P-118：小型JASMINEにおける擾乱PSF解析

○鹿島伸悟[1], 上田暁俊[1], 矢野太平[1], 宇都宮真[1], 井上登志夫[1], 間瀬一郎[1], 郷田直輝[1], 山田良透[2], 安田進[3]
1:国立天文台JASMINE検討室　2:京都大学　3:JAXA

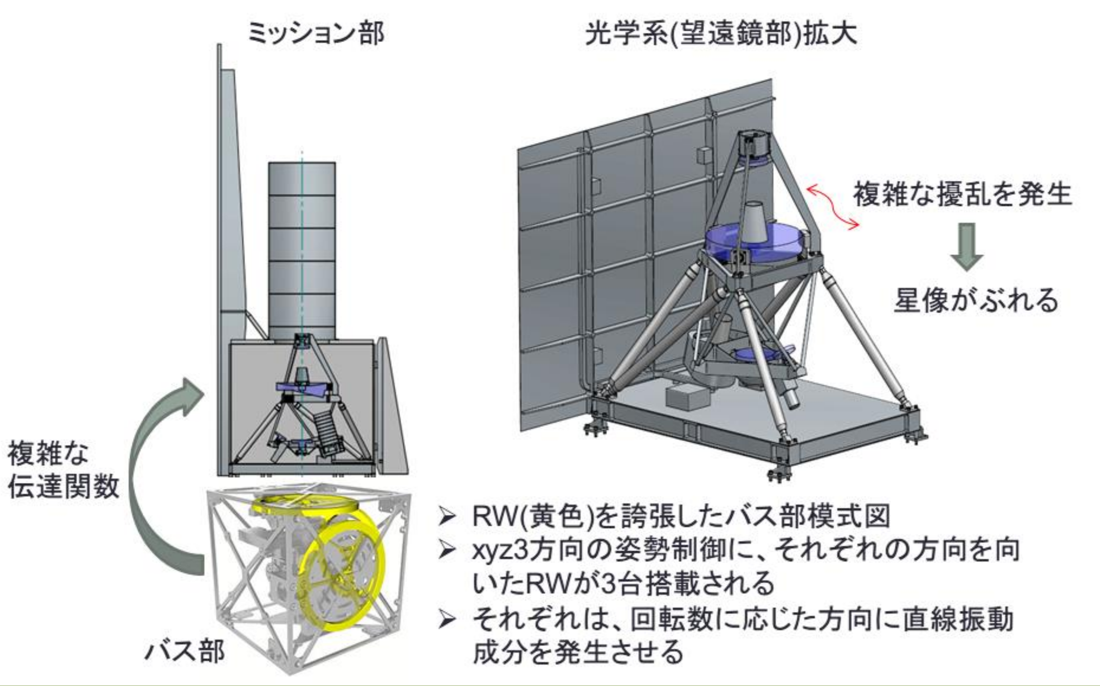
1

背景

- 小型JASMINEのバス部には3台のリアクション・ホイール(RW)が搭載されるが、これらはそれぞれ独立な擾乱源となり、それが複雑な伝likely関数でミッション部に伝わる
- 振動数によって(擾乱)振動方向が変わり、それが楕円振動となって伝達するとのこと
- 光学的には、PSFが微小に動き回ることになり、露出時間の7.1秒間積算されたものが得られる星像PSFとなる
- 正確な擾乱は、FMに近いものが出来上がってからでないと測定できないが、それまで待ってNGでは後戻りが大きすぎる
- そのため、ある仮定の下で、擾乱解析を行う必要がある
  - 3台のRWは、正弦波的擾乱を発生する
  - 振動の中心は三つとも一致しているとする
  - 周波数・振幅・位相は、ある範囲内でランダムな値を取る
  - PSFは、その三つの正弦波の重ね合わせに従って揺籃される

2

RWによる擾乱模式図



- RW(黄色)を誇張したバス部模式図
- xyz3方向の姿勢制御に、それぞれの方向を向いたRWが3台搭載される
- それぞれは、回転数に応じた方向に直線振動成分を発生させる

