

H3

光学観測による宇宙物体の動態推定

Estimation of Space Object Behavior Using Optical Measurements

- 榎本稔也, 渡邊 一史, 藤田浩輝, 花田俊也 (九州大学), 北澤幸人 (株式会社 IHI)
- Toshiya Enomoto, Kazufumi Watanabe, Koki Fujita, Toshiya Hanada (Kyushu University),
Yukihito Kitazawa (IHI corporation)

軌道上の物体の形状や表面特性及びそれらの時間変化の計測(動態観測)は, 軌道上物体の特定, 生成原因, 挙動等を把握する上で重要である。低軌道において地球の影に入ってしまう間に追跡できない間に見失った物体を再同定する場合, 動態観測は重要な物体識別情報を供することになると考えられる。そのため中小型の光学望遠鏡(口径40cm~1m程度)に適した動態観測の方法とその観測能力を把握する必要がある。昨今, 光学望遠鏡で動態情報を得るための観測手法が研究開発されている。その中の補償光学等による観測画像の補正手法及びライトカーブ計測による宇宙物体の動態推定手法について取り上げる。静止軌道上物体に対して, 補償工学を用いた撮像画像の補正による観測限界, またライトカーブシミュレーションを用いた静止軌道上物体の姿勢, 形状推定結果の一例を紹介する。

It is important to observe not only the shape and surface characteristic of space objects but also their change over time to correlate them and understand their origin and behavior. In case of objects in low Earth orbit, we cannot track always them. For example, we may lose an object while it is in Earth's shadow, so that we may need to identify the lost object when it comes up again. Then, estimation of space object behavior using optical measurements is essential to identify it again. Therefore, it is necessary to figure out how space object behavior changes through measurements using medium- and small-aperture telescopes. Space object behavior in optical measurements have been studied for a long time. The imaging correction method using adaptive optics and the attitude and shape estimation method using photometric observation are picked up in this presentation.



光学観測による宇宙物体の動態推定

Estimation of Space Object Behavior Using Optical Measurements

榎本稔也^{a)}, 渡邊 一史^{a)}, 藤田浩輝^{a)}, 花田俊也^{a)}, 北澤幸人^{b)}

^{a)}九州大学 宇宙機ダイナミクス研究室

^{b)}株式会社 IHI

October 20, 2016



Contents

- デブリ問題
- 光学観測について
- 研究報告
 - 補償光学による観測画像の補正手法
 - ライトカーブ計測による宇宙物体の動態推定手法
- まとめ



Contents

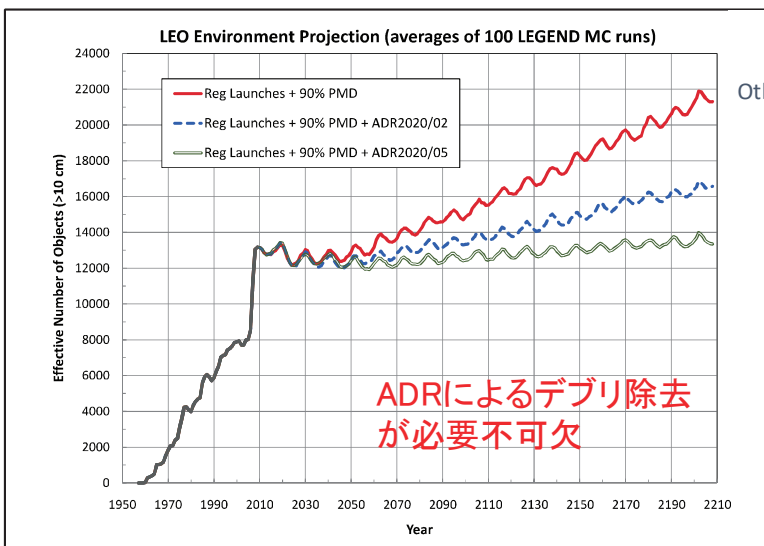
- **デブリ問題**
- 光学観測について
- 研究報告
 - 補償光学による観測画像の補正手法
 - ライトカーブ計測による宇宙物体の動態推定手法
- まとめ



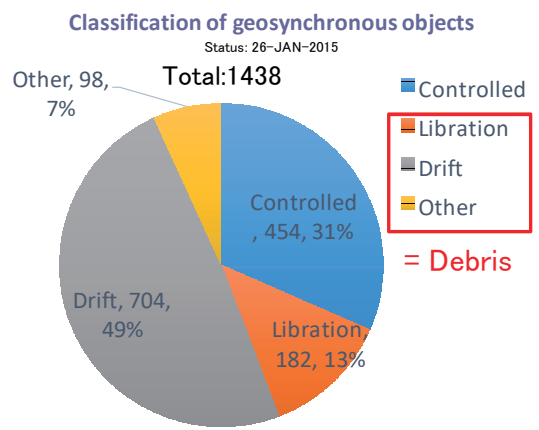
現在の宇宙環境

低軌道環境

静止軌道環境



Simulated LEO environment prediction with PMD and ADR scenarios. (ODQN,2011)



No TLE : 75
運用中の衛星との衝突リスク

(CLASSIFICATION OF GEOSYNCHRONOUS OBJECTS, T.Floher, ESA, 28 March 2015)





