

超小型位置天文衛星 Nano-JASMINE のデータ解析

山田良透^{*1}

Data analysis of Ultra small astrometry satellite Nano-JASMINE raw data

Yoshiyuki YAMADA^{*1}

ABSTRACT

Nano-JASMINE is high precision astrometric satellite mission by using ultra small satellite which has developed rapidly in recent decades. Targeted accuracy is 3 milliarcsec (3 mas), or 1.5×10^{-8} rad. For example, attitude sensor of middle sized satellite has about 1 arcsecond accuracy. On the other hand, that of ultra-small satellite has 1 arcmin accuracy. The key of achieving such high accurate observation by poor satellite instruments is the role of “data analysis”. In this document, we will report Nano-JASMINE data analysis, especially parameter selection of attitude model and its validation.

Keywords: Nano-JASMINE, Data analysis, Model

概 要

Nano-JASMINE は、近年急速に進歩している超小型衛星を利用して、高精度な星の位置決定の観測をしようという試みである。Nano-JASMINEの目指す精度は3ミリ秒角(3mas), 1.5×10^{-8} radである。衛星の姿勢センサーをみると、大型衛星では1秒角(1/3600度)程度が達成されるのに対して、超小型衛星では1分角(1/60度)程度の姿勢決定精度しか持たない。大型衛星に比べると性能の低い機器を用いた衛星で、高精度観測を達成するカギは、データ解析の役割の重要性である。Nano-JASMINEにおけるデータ解析、特に姿勢モデルのパラメータの選択に関して報告する。

記 号

mas	ミリ秒角	\mathbf{b}, \vec{b}	独立パラメータ
μas	マイクロ秒角	$f_i(\vec{a}, \vec{b})$	i 番目の観測値を決める式
HILS	hardware in the loop simulator	x_i	i 番目の観測期待値
CCD	Charge coupled device	o_i	i 番目の観測値
TDI	Time delayed integration	ε_i	i 番目の観測誤差
i	観測の index	\mathbf{q}_j	j 番目の姿勢 quaternion
j	姿勢時系列の index		
\mathbf{a}, \vec{a}	最小二乗法における推定パラメータ		

* 平成 27 年 12 月 17 日受付 (Received December 17, 2015)

^{*1} 京都大学大学院理学研究科 (Graduate School of Science, Kyoto University)

1. はじめに

日本の国立天文台を中心とするグループでは、超小型衛星を利用した Nano-JASMINE という位置天文衛星の打ち上げを予定している¹⁾。位置天文衛星と言えば、ESA により打ち上げられた Hipparcos(1989~1993)があり、同じく ESA により打ち上げられた Gaia(2013~)が運用中である。Hipparcos 衛星は、重量 1.4t の衛星だったが、Nano-JASMINE はたった 35kg の衛星で、Hipparcos と同程度の精度のカタログを出すことを目標としている。なぜそのようなことが可能になるかと言うと、もちろん、衛星バス部の搭載機器である Reaction Wheel や通信機、オンボード処理装置などが小型化したという事情もある。また、Hipparcos は光電増倍管を使っていたが、今は宇宙で CCD を使うことができるようになったという事情もある。位置天文衛星では解析の占める役割が大きいことが、小さな衛星で高精度を達成できる理由である。本稿では、Nano-JASMINE 衛星のデータ解析について、なぜ 3mas の精度が達成できるのかに係る解析技術を中心に、紹介する。

2. Nano-JASMINE 計画

位置天文観測は、星の時々刻々の位置を測定し、これより星の天球上の運動を精密に測定する天文学である。地球が太陽の周りを公転することにより、星は天球上で小さな楕円運動をする。また、星は銀河系の中を運動するが、連星など特別の星を除けば加速度は観測にかかるよりはるかに小さいので、星の運動は銀河系に固定した座標で見れば等速直線運動だと思って良い。地球、あるいは地球に近い軌道を周回する衛星から星の運動を観測すると、この見かけの楕円運動と等速直線運動の合成運動として、星は天球上をらせん運動する。天球面上の二次元等速直線運動はある基準時刻での位置と速度の合計 4 つのパラメータで、また楕円運動の位相と長半径・短半径比は星のある方向で決まるので、楕円運動は長半径だけ表現できる。これら 5 つパラメータを、位置天文パラメータと呼び、これらを解くことが位置天文の目的である。

