

2023年 春季年会 3月15日

V253b多数枚撮像による高精度 星像位置決定の多角的な実証

○矢野太平, 三好真(国立天文台),
ほか JASMINE チーム

はじめに

- 天文学分野において位置天文学をはじめ高精度に星の位置を高精度に決定する事は非常に重要な技術となっている。
- 赤外線位置天文観測衛星 JASMINE においても高精度に星像位置を決定する必要があり、その原理実証が求められてきた。
- これまでも、100 万枚という多数回撮像データを用いる事によって高精度星像位置測定を達成できるという実証がなされた。
- そして、このような高精度な星像位置測定ができていているという事を多角的な方法で実証することで、より確固たるものとしたい。
- そこで、熱変動による星像間距離の変化を正確にとらえる事により、確かに系統誤差が取り除かれ、星像間距離が求められていることを示す。
- さらに、光学系を変化させることで、検出器上の星像間距離の変化をとらえ、確かに系統誤差が除かれ、星像間距離が求められている事を示す。

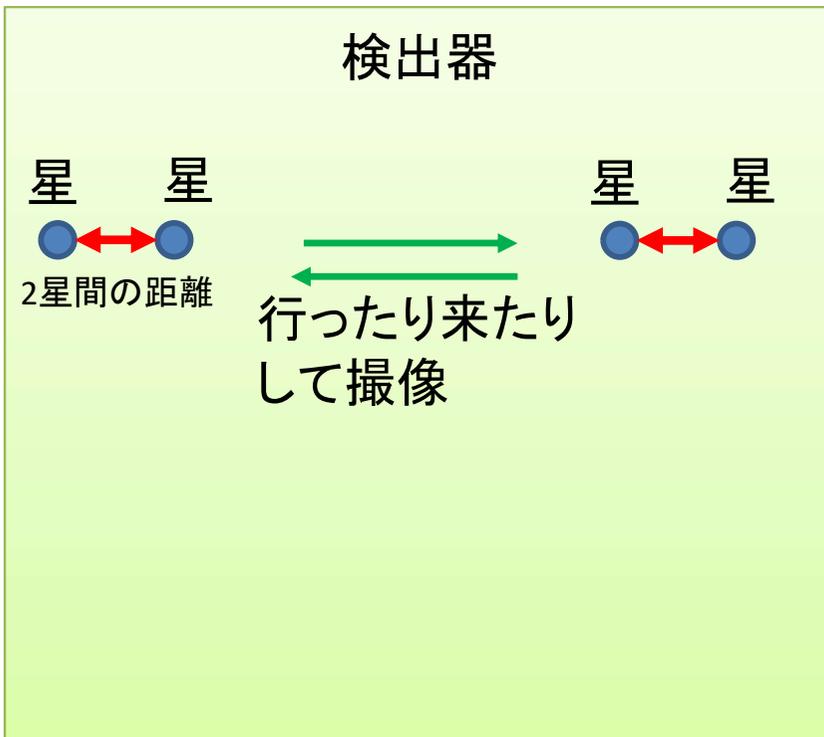
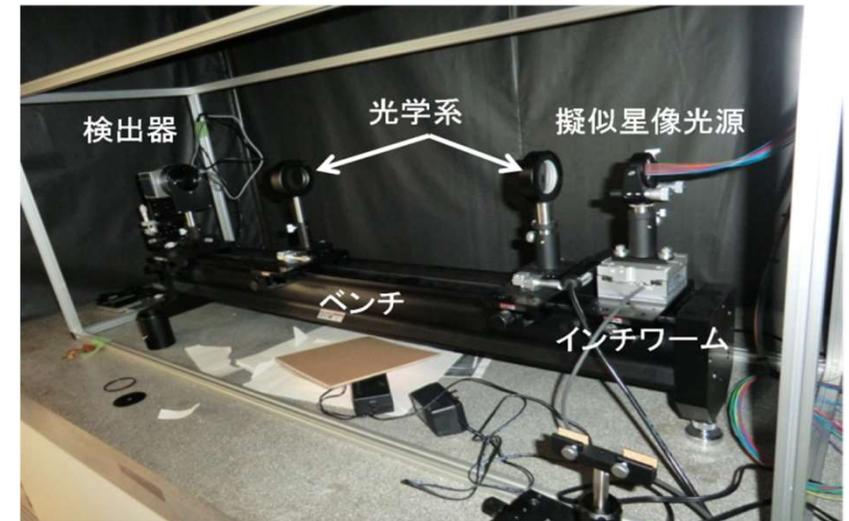
これまで実証した事