デブリ問題

- 運用中の宇宙機とデブリの衝突の被害は甚大
- 衝突・破砕によるデブリ増加とその特定が必要
複数の破砕に該当する場合の有効な評価法がない
- ADRを見据えた大型デブリの挙動把握が必要
- 低軌道の観測デブリを見失うことがある



宇宙物体の動態把握が必要



Contents



- デブリ問題
- 光学観測について
- 研究報告
 - 補償光学による観測画像の補正手法
 - ライトカーブ計測による宇宙物体の動態推定手法
- まとめ





動態推定とは

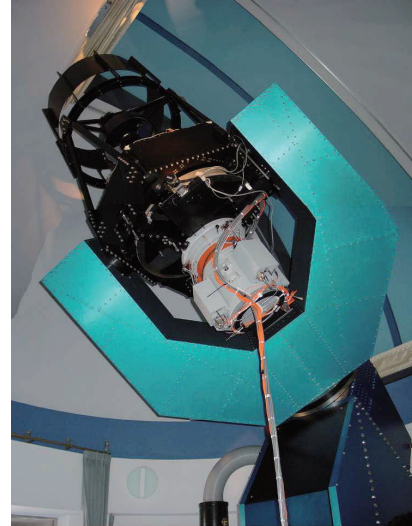
動態観測: 軌道上の物体の形状や表面特性及びそれらの時間変化の計測

有用性

- 軌道上物体の
- ・ 特定
 - ・ 生成原因の把握
 - ・ 挙動の把握

目的

多観測地点, 低コストの点から中小型光学望遠鏡(口径40~100cm程度)に適した動態観測手法の把握



美星スペースガードセンター
1m光学望遠鏡

動態観測手法



観測手法	原理	取得情報
研究報告		
撮像観測	天体の像を撮影	姿勢, 形状
測光観測	天体の明るさを測定	姿勢運動, 形状, 表面特性
調査報告		
分光観測	天体のスペクトルを測定	姿勢運動, 組成
偏光観測	天体の光の偏りを測定	組成



