

JASMINEのデータ解析 ソフトウェアの構築

山田良透(京都大学大学院理学研究科)、河田大介(Mullard Space Science Laboratory, University College London)、河原創(東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻)、上塚貴史(東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター)、大宮正士(自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター)、大澤亮(東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター)、服部公平(統計数理研究所統計思考院)、立川崇之(高知工業高等専門学校ソーシャルデザイン工学科)、吉岡諭(東京海洋大学海洋工学部海洋電子機械工学科)、辰巳大輔(国立天文台JASMINEプロジェクト)、片坐宏一(宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所)、臼井文彦(宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所)、平野照幸(自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター)、福井暁彦(東京大学地球惑星科学専攻)、越本直季(東京大学理学系研究科)、泉浦秀幸(国立天文台ハワイ観測所岡山分室)、郷田直輝(国立天文台JASMINEプロジェクト)、三好誠(国立天文台JASMINEプロジェクト)、矢野太平(国立天文台JASINEプロジェクト)、Wolfgang Löffler(ハイデルベルク大学)、JASMINEチーム

Abstract

- 公募型小型3号機に選定されたJASMINEは、位置天文観測衛星であり、データ解析が非常に大きなウェイトを占める。解析と、より現実的な模擬データを生成するためのシミュレーションを行うため、2020年9月より約20名の解析チームで活動を行っている。衛星の姿勢擾乱を含む画像の生成と、これを基にする解析で、高精度を実現できることを実証することが目的である。本公演では、この進捗状況を報告する。

可視光位置天文観測衛星Gaia(ESA: 2013年~2025年?)

Gaia



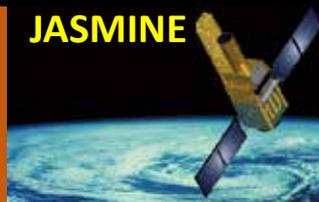
- ・太陽系近傍
- ・広域のハロー星
- ・バルジ/バー構造の上層部
- ・銀河円盤上層部

相補的

Gaiaでは測定困難な領域あり!

赤外線(1.1~1.6μm)位置天文観測衛星

JASMINE

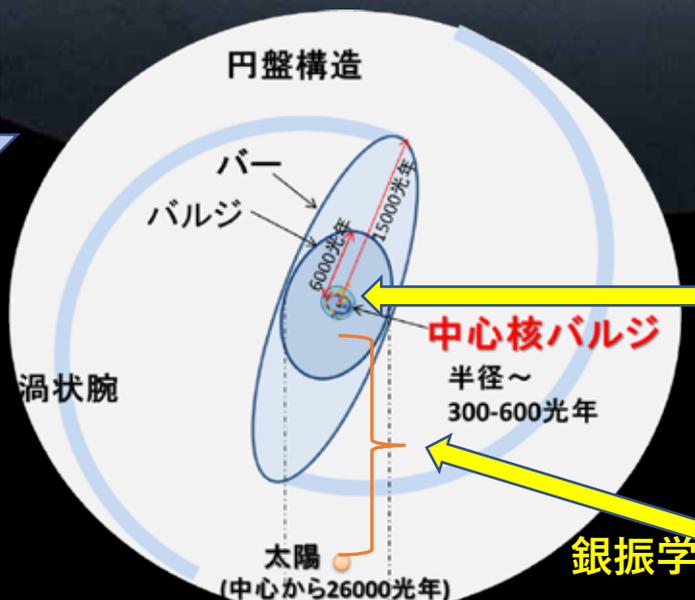


- ・中心核バルジ
- ・中心近くの銀河円盤
- ・星間ガスに覆われた星形成領域

- ・全天サーベイ
- ・3回目公開(2020.12)の中間データでは、約15億個の星の位置天文情報。年周視差精度は明るい星で20~30μas

画期的! 天の川銀河研究の大革命が起きている!!