1. 1回の撮像により検出器上の1ピクセルの100分の1レベルの星像の位置決めが可能
2. 上述の撮像を100万枚という多数回繰り返し行う事によって10万分の1ピクセルレベルの高精度星像位置測定を達成。

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。

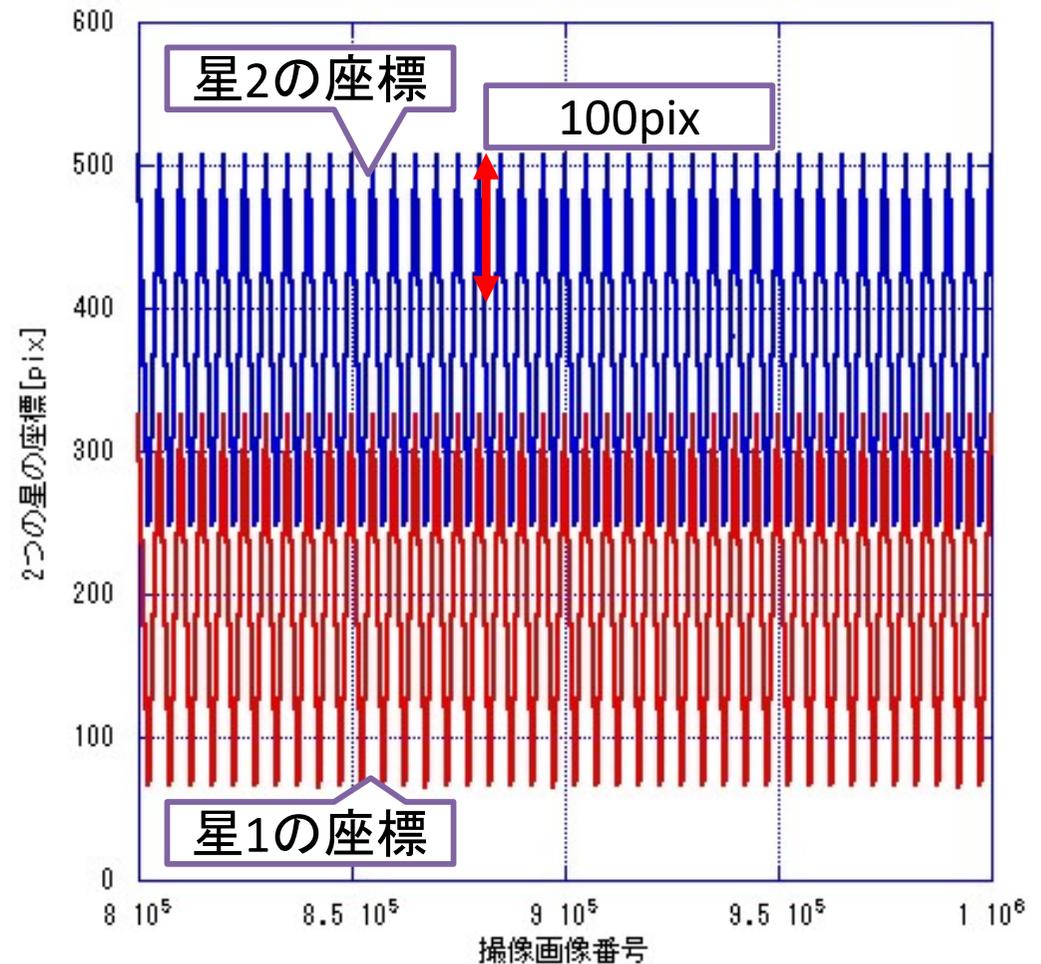
多数回撮像データによる高精度中心決定

- 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つの疑似星像の測定座標