Contents

- デブリ問題
- 光学観測について
- 研究報告
 - 補償光学による観測画像の補正手法
 - ライトカーブ計測による宇宙物体の動態推定手法
- まとめ



補償光学とは



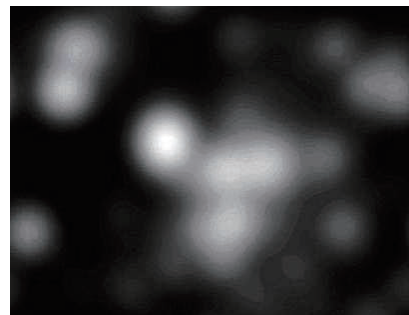
大気による波面の乱れ

➤ 撮像に悪影響

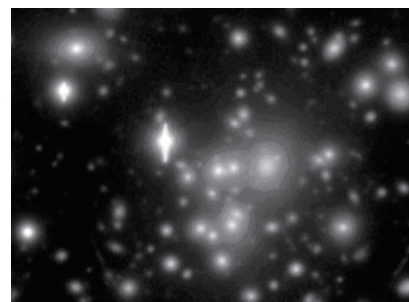


解決するためには？

- 宇宙空間に望遠鏡を設置
 - ハッブル宇宙望遠鏡
- 光学系の内部で乱れを補正
 - 補償光学



補償光学なし



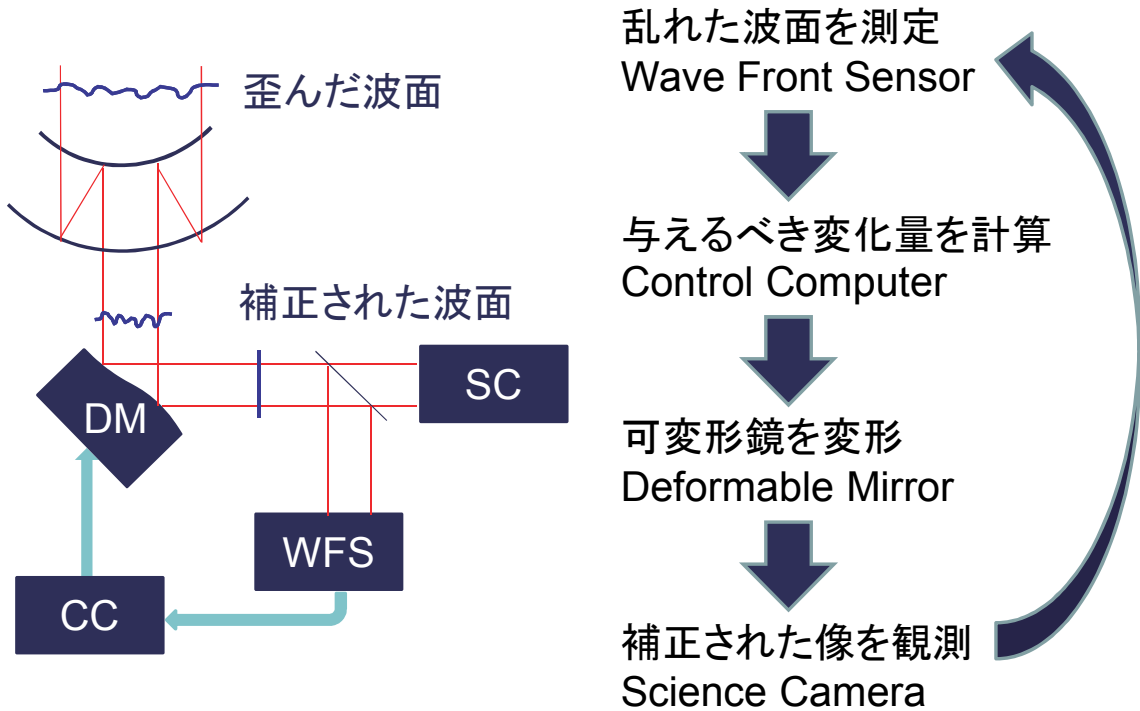
補償光学あり

http://subarutelescope.org/Pressrelease/2005/07/06/j_index.html

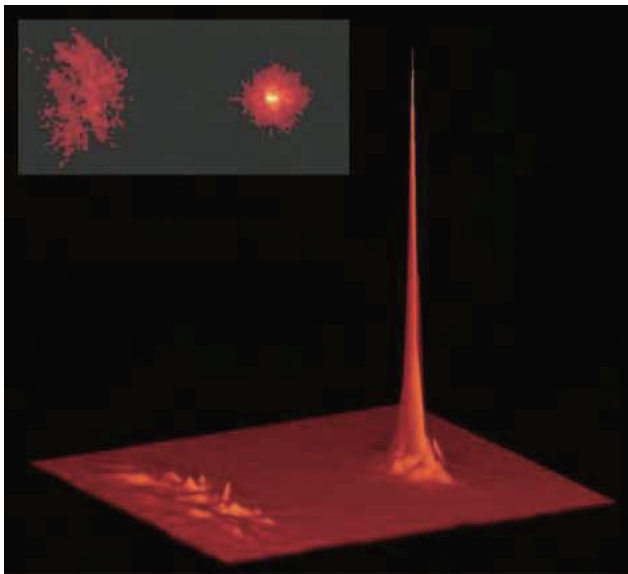




一般的な補償光学装置



補償光学の効果



点像分布関数(PSF)の比較
左:補正前, 右:補正後

James R. Graham (UCB) with IRCAL on the Lick Observatory 3m.

- ピーク値の増加による限界等級の改善
 - ライトカーブによる動態観測の実行に寄与
- 空間分解能の向上
 - 対象の姿勢・形状をより詳細に観測可能



すばるを想定したシミュレーション

Subaru

- 補償光学システム: HiCIAO
 - イメージセンサ [1]: 4.2 MPixel
 - 視野 [1]: 20 arcsec × 20 arcsec
 - 空間分解能 [2]: 0.03 arcsec
 - 観測波長: 1.6 μm
- [1] <http://exoplanet.mtk.nao.ac.jp/instrument/hiciao>
 [2] <http://tmt.mtk.nao.ac.jp/intro-j.html>

観測対象

- JCSAT3
 - 高度 : 35786 km
 - サイズ : 26.1 m × 7.6 m = 0.150 arcsec × 0.0436 arcsec



- シミュレーションのパラメータとしては望遠鏡の空間分解能, 高度及び観測対象の高度, サイズのみを考慮
- 観測波長を1.6μmに設定し, 大気の影響を無視できると仮定



シミュレーション結果



左:衛星の画像, 右:衛星の画像からシミュレートされた画像

解像度の低下に加え, 実際は画素数の制限により画質が劣化するため, 補償光学を適用しても静止軌道上の衛星を直接撮像するのは困難



Contents



- デブリ問題
- 光学観測について
- 研究報告
 - 補償光学による観測画像の補正手法
 - **ライトカーブ計測による宇宙物体の動態推定手法**
- まとめ

14

第7回スペースデブリワークショップ



KYUSHU UNIVERSITY

測光観測



15

第7回スペースデブリワークショップ



KYUSHU UNIVERSITY

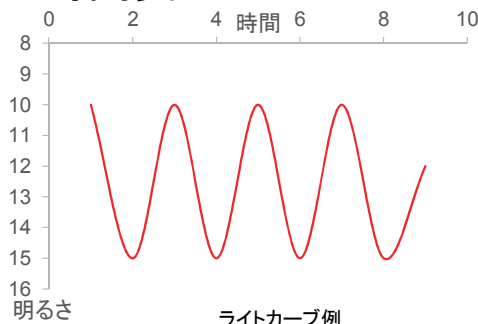


測光観測

ライトカーブ：対象物体の明るさの時間変化

利点

- ・観測システムが簡単
- ・必要経費が少ない
- ・既存の観測システムが多い



ライトカーブ例

課題

- ・3軸物体への取り組みがあまり行われていない
- ・動態情報取得の限界が不明瞭



九州大学ペガサス望遠鏡



ライトカーブモデル

観測量：ライトカーブ(等級)

$$y = m_{sun} - 2.5 \log_{10} \left| \frac{F_{target}}{F_{sun}} \right|$$

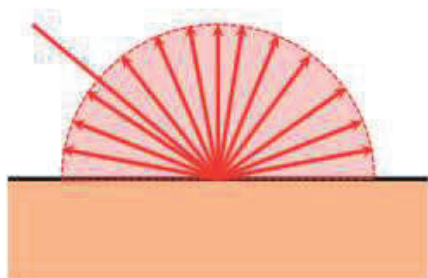
F_{target} : 対象のフラックス [W/m²]