3

指向擾乱バジェットの整理

- 下表は「各姿勢擾乱が7.1secのタイムスケールでの指向安定度に与える影響」に関してまとめたものである(小型標準バスを想定)
- 周期が長いものはあまり影響しないため、やはりRWが一番効いている
- なお、下記擾乱値は伝達倍率260倍がかかった、ミッション部での値である

擾乱種別		誤差項目	周期[sec]	7秒スケールでの擾乱値[mas]
姿勢系ミッション		アラインメント誤差	Bias	-
		機械環境ヒステリシス	Bias	-
		ゼロG効果	Bias	-
		打ち上げ変動	Bias	-
		熱歪み	6000	27
AOCS誤差	姿勢決定誤差	STTバイアス	Bias	-
		姿勢推定フィルタ IRU伝搬	6000	31
	ガイダンス	目標のモデル化誤差	Bias	-
	制御誤差・ダイナミクス	自然外乱抑制残差	3000	22
		目標捕捉残差	13	100
		磁気アンロード外乱	30	62
内部擾乱		RW	0.02～0.03	240
		IRU	0.007	48

4

計算概要

- 3台のRW擾乱によって、星像が検出器面上で振動するものとし、それらの周波数、XY振幅、XY位相を、以下の範囲内でランダムに与える
  - 周波数：40～60Hz
  - XY振幅：0～2.25μm：7.1秒スケールでの擾乱値は240masであるため、光学系の焦点距離f=3857mmより、像面上では f*tan(0.24/2sec)=約4.5μm(4.4878μm)
  - XY位相：0～360度
- 星像の軌跡をXYそれぞれ三つの正弦波の和で表す
- 露光時間7.1sec、時間刻み100等分(=0.071sec)、その間振動状態は不変 (撮像中RWの回転数は一定)
- 先ずは、上記の計算をExcelのマクロを用いて作成した
- 3台のRWの振動状態及び三つの重ね合わせのグラフで示す
- 描画範囲は14x14μmで、ピクセルサイズ(□10μm)は青四角

5

Input/Outputと計算式

- Input (各randは各々独立な0~1の乱数)

	RW1x	RW1y	RW2x	RW2y	RW3x	RW3y
Freq.	40+20*rand		40+20*rand		40+20*rand	
Amp.	2.25*rand	2.25*rand	2.25*rand	2.25*rand	2.25*rand	2.25*rand
Phase	360*rand	360*rand	360*rand	360*rand	360*rand	360*rand

- Output (当然毎回変わる)

t [sec]	RW1x	RW1y	RW2x	RW2y	RW3x	RW3y	Sum_x	Sum_y
0	0.81636	-0.21794	0.33029	-0.39925	2.12296	-1.79188	3.26961	-2.40907
0.071	-0.95100	1.16945	-0.31351	0.07499	-1.64669	1.68810	-2.91120	2.93255
0.142	0.77111	-1.73418	0.28409	0.25230	0.68885	-1.09065	1.74405	-2.57254
0.213	-0.33619	1.72536	-0.24321	-0.56941	0.47044	0.17425	-0.10897	1.33020
…								
7.10	-0.95100	1.16945	-0.31351	0.07499	-1.64669	1.68810	-2.91120	2.93255