- 撮像データ毎の2つの星座標を右図に記す。

0.1pix相当疑似星像位置を移動、片道2500回(250pix分)の往復運動する様子が見て取れる。

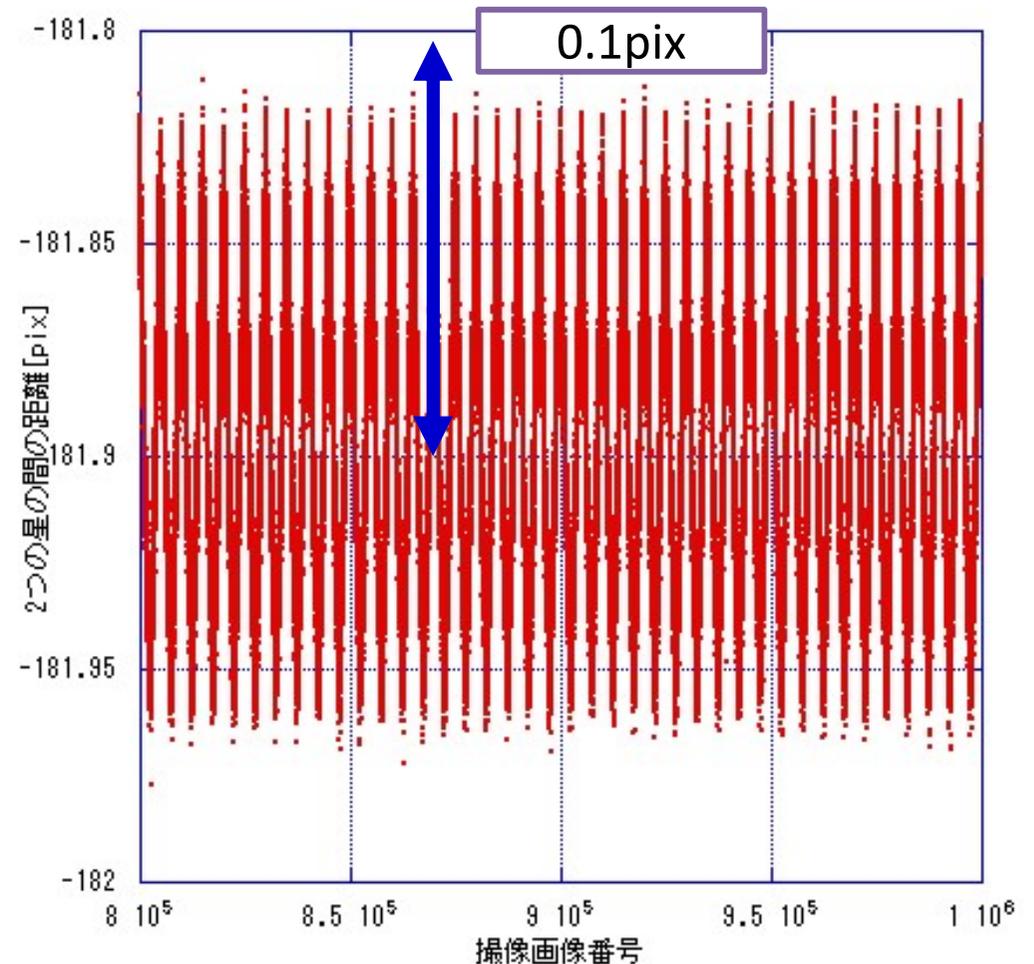


横軸：画像取得番号 縦軸：2つの星の座標[pix]
往復運動を見やすくするため80万枚以前のデータは割愛した。

2つの星の距離

- 撮像データ毎に2つの星の間の距離を示した。

画像歪(主に光学歪)の影響により検出器の撮像場所に応じて2星間の距離が0.1pixレベルで変動するのが確認できる。