1. ハローの構造・形成史(銀河考古学)
2. 太陽系近傍や反中心方向の銀河円盤の速度構造
3. バー構造のサイズ・回転速度



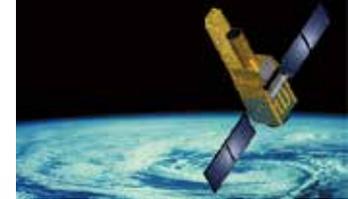
銀河中心考古学

1. 中心核バルジの構造(天の川銀河誕生時の構造の痕跡?)
2. 中心核バルジ内の円盤構造の形成時期
→バー構造の形成時期を決定
→太陽系が銀河内部から移動を開始する時期
→地球誕生や人類の誕生にも影響
3. 超巨大ブラックホールの質量成長
4. 内部円盤の振動

銀振学

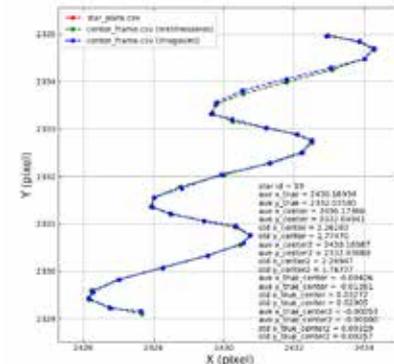
中心方向以外: 低質量星周りの生命居住可能領域にある地球型惑星探査(日本初の系外惑星探査衛星でもある)





位置天文にはデータ解析が重要

- 25マイクロ秒角～0.6nm
- 安定性を「測定」で保証する、較正することは不可能。



変動を抑える



$CTE < 5 \times 10^{-8}$ オーダーの素材を開発。
1m程度の部材で、10mKオーダーの制御
素材を選べない部分もある。

変動を制御 or 較正



0.6nmより十分高精度の測定が前提。
Gaia衛星はレーザー干渉計併用

残る手段: 変動を推定する

この精度のモデルを作り、
他の測定値から推定する。



位置天文データ解析

問題規模

- 欲しいパラメータ: 50万個 (10万星 × 5)
- Nuisance parameter: 約1千万個
- 観測数: 500億データ
- 数mas → 25 μasを実現

