

広帯域分光装置NINJAおよび スリットへの導入手法の開発

東京大学理学系研究科天文学専攻修士2年
幸野友哉

東谷千比呂(PM), 守屋堯(PS), 吉田道利(PI),
尾崎忍夫, 柳沢顕史, その他NINJA開発チーム

目次

1. すばる望遠鏡 広帯域分光装置NINJA
 - 1-1. 概要
 - 1-2. 主なサイエンスターゲット
 - 1-3. 装置の仕様・特色
 - 1-4. 暗い天体の導入方法
2. Subaru A0188エンジニアリング観測
 - 2-1. Position Angleの残差測定
 - 2-2. Distortion
 - 2-3. 考察
3. まとめ
4. 今後のスケジュール

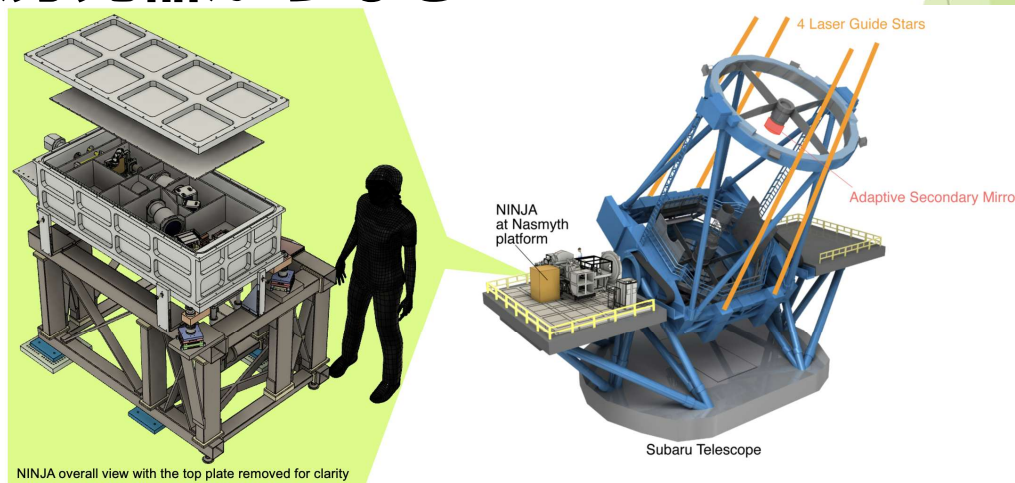
1. すばる望遠鏡 広帯域分光装置NINJA

1-1. 概要

NINJA(Near-INfrared and optical Joint spectrograph with Adaptive optics)

- 可視・近赤外同時分光装置
- **次世代補償光学LTAOに最適化**
- すばる望遠鏡の赤外ナスミス焦点に設置予定
- **可視光分光器と近赤外線分光器**からなる
- 近赤外分光器を開発中

NINJAおよびSubaru望遠鏡の外観



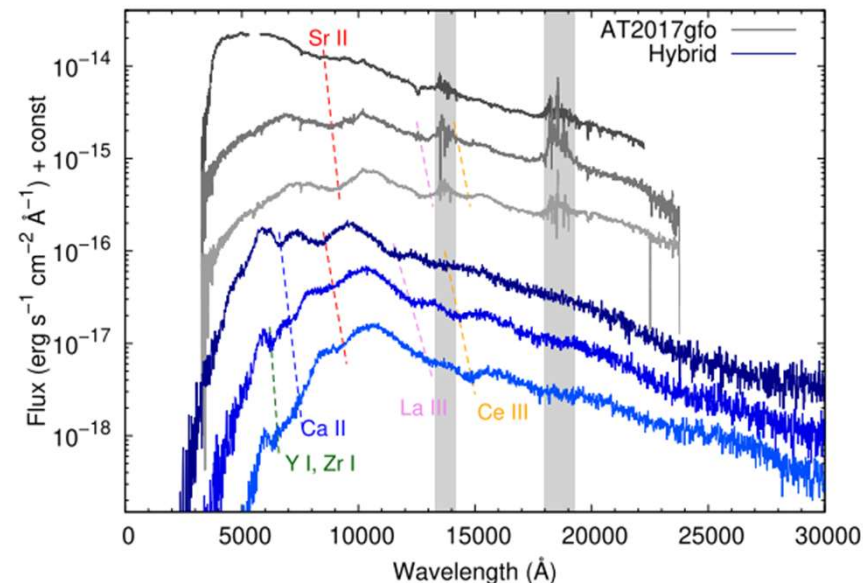
1-2 主なサイエンスターゲット

キロノバ観測による重い元素の起源解明

重力波イベントGW170817, キロノバAT2017gfo:

- 中性子星合体によるr過程での重元素合成を示唆
- キロノバの観測例はこの1例のみ
⇒さらなる観測データが必要

AT2017gfoの観測スペクトル(グレー)と、
キロノバのモデルスペクトル(青)
(Domoto et al. 2022)

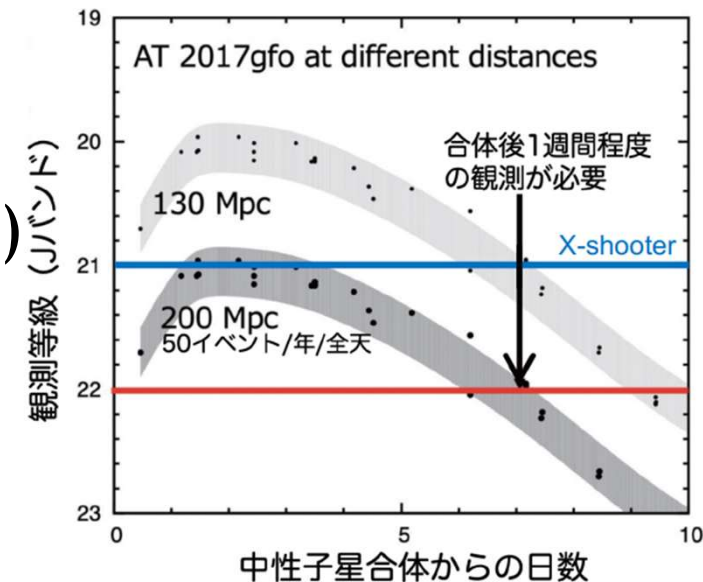


1-2 主なサイエンスターゲット

- 重元素からの放射の主な特徴は可視光と近赤外線に分布
- 合体後1週間で放出された物質の中心付近が見える
⇒**r過程で生成される元素の量の推定のため
1週間以上の分光観測が必要**
- キロノバのJ-band推定等級: 22等(距離200Mpc)
年間10個程度の観測機会が見込まれる

他の観測ターゲット:

- High-z galaxy
- クエーサー etc.

