

CTA報告176: CTA大口径望遠鏡初号機における 分割鏡制御システムの試験運用現状

深見哲志^A, 野田浩司^A, levgen Vovk^A, 稲田知大^A, 奥村暁^B, 小原光太郎^C, 加賀谷美佳^A, 片桐秀明^C,
齋藤隆之^A, 手嶋政廣^{A,D}, 千川道幸^A, 山本常夏^E, 吉田龍生^C, 他 CTA-Japan Consortium

東大宇宙線研^A, 名大 ISEE/KMIB^B, 茨城大理^C, マックスプランク物理学研究所^D, 甲南大理工^E

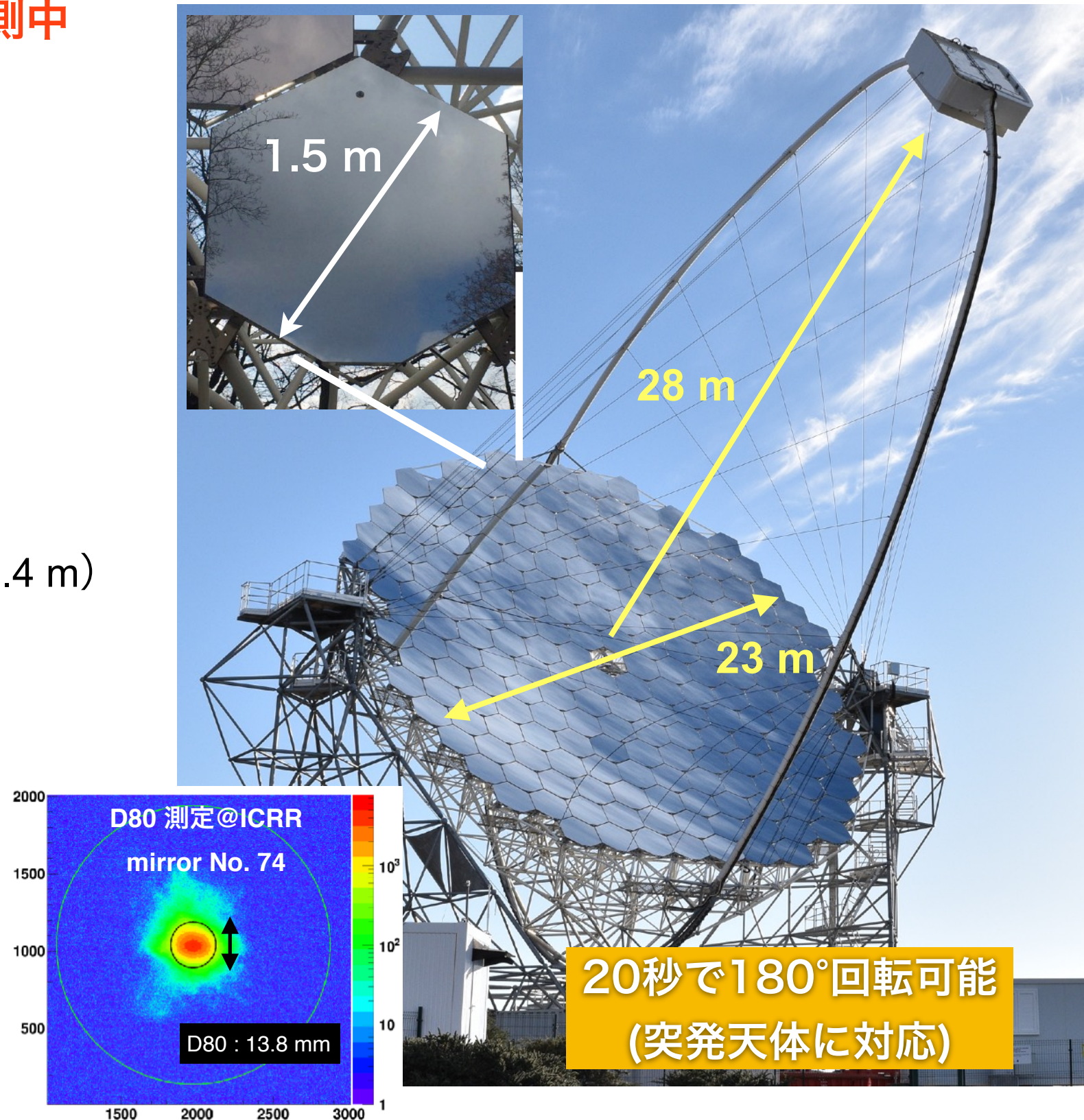
2018年10月完成、現在は安定観測中

望遠鏡の光学系仕様

- 放物面鏡 (分割鏡**198**枚で構成)
- 口径 : **23 m** (反射面積 : $\sim 400 \text{ m}^2$)
- 焦点距離 : **28 m**

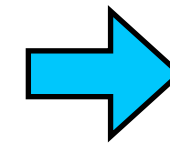
分割鏡の仕様

- 正六角形球面鏡 (曲率半径 : 56 - 58.4 m)
- 対辺距離 : **1.5 m** (表面積 : 2.0 m^2)
- 質量 $\sim$ **50 kg** (アルミハニカム構造)
- 鏡面5層コーティング
- 結像性能(仕様値) : $< \mathbf{16.7 \text{ mm}}$ @ 1f
(焦点面pixelの1/3)

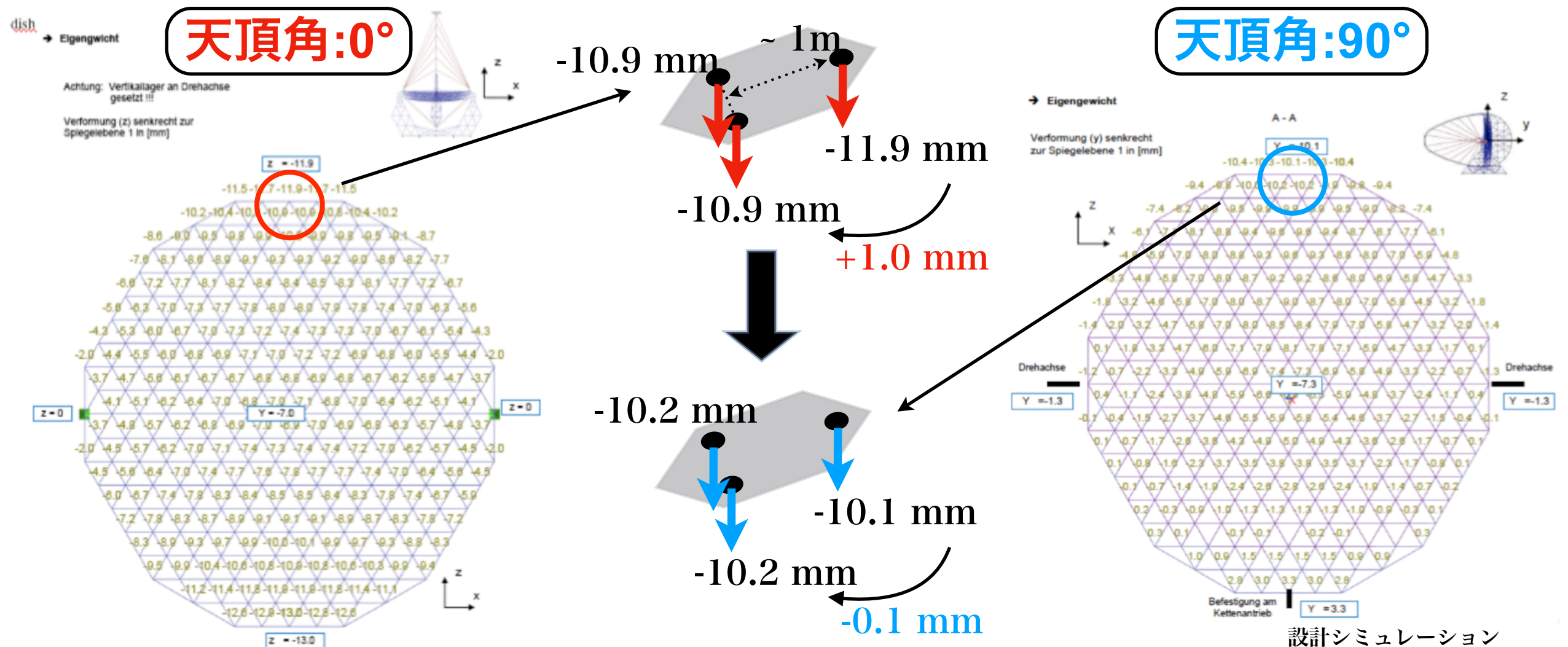


分割鏡に最大**4分角**程度の歪み (焦点面1ピクセル以上)