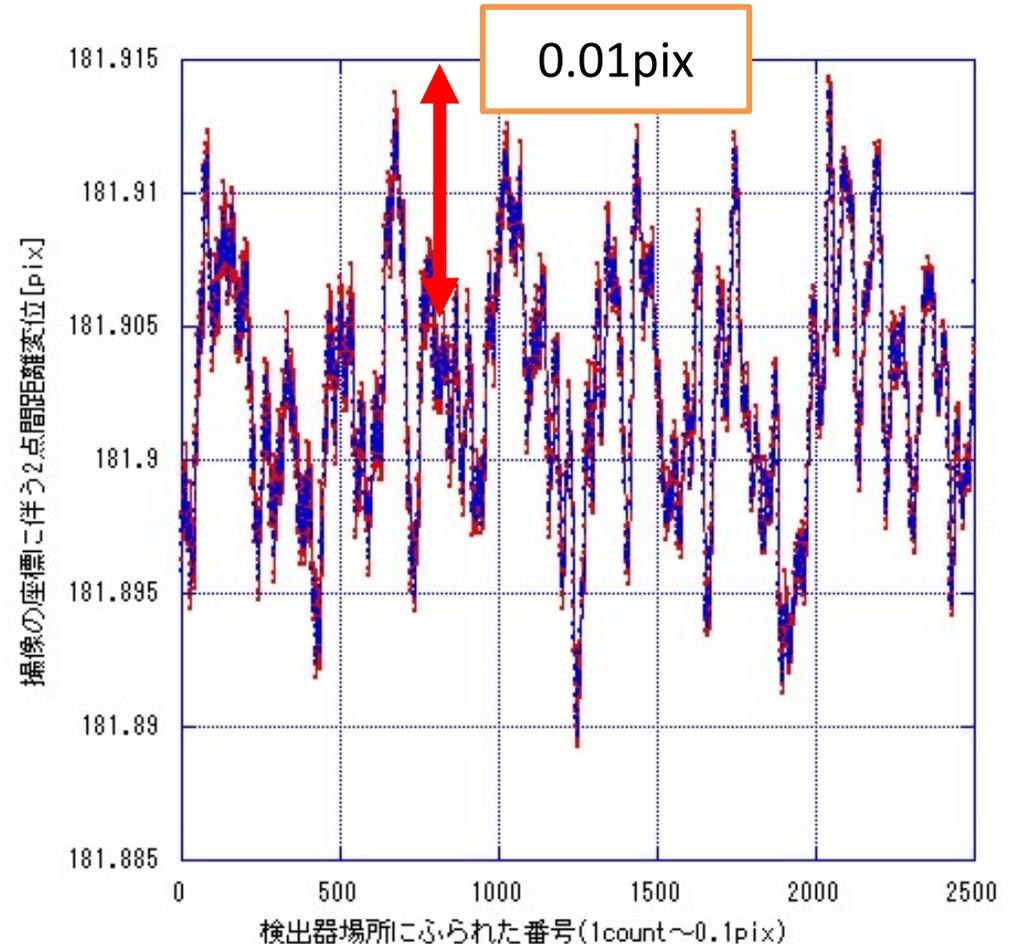


80万枚から100万枚までを示す。0.1ピクセルレベルのdistortionに関連する系統誤差が見られる。

検出器座標に伴う系統誤差

- 前スライドに示した大きな画像歪(主に光学歪)を多項式(4次多項式)によって補正し、検出器上の座標に対する2星間距離としてグラフに示す。

検出器の場所に応じて、異なる系統誤差の影響を受け、2星間距離が検出器の場所の関数として0.01pixのレベルで変動する。
⇒補正が可能

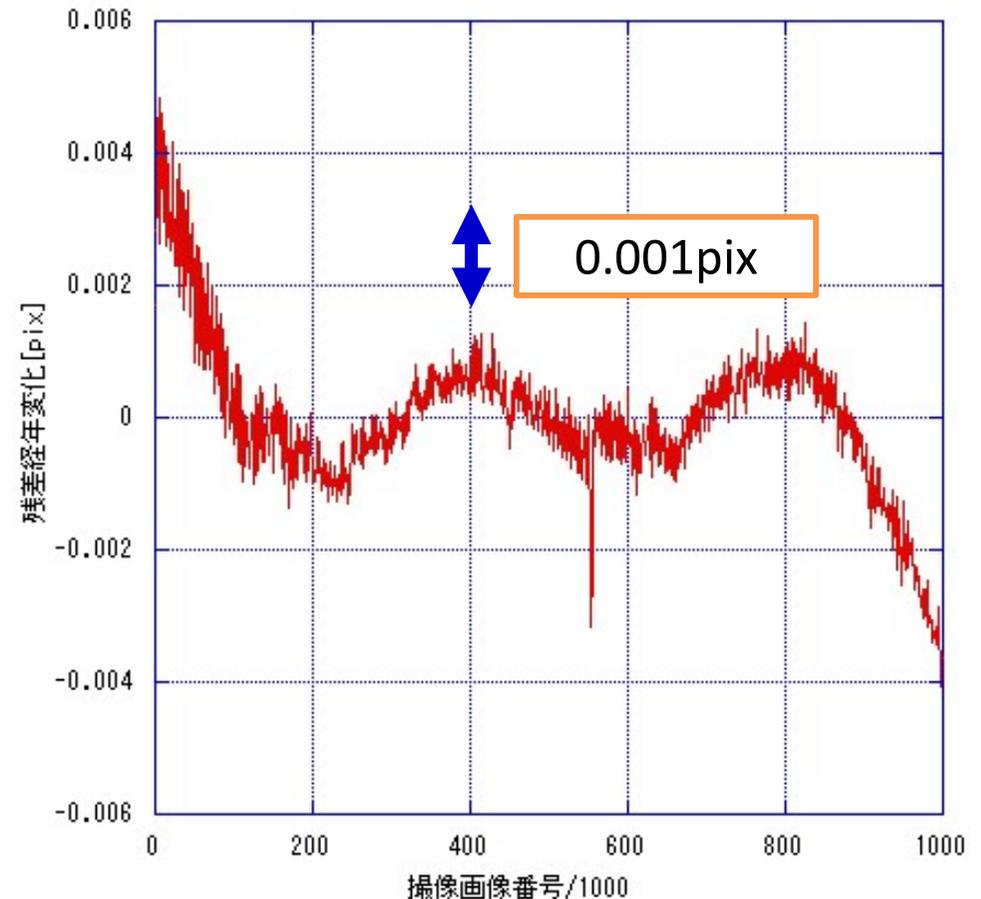


