

微小デブリの軌道上観測による環境推定

Environmental Estimation on sub-millimeter-size Debris using In-situ Measurement Data

○古本政博, 藤田浩輝, 花田俊也 (九州大学), 中野慎也 (統計数理研究所)
Masahiro Furumoto, Koki Fujita, Toshiya Hanada (Kyushu Univ.), Shin'ya Nakano (Institute of Statistical Mathematics)

Key Words: Space Debris, Environmental Estimation, In-situ Measurement

Abstract: Space debris smaller than 1 mm in size still have enough energy to cause a fatal damage on a spacecraft, but such tiny debris cannot be followed or tracked from the ground. Therefore, knowledge on sub-millimeter-size debris should be incorporated in design of spacecraft to minimize the damage due to such tiny debris. IDEA the project for In-situ Debris Environmental Awareness, which aims to detect sub-millimeter-size debris using a group of micro satellites, has been initiated at Kyushu University. This paper proposes data assimilation method for estimating sub-millimeter-size debris environment using in-situ measurement data. The proposed method uses particle filter that is one of the data assimilation methods applicable to nonlinear system. This paper also estimates the environment from virtual in-situ measurement data to verify the proposed method. The verification demonstrates that the proposed method can estimate the distribution and number of debris approximately.

1. 緒言

人類の宇宙活動に伴うスペースデブリの個数およびそれによる宇宙開発・利用のリスクは、年々増大している。大きさが10cmを越えるデブリは地上から追跡がされており、宇宙機はマニューバにより衝突を回避することが可能である。一方、10cmよりも小さなデブリの衝突は回避できないため、宇宙機の設計において適切な防護対策をとる必要がある。地上試験によって100 μ m以上のデブリは宇宙機に対して機能喪失に陥るような損傷を与え得ることが示されており¹⁾、このような微小デブリの宇宙機に対する衝突頻度を適切に見積もることが防護設計には不可欠となる。そのために、微小デブリの環境は正確に観測・把握されなければならない。

追跡の不可能な小さなデブリのうち、2mmよりも大きなものはレーダー観測によって地上から観測することができる²⁾。しかし、2mm以下の微小デブリについては、スペースシャトルなど軌道上から回収された物体の表面を調査することにより、それらの物体に衝突したことが明らかとなっているのみである。回収された物体の衝突痕調査により得られる情報は、軌道上にあった期間のうちいつ衝突したのかがわからない積分情報であり、観測可能な頻度や高度も限られている。さらに、スペースシャトルの退役により新たな情報を得る機会は殆どなくなっており、2007年1月の中国衛星破壊兵器実験や2009年2月の米ロ通信衛星衝突事故により劇的に変動した最新の宇宙環境に対する微小デブリのデータは存在しない。そのため、欧州宇宙機関のMASTERや米国航空宇宙局のORDEMのように微小デブリ環境の推定を試みているモデルは存在するものの、現在

の微小デブリ環境を記述するために十分なデータは極めて不足している。変動し続けるスペースデブリ環境を正確に把握するためには、軌道上での継続的な微小デブリ観測が不可欠である。

現在、宇宙航空開発研究機構(JAXA)によって微小デブリの衝突を軌道上で検出可能なインパクトセンサが開発されている³⁾。図1にその概念図を示す。このセンサ上には直径50 μ mの銅線が100 μ mピッチで平行に並んでおり、その断線を検出することで微小デブリの衝突時刻とサイズを計測することができる。Space Debris Monitor (SDM)と呼ばれるこのセンサを利用し、微小デブリの環境把握のため小型衛星による微小デブリ計測を行う計画が2011年より九州大学を中心に進められており、「デブリ環境の“その場”認識」を意味する英語の頭字語からIDEA(In-situ Debris Environmental Awareness)プロジェクトと呼称されている。

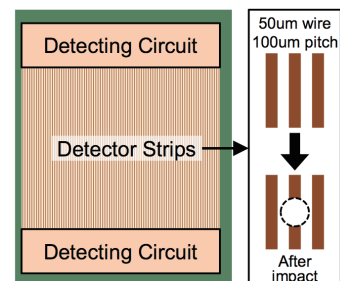


図1 Space Debris Monitor 概念図³⁾

IDEAプロジェクトでは、表面にSDMを設置した超小型衛星を軌道上に複数機展開して微小デブリのリアルタイム観測を行い、理論的に構築した環境予測と衛星による観測

データを逐次比較することで常に最新の状態に更新される動的な環境モデルを構築することを目標とする。その初号機となる IDEA OSG 1 と命名された衛星は、IDEA 計画の意義・理念に共感したデブリ問題に取り組むベンチャー企業である株式会社アストロスケールによって、オーエスジー株式会社の支援を得て開発・製造が進められている。図2はその想像図である。IDEA OSG 1 の打ち上げは2016年度後半に計画されており、取得が期待されるデータから軌道環境を推定する手法の確立が求められる。