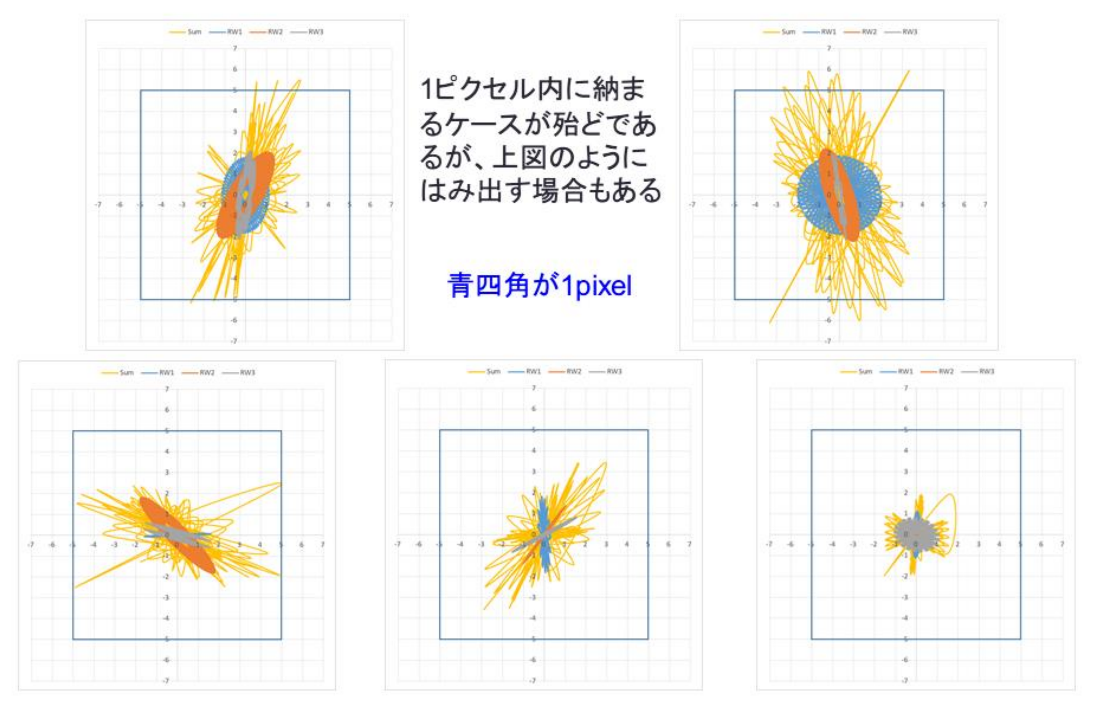
$$RW_{x,y} = Amp.*\sin(2\pi * Freq.*t + \frac{Phase}{180}\pi)$$

上記数値の計算式：

$$Sum\_x = RW1_x + RW2_x + RW3_x$$
$$Sum\_y = RW1_y + RW2_y + RW3_y$$

6

擾乱例



7

CodeVでの解析1

- 基本的にはExcelと同じ処理をマクロを用いて作成する
- 計算された三つの正弦波重ね合わせの、各時間でのxy値を書き出す(xt,yt)
- それを0.1μmで丸め込む
- 予め0.1μmピッチで1000x1000程度のPSFを計算しておく
- グリッドのシフト量は(round(xt)/0.1, round(yt)/0.1)となる
- 1000x1000のPSFから、中心を(round(xt)/0.1, round(yt)/0.1)だけずらした領域900x900程度をシフトしたPSFとして書き出す
- これを101個(0~7.1sec, 0.071sec刻み)積算したものを、ある乱数値での擾乱PSFとする
- この擾乱PSFを多数生成し、どのような擾乱PSFであっても、位置決定精度20μasが達成できることが示されれば、RWの擾乱が問題無いことが、ある確率で示されたことになる

8

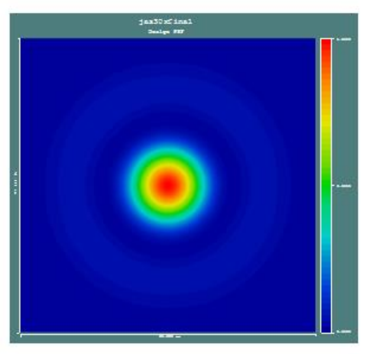
CodeVでの解析2

- 今回は、予め計算されたPSFとして、軸上設計値・波長1.4μmのPSFを用いた
- これは、ほぼ完全に無収差のPSFである
- 当然、このPSFに製造誤差や温度変化等による収差を付加することも可能であるが、段階的に解析していかないと、何が何だか分からなくなる危険性があるため、以下の順に進める予定である
  1. ほぼ無収差のPSFでの解析(今回の検討)
  2. 製造誤差(部品精度・アライメント誤差)の影響を付加したPSFでの解析
  3. 更に、軌道上での環境変化(主に温度)の影響を付加したPSFでの解析
  4. 必要であれば、更に、スパイダ構造の影響(画角依存)を付加したPSFでの解析
- 光学的に解析できるのはここまでであり、こうして作成されたPSFで位置決定精度20μasが達成できるかどうかは、実際の統計解析手法に基づいて計算する必要がある