横軸：画像取得番号 縦軸：2星間距離変化 [pix] (座標に伴う系統誤差)
座標を横軸に整理した2星間距離。検出器の場所による系統誤差が現れる。

経年変化の補正

- 座標に伴う系統誤差を除いたのち改めて時系列に並べた撮像データ。

場所にもなう系統誤差を除くと微小な系統誤差として潜んでいた経年変化の系統誤差が表面化する。
⇒補正する事が可能。

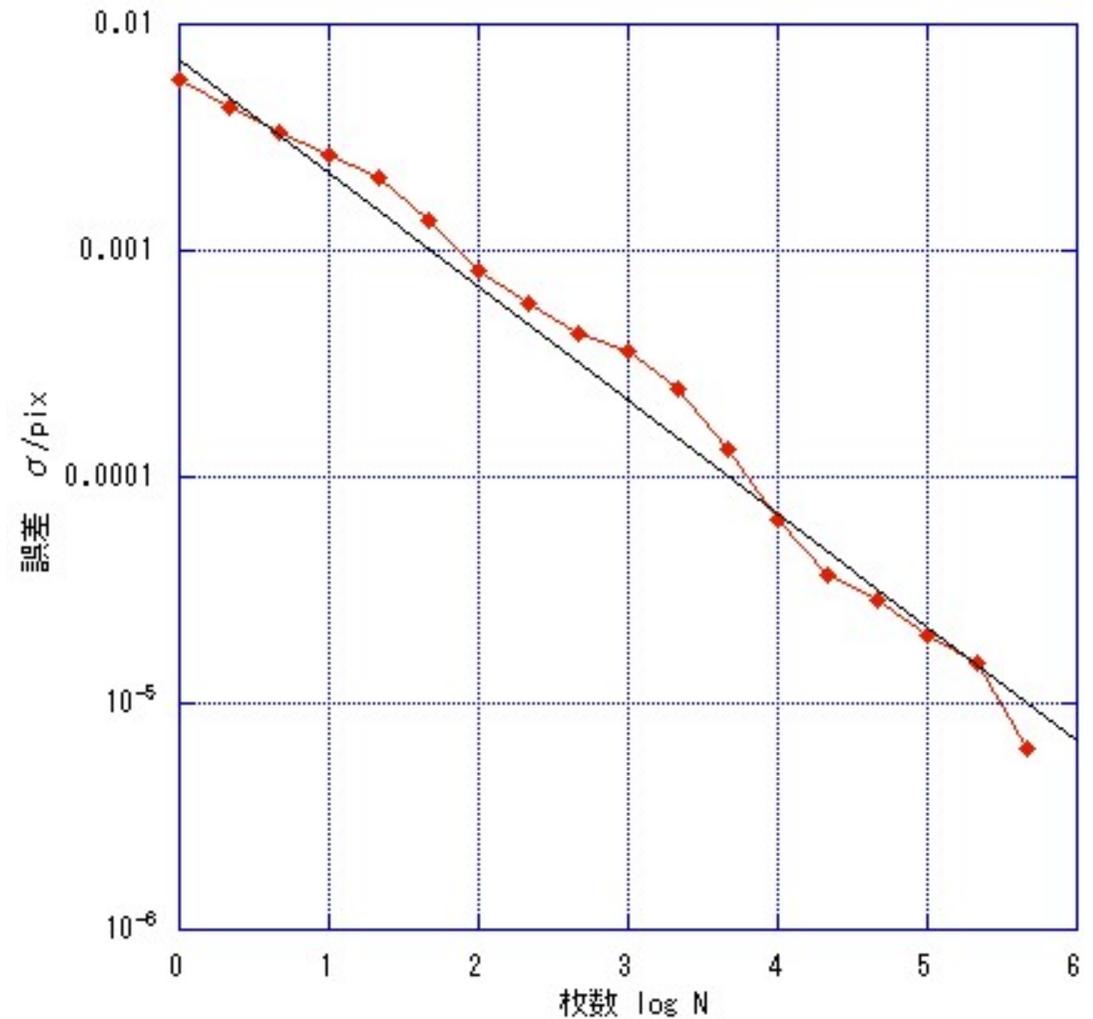


横軸：画像取得番号 縦軸：2星間距離変化 [pix] (時間に伴う系統誤差)
時間 (撮像画像番号) を横軸にして経年的変化を見る。時間的な変動が見える。