望遠鏡の自重による天頂角に依存した構造体の歪み
強風、気温による構造体の変形



鏡面の方向ずれを観測中に
リアルタイムで制御



設計シミュレーション
Baseline Design Document for LST, 2013

観測時2つのリアルタイム補正モード

1. Look-Up Table (LUT)モード

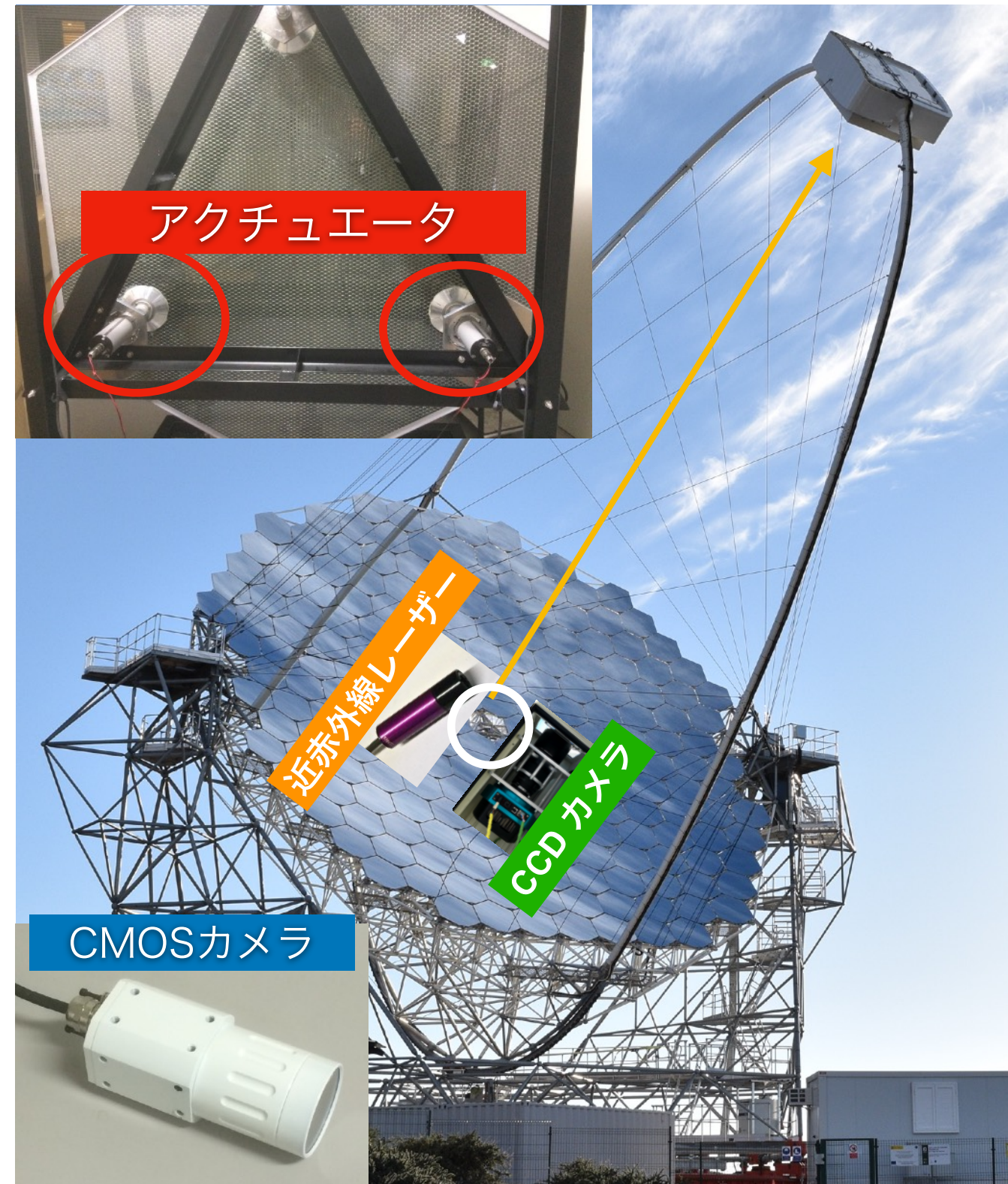
- 通常観測前の校正試験として、明るい星を追尾し、天頂角ごとに各分割鏡スポットを**CCDカメラ**で撮影しながら方向を調整し、調整時の**アクチュエータ**の長さをテーブルに記録する
- 通常観測時は観測天体の天頂角に対応したテーブルを読み出して調整