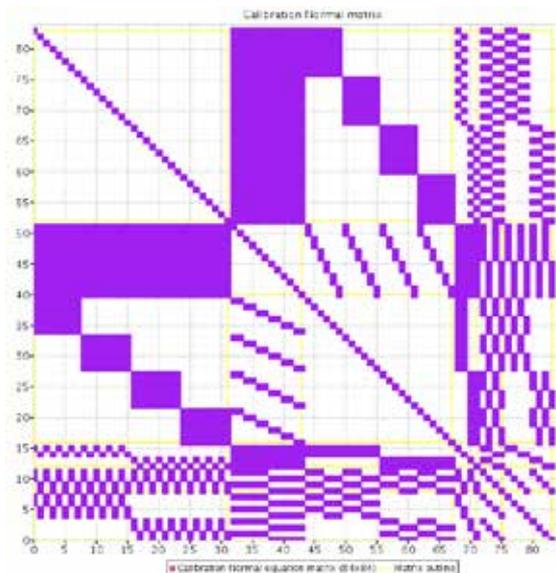
PSFの幅 400mas

↓ 光子数 ~ 30,000
 $400 / \sqrt{30000} \sim 2.3$

時々刻々の星像中心 4~6mas

↓ 観測数 ~ 500,000
 $6000 / \sqrt{500000} \sim 8.4$

位置天文パラメータ 25 μas



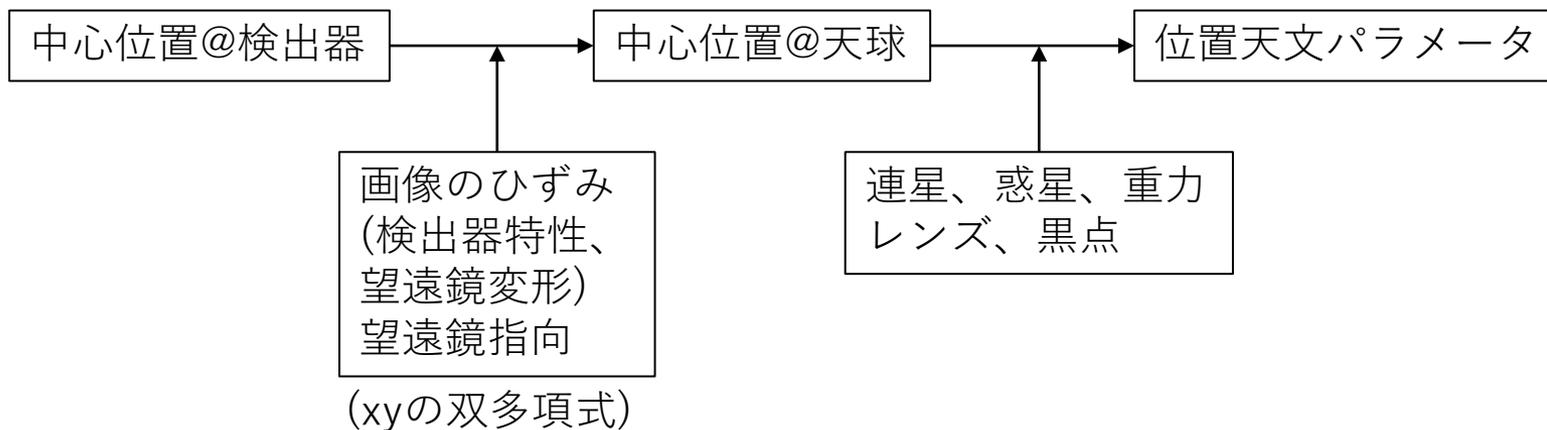
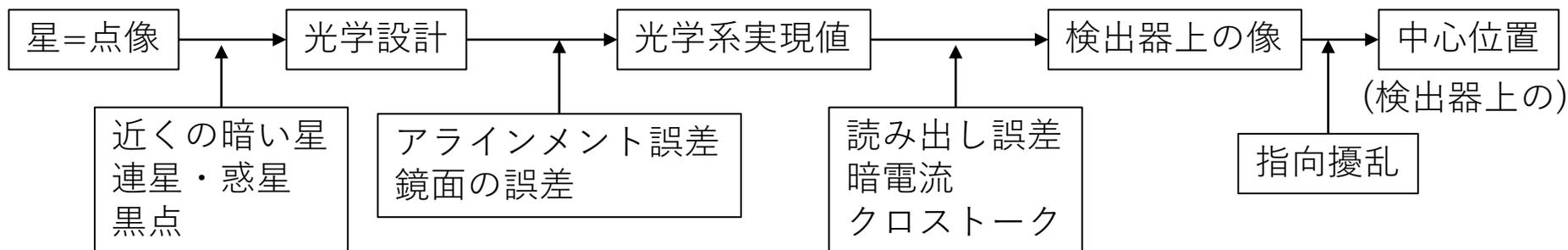
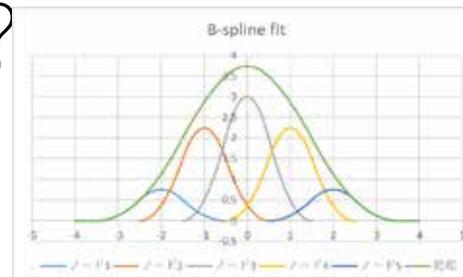
数stepに分けて、最小二乗推定

