

高精度星像中心決定と実証実験

○矢野太平(国立天文台),
赤外線位置天文観測衛星(小型JASMINE)
プリプロジェクト候補チーム

高精度星像中心決定とその実証

小型JASMINEは～25マイクロ秒角精度で年周視差星を測定する計画。
JAXA宇宙研の公募型小型計画宇宙科学ミッション3号機選定
宇宙研の所内準備チームが設置された。

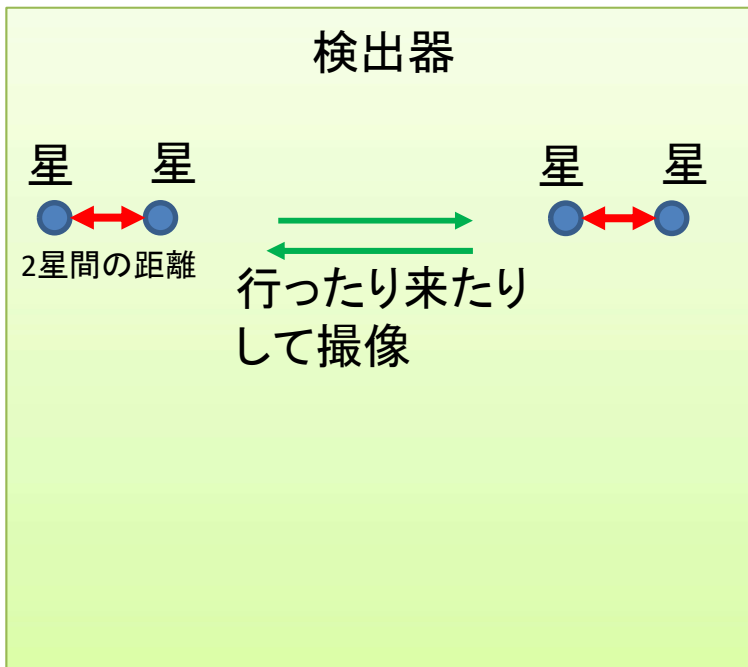
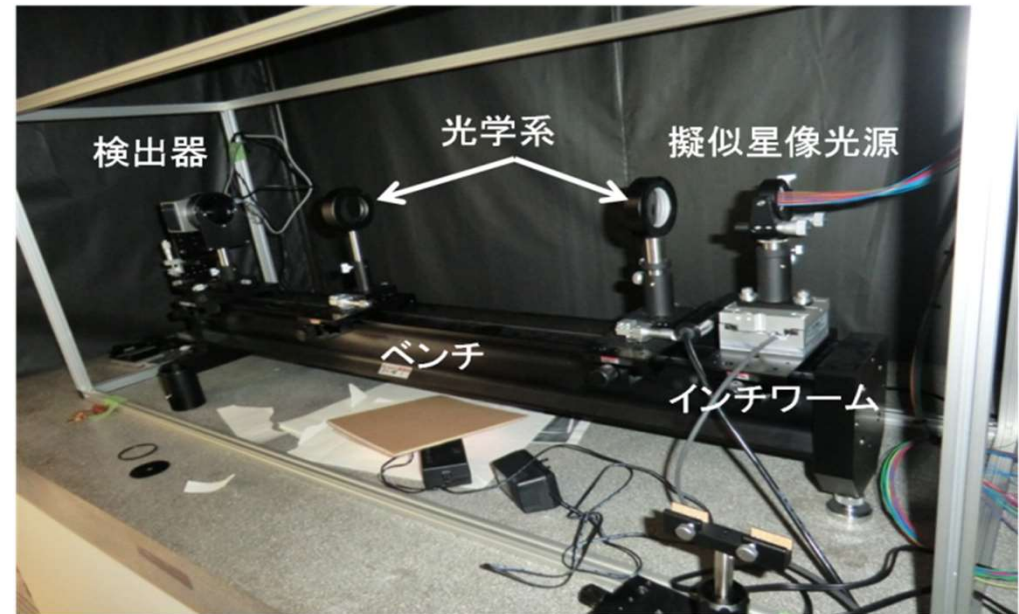
各種審査会において、星像中心決定の実証実験は面白くかつ重要であるとのコメント