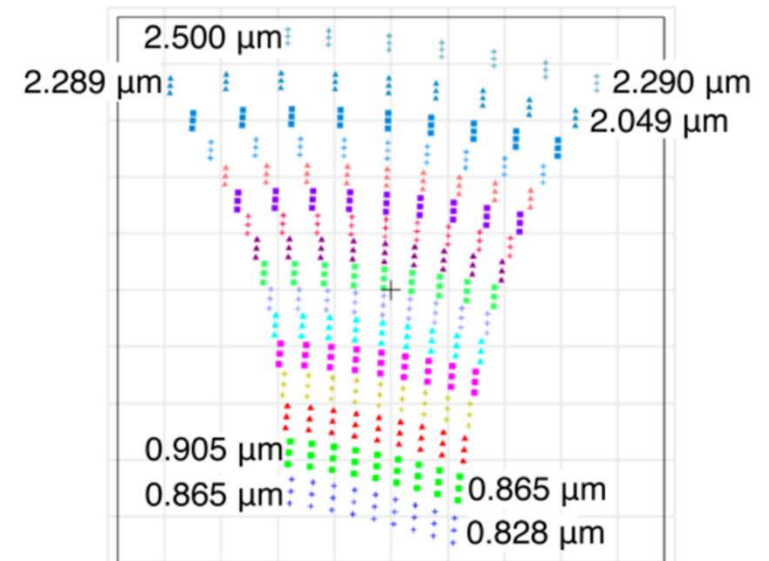


AT2017gfoが異なる距離にある場合の
Jバンド光度曲線

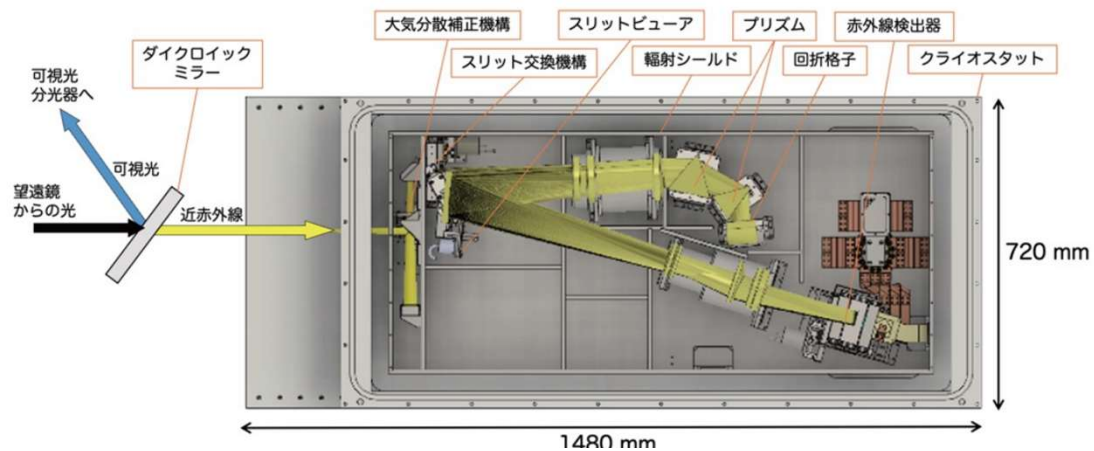
1-3. 近赤外線分光器の仕様・特色

- ・ エシエル分光器を採用(広い波長帯のスペクトルを同時に取得可能)
- ・ **2時間の積分時間でS/N=10, J=22magが達成可能**

波長範囲	0.83-2.5 μm
F比	13.9
スリット幅 (波長分解能)	0.35" (R~3300) 0.21" (R~5500) 0.5" (R~2310) 0.7" (R~1650)
スリット長	5"
検出器	HAWAII-2RG $\times$ 1 (2048 $\times$ 2048pix)
Pixel size	18 μm /pix
サンプリング (0.35"スリット)	3.3pix



検出器上のスペクトル配置



近赤外線分光器性能の諸元および内部レイアウト

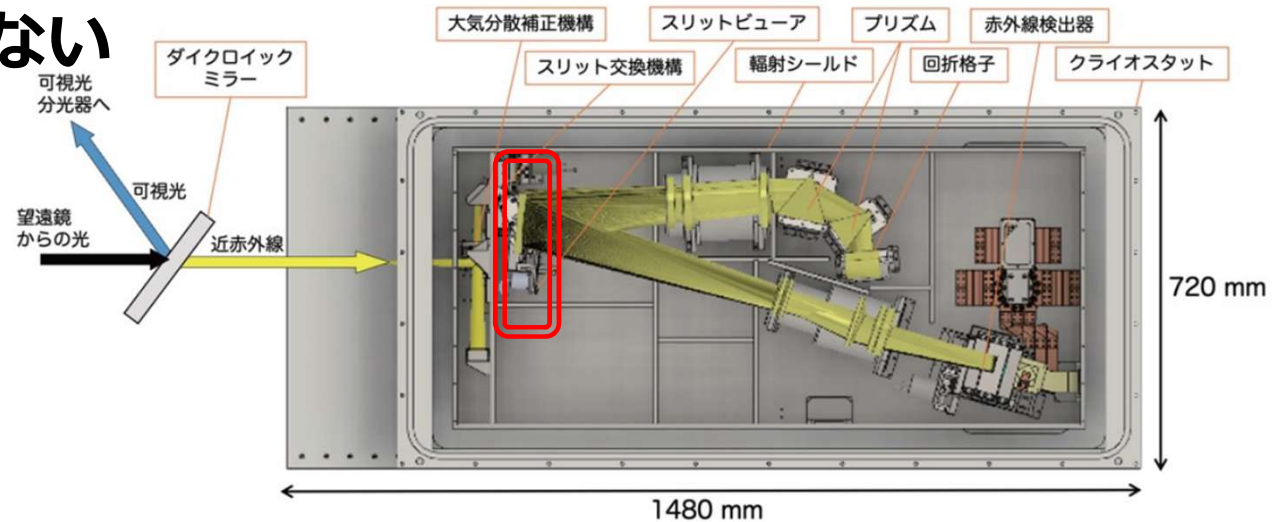
1-3. 近赤外線分光器の仕様・特色

スリットビューワ

- スリット通過直前の画像を検出器のスペクトルが映らない領域に映す機構。
- 視野: $\Phi \sim 10''$, 波長帯 $1.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$
- 明るい天体導入時にはここでの像を参照