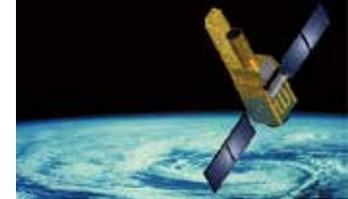
← Gaia衛星のあるステップの正規行列

スパースでもない、密でもない



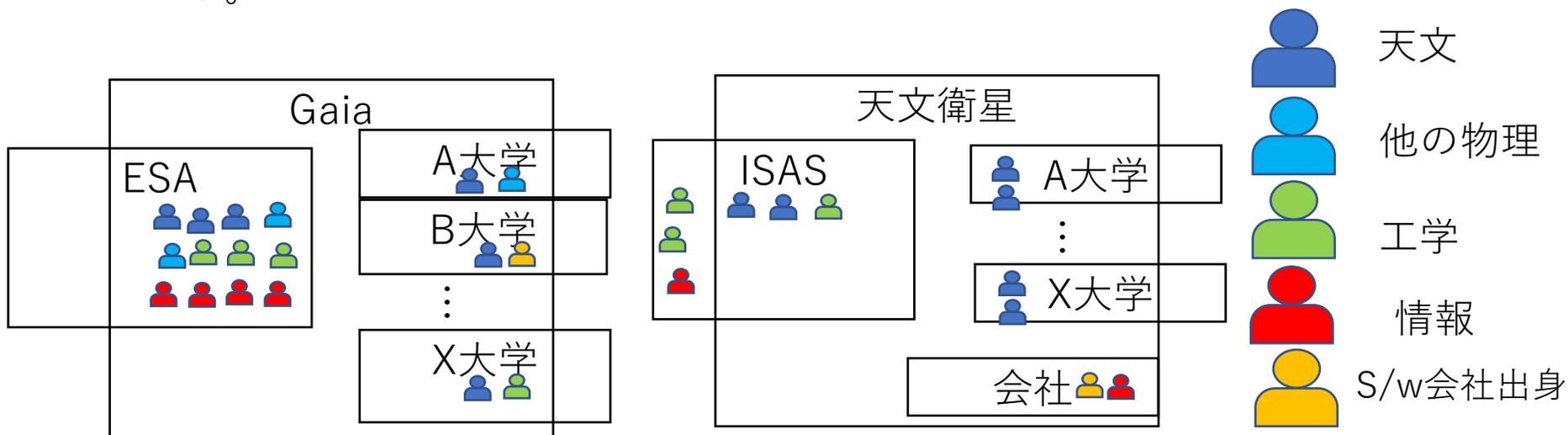
モデル駆動? データ駆動?





開発

- メーカーによる委託開発
 - 長期戦である⇒山田は定年⇒オープンソースQualityが必要
 - 開発はメーカーに委託し、発注側は仕様書の整備に努める
 - あとで引き継いだ研究者が見てもわかる。
 - ISO12207:2017(software lifecycle process), ISO15288:2015(system lifecycle process)に出来るだけ沿う
- 研究者による開発
 - 様々な誤差要因を入れ込み、精度を向上させる部分は、Astronomerでないと出来ない。



E2E simulation groupの立ち上げ

- UCL河田氏(JASMINEのproject scientist)が声をかけ、20名強のE2Eチームを立ち上げ。
- 9月より毎週会合+GitHubによるコード共有+Slackによる日常的な議論。
- NAOJ, ISAS, 東大, 京大, 東工大, 海洋大, 高知高専, 統数研, 大学院生から教授クラスまで。
- 「解析」と「シミュレーション」の二本立て

「シミュレーション」の活動状況

- 現段階で想定できるノイズ要因はほぼ実装済み
- 系外惑星探査に必要な測光精度を得られるかどうか検証
- 「解析」のinputにできるようなI/Fを実装。

「解析」の活動状況

文書

仕様改訂

プロジェクトによる仕様策定

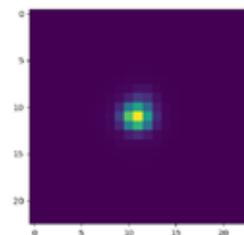
メーカーによる実装

プロジェクトによる検証

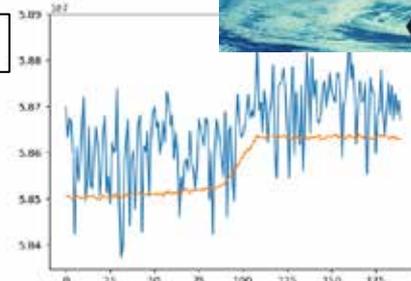
導入するノイズによって、アルゴリズムに改良を要する点を発見した場合

運用計画に反映

セルフキャリブレーションで解けない擾乱モードを発見した場合



測光精度の評価



系外惑星探査の成果評価
キャリブレーション方法の検討

衛星の位置、速度⇒星が見える方向
衛星の姿勢⇒像面で結像する位置
画像歪、検出器歪⇒結像位置(pixel単位)
PSF形状、星の色、ノイズ⇒光が作る像の形
検出器特性⇒電氣的に得られる像の形