星像位置決定の実証実験の重要性が認識される。

地上実験による原理実証

実験装置

- ・疑似星像光源、光学系、検出系がこの順番にベンチに設置
- ・光源はインチワームで移動可能



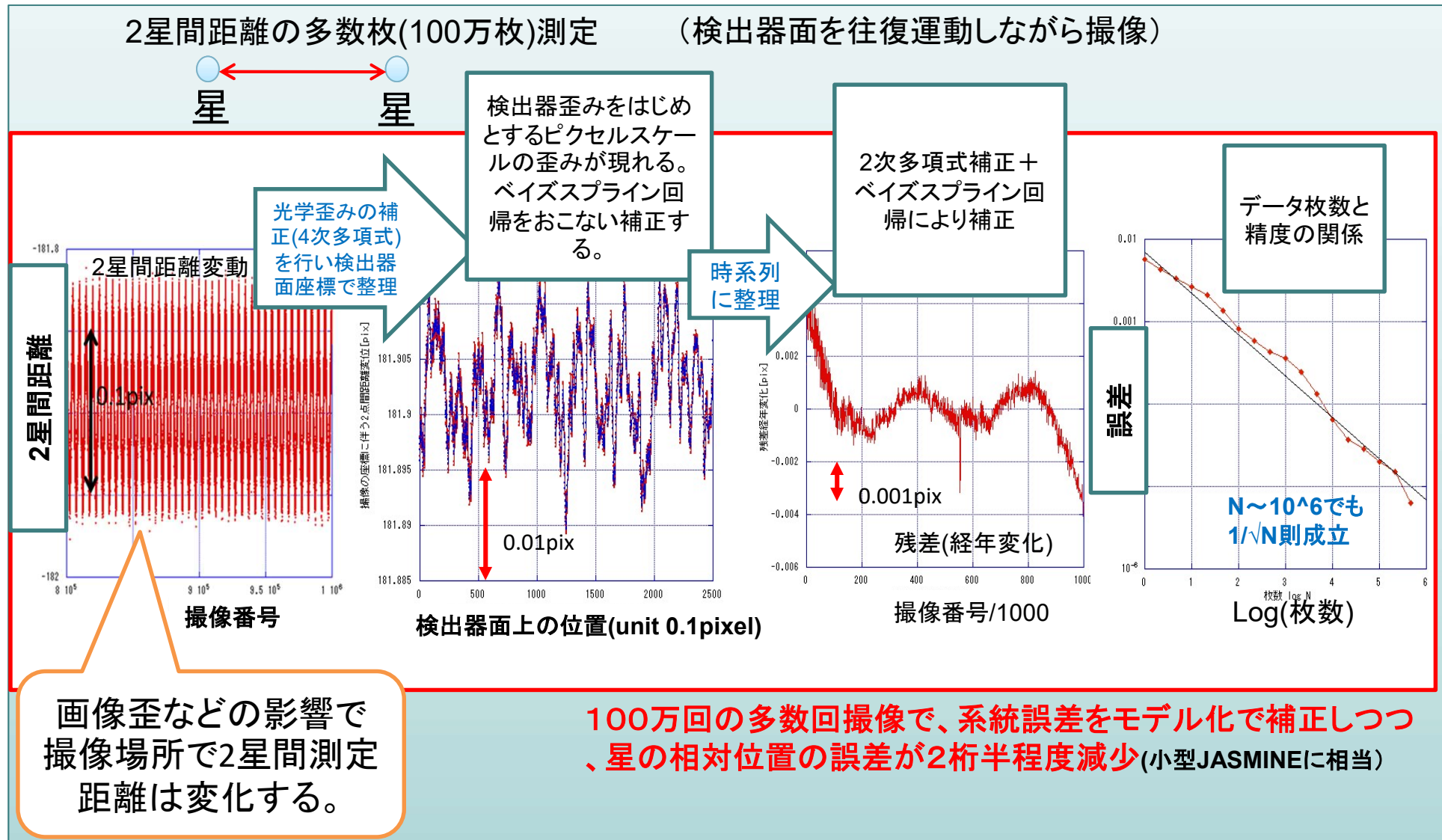
取得データ

- ・ 1画像から星像2個をピックアップ
- ・ 1回撮像毎、0.1pix相当疑似星像位置を移動、片道2500回分移動
- ・ 2500回の往復運動=100万枚の画像データを用いる。