多数枚による誤差低減

- データ枚数と誤差の関係を示した。

系統誤差がのぞかれランダム誤差となっていると $1/\sqrt{N}$ に比例して誤差が低減される。



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

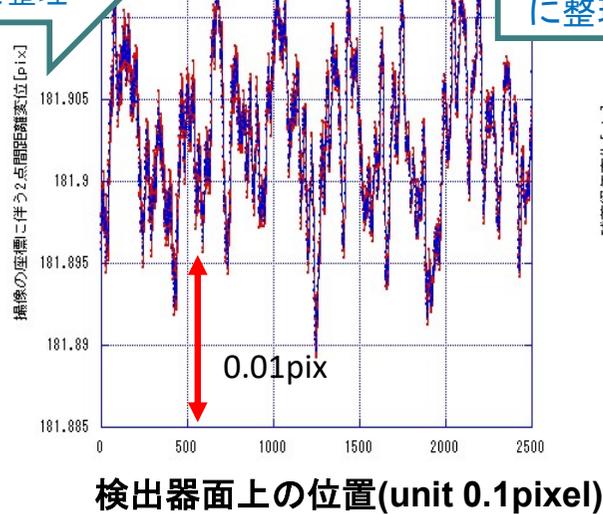
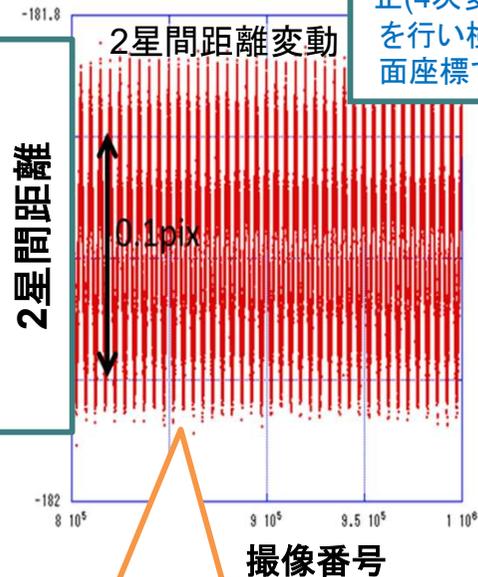
2星間距離の多数枚(100万枚)測定

(検出器面を往復運動しながら撮像)