歪みの天頂角依存性を補正

2. CMOSカメラモード

- 各分割鏡の**CMOSカメラ**が焦点面の**参照レーザースポット**を撮影し、スポット位置のずれからリアルタイムの方向調整を行う

温度変化や強風での方向補正も可能



観測時2つのリアルタイム補正モード

本講演

1. Look-Up Table (LUT)モード

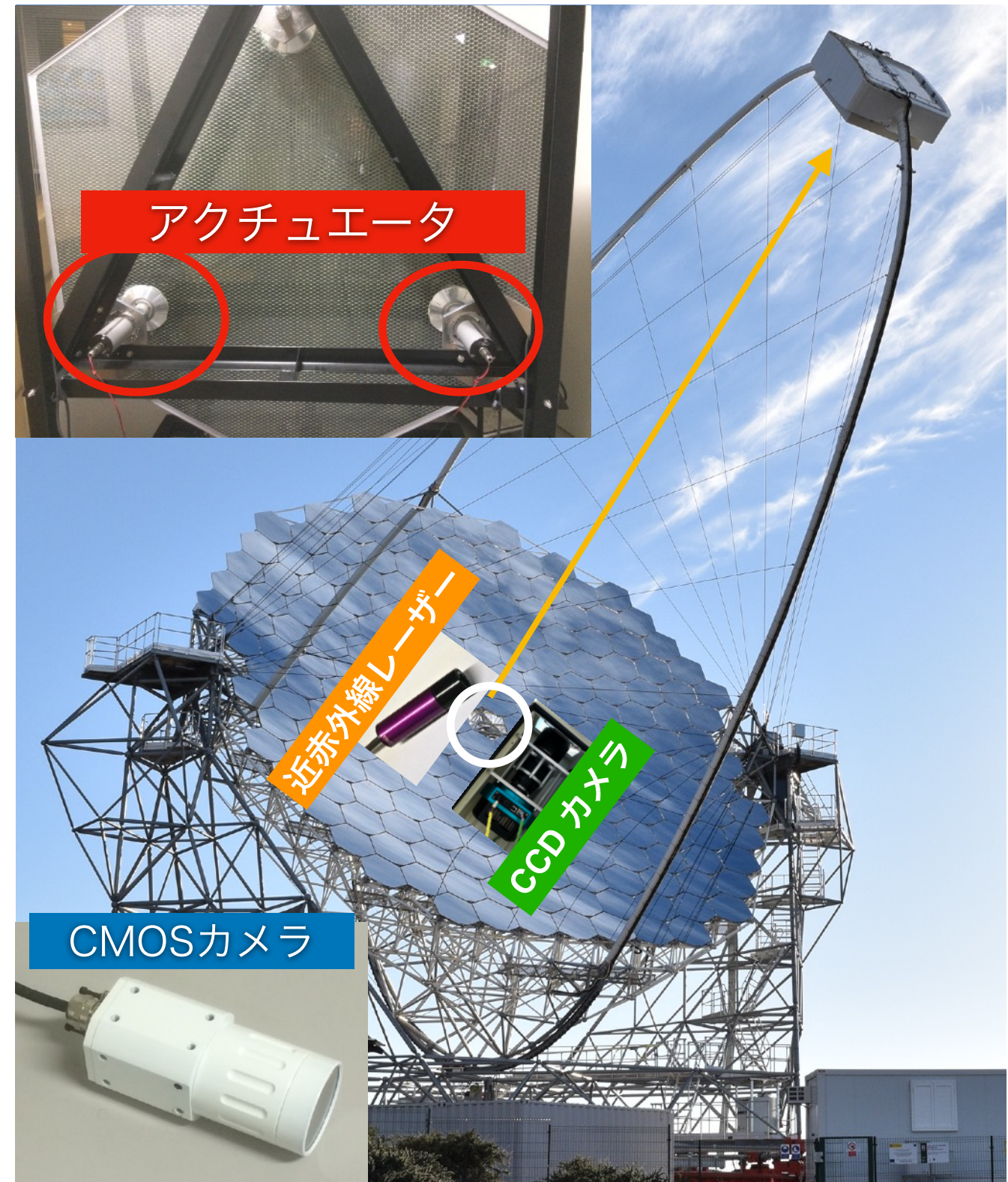
- 通常観測前の校正試験として、明るい星を追尾し、天頂角ごとに各分割鏡スポットを**CCDカメラ**で撮影しながら方向を調整し、調整時の**アクチュエータ**の長さをテーブルに記録する
- 通常観測時は観測天体の天頂角に対応したテーブルを読み出して調整

歪みの天頂角依存性を補正

2. CMOSカメラモード **準備中**

- 各分割鏡の**CMOSカメラ**が焦点面の**参照レーザースポット**を撮影し、スポット位置のずれからリアルタイムの方向調整を行う

温度変化や強風での方向補正も可能

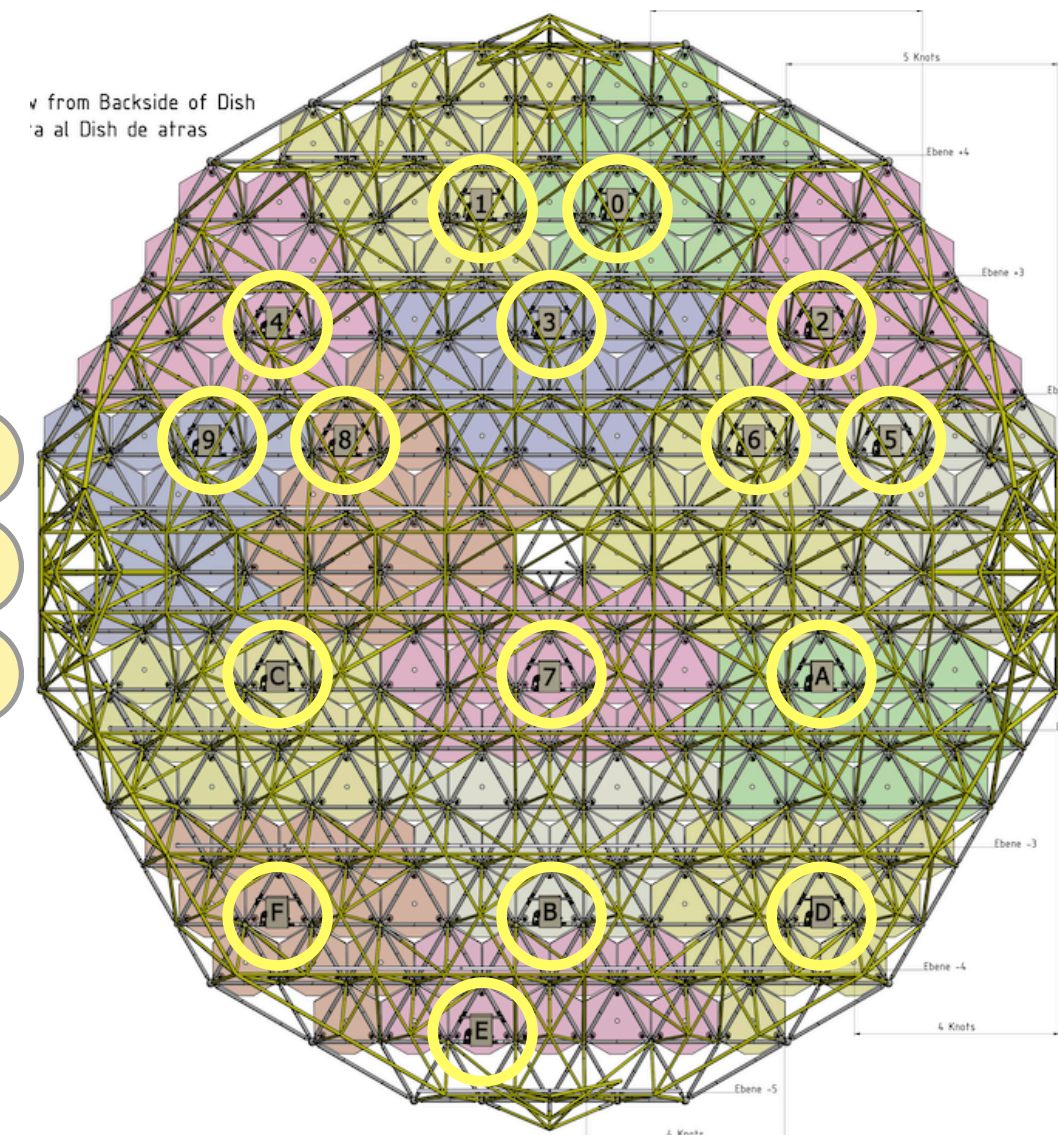
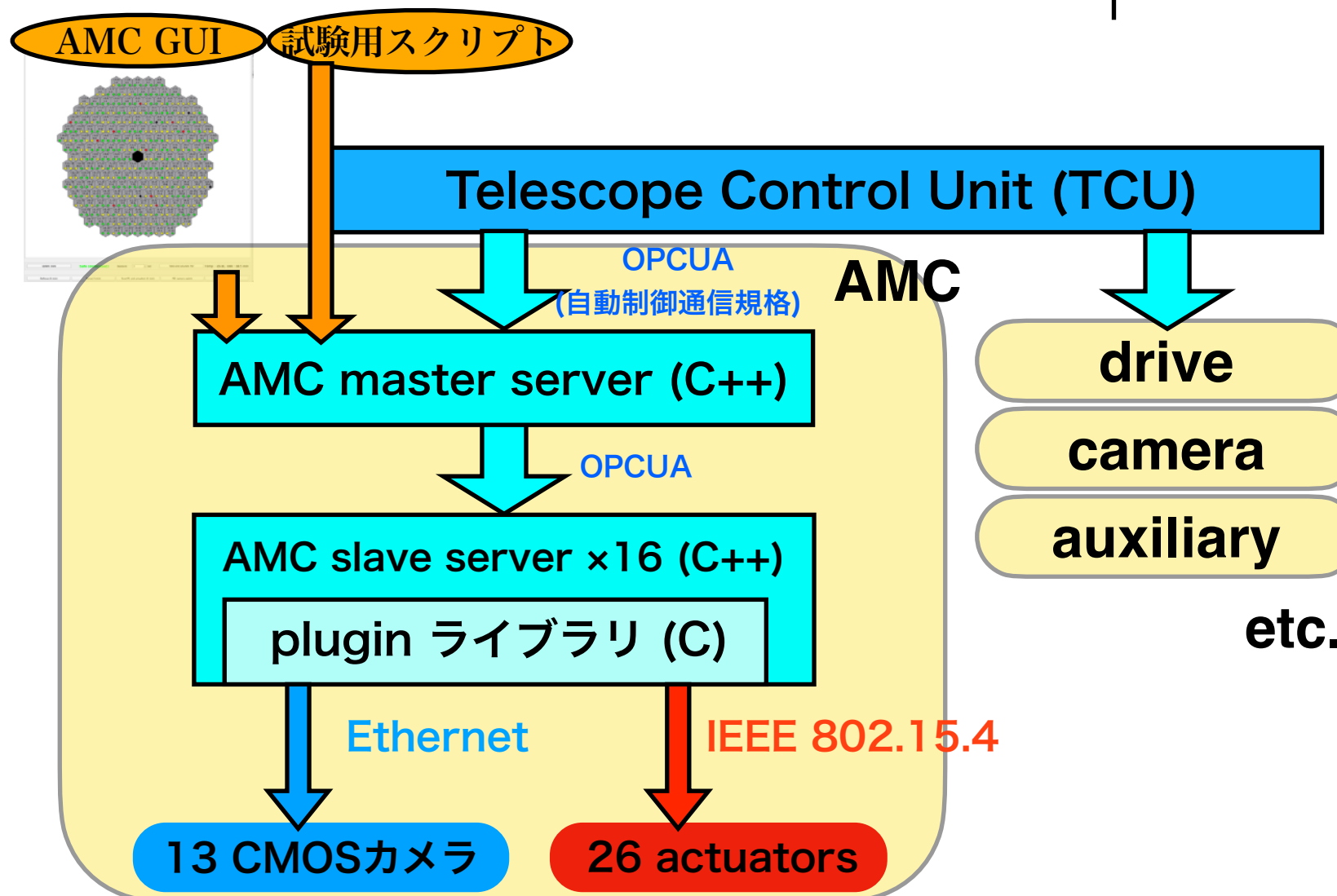