スリットビューワで映せない、暗い天体がターゲットの時は利用できない

⇒別の導入手法が必要



1-4 暗い天体の導入手法

スリットビューワに映る明るい参照星とターゲットとの相対位置を基準に導入する

A0188の低次波面センサーにある Acquisition Cameraを利用する

Acquisition Camera
FoV($\Phi \sim 20''$)

Ref Star

Target

Slit viewer
FoV($\Phi \sim 10''$)

AU2 Patrol Field($\sim 2.7'$)

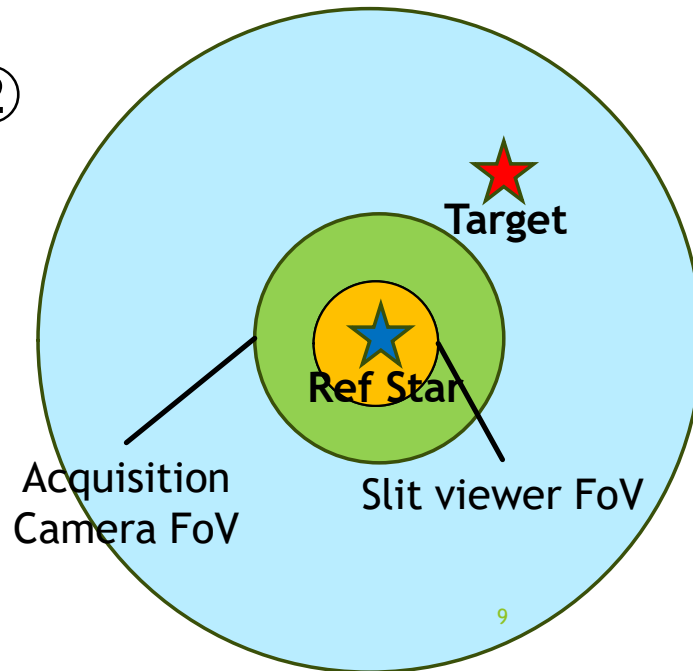
Acquisition Camera FoV: AU2 Patrol field内で動かせる

1-4. 暗い天体の導入手法

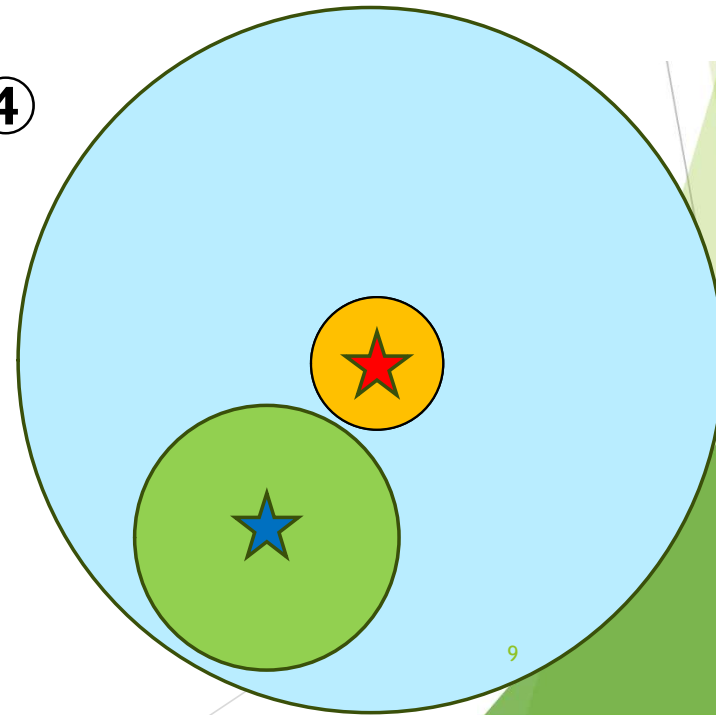
導入方法:

- ① ターゲット付近の明るい天体を参照星として選択
- ② 望遠鏡を動かし、参照星をスリット上に導入
- ③ 参照星を使って、低次波面センサーのループを閉じる (Acquisition Camera 上での参照星の位置が固定される)
- ④ ターゲットと参照星の相対座標をもとに、Acquisition Cameraの視野を動かしてターゲットをスリットに導入する

