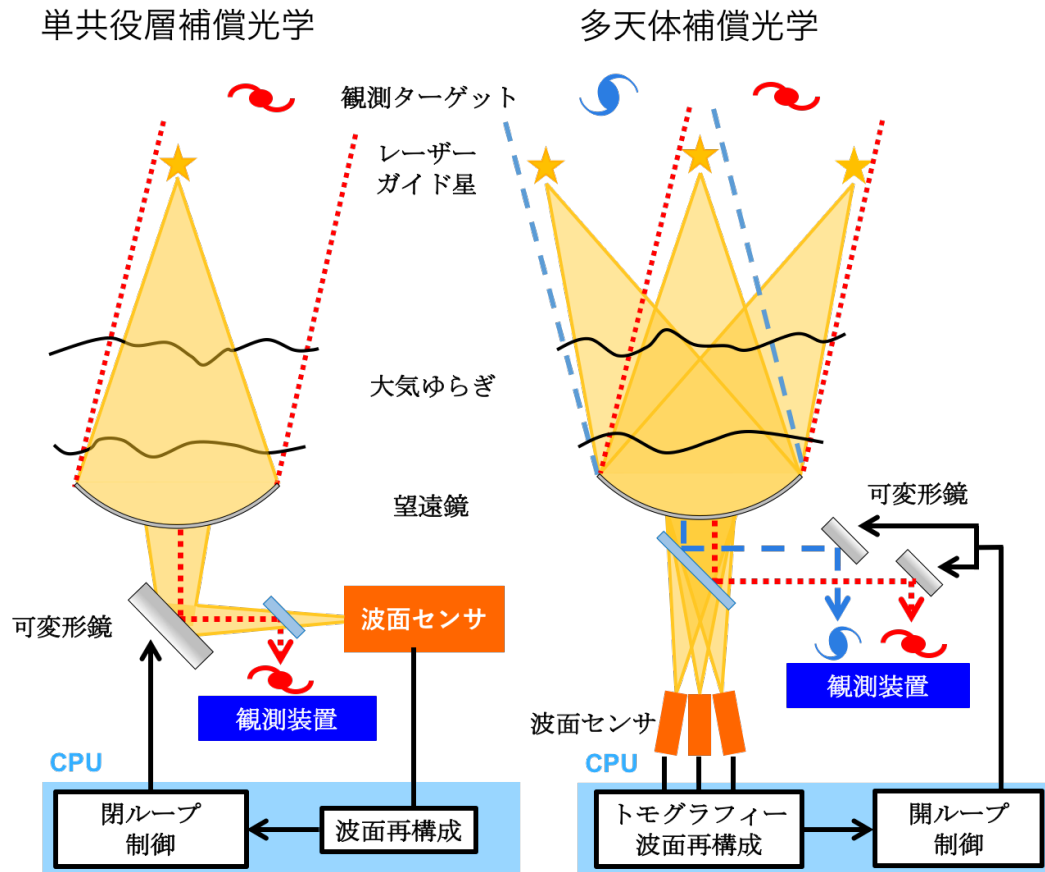
TMT IRMOS



TMT 第2期装置提案 IRMOS (Infra-Red Multi-Object Spectrograph)
FoV 10' 内の複数天体を補償光学を効かせながら同時に観測を行う。
➤ 高い空間分解能と広視野での効率的な観測

IRMOS = 地表層補償光学 (GLAO) + 多天体補償光学 (MOAO) + 面分光装置 (IFU)

多天体補償光学(Multi-Object Adaptive Optics : MOAO)



MOAOは広視野補償光学の一つ

- ✓ 複数のレーザーガイド星を用いることで広視野の波面測定を行う
→ トムグラフィック波面推定
- ✓ 各観測天体ごとに可変形鏡を用いた波面補償
→ 開ループ波面補償

MOAOの技術的課題は

- ・ トムグラフィック波面推定法
- ・ 開ループでの波面補償(DMの制御)