ソフトウェア構造：

- AMC master server (地上): slave serverを統括
- 16 × AMC slave server (望遠鏡内):
アクチュエータ、CMOSカメラを直接操作

ハードウェア構造：

- 望遠鏡内に16 個のAMC制御用ボックス
 - PC (slave server) - ネットワークスイッチ
 - DC変圧器 - 温湿度計
- 各ボックスが最大13枚のミラーを制御



1. ミラースポット画像の撮影

step 0 : ある天頂角範囲で明るい星を追尾

Step 1 : 1グループの全ミラースポット(12-13枚)を
defocus positionからスクリーンから少し離れた
場所に移動

Step 2 : グループの各ミラーについて

Step a : スクリーン中心付近にスポットを移動

Step b : 望遠鏡中心のCCDカメラで撮影

Step c : 片方のアクチュエータを数mm伸ばす

Step d : 望遠鏡中心のCCDカメラで撮影

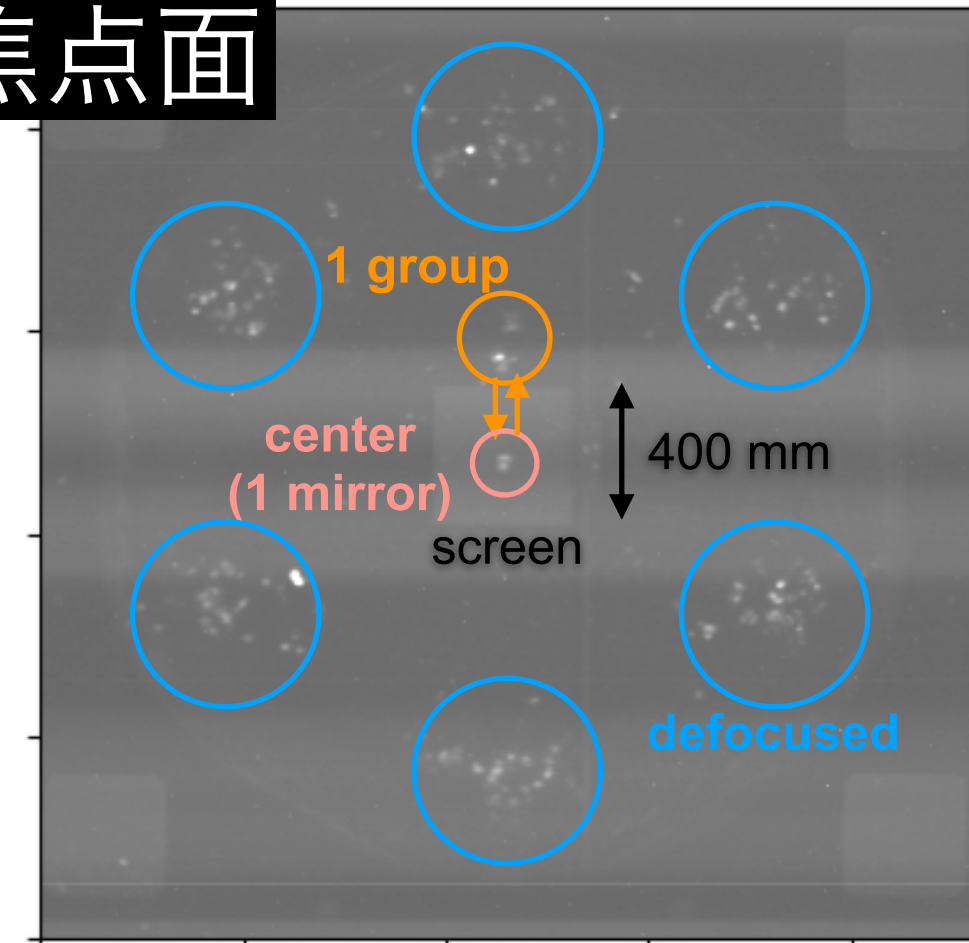
Step e : もう片方のアクチュエータを数mm伸ばす

Step f : 望遠鏡中心のCCDカメラで撮影

Step g : 再びスクリーン中心から少し離れた場所に移動

Step 3 : グループをdefocus positionに戻す

焦点面

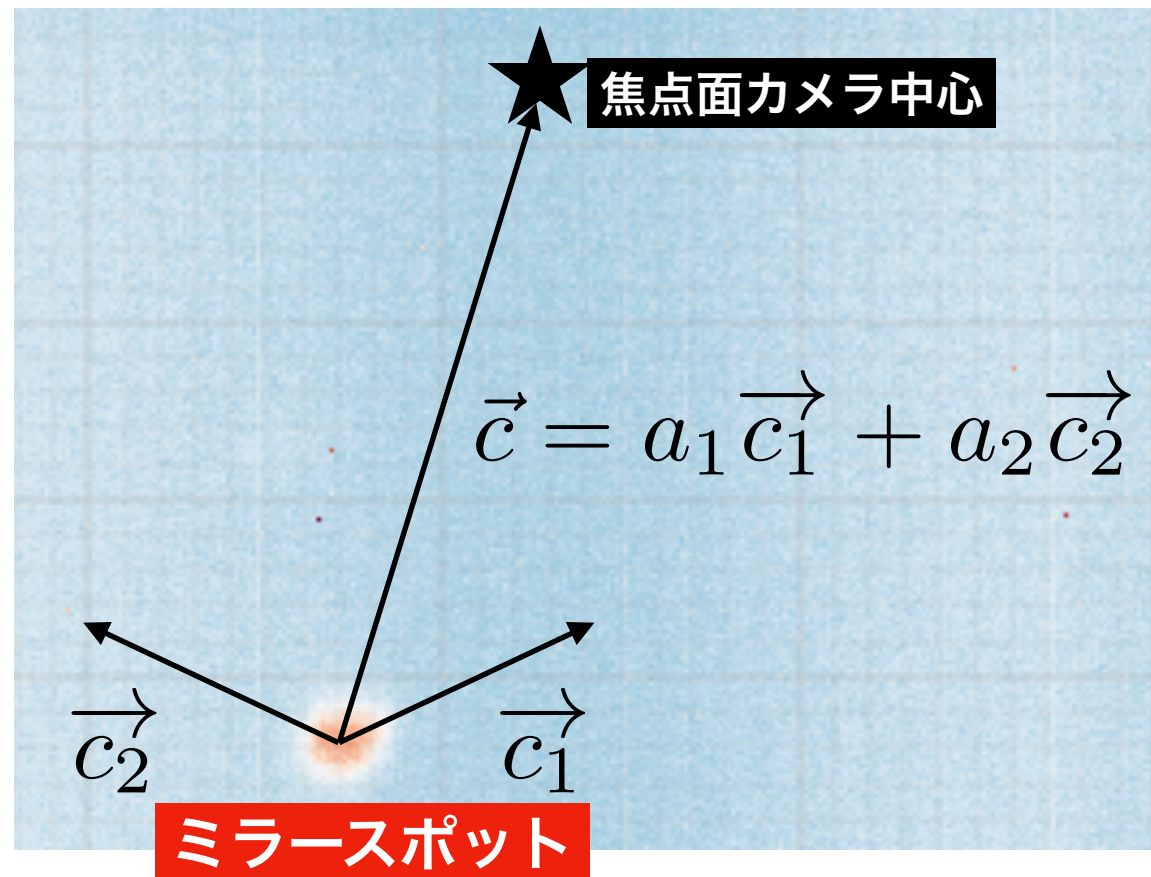


アクチュエータ変位とスポット変位の