②



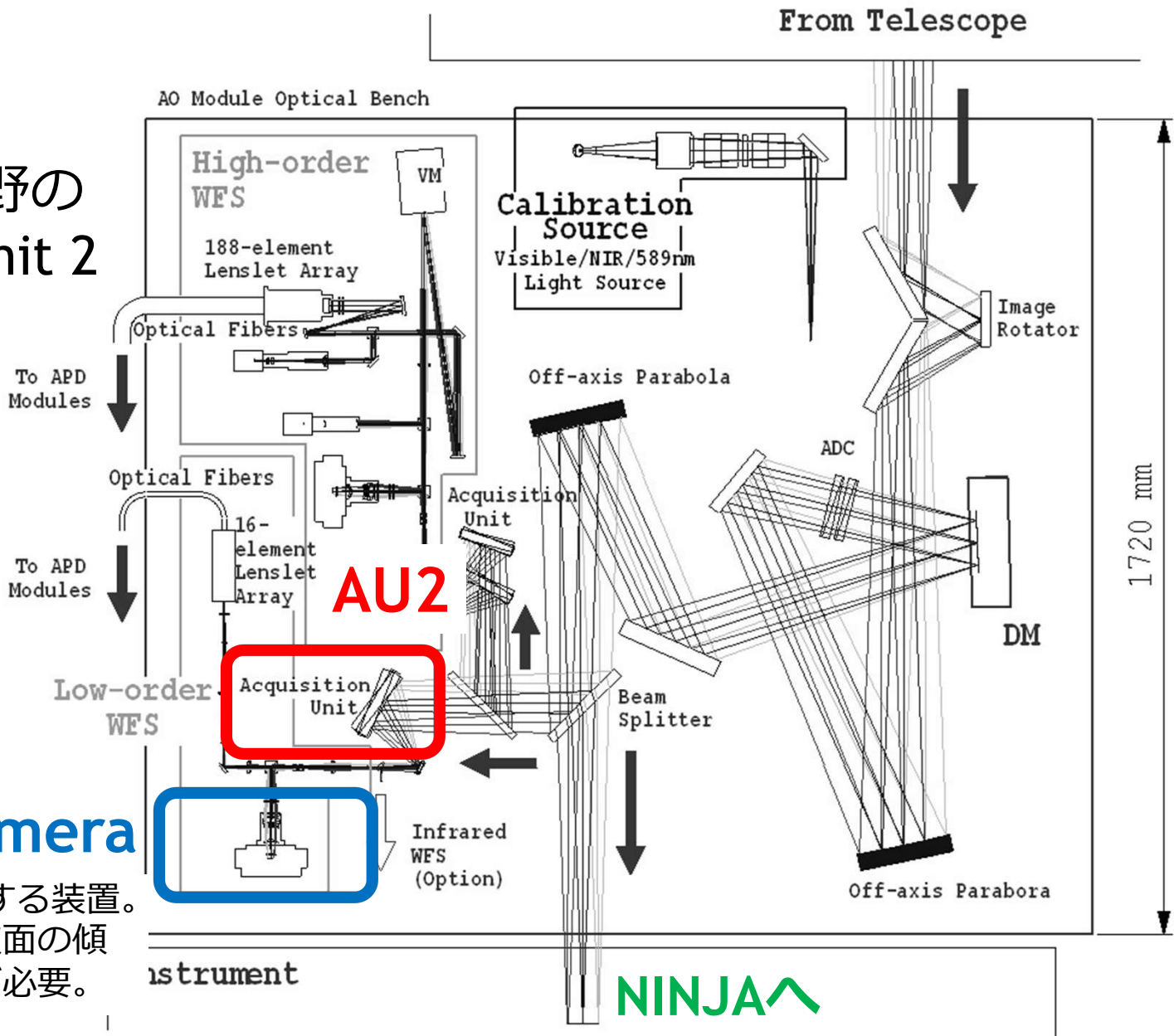
④



Acquisition Cameraの視野の移動には、Acquisition Unit 2 (AU2)を利用

Acquisition Camera

AU2: 自然星を低次波面センサーに導入する装置。レーザーガイド星を利用する観測では波面の傾きや焦点ボケを観測するための自然星が必要。



1-4. 暗い天体の導入手法

問題点

AU2をどの程度動かすか(=AU2のoffset値)は、**天球座標上での参照星とターゲットの相対位置から決める**

NINJAのスリット(~0.3"幅)に導入するには、**天球座標換算で0.1"以下の精度でAU2のoffset値を決めることが必要だが、現状ではその精度でAU2のoffset値を決めることはできない**