多数回撮像データによる高精度中心決定

- 2星間距離の多数データを取得し、撮像枚数に応じて誤差が $1/\sqrt{N}$ で低減することの実証する。
- 2星間距離は様々な誤差要因で変動しているが、画像歪といった場所に応じた系統誤差、時間変動する系統誤差といったように、順次取り除き補正していく事で最終的に撮像枚数に応じて誤差が $1/\sqrt{N}$ で低減することの実証を行う。

2星間距離距離の決定精度が星像撮像枚数に応じて $1/\sqrt{N}$ で低減

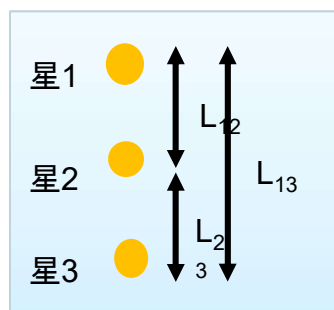


系統誤差である事の実証

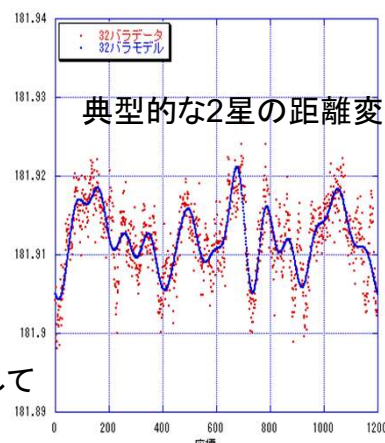
- 上述の実証実験では、星の検出器上の座標に応じて、本来不変と考えられる2星間の座標差の値が変動した。この変動量は検出器歪をはじめとする系統誤差と考えられる。
- この2星間座標差の変動が確かに検出器歪などからくる系統誤差であって、「**気ままに**」変動しているわけではない事を示すため、もうひとつの星像を用意し、複数点(3点)での2星間座標差の変化の関係を調べた。

推定した系統誤差の主原因が画像歪みであることを示す地上実験実証

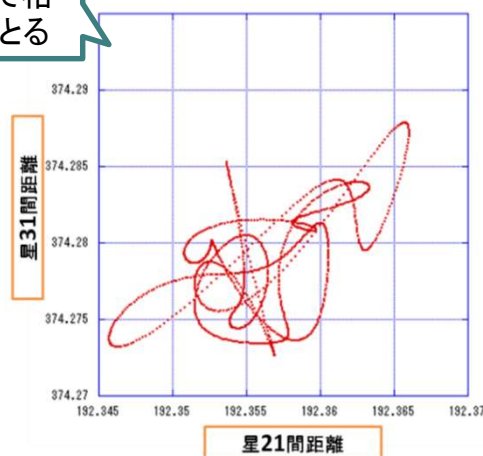
星12間距離変動 + 星23間距離変動 = 星13間距離変動 となっていることが示された実証実験