変換係数の計算に使用
(各ミラーで最初の一度だけ)

スクリプトにより上記手順は全自動化!

2. スポットの画像解析

- 各ミラーについて
 - アクチュエータ単位長さあたりのスポット変位 $\vec{c}_1$ $\vec{c}_2$ を計算 (p7 step2, c-fの画像を解析)
 - ミラースポットの位置と焦点面カメラの中心の変位 $\vec{c}$ を計算 (p7 step2, bの画像を解析)
 - 各アクチュエータの伸縮長(a_1 a_2)を下式で計算 ➡ **伸縮後の長さをLUTとして記録**



$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = (\vec{c}_1 \ \vec{c}_2)^{-1} \vec{c}$$

$\vec{c}_1$: 単位ベクトル (アクチュエータ 1)

$\vec{c}_2$: 単位ベクトル (アクチュエータ 2)

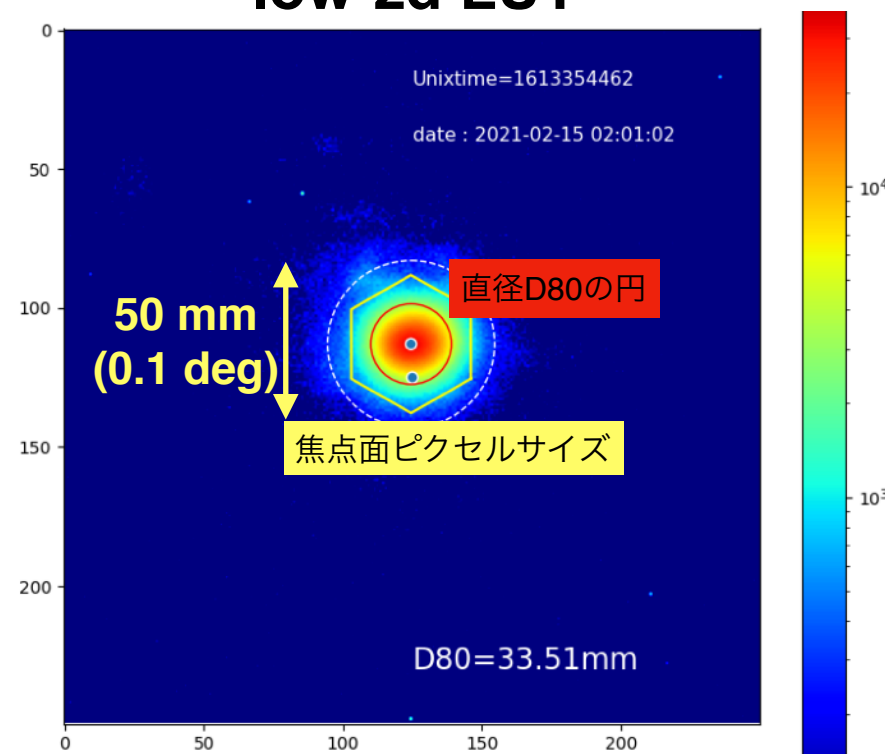
$\vec{c}$: 焦点面カメラ中心

$(a_1 \ a_2)$: アクチュエータの伸縮長

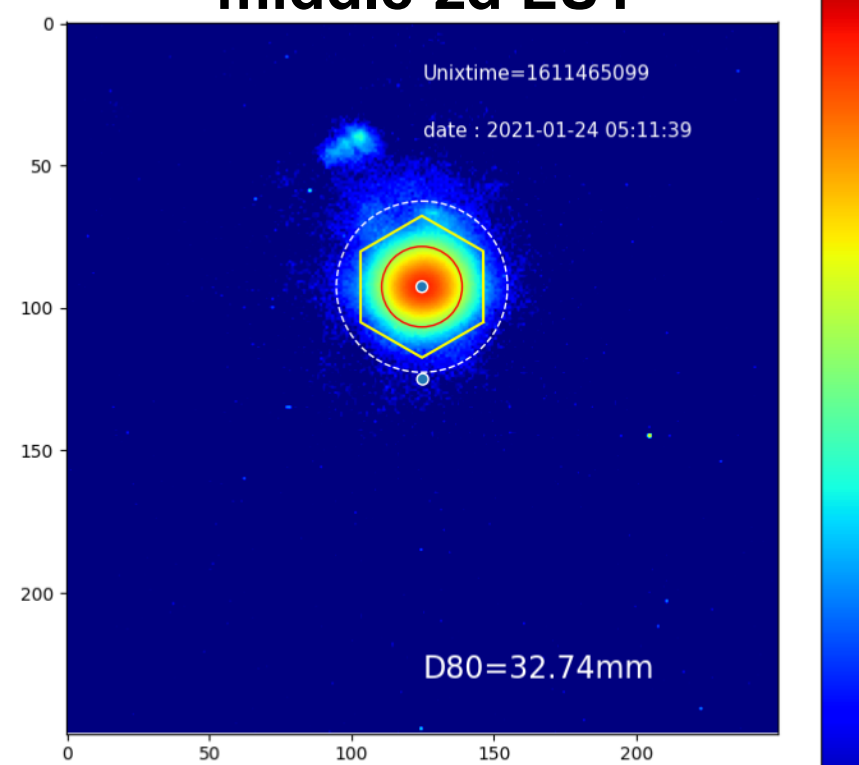
- 複数の天頂角範囲でLUTを作成
 - 小天頂角 : 15 - 25 deg - 中天頂角 : 35 - 45 deg - 大天頂角 : 50 - 60 deg
- D80 (80%の光量が入る円の直径): 3つの範囲とも~32-33 mm