今研究では、TMTの多天体補償光学装置の開発に向け”開ループ制御”での波面補償についての実証と、高精度の波面補償の実現を目的としている。

MOAO実証機 : MOAOのパフォーマンス

CANARY @ William Herschel Telescope

RAVEN @ Subaru Telescope

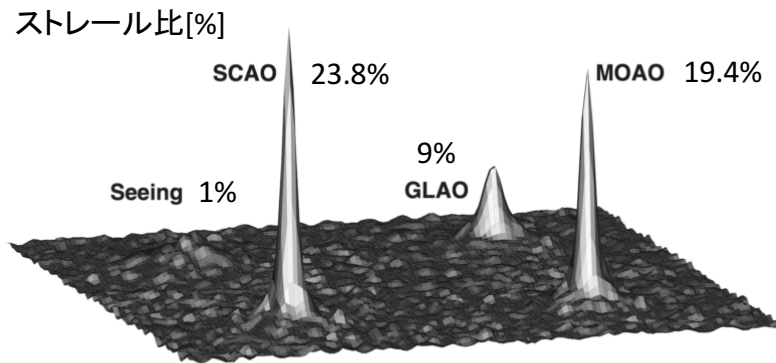
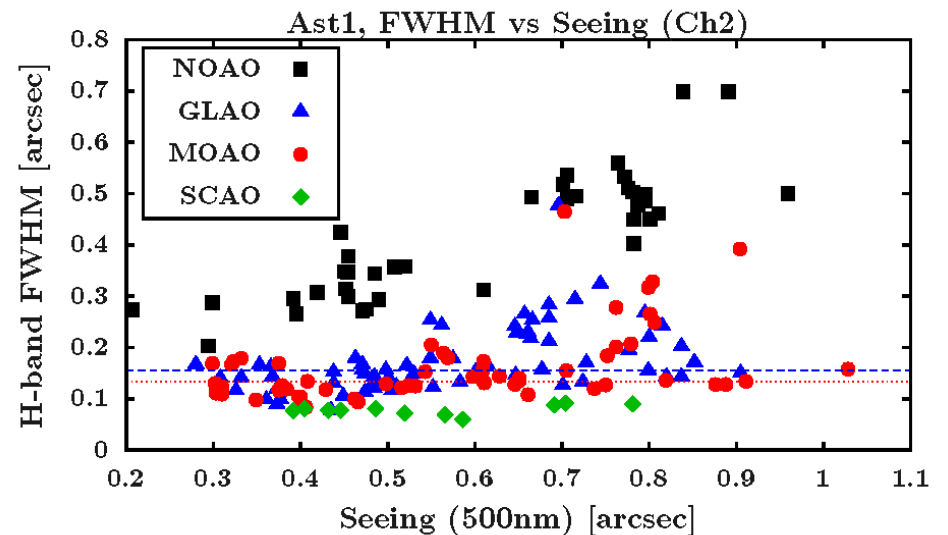


Fig. 7. IR image comparison at $\lambda = 1530$ nm. The four images of 30 seconds exposure each were taken at $00^{\text{h}}59^{\text{m}}18^{\text{s}}$ (Seeing), $00^{\text{h}}42^{\text{m}}10^{\text{s}}$ (GLAO), $00^{\text{h}}29^{\text{m}}22^{\text{s}}$ (MOAO) and $00^{\text{h}}32^{\text{m}}28^{\text{s}}$ (SCAO). Measured SR are respectively: 1%, 9%, 19.4% and 23.8%.

(Vidal et al. 2014)



(Ono et al. 2016, SPIE)

MOAOのパフォーマンスは、

SCAO > MOAO \geq GLAO > No AO

に位置している。

ストレーン比と波面収差

ストレーン比(Strehl Ratio : SR)と波面収差 σ_{Err} [nm]の関係式は、波長 λ [nm]とすると、

$$SR \approx \exp\left(-\left(\frac{2\pi\sigma_{Err}}{\lambda}\right)^2\right)$$

である。 σ_{Err} は様々な要因から生じる収差項の二乗和で表現される。

- 閉ループ(Closed-Loop)制御(ex. SCAO)では、

$$\sigma_{Err}^2 = \sigma_{Fitting}^2 + \sigma_{temporal}^2 + \sigma_{noise}^2 + \sigma_{ani}^2 + \dots$$