9

計算結果例

図1



- 図1は設計値・軸上(ほぼ無収差)のPSF、図2はある擾乱を与えた場合のPSFである
- これでは差が分からないため、両者の差分を取ったのが図3
- 擾乱PSFは、元のPSFに図3のノイズが重畳したものと考えられる
- 図3のパターンの非対称性や、その値・分散等で何らかの評価ができないか？
- 図3のデータは、Max=0.0225, Min=2.02e-9である
- PSFは正規化しているためピークは1、よってこの例では、最大2.25%のノイズが乗っていることになる

図2

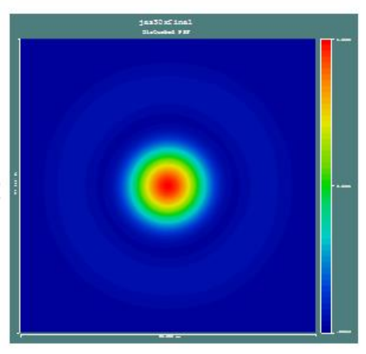
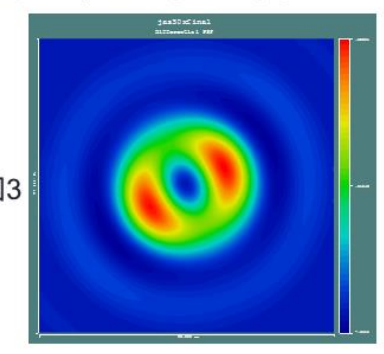
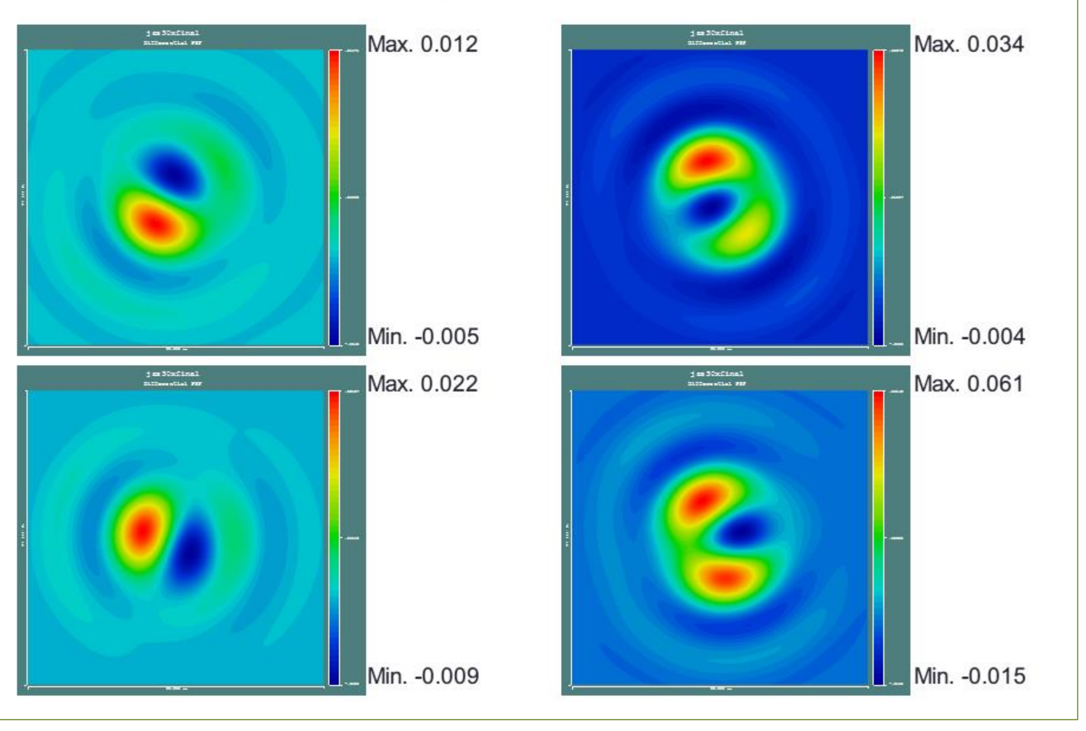