F_{sun} : 太陽のフラックス [W/m²]

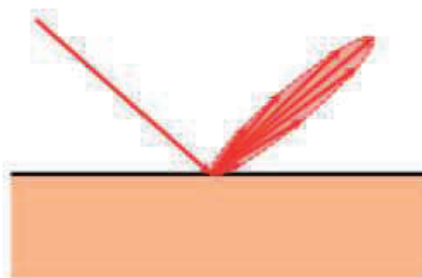
m_{sun} : 太陽の見かけの等級

鏡面反射モデル: Cook-Tranceモデル

(1) 拡散反射



(2) 鏡面反射





推定手法

Unscented Kalman Filter (UKF)を利用

- ・ ヤコビ行列の計算無し
- ・ 拡張カルマンフィルタに比べて高精度

状態量(姿勢, 角速度)

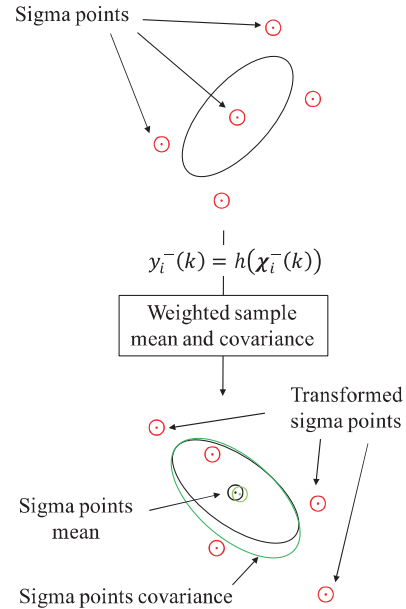
$$\dot{x} = f(x, t) + G(x, t)T(t)$$

$$x = \begin{pmatrix} q \\ \omega \end{pmatrix}$$

運動モデル

$$\dot{q} = \frac{1}{2} \Xi(q) \omega_{B/I}$$

$$\dot{\omega} = J_{obj}^{-1} (T_p - [\omega_{B/I} \times] J_{obj} \omega_{B/I})$$



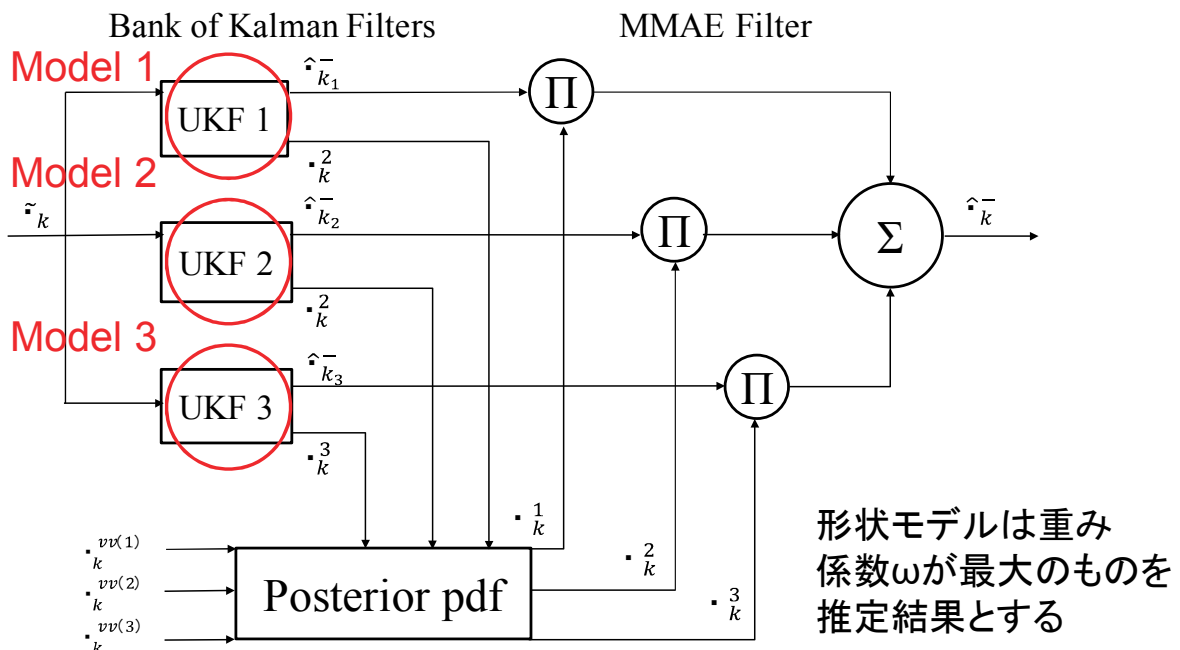
Unscented 変換イメージ図



Multiple-Model Adaptive Estimation(MMAE)