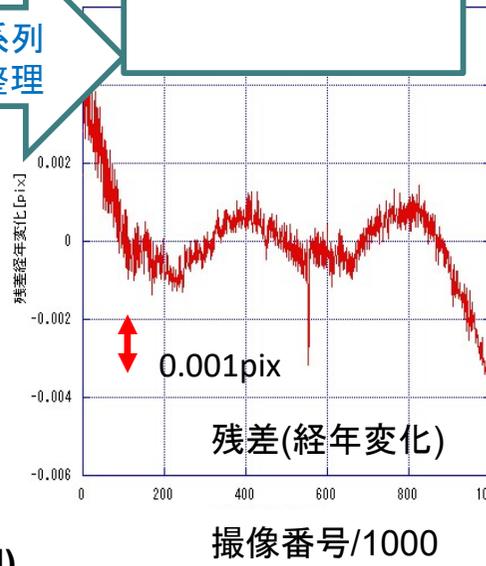
検出器歪みをはじめとするピクセルスケールの歪みが現れる。ベイズスプライン回帰をおこない補正する。

光学歪みの補正(4次多項式)を行い検出器面座標で整理

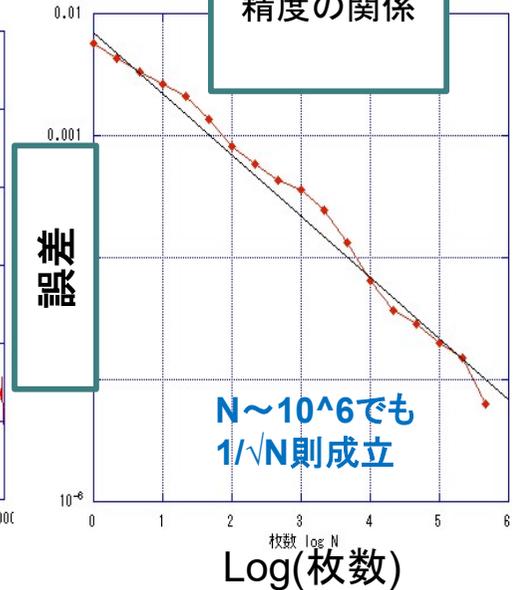


時系列に整理

2次多項式補正+ベイズスプライン回帰により補正



データ枚数と精度の関係



画像歪などの影響で撮像場所で2星間測定距離は変化する。

100万回の多数回撮像で、系統誤差をモデル化で補正しつつ、星の相対位置の誤差が2桁半程度減少(小型JASMINEに相当)