1列にならぶ3つの星に対して
多数撮像を行い
 L_{12} 、 L_{23} 、 L_{13} を推定



各長さに
対して相
関をとる



* L_{12} 、 L_{23} 、 L_{13} の変動は、
各々独立に0.01pixel程度。

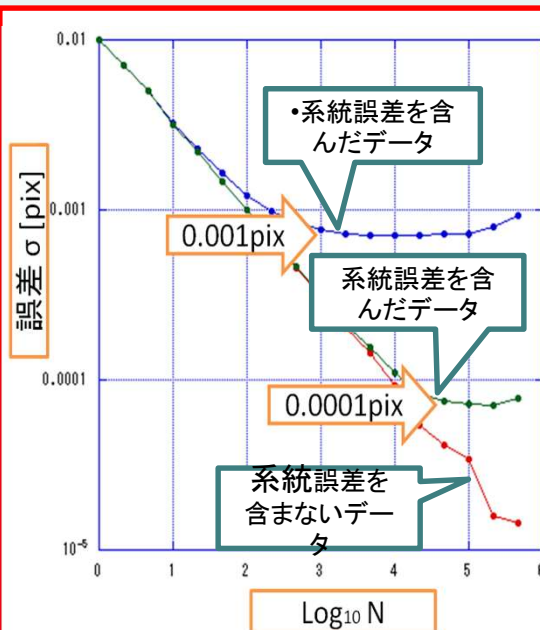


画像歪みが補正できていることに相当

微小な系統誤差が多数画像データから検知できる事の数値シミュレーションによる実証

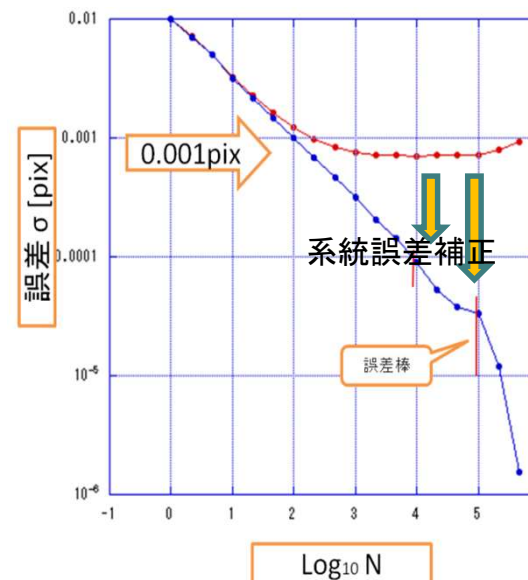
- 最終的に必要な精度は一回の観測で得られる精度に比べて圧倒的に小さい(3桁程度)。
- 以上のような1回の撮像より小さい誤差も多数の観測により確かに検出することができ、その誤差を取り除き補正することが可能である事を数値シミュレーションにより示す。

微小な系統誤差が多数画像データから検知できる事の数値シミュレーションによる実証



系統誤差の発見

微小な系統誤差が含まれている場合
(当初の星に位置精度では存在を認識出来ない場合)
⇒ 誤差が減少していき、あるところで、
 $1/\sqrt{N}$ 則が成立しなくなる
⇒ **系統誤差の存在を検知**



系統誤差の補正

モデル化:

- 多項式
- フーリエ級数

○ ベイズ型スプライン回帰法
+ 赤池情報量規準

- ・ 低次から試行して順次、高次の補正をしていくことが可能。
- ・ ステップ関数型の系統誤差も対応可能

モデルを改良して補正可能

これまでの実験や実証

- 2星間距離距離の決定精度が星像撮像枚数に応じて $1/\sqrt{N}$ で低減(100万枚)
- 推定した系統誤差の主原因が画像歪みであることを示す地上実験実証(3点の星像を使用)
- (1回の観測では検出できない)微小な系統誤差が多数画像データから検知できる事の数値シミュレーションによる実証

以上はすべて1次元解析



2次元マップにおける解析が望まれる

2次元データ実証手順

1. 2次元の星像位置導出プログラム作成
2. 2次元擬似データによる動作確認
3. 実際の地上実験データによる解析により
～100分の1pix精度で決定できるかの確認
4. 画像面上様々な場所で取得されたデータ
による補正ができるかの確認
5. 多数毎画像で精度が向上するかの確認