図3



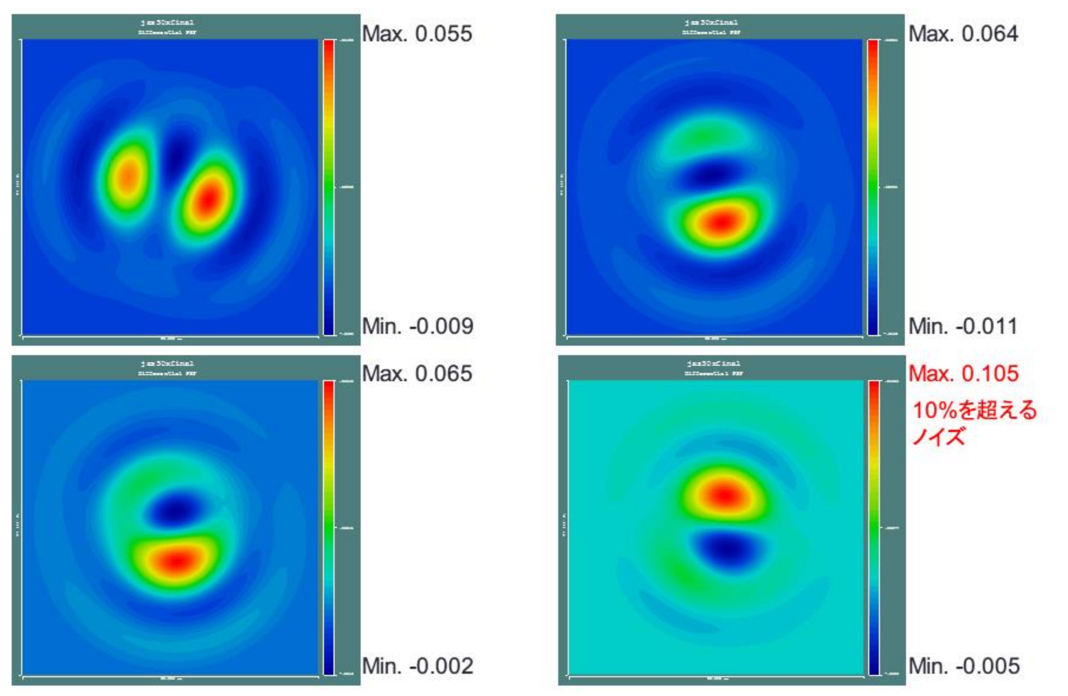
10

差分PSF計算結果例



11

差分PSF計算結果例



12

考察1

- ここで、計算時の仮定に関して考察してみる
- 3台のRWは、正弦波的擾乱を発生する
  - 完全な正弦波ではないかも知れないが、余程特殊な形状で無い限り、擾乱の波形は結果にあまり影響しないと思われる
  - RWは回転するはずみ車であるため、そこから発生する振動が、それほど特殊なものであるとは考えにくい
  - よってこの仮定はreasonableと思われる
- 振動の中心は三つとも一致しているとする
  - 完全には一致しないかも知れないが、ほぼ一致するであろう
  - 製造誤差等で、常にそれぞれがある量ずれているなら、それはBiasとして差し引ける
  - 温度変化等によって軌道上でずれるとやっかいであるが、現状そこまで詳しいデータはもっていない
  - よってこの仮定も、現状ではreasonableと思われる