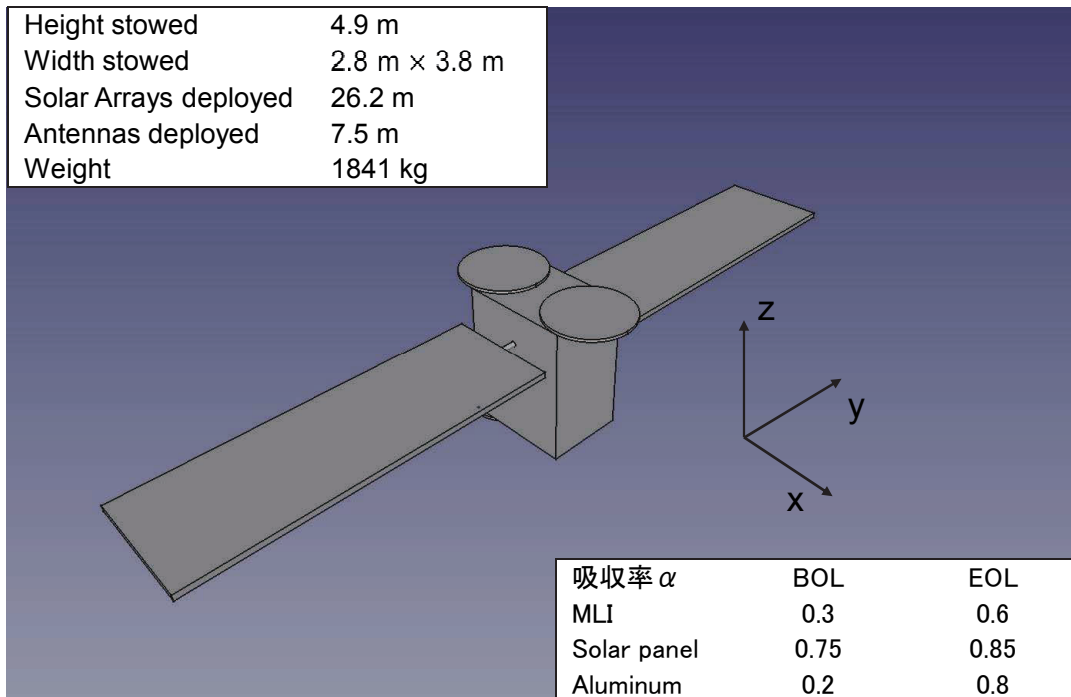


最終状態量は各UKFの推定値の重み付け和として計算





衛星モデル



Simulation

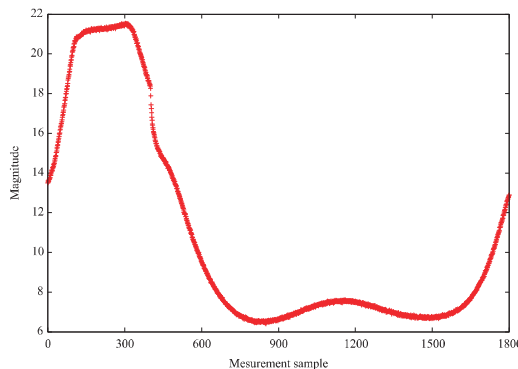


1. 衛星モデルを使用し、ライトカーブデータを作成する。
(平均0, 分散0.1の白色ノイズ)

シミュレーション条件

JD	2457724.998901
Mean motion [rev/day]	1.002736
Eccentricity	0.000598
Inclination [deg]	7.146
Right ascension of ascending node [deg]	51.38
Argument of perigee [deg]	236.50
Mean anomaly [deg]	51.12

観測地点:九州大学ペガサス望遠鏡
 N:33°.598978
 E:130°.211812
 Altitude:70 m



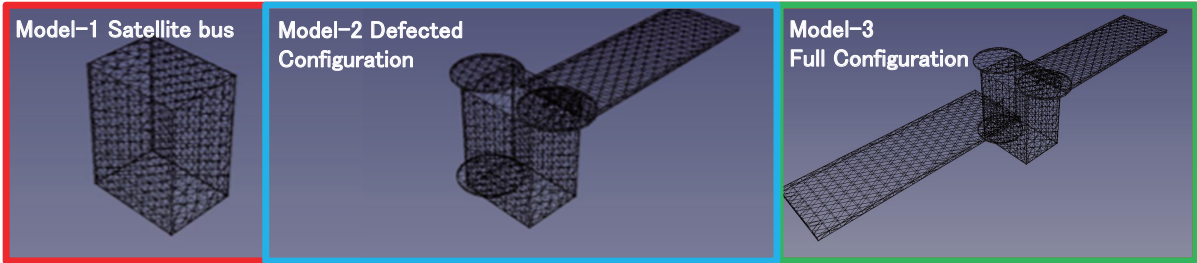
得られたライトカーブ





Simulation

2. 異なるシナリオで姿勢, 形状モデルの推定を行う



シミュレーション条件

	Model-1				Model-2				Model-3			
	B	B	M	E	B	M	E	B	M	E		
シナリオ1	○	○						○				
シナリオ2								○	○	○		
シナリオ3			○	○	○							