- 開ループ制御が伴う多天体補償光学(MOAO)では、更に以下の項が追加される。

$$\sigma_{Err}^2 = \sigma_{Tommo}^2 + \sigma_{OL}^2 + \sigma_{NCPA}^2 + \sigma_{Fitting}^2 + \sigma_{temporal}^2 + \sigma_{noise}^2 + \sigma_{ani}^2 + \dots$$

$\sigma_{Fitting}^2$: 可変形鏡のフィッティング誤差

$\sigma_{temporal}^2$: 波面補正の時間差に誤差

σ_{noise}^2 : 波面センサのノイズ

σ_{ani}^2 : anisoplanatism angle

σ_{Tommo}^2 : トモグラフィ推定誤差

σ_{OL}^2 : 開ループ制御による補正誤差

σ_{NCPA}^2 : Non-Common Path Aberration (非共通光路の収差)

ストレーン比と波面収差

ストレーン比(Strehl Ratio : SR)と波面収差 σ_{Err} [nm]の関係式は、波長 λ [nm]とすると、

$$SR \approx \exp\left(-\left(\frac{2\pi\sigma_{Err}}{\lambda}\right)^2\right)$$

で 今研究の目的

- 閉ル

MOAO実証機では、 $\sigma_{TomO}^2 + \sigma_{OL}^2$ の誤差が縮重しており区別できない。
今研究ではトモグラフィー推定を伴わない、小型の開ループ制御補償光学装置(可視)を開発し、開/閉ループでの波面補償の実験を行う。

- 開ル

→ 開ループ制御での波面補償の性能評価
→ σ_{OL}^2 の要因と、キャリブレーションの手法の検討(TMT-MOAOに向けて)

$\sigma_{Fitting}^2$: 可変形鏡のフィッティング誤差

σ_{TomO}^2 : トモグラフィー推定誤差

$\sigma_{temporal}^2$: 波面補正の時間差に誤差

σ_{OL}^2 : 開ループ制御による補正誤差

σ_{noise}^2 : 波面センサのノイズ

σ_{NCPA}^2 : Non-Common Path Aberration (非共通光路の収差)

σ_{ani}^2 : anisoplanatism angle

1. 多天体補償光学の課題

2. 東北大51cm 望遠鏡用 開ループ制御補償光学系の開発

3. 開ループ制御のためのCalibration手法

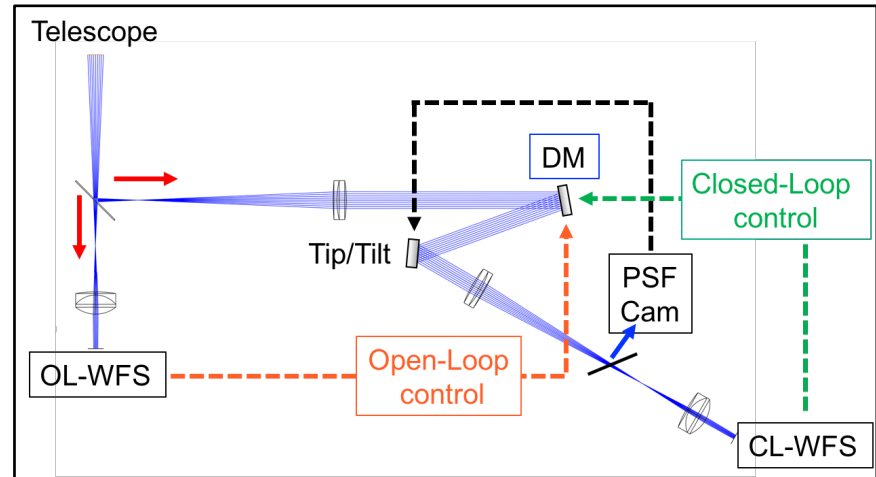
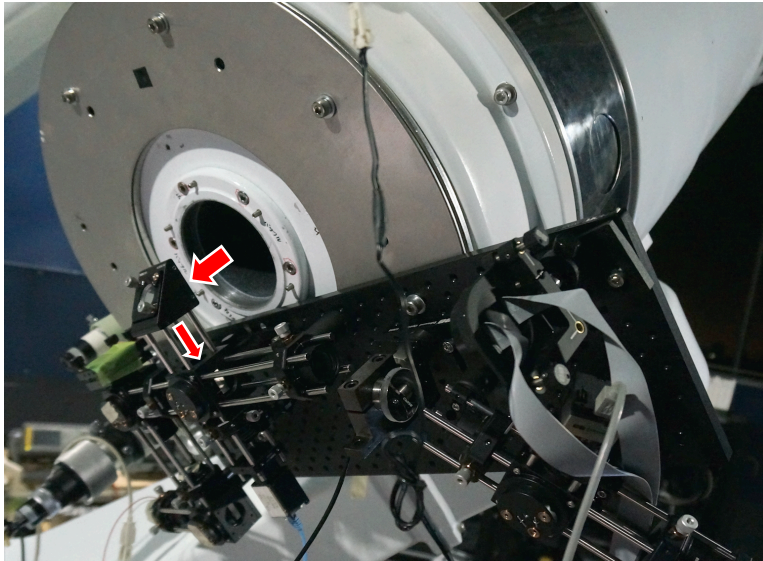
4. 波面補償の実験結果