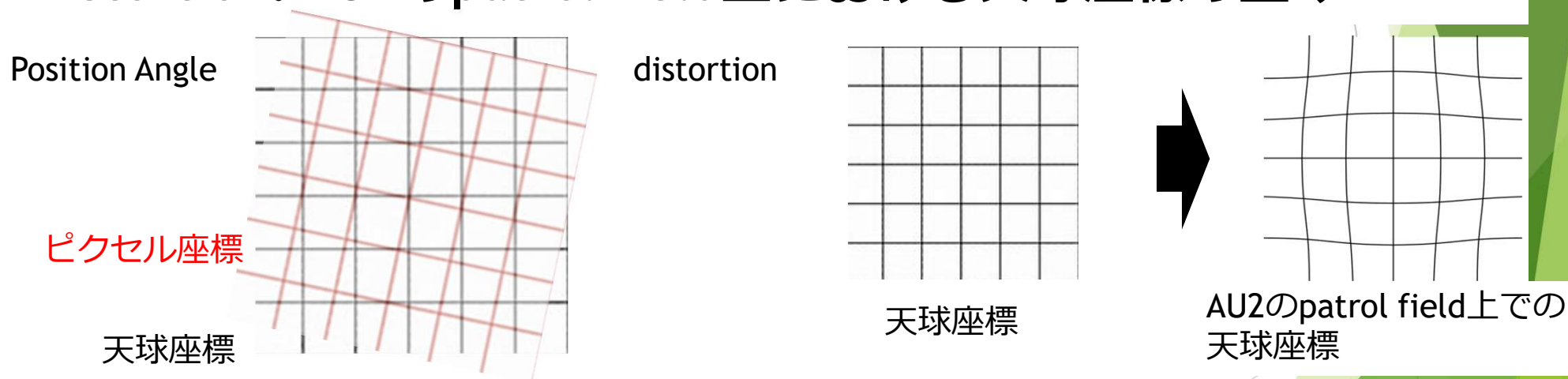
1-4. 暗い天体の導入手法

より高い精度でAU2のoffset値を決定するには、

- Position Angleを0に設定した時の、Position angleの残差
- AU2 patrol field上のdistortionの測定が必要

Position Angle: 天球座標に対する画像のピクセル座標の回転角

Distortion: AU2のpatrol field上における天球座標の歪み



Position Angleの残差およびdistortionを高い精度で測定するため、AO188のエンジニアリング観測を実施

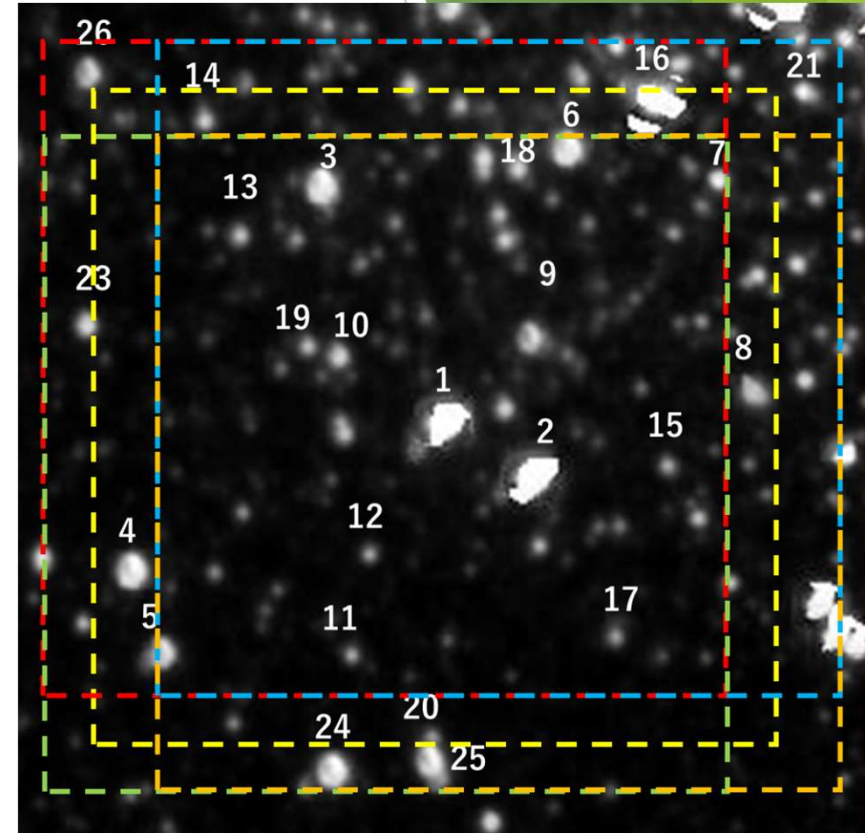
2. Subaru A0188エンジニアリング観測

2-1 Position Angleの残差測定

IRCSカメラを利用して測定

方法

1. IRCSカメラ(J-band, 52mas mode)で球状星団の画像を取得
2. 視野内の恒星を20個程度選び、それらの天球座標とピクセル座標を求める
3. IRAF ccmmapタスクを用いて回転角を計算する
4. 観測領域を少し変えて同様に回転角を計算し、position angleの残差 ΔPA を決定する

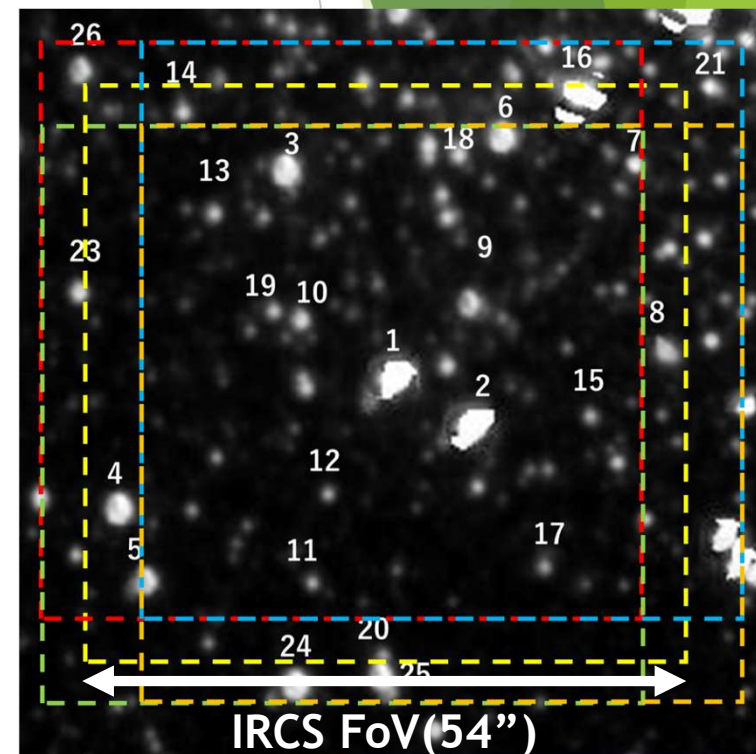
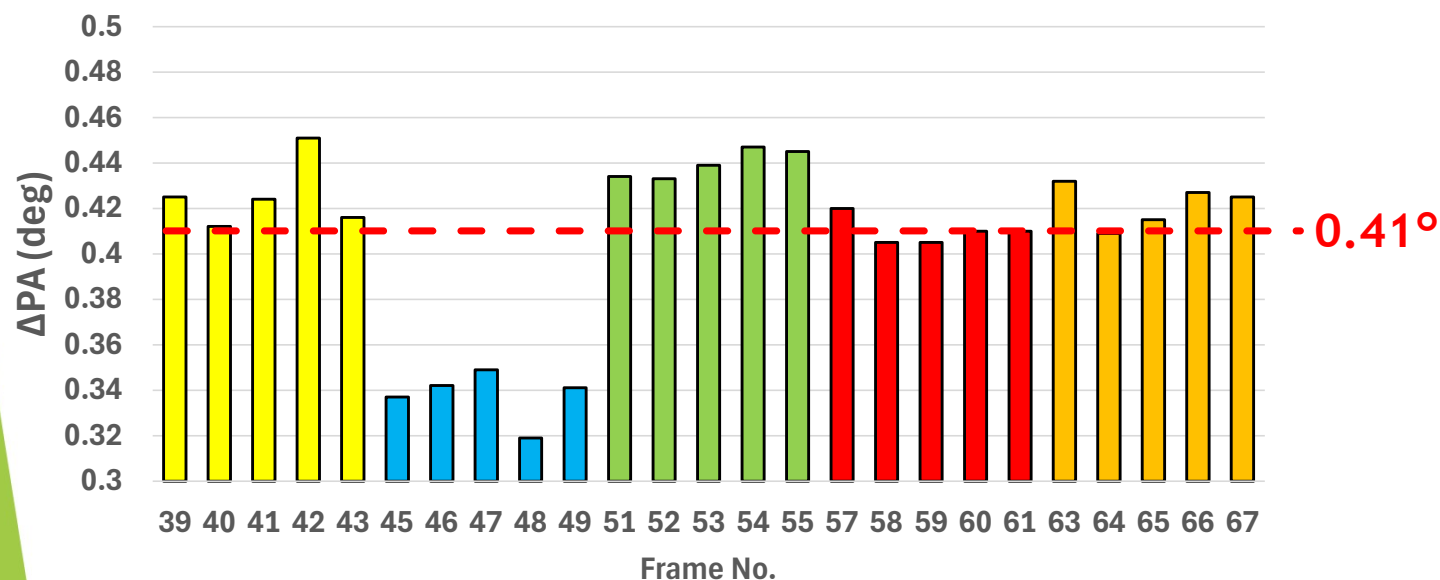


今回Position Angleの残差測定に用いた領域のPan-STARSによる画像。番号は2.で抽出した恒星、点線は観測領域(計5領域)