形状モデル

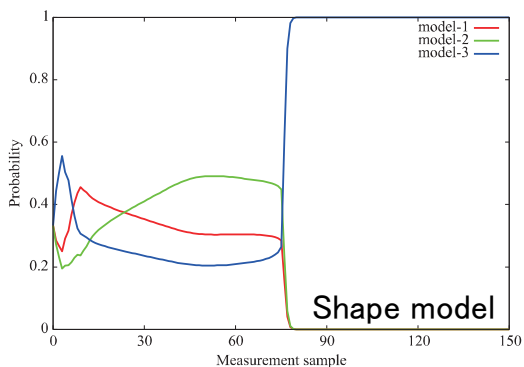
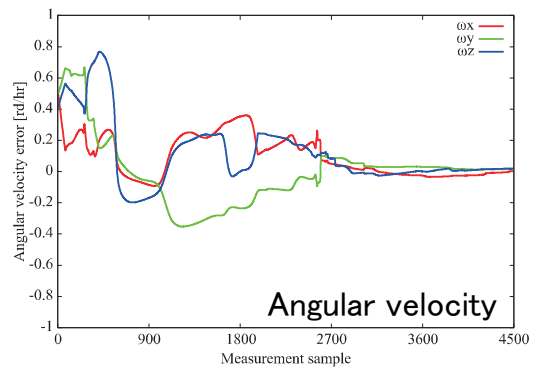
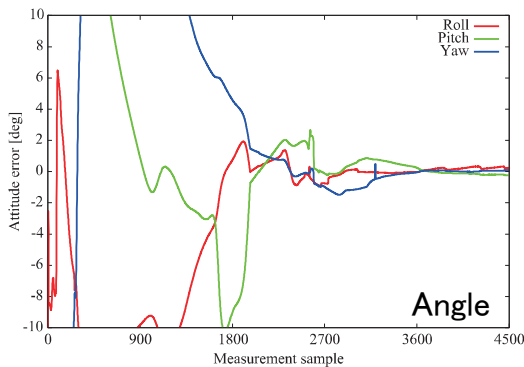
異なる表面特性

正しいモデルが存在しない

* シミュレーションに使用するライトカーブは全てModel-3(BOL)のものとする



Result (scenario1)

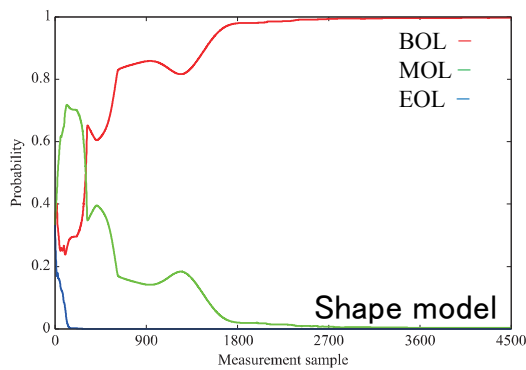
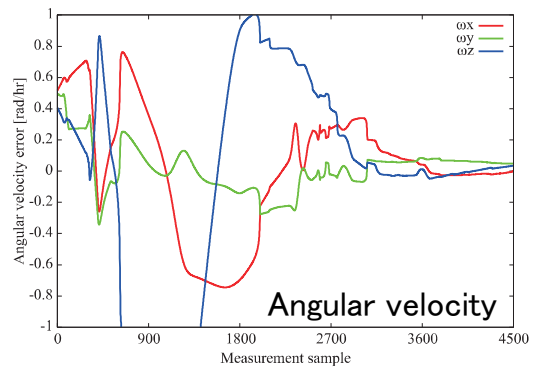
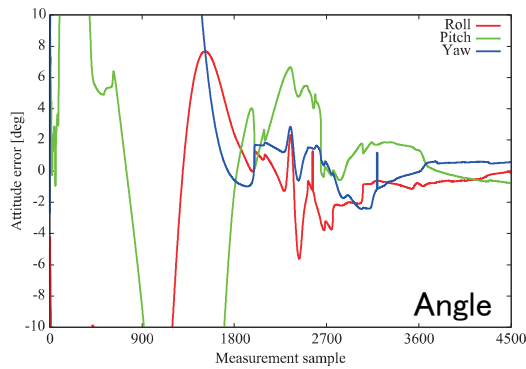