5. まとめ

開ループ試験用補償光学系

51cm 望遠鏡→
主鏡裏側

補償光学装置→



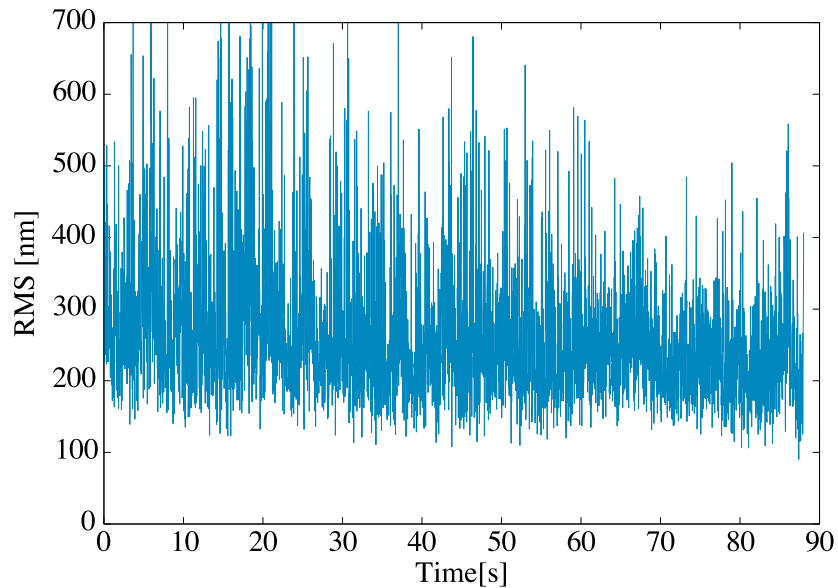
東北大 51cm 望遠鏡装着用の“開ループ制御試験用補償光学系”の開発を行った。

- ・可変形鏡(DM) : Adaptica社 “Saturn”、メンブレン型、48素子
→ 最大ストローク <math><10\mu\text{m}</math>
- ・波面センサ : EO-2018M(CMOS) + MLA(pitch 300 μm , focal 18.8mm)
→ 最速 50Hz (読み出し領域 700pix \times 700pix)

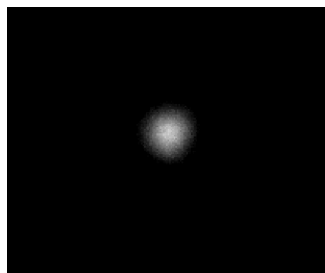
➤ “遅い”かつ“小ストローク”なAOシステムのため、閉ループ制御用の波面センサのRMS[nm]で評価

小型補償光学系での波面測定

2016/11/16/22:10~ 測定天体 カペラ(M_V 0.7)



星像(seeing)



平均の波面RMS(w/o Tip/Tilt) : 282.39 [nm]

- フリード長 r_0 (λ :500nm)

$$\sigma_{tiltcomp}^2 = 0.134 \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3} [rad^2]$$
$$\rightarrow r_0 \sim 3.34 [cm]$$