2-1 Position Angleの残差測定 結果

各領域5枚×5領域=25枚の画像それぞれで回転角を計算
平均値を ΔPA 、標準偏差を誤差とする

Residual of Position Angle

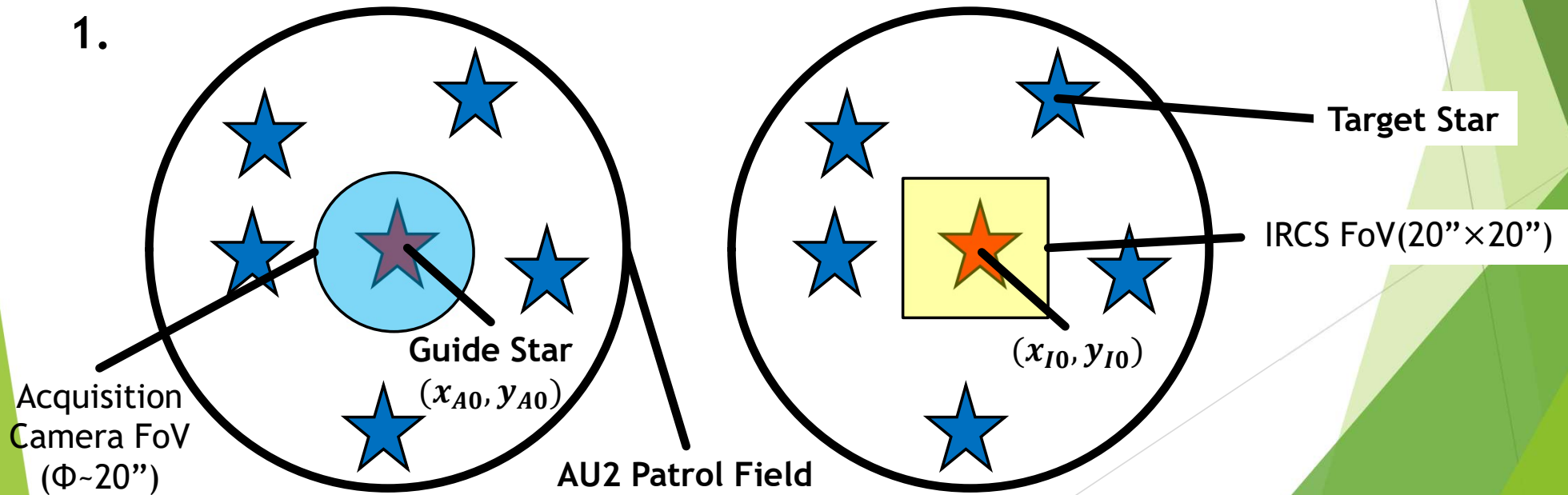


よって、 $\Delta PA \sim 0.41 \pm 0.04$ (deg)
要求精度(0.05deg)を満たしている

2-2 Distortionの測定

測定に低次波面センサーのAcquisition Cameraを使用
球状星団からGuide Star、およびその周囲にあるTarget Starを抽出し、
Guide Starと各Target Starの天球座標での相対座標($\Delta\alpha, \Delta\delta$)を求めておく
方法

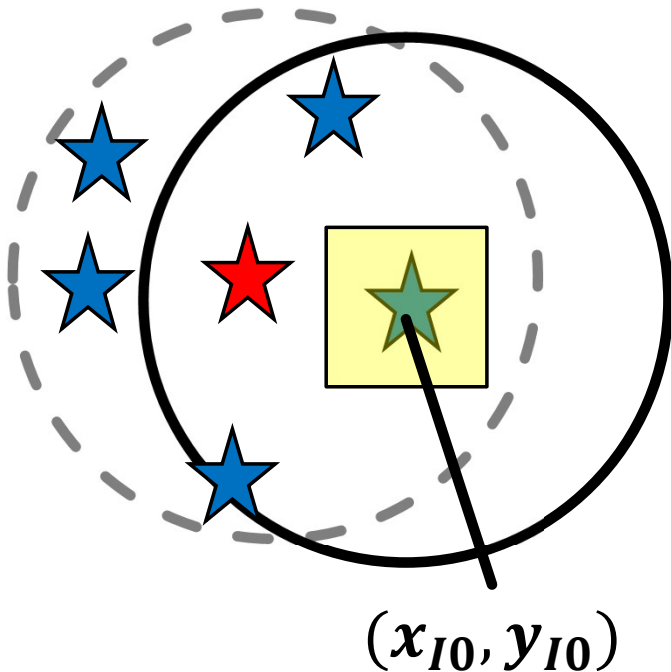
1. AU2をbase positionに戻し、望遠鏡をGuide Starに向けて、Acquisition CameraおよびIRCSでGuide Starを撮影する。その際のGuide Starの位置を(x_{A0}, y_{A0})、(x_{I0}, y_{I0})とする。また、Guide Starを使用して高次波面センサーのループを閉じる(望遠鏡のガイドエラーの影響がなくなる)



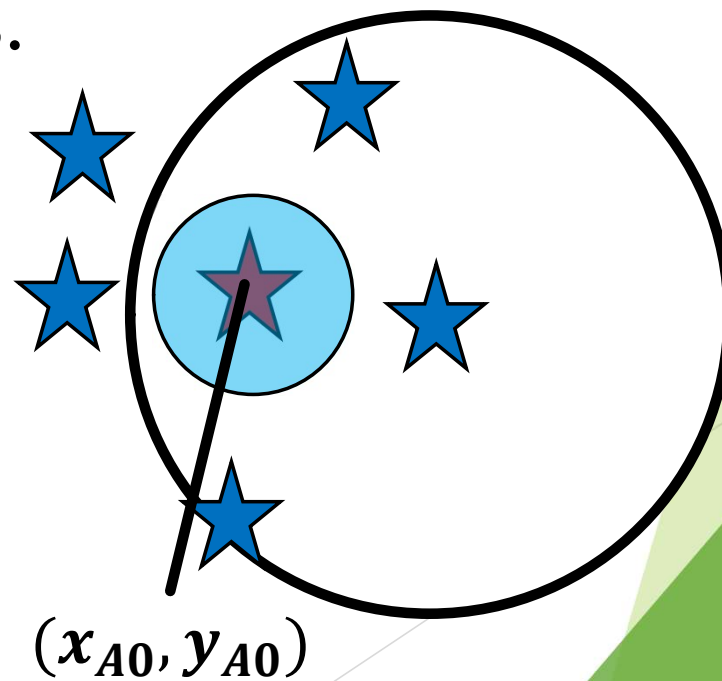
2-2 Distortionの測定

2. 望遠鏡をTarget Starの1つに向け、IRCSカメラ上で (x_{I0}, y_{I0}) の位置に導入する
3. 望遠鏡を固定したままAU2を動かして、Guide StarをAcquisition Cameraの (x_{A0}, y_{A0}) に導入する
4. 3.でのAU2のoffset値 (x_{AU2_n}, y_{AU2_n}) を記録する
5. 別のTSに対し2.~4.を繰り返す
6. $(\Delta\alpha, \Delta\delta)$ と (x_{AU2_n}, y_{AU2_n}) の関係式を2次式でフィッティングする

2.