焦点面検出器1ピクセル(50 mm)に十分収まる結像性能を実現

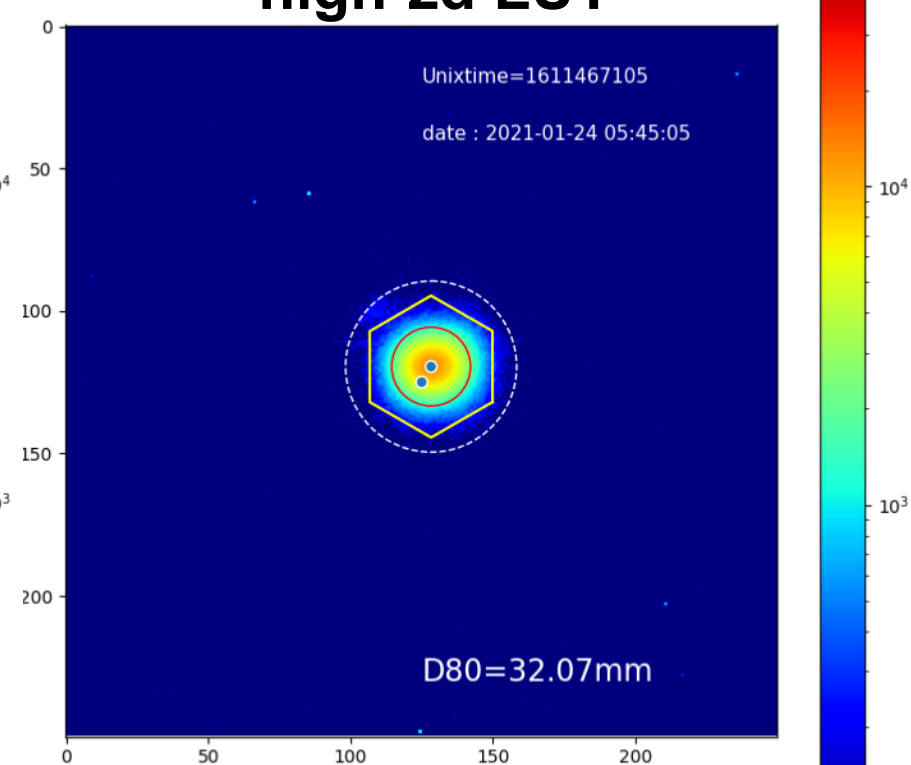
low-zd LUT



middle-zd LUT



high-zd LUT



- 実際の天体追尾では天頂角が連続的に変化

➡ 求めた3つの天頂角範囲のLUTの値を内挿して各天頂角でのLUTを計算

- 内挿方法：

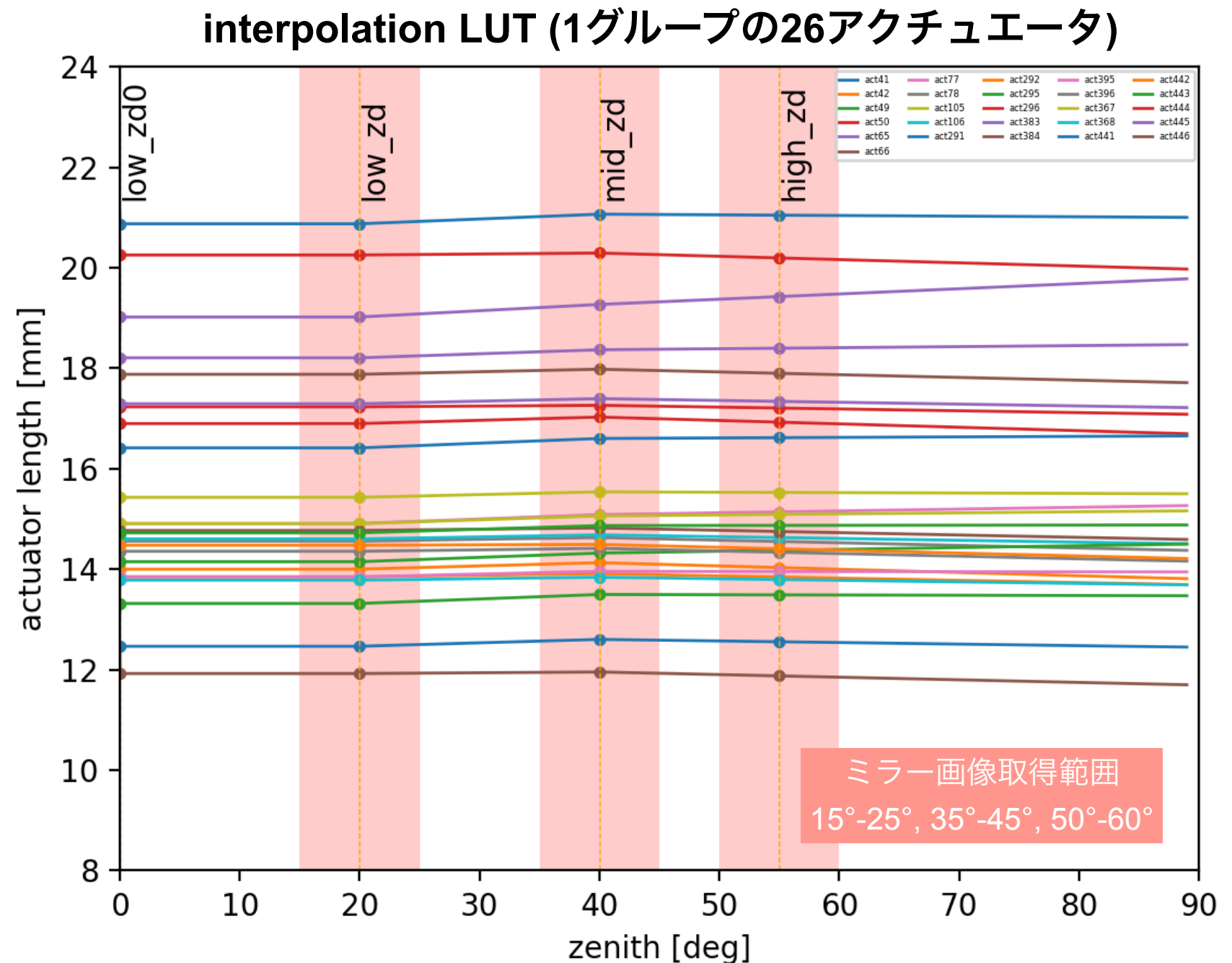
- 基準点の決定

- 0° , 20° , 40° , 55°

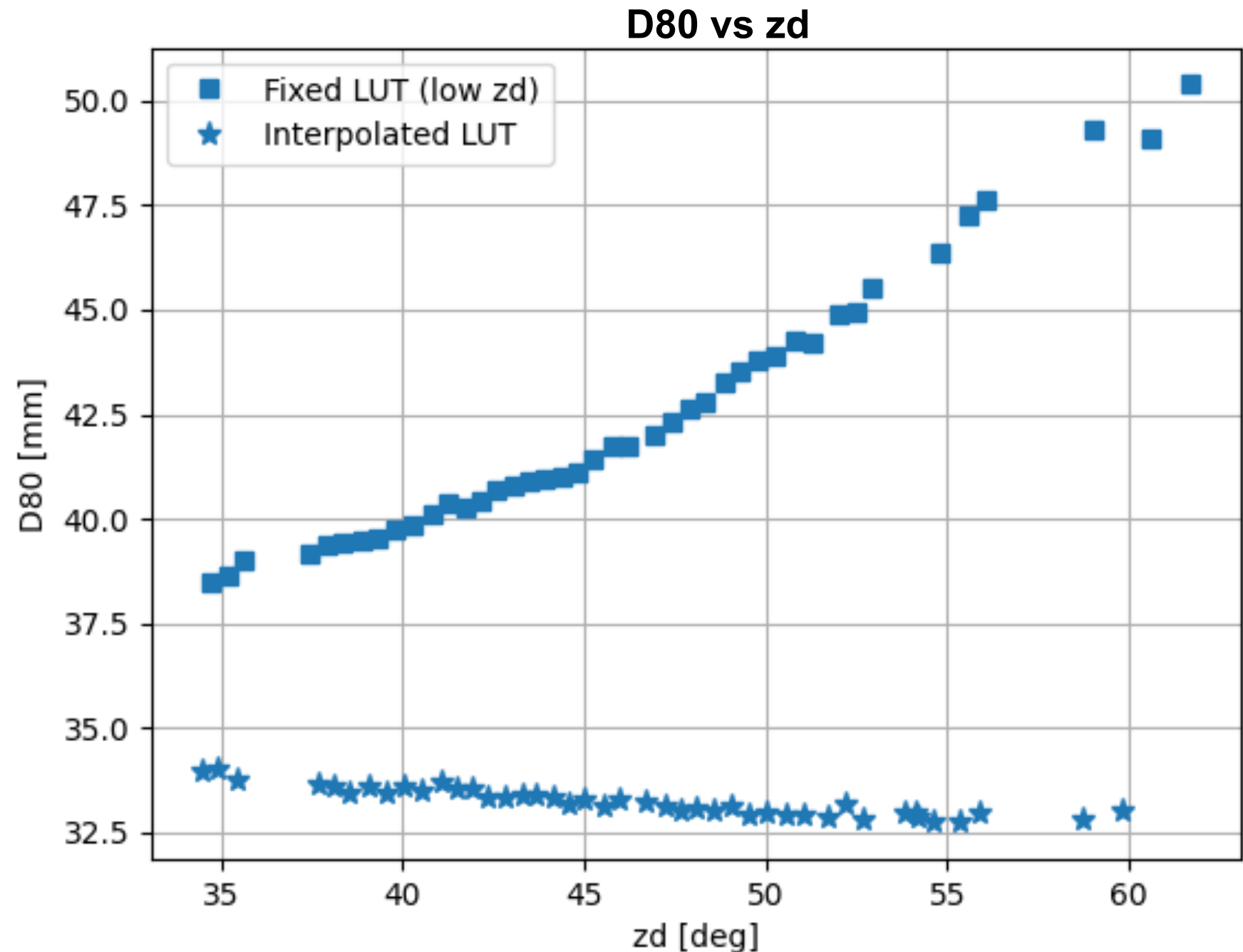