楕円運動の長半径を年周視差と呼んで、これは太陽系重心から対象とする恒星までの距離の逆数である。天文学において、距離を測定することは、見かけの明るさから実際のエネルギーに換算する上で、また恒星系の 3 次元的な位置関係を把握するために重要である。しかし、多くは主系列星の色と等級の関係を仮定したり、変光星の周期と光度の関係を仮定したり、様々な仮定にもとづいている。地球の力学的な運動だけから推定される星の運動をもとに、それ以外の特別な仮定無しに距離を測定することができるが、位置天文学の特徴である。

ところが、年周視差と距離が逆数関係にあることや、星が遠くほどたくさん存在することから、年周視差の誤差が 10% を越えると距離の誤差は急速に増大する²⁾。距離 100pc に対応する年周視差は 10mas(ミリ秒角)だが、Hipparcos の精度である 1mas はこの 10% に相当する。つまり、今のところ直接測定で測られている星の距離は 100pc までと言うことである。Gaia 衛星は 10 μ as の精度を達成する予定なので、年周視差 100 μ as に相当する 10kpc 程度の星の距離まで測定できることになる。

Nano-JASMINE は、わずか口径 5cm の望遠鏡で、Hipparcos が達成した 1mas レベルの位置天文精度をもつカタログを作るためのミッションである。衛星バスは東京大学工学部、ミッション機器は国立天文台と京都大学、打ち上げはウクライナのロケットでブラジルの射場から行われるという、大きな国際協力である。さらに、データ解析は、日本のチームとヨーロッパの大型衛星 Gaia の解析チームが共同で行っていて、ドイツ、フランス、スペイン、オランダ、イギリス、ロシア、スウェーデン、アイルランドなど多くの国の研究者がかかわっている。特に Gaia のチームは Hipparcos で、位置天文のむずかしさとそれに対する対処の経験を持ち合わせている。

Hipparcos の最大の教訓は、次の点である。通常システムエンジニアリングでは、プロジェクトの成

功の前提にはミッションの成功が、ミッションの成功の前提にはシステムの成功があると考えられている。しかし、Hipparcos は予定の軌道に投入できなかった。明らかにシステムとしては失敗のミッションであるが、天文学的には非常に大きな成果を残した。プロジェクトとしては成功である。これを支えていたのが、解析技術である。予想していた軌道をそれでも、衛星から得られる様々な情報をもとに、衛星のモデルを組み直し、新しいモデルのもとで解析を実施し、当初予定以上の成果を出すことに成功した。

Nano-JASMINE 衛星の仕様は表の通りである。衛星自身は 2010 年 10 月に組みあがっていて、現在は東京大学工学部のクリーンブース内に保管されている。Nano-JASMINE は Hipparcos と同様、スピンの軸に垂直な方向の大角度離れた 2 視野を同時に観測する。2 視野の相対角は、Nano-JASMINE の場合は 99.5° である。Hipparcos では約 60° 、Gaia では約 106° である。二視野を同時に観測するため、主鏡の前にビーム混合鏡と呼ばれる確度の付いた二枚の平面鏡を置き、主鏡の上半分と下半分のそれぞれが別の方向を見るように設計されている。スピン周期は Nano-JASMINE で 1.5 時間、Gaia では 6 時間程度だが、このスピン数周回中で二視野の相対角が安定していることが、高い位置精度を達成するカギとなる。

表 1 Nano-JASMINE の仕様概要

質量	35kg
大きさ	50cm 立方
姿勢制御	三軸安定
ミッション期間	2 年
軌道	太陽同期軌道(高度 800km), LTAN 22 時
打ち上げ	2017 年末(調整中)
主鏡口径	5.3cm
2 視野の相対角	99.5°
焦点距離	1.67m
視野	$0.5^\circ \times 0.56^\circ$
検出器	完全空乏裏面照射型 CCD 1024 pixel \times 1152pixel
ピクセルサイズ	$15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$, 1.8 秒角 \times 1.8 秒角
自転周期	100 分(軌道周期と同期)
観測波長帯	$0.6\mu\text{m} \sim 1.0\mu\text{m}$ (z_w バンド)
精度	$\sim 3\text{mas}$ @ $z_w=7.5$ (Vega 等級)