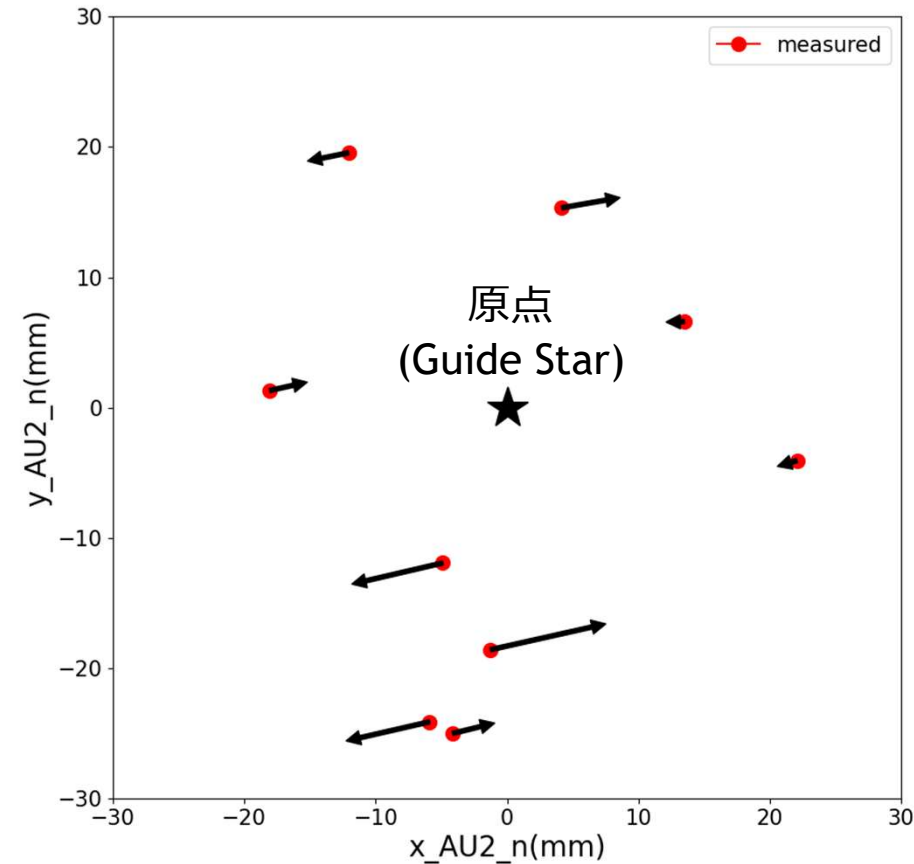
3.



Distortionのフィッティング結果

天球座標上の相対座標とAU2のoffset値の変換式が得られるので、AU2のoffsetの測定値(赤)から残差ベクトルを描く

最大残差:天球座標換算で約2”
AU2の天球上での機械的再現性(0.006”)よりはるかに大きい



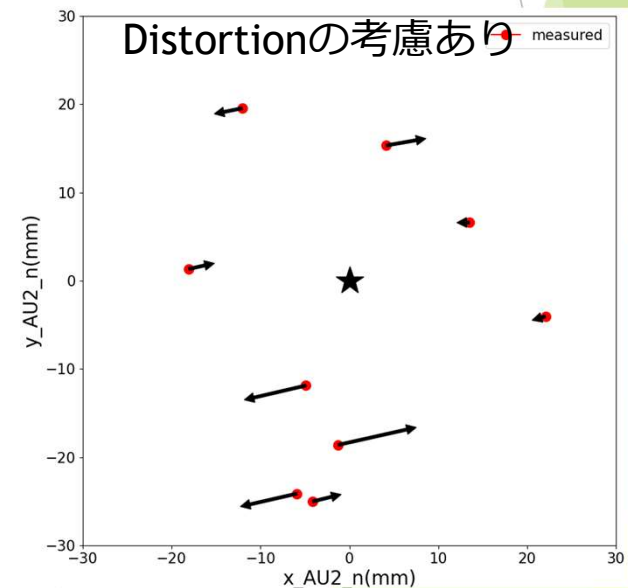
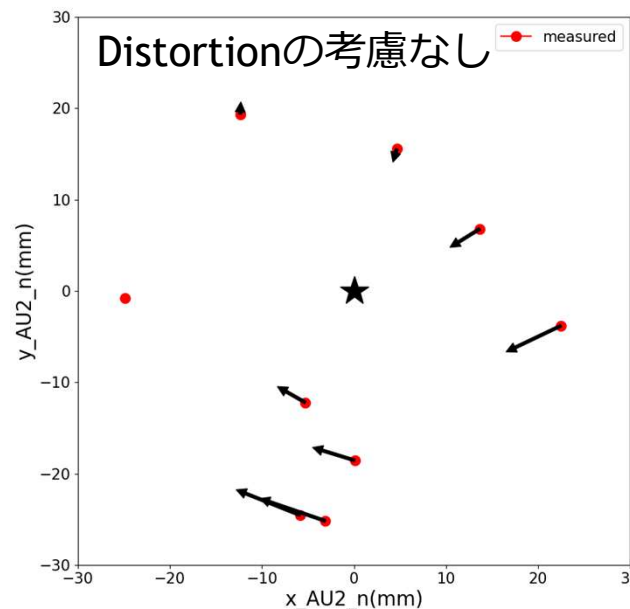
残差ベクトル。残差の長さは10倍にして示した。矢印の根元が $x(y)_{AU2_n}$ の測定値、矢印の先が天球座標上の相対座標から求めた $x(y)_{AU2_n}$ の値

2-3 考察

Distortionのフィッティング残差が大きい理由

- Distortionの効果を入れない場合との残差の変化
残差が逆方向に出るようになっている
⇒3次以上の項があるなどの理由でフィッティングがうまくいっていない可能性が高く、Target Starが足りていない可能性がある