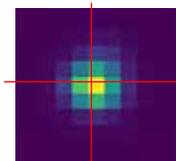
星の運動5
パラメータ



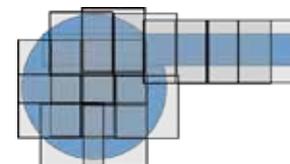
3年のデータを集めて運動を解く。

データ解析は問題

像の中心を推定



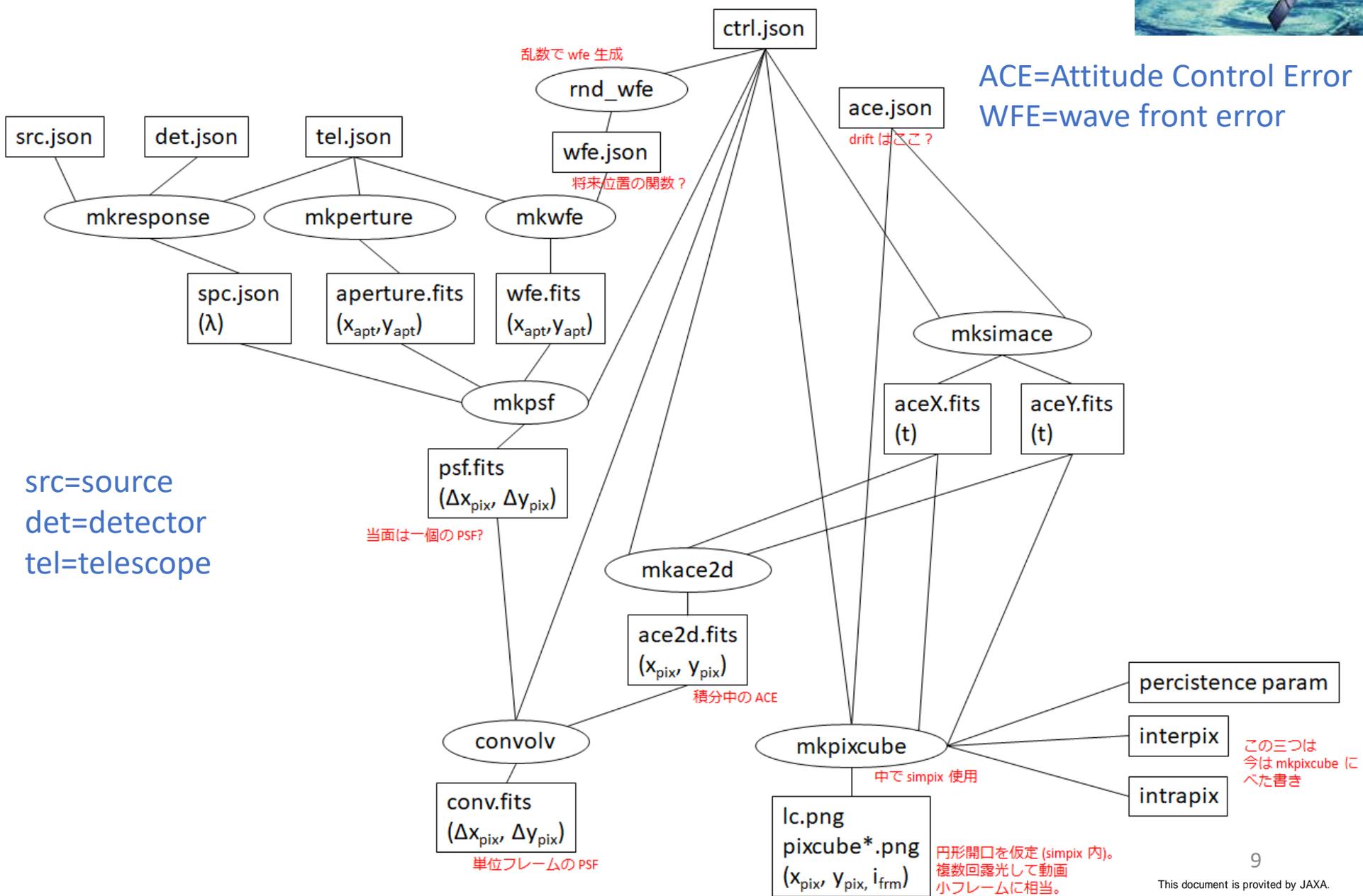
50分の観測からある時刻の星位置を求める。



シミュレーションに取り入れたもの