- 星像のFWHM (λ :500nm)

$$FWHM_{long\ exp} = 1.22 \left(\frac{\lambda}{r_0} \right)$$
$$\rightarrow 3.77 [arcsec]$$

- ✓ PSFカメラでの星像のFWHMは

$$FWHM_{from\ PSF} = 3.88 [arcsec]$$

両者はおおよそ一致。

1. 多天体補償光学の課題

2. 東北大51cm 望遠鏡用 開ループ制御補償光学系の開発

3. 開ループ制御のためのCalibration手法

4. 波面補償の実験結果

5. まとめ

開ループでの制御方法 - Learn & Apply 法

- 開ループ波面センサ(OL-WFS)では、可変形鏡の制御行列を生成できない。
→ 開ループ波面センサの波面 \vec{w}_{CL} を、閉ループ波面センサの波面 \vec{w}_{OL} に変換することでDMを制御
→ $\vec{w}_{CL} = R \vec{w}_{OL}$

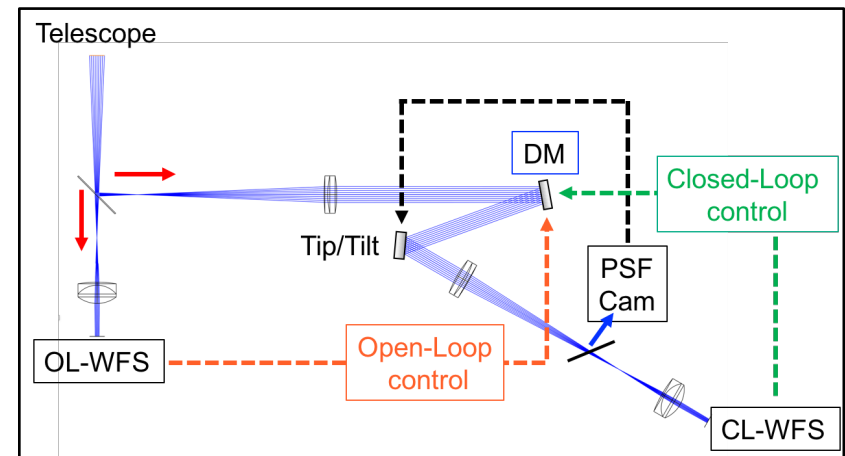
- Learn&Apply法 (Vidal et al. 2014)**

- ✓ 開ループ波面と閉ループ波面を関係づける行列 R は

$$R = \operatorname{argmin}(\|M_{CL} - R M_{OL}\|^2)$$