- ・姿勢推定精度 : 0.3 degrees
- ・角速度推定精度 : 0.05 rad/hr
- ・形状モデルは約3分で推定





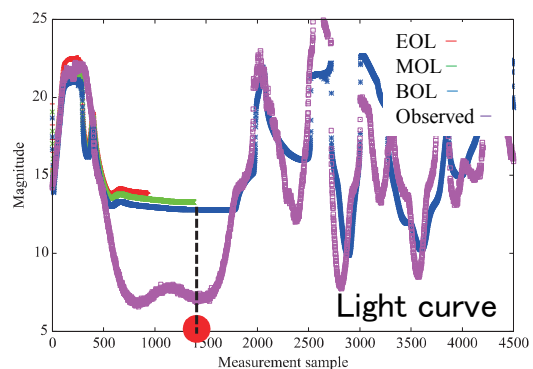
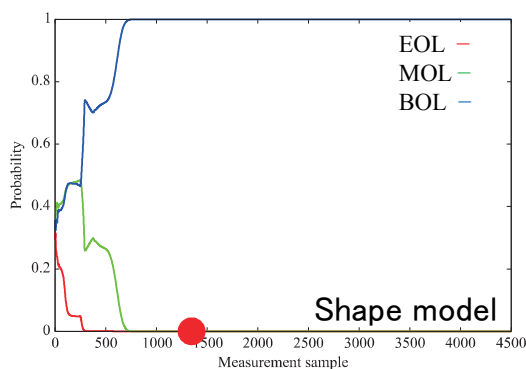
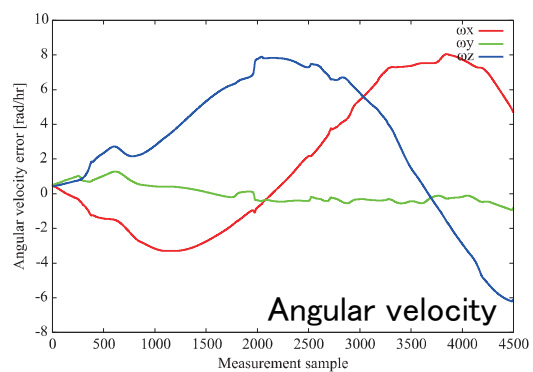
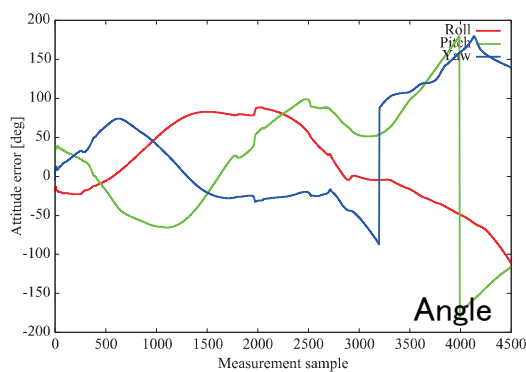
Result(scenario2)



- 姿勢推定精度 : 0.5 degrees
- 角速度推定精度 : 0.1 rad/hr
- 形状モデルは約2時間で推定



Result(scenario3)





Root Mean Squared Error

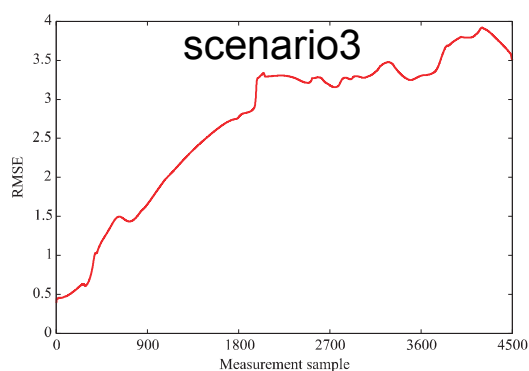
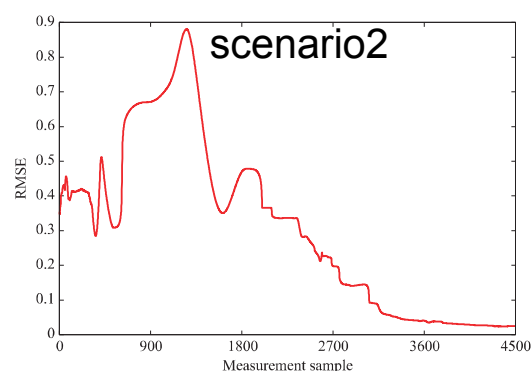
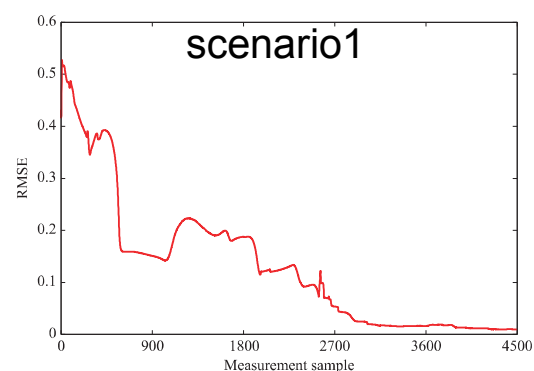
予測と実測の誤差を表しており、値が0に近いほど推定精度が高いことを示す指標。姿勢 [rad], 角速度 [rad/hr]で評価する。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{6} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x})^2}$$

x_i : actual value
 \hat{x}_i : predicted value



RMSE評価



推定に必要な観測数の目安
 (時間とステップ)





まとめ

- 補償光学による観測画像の補正手法
 - ✓ すばるを使用しても静止軌道物体の動態把握は難しい.
 - ✓ 中小型光学望遠鏡での観測を前提にすると低軌道物体の動態把握が現実的.
- ライトカーブ計測による宇宙物体の動態推定手法
 - ✓ 実観測での推定に向け大気やノイズの考慮が必要.
 - ✓ 正しいモデルが存在しない場合は近いモデルが検出される.
 - ✓ 見失った宇宙物体の再同定への利用に適している.