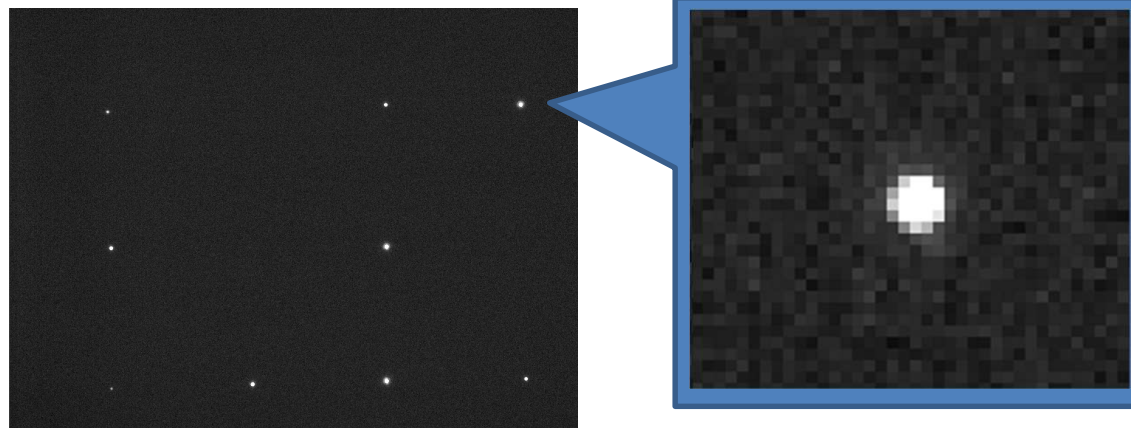
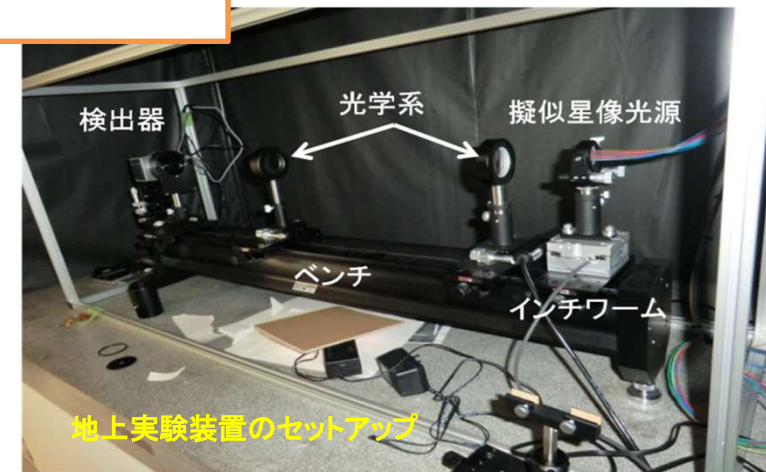
実験装置 & 使用データ

実験装置

- ・疑似星像光源、光学系、検出系がこの順番にベンチに設置
- ・光源はインチワームで移動可能

取得データ

- ・ 1画像から星像7個をピックアップ
- ・ 1回撮像毎、0.1pix相当疑似星像位置を移動、1200回分移動
- ・ 1200回移動のデータを20セット＝24000枚の画像データを用いる。



実際の地上実験データによる解析により100分の1pixレベルの精度で決定

- 検出器面の2次元面上の星像において星像の位置が1回の撮像データにつき、100分の1ピクセルレベルで決定できることを示す。

解析

使用するそれぞれの画像に対して
星像位置の決定: 中心位置推定 psfフィッティング

- ・平行移動
- ・回転 (←2次元の解析に現れる項)