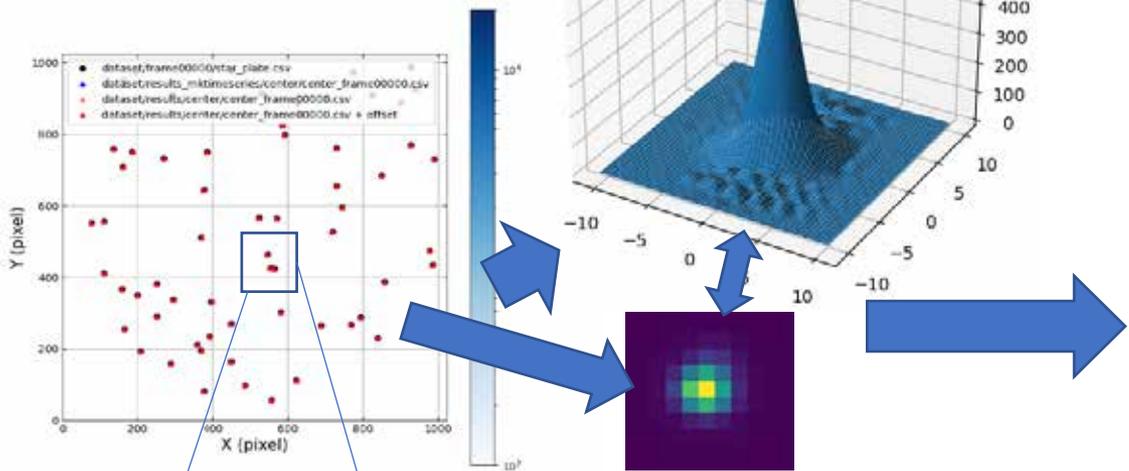
ACE=Attitude Control Error
WFE=wave front error



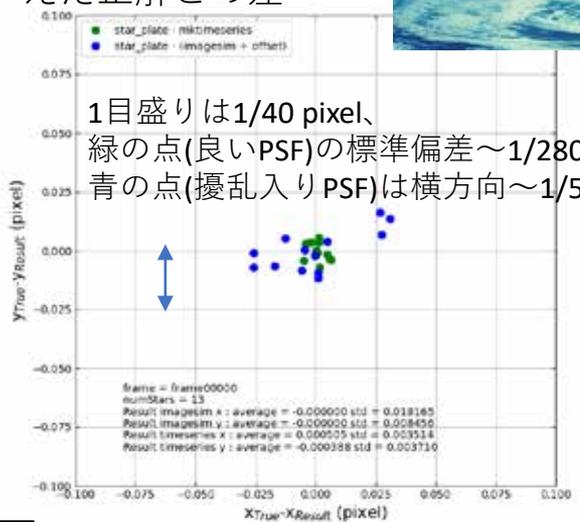
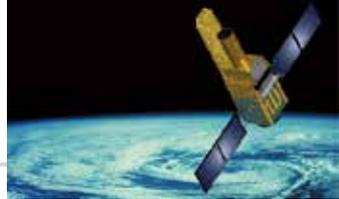
src=source
det=detector
tel=telescope