また、衛星を熱的に安定させるため、環境条件をできるだけ均一にしなければならない。スピンに垂直方向の二つの視野で全天を掃くには、スピン軸を動かさなければいけないが、太陽からの角度を一定角度の 45° に保ったまま、2 か月程度の周期で歳差させる。スピン軸方向が太陽指向方向と一定であるということは、熱的に安定した環境を得るための一つの工夫である。CCD を TDI 駆動することで、両視野は天球上を掃きながら連続的な帯状のデータを出してくる。発生データレートは 2Mbps 程度となる。地球周回衛星では地上のアンテナからの可視時間は全体の 5% 程度なので、通常の科学衛星の通信では全データはダウンリンクできない。そこで、星像中心のまわりの 5×9 pixel 程度の部分を切り取って、データをダウンリンクすることで、2Mbps のダウンリンクレートでもダウンリンク可能なデータ量に減らすことができる。

3. Nano-JASMINE データ解析とモデル

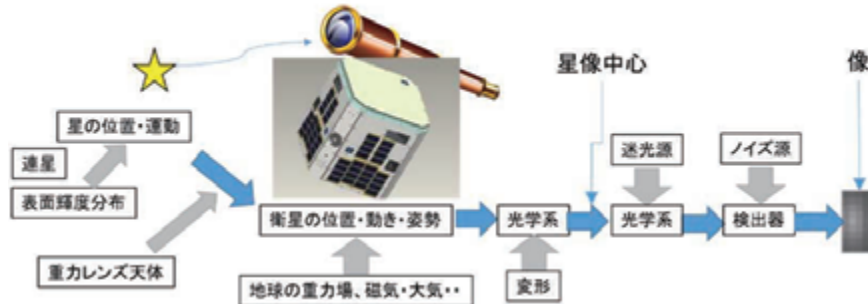


図 1 位置天文観測データの解析において考慮すべき効果。

Nano-JASMINE のデータ解析は、地上に降ろされるデータから星の位置や運動を再構築することである。これには、図 1 のような流れの逆問題を解く。図 1 を説明すると、次のようになる。

最初に星の位置と運動、衛星の姿勢や光学系のゆがみなどの情報がすべてわかっていたとする。そうすると、像面での星の中心位置は容易に計算できる。ただし、これらの効果の取り入れ方は、慎重に行わなければならない。

我々が測定しているのは星の像の光学中心である。一方、星が銀河系内を等速直線運動するのは、重力中心の話である。もし光学中心と重力中心が異なる動きをすれば、星の運動が 5 つのパラメータで書けるという前提が間違いになる。さらには、赤色巨星のような星はその半径が 1AU 程度ある。その星が黒点を持っていたり、光度にムラがあったりすると、光学中心の運動も観測精度の範囲で星の運動モデルからのずれを生じる。星の光が望遠鏡に入る前に、重力レンズ効果を受けて、星のある方向と光の来る方向がずれることも考えられる。望遠鏡の指向が正しく表現されたとしても、光学系がゆがんでいれば、像面の位置と天球上の位置の写像が自明ではない。さらに、衛星が運動しているので光行差も考慮しなければならない。

図 1 中の四角で囲ったすべての項目は、天球上の星の位置から像面での星像中心、さらには像を生成するときに影響を与える項目であり、仮にそれらが全てわかっていたとすれば、これは簡単な数式で書ける。

$$f_i(\vec{a}, \vec{b}) = x_i, o_i = x_i + \varepsilon_i \quad (1)$$

式中で f がその写像、 a は、図 1 でリストアップした「全ての」効果のモデルのパラメータ、 b は時刻などの独立変数である。観測を index i で表すと、 x_i は与えられたパラメータでの i 番目の測定での星像中心の期待値を表す。観測値 o_i は、 x_i に対して誤差が加わったものである。像面での星の中心位置から像を計算するのも同様のプロセスである。光学系のゆがみ、検出器の特性やノイズ、迷光などの条件を与えれば計算はできる。