の自由度を与え誤差が最小になるよう各画像フレームの位置関係を定める。

$$X(j) = a1(i) + x(i,j) - a3(i)y(i,j)$$

$$Y(j) = a2(i) + y(i,j) + a3(i)x(i,j)$$

i: i番目撮像画像

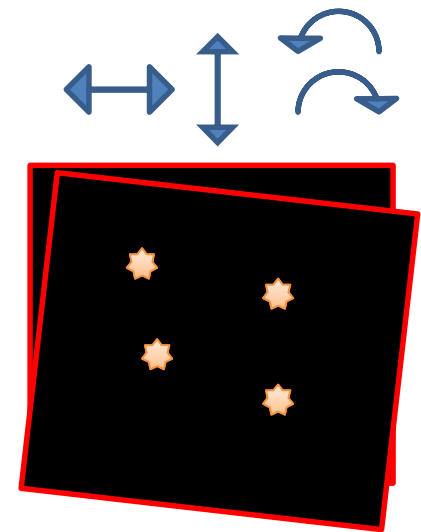
j: 画像内の番目の星

$x(i,j)$, $y(i,j)$: iフレームの星j

平行移動

回転

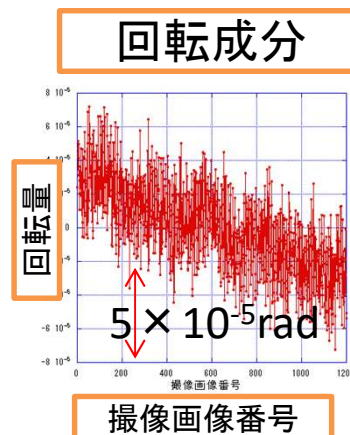
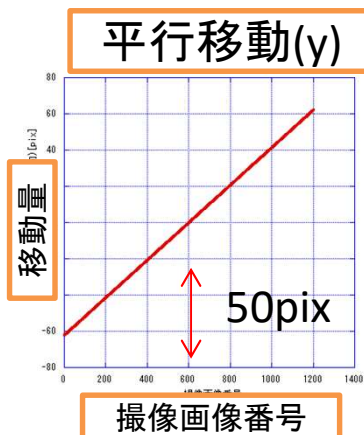
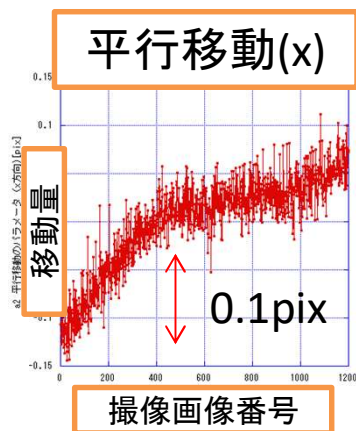
各星の位置についての誤差が最小になるようにパラメータ $a1(i)$, $a2(i)$, $a3(i)$ を定める。(最小2乗法)