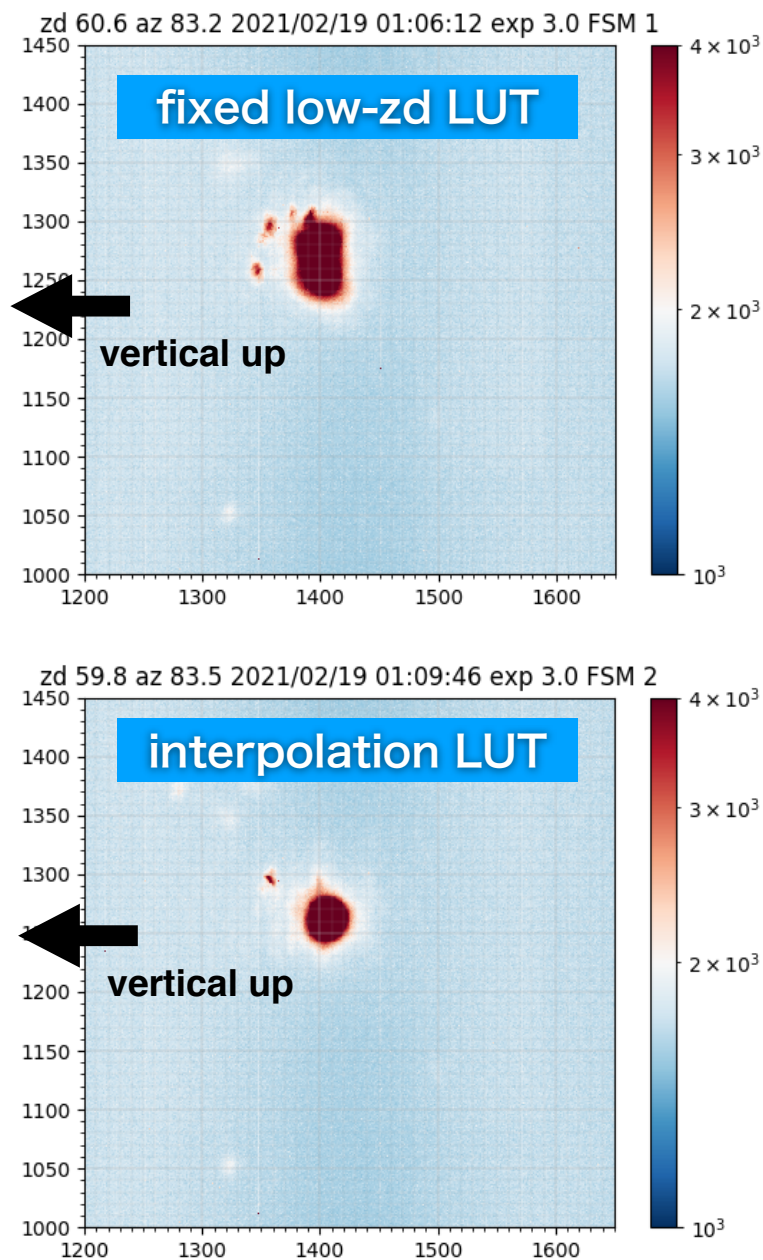
- 0° は 20° と同じ値を使用

- 補完方法

- 基準点間を線形補完



- 中-大天頂角において、**小天頂角LUT**と**内挿LUT**でのスポットサイズを比較
 - 小天頂角LUT：大天頂角で大きく、天頂角とともに低下
 - **内挿LUT**：広い範囲でほぼ一定



- 基準天頂角を 20° , 40° , 55° からミラー毎に異なるスポット撮影時の天頂角に変更
 - スポット撮影時に星の天頂角が徐々に変化（現スクリプトで1グループ20分：最大 5° ）