今回測定したdistortionの影響を考慮した場合としていない場合の残差ベクトル。



3. まとめ

- NINJAはキロノバ観測による重元素の起源解明などを旨とする、可視近赤外分光観測装置
- 幅0.3”程度とかなり狭いスリットを搭載予定であり、導入手法の開発が急務
- NINJAは初期の運用でAO188のAcquisition Unit 2を用いた天体導入を予定
⇒AU2の視野内のPosition Angleの残差およびdistortion測定が必要
⇒AO188・IRCSを用いた試験観測を実施
- Position Angleの残差は十分良い精度で測定できたが、distortionは不十分
- 再観測によるTarget Starの追加が必要

4. 今後のスケジュール

近赤外分光器:

設計と製造の段階は終了

NAOJ/ATCで組み立て・統合・検証(AIV)段階



ATCにて組み立て中のNINJA近赤外分光器

今後のスケジュール:

2024年度中: AIV段階終了

2025年度: ハワイ移送

S25B~S26A(2025年末~26年前半): エンジニアリング

ファーストライト(目標)

可視光分光器: 概念検討を開始

2-3 Distortion

過去のdistortionの測定により、以下の関係式が分かっている。

$$\begin{aligned} & (\Delta\alpha, \Delta\delta): \text{天球座標上での相対座標} \quad \Delta\theta: \text{Position Angleの残差} \\ & (x_{AU2_o}, y_{AU2_o}): \text{AU2のoffset値(mm)} \quad p: \text{IRCSカメラのpixel scale}(0.02042''/\text{pix}) \\ & (x_{AU2_n}, y_{AU2_n}): \text{AU2のoffset測定値(mm)} \\ & \begin{pmatrix} x_{AU2_o} \\ y_{AU2_o} \end{pmatrix} \\ & = \frac{1}{p} \begin{pmatrix} 0.010985 & -0.000063 \\ 0.000049 & 0.011013 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\Delta\theta & \sin\Delta\theta \\ \sin\Delta\theta & -\cos\Delta\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\alpha \\ \Delta\delta \end{pmatrix} \end{aligned}$$

精度が足りないため、以下の補正式f, gを加える

$$\begin{cases} x_{AU2_n} = x_{AU2_o} + f(x_{AU2_o}, y_{AU2_o}) \\ y_{AU2_n} = y_{AU2_o} + g(x_{AU2_o}, y_{AU2_o}) \end{cases} \quad (f, g \text{は多項式})$$

f, gを定数項を含む二次式とし、フィッティングで係数を求める

2-3 結果

(B)Distortion

$$f = a_f + b_fx_{AU2_o} + c_fy_{AU2_o} + d_fx_{AU2_o}^2 + e_fx_{AU2_o}y_{AU2_o} + f_fy_{AU2_o}^2$$
$$g = a_g + b_gx_{AU2_o} + c_gy_{AU2_o} + d_gx_{AU2_o}^2 + e_gx_{AU2_o}y_{AU2_o} + f_gy_{AU2_o}^2$$

a_f	-0.35 ± 0.03	a_g	-0.04 ± 0.02
b_f	-0.1224 ± 0.0008	b_g	-0.0419 ± 0.0005
c_f	0.01812 ± 0.0009	c_g	-0.0043 ± 0.0005
d_f	0.00650 ± 0.00007	d_g	0.00170 ± 0.00004
e_f	0.0063 ± 0.0001	e_g	0.00150 ± 0.00007
f_f	-0.00182 ± 0.00008	f_g	-0.00026 ± 0.00005

補償光学でのループ

- ①波面センサーにゆがんだ波面を送る
- ②測定した波面情報を制御装置に送る
- ③制御装置で波面補正素子 (Deformable mirrorなど)の形状変更
- ④波面の形が変化
- ⑤①に戻る

以上の順序が補償光学のループ

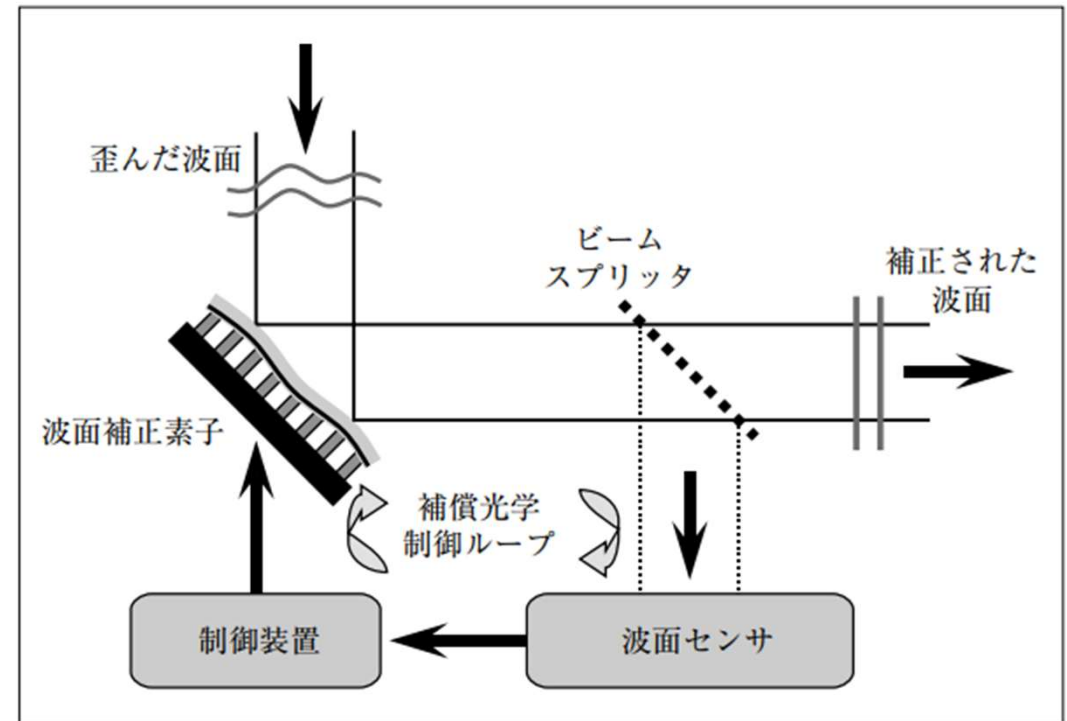


図1 補償光学系の概念

https://www.jstage.jst.go.jp/article/itej/65/5/65_648/_pdf/-char/ja