$$\rightarrow R = (M_{CL} M_{OL}^t)(M_{OL} M_{OL}^t)^{-1}$$

で求めることができる。



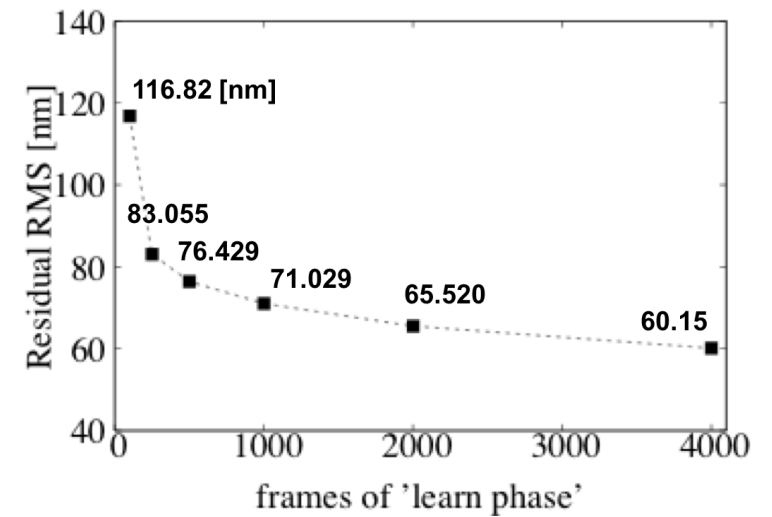
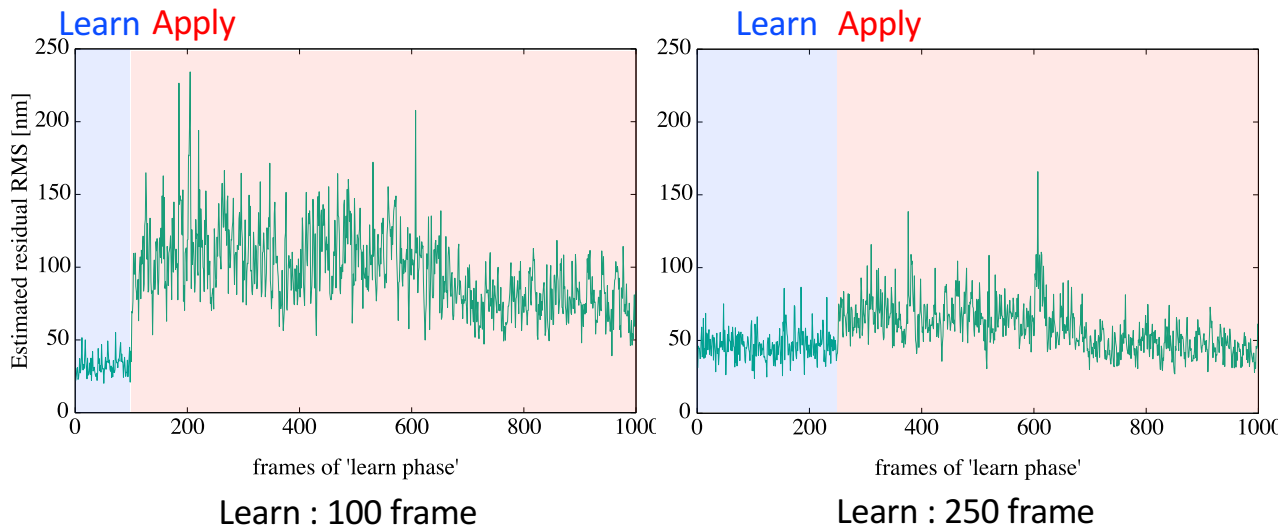
この行列の作成のために、同時に波面を取得・格納を行い M_{CL} 、 M_{OL} を生成する。→ Learn-Phase

$$M_{CL} = [\vec{w}_{CL \text{ frame}=1}, \dots, \vec{w}_{CL \text{ frame}=n}], M_{OL} = [\vec{w}_{OL \text{ frame}=1}, \dots, \vec{w}_{OL \text{ frame}=n}]$$

- ✓ 生成した関係行列 R を用いて開ループ波面 \vec{w}_{OL} から閉ループ波面を推定 $\vec{w}_{EstCL} = R \vec{w}_{OL}$ → Apply-Phase
- ✓ 推定した波面について可変形鏡の制御行列を作用させることで、波面補償を行う。
- Learn&Applyを較正手法として用いる。

On-SkyでのLearn & Apply 法による較正

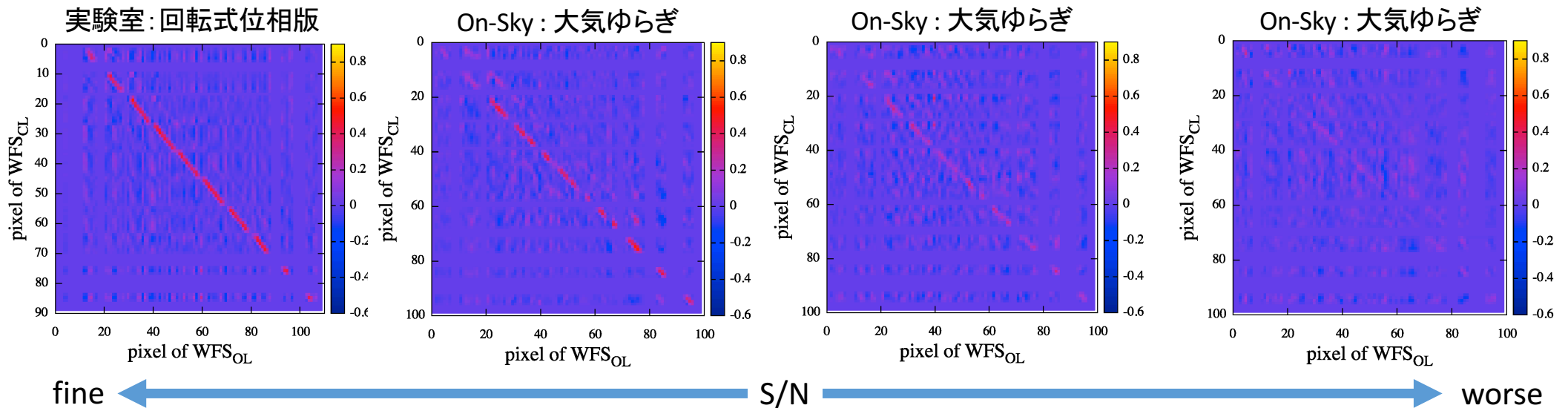
推定残差($\vec{w}_{CL} - R\vec{w}_{OL}$)とLearn-Phaseのフレーム数の関係