現状

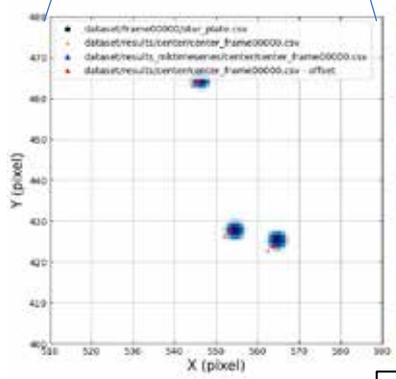
PSFを推定する



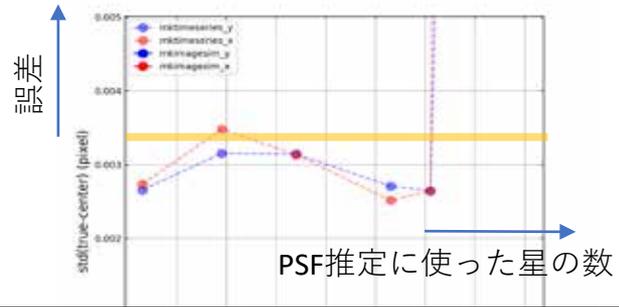
推定した星像の中心と、画像生成時に与えた正解との差



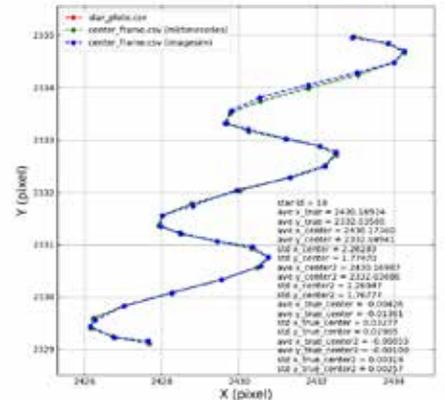
画像の生成



精度が十分でないケースの理由が分かってきた⇒アルゴリズムの改良中
視野の端で星像が切れている場合
近接した星がある場合



パラメータとの関係を実証
例:星の数を増やすとPSF推定精度が上がる。



運動の推定部分は今後検証

今後

End to end (E2E) simulation:

位置天文学では観測システムのモデル化、擾乱要因のモデル化により、星の運動と装置モデルパラメータの同時推定を行い、精度を出す。このプロセスがうまく機能し、目的の精度を達成できることを確認することが、end to end simulationの目的である。



FY2016	FY2017	FY2018	FY2019	FY2020	FY2021	FY2022	FY2023
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

担当者(1名)による開発

NAOJ資金で招聘

Heidelberg大学資金でHeidelberg大と共同研究

DLR資金apply

ソフトウェアメーカーへの委託⇒

日ΔMDR

国際審査

プリプロ候補選定審査

ダウンセレクト前審査

研究者に依るEnd to end simulationチーム活動

予備的計算で、解析の各要素で期待する精度が出ることを確認した。

解析各要素の実装
End to end計算のパイプライン開発

ノイズ入り画像生成

・想定する誤差導入
・対処法を検討
・精度達成に必要な較正法確立

・更なる精度向上
・処理高速化

原理的に可能である。
End to end計算が有効と示唆

マイルストーン
理想的な状況で、end to endで解ける(要素ではなく)

国産のInGaAsセンサー使用
⇒感度ムラの情報などは得られやすい
必要なデータは実験で取得可

Heidelberg大学チームとの共同開発の狙い:

- Gaia衛星の経験を持ち、ソフトウェア開発実績があるチームの知見とノウハウを取り入れたい。

ソフトウェア会社への委託開発の狙い:

- 委託に伴って、専門家への聞き取り(システムライフサイクルの専門家)
- 長期の計画(=衛星計画)に耐えるquality(可読性や設計柔軟性)のソフトウェアの開発。(オープンソース品質)
- プロジェクト側にしっかりとしたドキュメントを残すこと。
- スケジュールのキープ