MMAE



Weight update

$$p(\tilde{\mathbf{y}}_{k-1} | \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^{-l}) = \frac{1}{\det(2\pi P_{k-1}^{vv})^{\frac{1}{2}}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \mathbf{e}_{k-1}^l T P_{k-1}^{vv}^{-1} \mathbf{e}_{k-1}^l\right\}$$

$$\omega_k^l = \omega_{k-1}^l p(\tilde{\mathbf{y}}_{k-1} | \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^{-l}) \quad \longrightarrow \quad \omega_k^l \leftarrow \frac{\omega_k^l}{\sum_{j=1}^M \omega_k^j}$$

Combination

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \sum_{l=1}^M \omega_k^l \hat{\mathbf{x}}_k^l$$

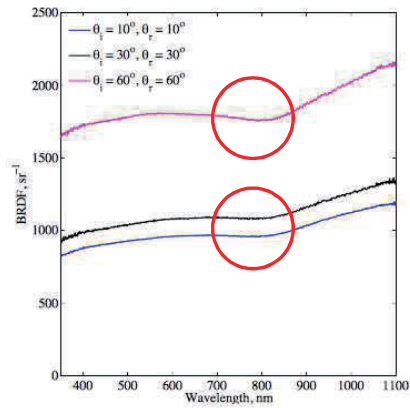
$$\mathbf{P}_k = \sum_{l=1}^M \omega_k^l \left[\mathbf{P}_k^l + (\hat{\mathbf{x}}_k - \hat{\mathbf{x}}_k^l)(\hat{\mathbf{x}}_k - \hat{\mathbf{x}}_k^l)^T \right]$$



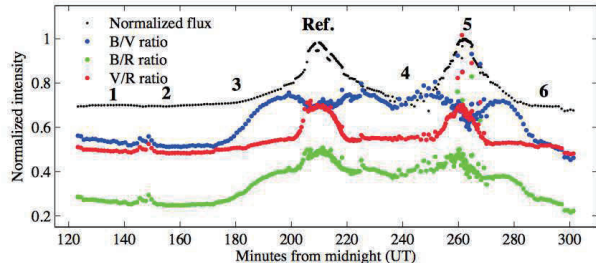
分光観測調査報告

Galaxy 11のスペクトル観測

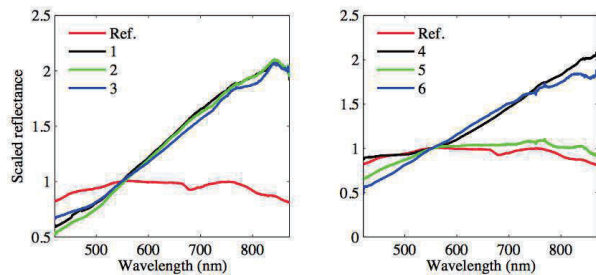
宇宙機の表面特性の特定は条件が整えば可能である



(a) Bare aluminum mirror.



(a) Broadband lightcurve and colour ratios.



(b) Scaled reflectance spectra.

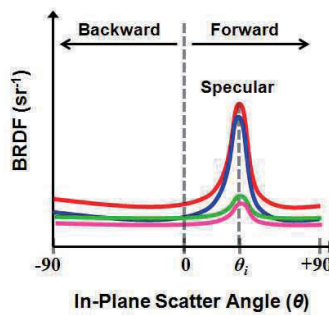
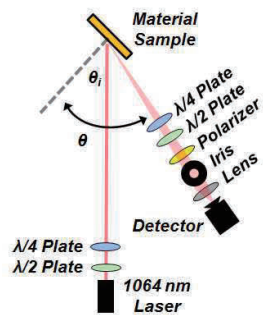
Donald Bédard, Gregg A. Wade, Andrew Jolley, 2014, Interpretation of Spectrometric Measurements of Active Geostationary Satellites, 2014 AMOS conference technical papers



偏光観測調査



地上試験により試料の偏光特性を計測



Michael Pasqual, Kerri Cahoy, Eric Hines, 2015. Active Polarimetry for Orbital Debris Identification. 2015 AMOS conference technical papers

Tx-Rx Pair	
HH	—
VV	—
+45+45	—
RCRC	—
...	...

左：機器配置図，右：計測概念図

Spacecraft Material	Diattenuation (D)			Retardance (R)			Depolarization Power (Δ)		
	Back ($\theta < 0$)	Forw. ($\theta > 0$)	Specular ($\theta = \theta_i$)	Back ($\theta < 0$)	Forw. ($\theta > 0$)	Specular ($\theta = \theta_i$)	Back ($\theta < 0$)	Forw. ($\theta > 0$)	Specular ($\theta = \theta_i$)
Glossy White Paint							1	0 - 1	
Matte Black Paint	< 0.5	0 - 1	0 - 1*	180°	0 - 180°	0 - 180°*	< 0.5	< 0.5	0*
Black Kapton®									
Titanium						> 40°			
Aluminum		< 0.5			> 70°		0 - 1		
Silver Teflon®					30 to 120°				

* Specular trends do not apply to matte black paint

計測結果





ライトカーブの差異

Configurationによるライトカーブへの影響