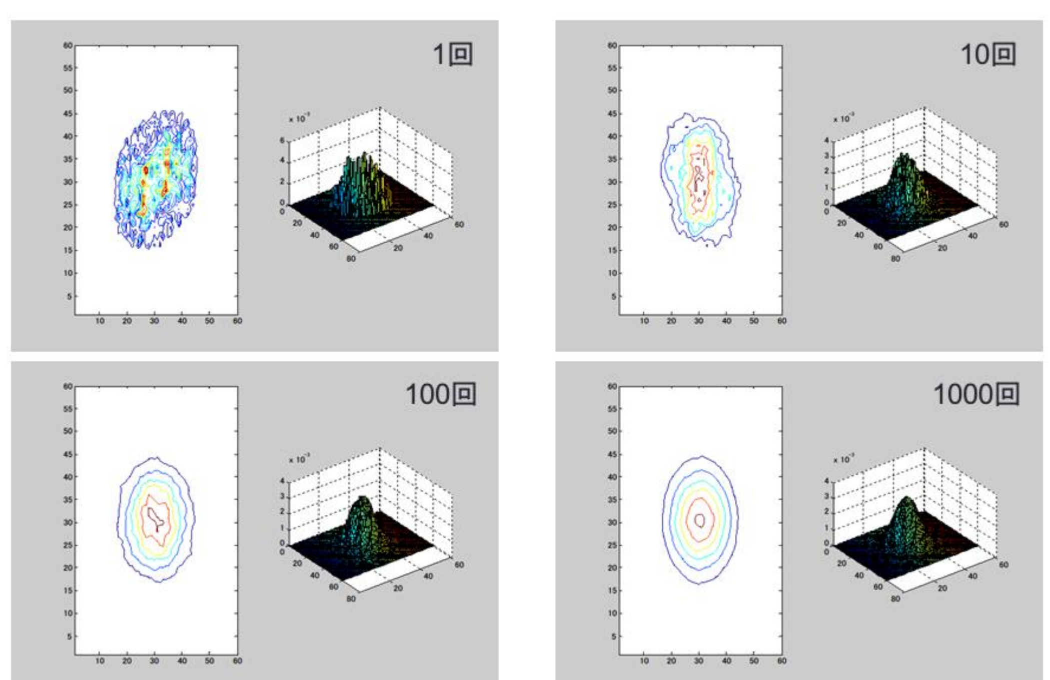
13

考察2

- 周波数・振幅・位相は、ある範囲内でランダムな値を取る
  - 今回ランダムで考えたのは、詳細な擾乱解析ができるところまで、構造設計が進んでいないからである
  - 実際の運用で画像を取得している7.1秒間は、周波数・振幅・位相は、常にほぼ一定となるはず
  - 但し、その「一定」のパターンは軌道上の位置や季節によって変わる
  - 小型標準バスメーカーからも、撮像中はRWの回転数はほぼ一定であると聞いている
  - つまり、1000回のうち997回がOKだからと言って、実際の運用時の周波数・振幅・位相が3回のうちに入っていたら、全画像がブレることになる
  - 擾乱が精度を満たさない範囲が特定出来れば、その周波数を避けてRWを運用することもできる(わりと一般的)
  - よって、PSFが一番歪むケースを求められれば良いのだが、3振動の重ね合わせとなるため容易には判断できず、ここはランダムにせざるを得ない
  - 以上より現状では、ランダムで100回くらい計算して、80~90%くらいOKならとりあえず合格と判断して良いのではないか？

14

試行回数による平均星像ブレの変化



15

まとめと今後の課題

- 光学性能を決めるPSFを劣化させる要因は種々あるが、擾乱がその中でも、最も影響の大きなものである
- ただ、その詳細な解析は非常に難しく、結局FMに近いものを実際に製造して実測してみないと分からない場合が多いが、その時点で問題が初めて発覚すると手戻りが非常に大きく、計画そのものが破綻する
- そのため、ある程度の仮定は置くが、事前に計算で擾乱PSFの解析を行っておくことが重要であり、今回その手法に関して詳細な検討を行った
- 但し、仮定はあくまでも現状での仮定であるため、もっと構造設計等が進み、仮定を見直す必要(見直せる状況)に応じて、計算をバージョンアップしていく必要がある
- 試行回数で星像のブレを平均してみると、少ない回数の時は最もらしく擾乱されてるが、回数を1000回にして平均すると、綺麗なガウス分布になってしまう
- これは前述の仮定より当然の結果であるが、実際は十分多数回平均しても特異な分布を持つと思われるため、仮定が未だpoorである証である