位置天文解析は、与えられた o から a を逆問題として解くものである。Hipparcos でも Nano-JASMINE でも Gaia でも、この逆問題を、最小二乗法を用いて解く。

ここで重要な点は、最小二乗法とは

- 解きたい物理現象(姿勢・軌道・星の運動)を指定しても問題は定まらない。
- 物理現象を表現する「モデル」を指定して、初めて問題が定まる。

ということである。位置天文解析では、星の運動は先に述べた 5 パラメータの運動をするという「モデル」をたてる。Nano-JASMINE では、衛星姿勢は姿勢 quaternion q_j を区分的 Spline でつないだモデルを採用し、軌道はチェビシェフ多項式、星像は PSF のモデルを光学計算し、像面の変形、放射線の影響、chromaticity などは適当な次数の多項式を用いる。

4. Nano-JASMINE の姿勢モデル

Hipparcos のデータは 1997 年に ESA より公式に公開されたが、その 10 年後に新しい解析を行った結果が van Leeuwen 氏によって公表された³⁾。この研究から、まったく同じ生データでも、モデルを改善すると精度が改善することである。特に重要だと指摘された点は、衛星姿勢のモデルである。

Hipparcos では、スピン垂直方向の二つの視野を星が通過する時刻を測定する。つまり、スキャン方向(スピン軸に対する経度方向)の座標だけを測定する。スピン軸方向の評価に誤差があったとしても、スキャン方向座標は軸の方向の誤差に対して二次でしか効かないので、結果に対するインパクトは少ないというのがシステム設計上のポイントであった。しかし、これはスピン軸方向の評価に多少の誤差があるとしても、軸方向そのものは安定しているという「姿勢モデル」の前提がある。実際のデータを見ると、この前提は必ずしも正しくないというのが、van Leeuwen 氏の指摘である³⁾。結果として、スキャン方向座標だけを精度よく測っても、軸の動きを含めたモデル化をしないと、十分な精度は達成できないということである。van Leeuwen 氏は、衛星姿勢に対する様々な影響を物理的に考慮して、姿勢 quaternion を区分的 spline でモデル化することを提案した。

Nano-JASMINE 衛星は、Hipparcos 衛星に比べて軽く、軌道上で様々な擾乱を受けやすい。そのため、姿勢モデルについては Hipparcos 衛星以上に慎重に考える必要がある。システム同定モデルを適用すると、残差が白色化できる⁴⁾という研究結果もある。しかしながら、位置天文解析は大規模な解析であり、モデルを大幅に変更することは難しい。我々は、星像中心の像面上の座標から位置天文パラメータを用いる部分は、Gaia のコアソフトウェア AGIS⁵⁾ を適用する予定である。このソフトウェアは、姿勢モデルとして姿勢 quaternion の区分的 spline モデルを採用している。

このモデルを大幅に変更できないという前提で、可能なパラメータの中で必要な精度の姿勢 fitting を行うことができるかどうかについて、検討した。姿勢データとしては、東京大学工学部の Nano-JASMINE 担当学生が開発した HILS (Hardware in the loop simulator) を用いた。これには、地磁気、太陽輻射、大気などの姿勢擾乱要因、センサーの精度に伴う姿勢センシング誤差と、そのセンサー情報をもとにした姿勢制御則が実装されている。

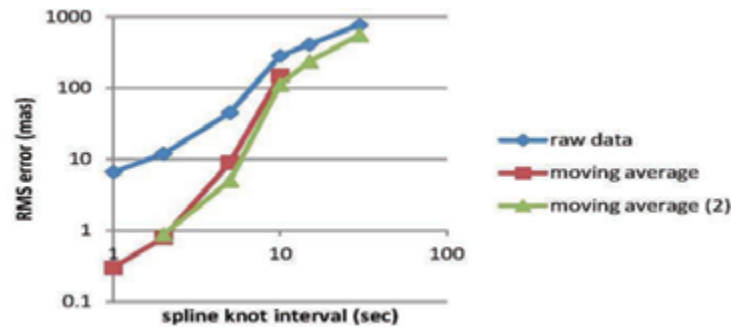


図 2 HILS により計算された姿勢則を Spline モデルで fit した場合の残差。青は生の HILS データに対するもの、赤と緑は HILS データに対して撮像時間の移動平均をとったものである。