検出器面上の星の位置決定

パラメータの値

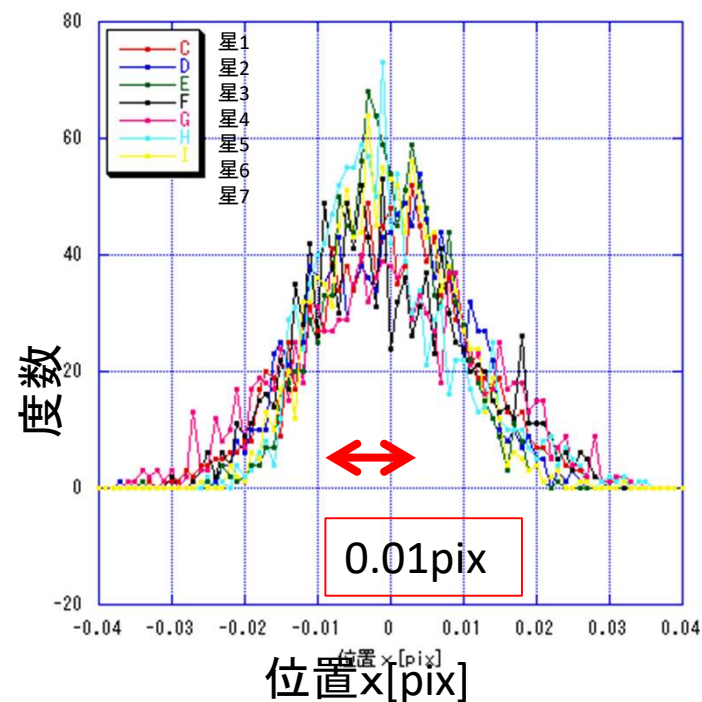
各撮像画像に対して導出されたパラメータの値



- 7個の星の位置を導出。
- 画像1200枚に対して平行移動量、回転量導出
- 7個の星それぞれについて、位置の誤差のヒストグラムを作成した。

7個すべての星についておよそ100分の1程度の位置決定ができています。

星の中には光子数が少なく位置の誤差が若干大きいものもある。すべての星を等ウェイトとしているので精度が精度のよくない星に引きずられる



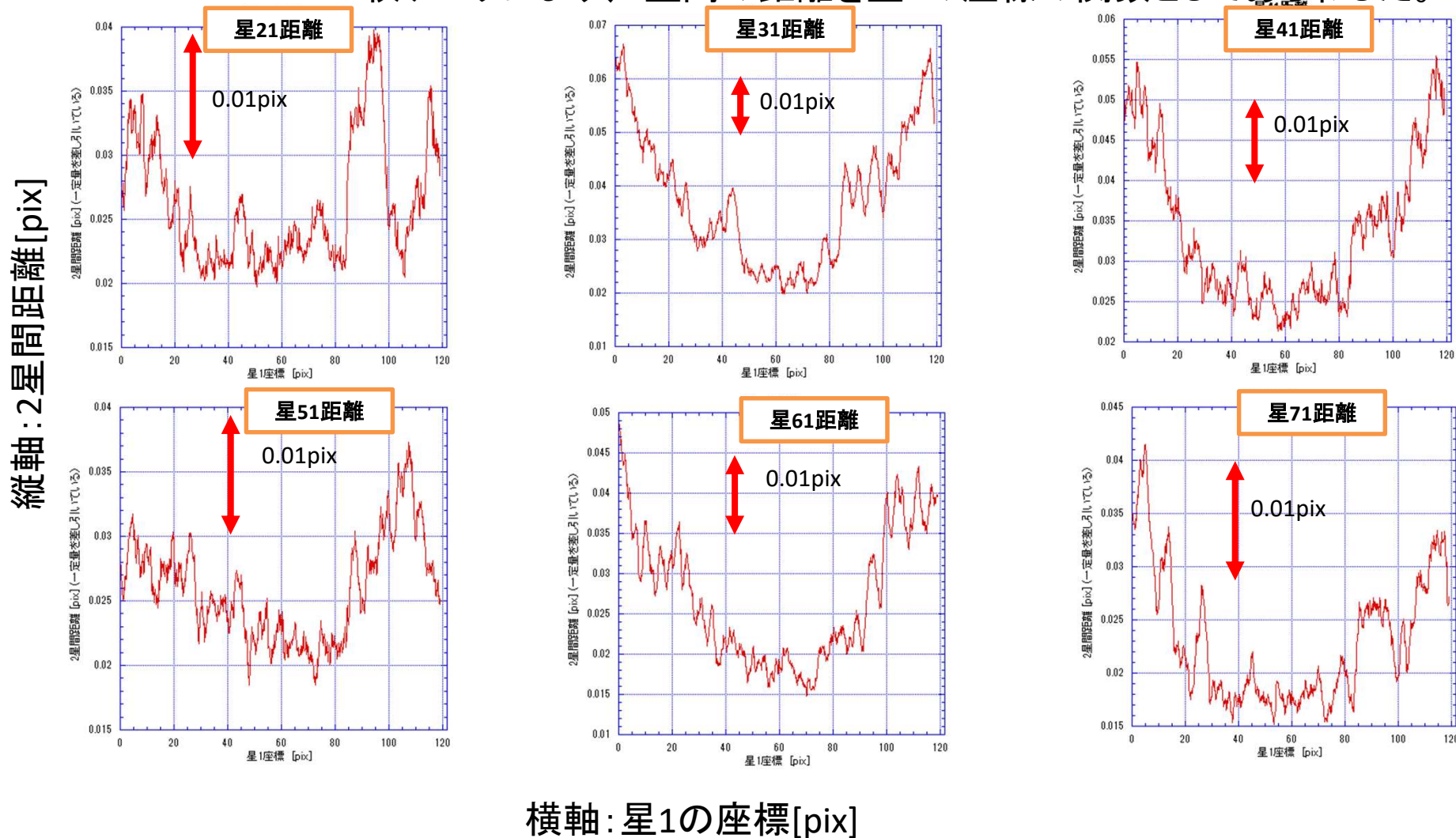
多数枚による歪補正

- 2次元多数枚により誤差の低減を目指す。
- 第一段階として、多数枚データを用いて星の位置決定精度を向上させ、画像歪などの系統誤差が現れる事を確認する。

多数枚データの解析

—2星間距離—

1200 × 20 = **24000**枚データにより、2星間の距離を星1の座標の関数としてあらわした。



多数毎解析により、位置の関数としての系統誤差が見えている。⇒補正が可能

まとめ

- 1次元の原理実験で、実験データから系統誤差を明らかにし、補正する事で枚数に応じて誤差が低減される事を実証した。
- 上述誤差が系統誤差であることを確認した。
- 一回の撮像では検出できないわずかな系統誤差が潜んでいる場合も多数データから抽出し、取り除く事ができる事を確認した。
- 2次元データの多数の星の間でも1回の観測で0.01pixレベルの位置決めが出来ている。
- 2次元多数データから系統誤差が表れている事を確認。

今後

- 明らかになった系統誤差をもとに補正し枚数に応じて誤差低減される事を実証する。