- Learn-Phaseに使用するフレーム数が少ないと、Learn-phaseに特化した推定行列になってしまう(オーバーフィッティング)。
- On-Skyでは推定誤差 ~ 60 [nm] を達成しているが、大気の状態(風速)や波面測定のS/Nに依存する。

波面センシングのS/Nと推定行列の変化

推定行列 R ($\vec{w}_{CL} = R \vec{w}_{OL}$) のLearn-Phaseでの波面センシングのS/Nによる変化
Learn-Phase : 4000 frames



- ✓ noisyな波面測定では、両波面センサ間の相関を得られない。
- ✓ 推定行列のコントラスト(=推定精度)は 実験室 > On-Sky

1. 多天体補償光学の課題

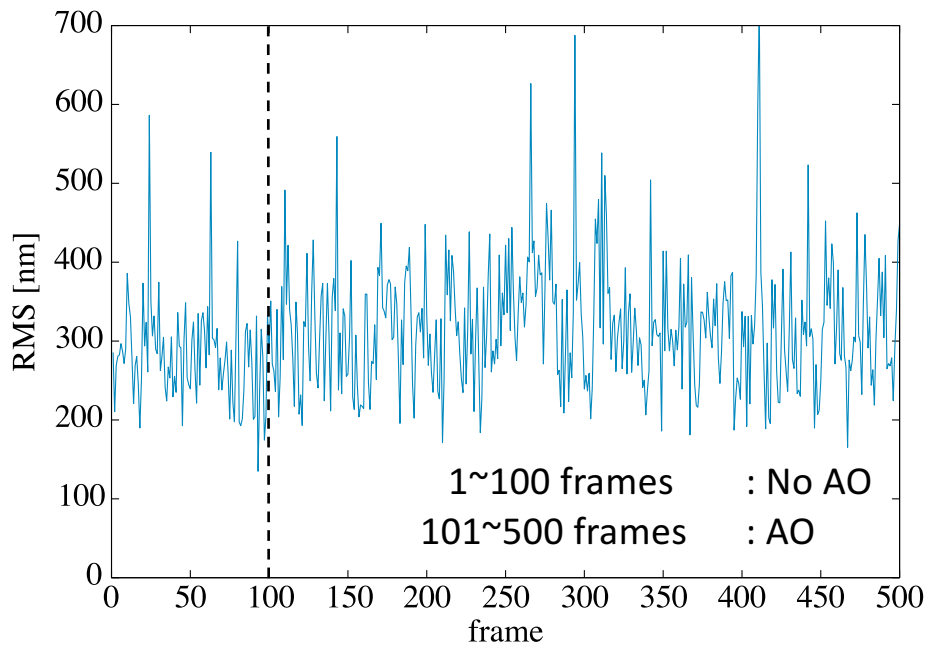
2. 東北大51cm 望遠鏡用 開ループ制御補償光学系の開発

3. 開ループ制御のためのCalibration手法

4. 波面補償の実験結果

5. まとめ

小型補償光学系での波面補償 : On-Sky



[結果]

閉ループ波面センサでの測定では、

	RMS
OFF AO	282.39 [nm]
ON AO	318.68 [nm]