➡ ミラー毎により正確なLUT

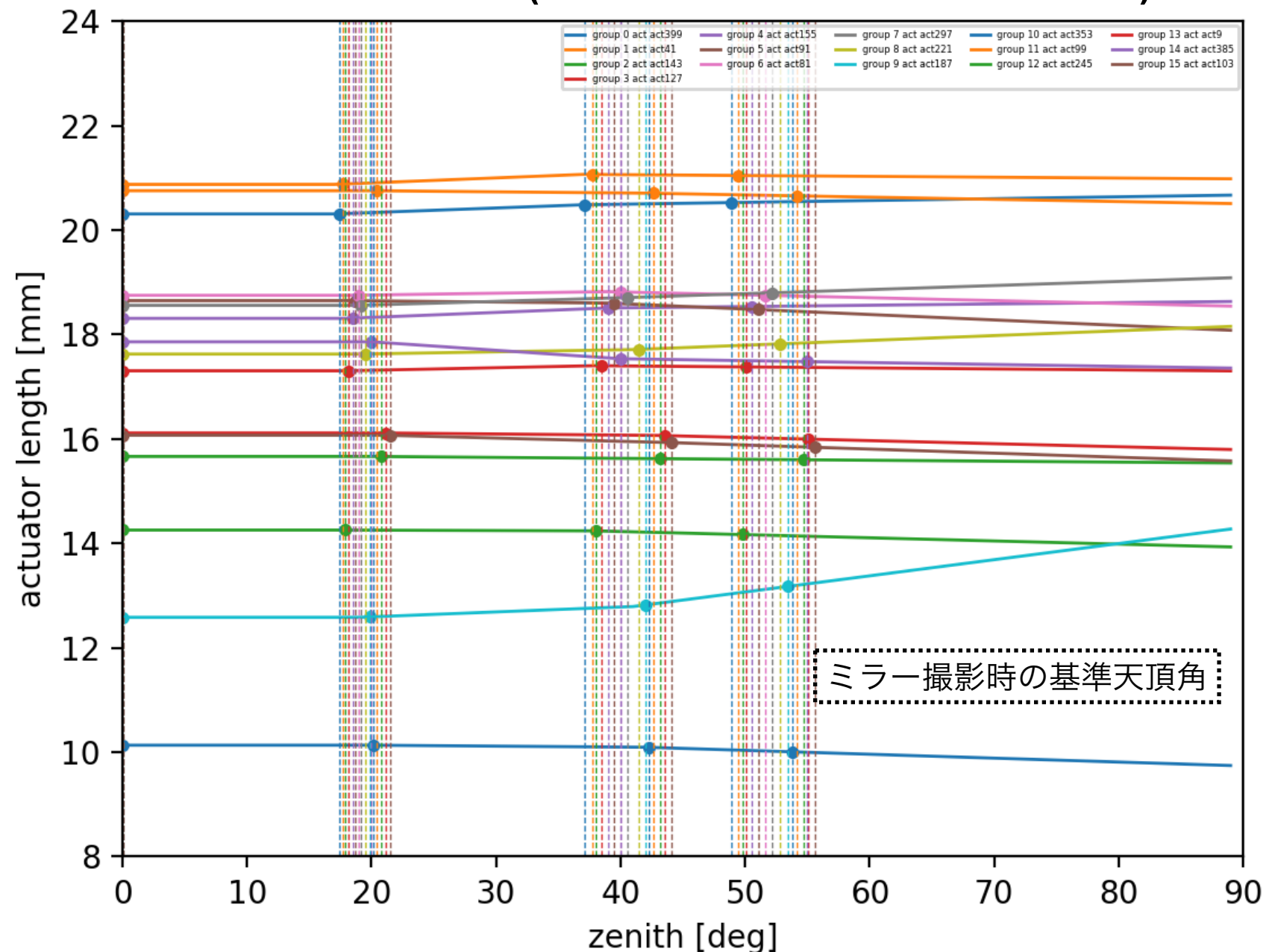
- 内挿方法：

- 基準点の決定
 - スポット撮影時の天頂角
 - 0° は小天頂角と同じ値

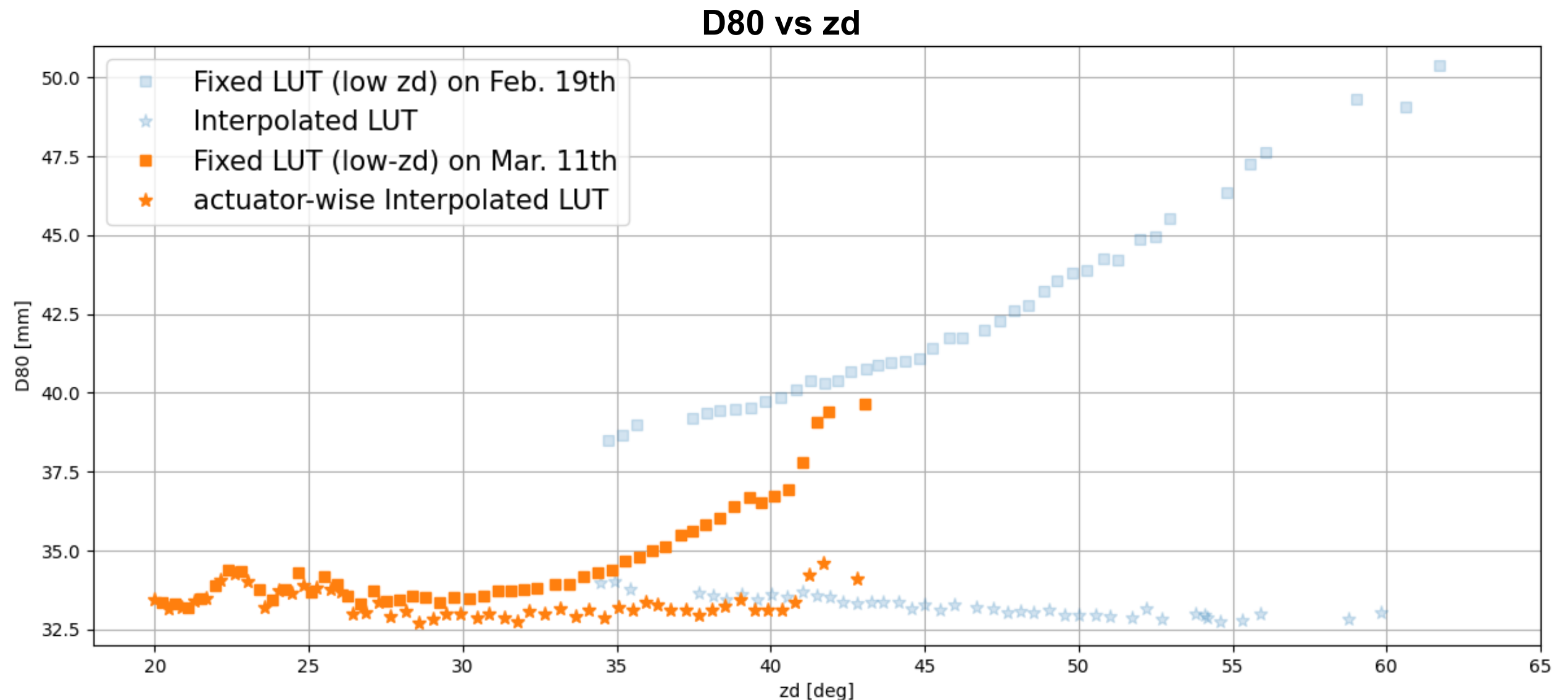
- 補完方法

- 基準点間を線形補完

修正版 内挿LUT (各グループから1アクチュエータ)



- 小-中天頂角において、**小天頂角LUT**(前出)と**新しい内挿LUT**でのスポットサイズを比較
 - 小天頂角LUT : 中天頂角から天頂角とともに低下
 - **内挿LUT : 小中天頂角でほぼ一定**
 - **zenith 35°-40°では2種類の内挿LUTがほぼ同じD80値を示している**



まとめ

- LST初号機の分割鏡の初期方向補正試験を行った。
- AMCの2種類の運転モードのうちLUTモードでの観測を目指し、LUTの作成を行った。
- 3種類の天頂角範囲でLUTを作成し、それぞれのLUTがD80 ~33 mmの集光精度を達成した。
- 2種類のinterpolation LUTを求め、広い天頂角範囲でほぼ一定の集光性能が得られることを確認した。

今後

- 集光精度向上のため、異なる内挿方法でのinterpolation LUTの精度比較を行う。
- CMOSモードを実装する。