HILS により計算される姿勢に対して、knot 間隔が異なるいくつかの Spline モデルで fit し、fit 前の姿勢との残差の RMS 値を計算したのが、図 2 のグラフである。位置天文解析のデータに使われる星像は、撮像時間程度(10 秒)の積分値である。それ以下の細かな振動は、星像中心を求める際は、その積分値だけが問題となる。そこで、生のデータへの fitting のほかに、10 秒移動平均をとったものに対する fitting も行った。移動平均の二つの異なる線があるのは、一つのデータで短時間スケールから長時間スケールまでをカバーできなかったため、二回の異なるシミュレーション結果を使ったためである。

Nano-JASMINE の要求精度は位置天文パラメータの精度で 3mas である。姿勢 fitting の誤差は、ある種の誤差として効くことになるが、異なる観測での姿勢相関は無いことから、本当はこれを観測回数 N_0 に対して $1/\sqrt{N_0}$ 倍程度に低減することを期待しても良いという考え方もあり得る。この姿勢誤差が「統計誤差」だとして扱う方法である。一方で、残差の白色性は保証されていないことを考えると、「系統誤差」として扱うべきだという考え方もあり得る。このどちらの考え方が正しいのか、あるいはその中間のどのあたりに答えがあるのかは、end to end のシミュレーションを実施してみないと分からない。そこで、今回は安全側に考えて、系統誤差的な取り扱い、即ち fitting 残差が 3mas より十分小さいことを条件とする。そうすると、knot 間隔が約 3 秒以下であれば、Spline モデルでも fit できるという結論になる。

ここでは、Nano-JASMINE の姿勢モデルのパラメータについて評価を行った。同様に、軌道、光学系ゆがみ、検出器特性、PSF など、Nano-JASMINE の観測に関係するあらゆる物理量のモデルを選択し、要求精度を達成するために必要な次数やパラメータ数を評価し、これらを解析ソフトに実装する必要がある。地上での実証実験などをもとに、これらの評価を進めている。

5. 結論

我々は、超小型衛星による位置天文観測衛星 Nano-JASMINE のデータ解析の準備を進めている。観測ストラテジが同じ Gaia 衛星のデータ解析チームと、コアソフトウェアの部分の共有を行う予定である。同じソフトウェアを異なるミッションに適用することは、チャレンジングである。その中で、解析に使われる「モデル」が取り得るパラメータを適切に選んで、系統誤差要因が目標精度の 3mas に比べて十分小さいようなパラメータが取れるかどうかの検討を進める。そのため、大学衛星の強みを生かし、工学・理学が一体となって、モデルの改善に努めている。さらに、モデルのより柔軟な変更が可能になるフレームワークも開発中である⁶⁾。

参考文献

- 1) Gouda, N., “JASMINE”, Scholarpedia, 6(10), 2011, 12021.
- 2) Lutz, T. E. and Kelker, D.H., On the Use of Trigonometric Parallaxes for the Calibration of Luminosity Systems: Theory, Publ. Astron. Soc. Pacific, 85 No.507,1973, pp.573- 578
- 3) van Leeuwen, F., “Hipparcos, the New Reduction of the Raw Data”, Springer, 2007
- 4) 伊藤まゆ美, “超小型人工衛星を用いたシステム同定による位置天文観測衛星に関する基礎研究”, 慶應義塾大学大学院理工学研究科修士論文 (2013)
- 5) Lindegren, L., Lammers, U., Hobbs, D., O’Mullane, W., Bastian, U., and Hernández, J., “The astrometric core solution for the Gaia mission. Overview of models, algorithms, and software implementation”, Astronomy and Astrophysics, 538 (2012) pp.78L
- 6) 初鳥陽一, 宮下尚, 清水淳也, 山田良透, “モデル駆動型システムズエンジニアリングに基づくモデル管理およびデータ解析—Nano-JASMINE データ解析への応用—”, 宇宙科学情報解析論文誌, 2 JAXA-RR-12-006 (2013), pp.103-111.