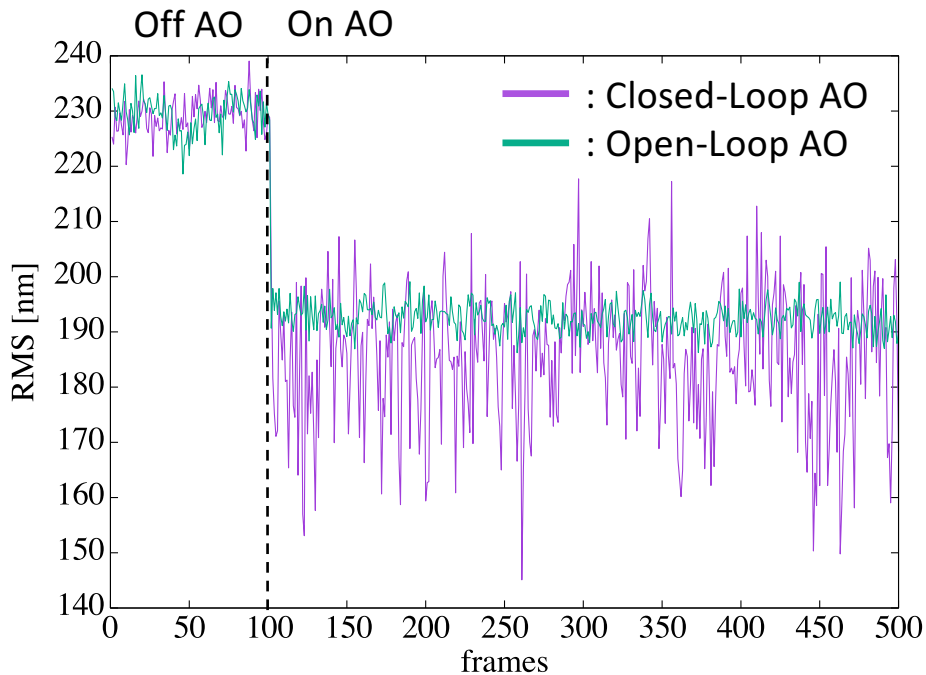
※ w/o Tip/Tilt成分

→ 波面補正ができていない...

[原因]

- AO装置の繰り返し速度が低い : $f_{AO} \sim 45$ Hz
要求される繰り返し速度 f_g は $f_g > 200$ Hz
(上空の風速 > 10 m/s を仮定、 $r_0 \sim 3$ cm)
- 波面センサ用のカメラで制限されている:
オーバーヘッド : 17 ms (700 pix × 700 pix 選択読み出し)

小型補償光学系での波面補償：実験光学系



- 実験室内で、大気位相版(r_0 : 4~6 cm)を用いた実験（固定式の位相版のためゆらぎの時間変動ない）
- 左図実験では、両制御でのGain = 1.0としている。（そのためClosed-Loop AOの分散が大きい）

[結果]

	RMS
OFF AO	229.31 [nm]
Closed-Loop AO	185.33 [nm]
Open-Loop AO	192.61 [nm]

※ w/o Tip/Tilt成分

補正性能は、 Closed-Loop AO > Open-Loop AO > No AO

今後は、

- 実験室ベースでの波面補償の比較実験を行う。
- 補正性能の違いについて定量的に評価を行う。

1. 多天体補償光学の課題
2. 東北大51cm 望遠鏡用 開ループ制御補償光学系の開発
3. 開ループ制御のためのCalibration手法
4. 波面補償の実験結果
5. まとめ

まとめと今後の展望

まとめ

- ✓ Closed-/Open-Loop 両制御が行える補償光学系(装置・ソフト)を開発した。
- ✓ Open-Loopの制御のCalibration手法として、Learn&Apply法を応用した。
- ✓ On-Skyでの波面補償を試みたが、大気ゆらぎの時間変動に対して、AOの補正速度が遅いため補正が行えなかった。

今後の展望

- ✓ カメラをより高速なものに置き換え、On-Skyでの波面補償を試みる。
- ✓ 実験室でOpen-/Closed-Loop制御の比較実験を行い、Open-Loopの波面補償について性能評価を行う。

➤ ポスター(スライド)を展示しています。質問やアドバイスをいただけると幸いです。