多角的な実証

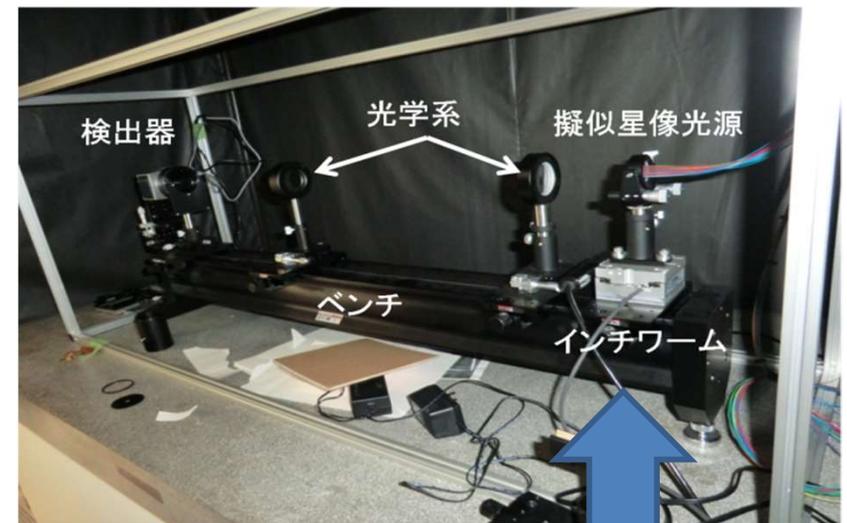
1. 高精度位置測定を行う際に補正した系統誤差が本当に物理的に正しく補正できている事を実証するため、コントロールされた熱環境で熱による装置の変形を撮像データから正しく測定できるかという事を示す。
2. 光学系レンズ位置を制御する事により焦点面上の星像サイズを制御し、その星像位置変動が正しく測定できるのかという事を示す。

実証1(熱変動による変形の測定)

地上実験装置において、疑似星像はアルミ基板にファイバー埋め込んだものである。この疑似光源を温度制御(測定)する。

星像間距離が温度変動に応じて変化する。

その変化が検出器で測定された星像間距離が無矛盾でとらえる事ができるかを確認する。



疑似星像光源

実証1(熱変動による変形の測定)

- アルミ(線膨張率 $2.4 \times 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$)基板における疑似星像光源において、 0.1°C 変化すると、検出器上で星像間距離が 3.2nm 程度変動する。これはおよそ3000分の1pix程度。
- 上述の値は1回の撮像では検出できないが、数千枚オーダで多数回撮像すると(うまく系統誤差を除く事ができていれば)検出できる量である。

実証2(光学系変動による変形の測定)

- 地上実験装置において、光学系をインチワームにより制御する。
- 光学系の変化により焦点面上における2星間距離が変化する。
- 変化した2星間距離を検出器で検出し、与えた変動で想定されるものと無矛盾であるかどうかを確認する。

実証2(光学系変動による変形の測定)

- インチワームを用い、 $1\mu\text{m}$ オーダーで光学レンズを制御する事により、effectiveな焦点距離を 10^{-6} の精度で制御する。
- その結果、焦点面上星像間距離を 10^{-4} pixで制御できる。
- 上述値は1回の測定では検出できないが、1万枚オーダーの多数回撮像で系統誤差をうまく除く事ができていれば検出可能となる。

現状および今後

- 現在、上述の実験を進めるべく、実験装置のセットアップを行っている。
- セットアップが完了すると、100万枚オーダーのデータ取得を行う。
- データ取得が完了後データ解析を行う。