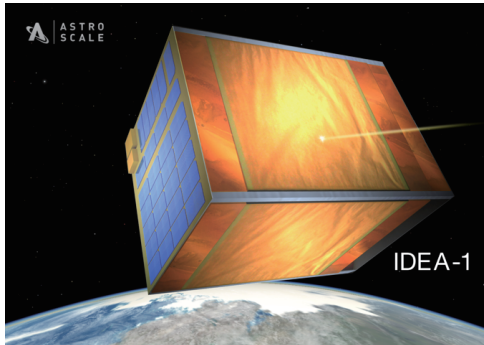


図2 IDEA OSG 1 の想像図

本論文では、微小デブリの軌道上観測データから微小デブリの分布を推定するために、データ同化手法の一つである粒子フィルタを用いた推定手法を提案する。また、仮想の宇宙環境におけるシミュレーションで生成した擬似観測データから提案手法を用いて分布を推定することで、手法の性能を示す。

2. 環境推定の手法

2.1 利用可能なデータ

前節で述べたように、SDM によって計測されるのは微小デブリの衝突した時刻およびサイズである。また、この時刻情報と、SDM を搭載した観測衛星の軌道情報から、微小デブリが衛星に対し衝突した位置を計算することができる。これらの情報が微小デブリの分布を推定する際に利用できる観測データとなる。

また、微小デブリは劣化による剥落や破砕等により大型のデブリや運用中の衛星から発生するものである。そのため、微小デブリの分布を考える際にはこのような大型の物体の分布を参考とすることができると考えられる。10cm以上の大きさの物体の軌道は米国国防総省戦略軍統合宇宙運用センター(JSPOC)により追跡・公開されており、環境推定の際に利用することが可能である。

2.2 データ同化

本研究の最終的な目的となる環境モデルでは、データが得られる度に更新され、常に最新のデータに基づく環境予測を行うことを目指す。このようなデータの利用に適した手法が、逐次データ同化と呼ばれる手法である。逐次データ同化では、シミュレーションによる予測に対しデータが

観測される度に推定状態ベクトルに対しデータを用いた修正を行い、予測の確実性を高めることができる。逐次データ同化の代表的な手法としてはカルマンフィルタなどがある。

本研究では、逐次データ同化の手法のうち、状態ベクトルの時間推移および観測がいずれも非線形の場合にも適用可能な粒子フィルタ⁴⁾を用いた。粒子フィルタでは、粒子と呼ばれる状態変数ベクトル $\mathbf{x}^{(i)}$ のサンプルを多数 (N 個) 用意し、次のようなアルゴリズムを繰り返し実行することにより状態ベクトルの予測と修正を行う。

- 1) 各粒子の時間推移を計算する
- 2) 観測データ \mathbf{y} に対し各粒子がどれだけあてはまっているかを表す尤度 $l^{(i)} = p(\mathbf{y} | \mathbf{x}^{(i)})$ を計算する
- 3) $L = \sum_{i=1}^N l^{(i)}$ を計算し、各粒子 $\mathbf{x}^{(i)}$ が $l^{(i)}/L$ の割合で抽出されるよう復元抽出する

このようにして得られた粒子の分布は、推定される真の状態変数 \mathbf{x} の確率分布の近似となっている。すなわち、例えばそれぞれの状態変数について各粒子の平均をとれば、真の分布の平均の近似値とみなすことができる。

2.3 モデルの定義

本研究では、前小節で述べた粒子フィルタを微小デブリの環境・観測に対して適用することで、軌道上観測データからの微小デブリ環境の推定を行う。粒子フィルタの実装にはシステムモデルと観測モデルの定義が必要となる。

まず、システムモデルの定義には状態変数 \mathbf{x} とその時間変化の定義が必要となる。本研究では微小デブリの環境を推定するため、 \mathbf{x} によって微小デブリの環境を表現する。ここで、微小デブリの軌道を円軌道であるとみなすと、地心距離は衝突データの地心距離と等しくなるから未知の軌道要素は昇交点赤経 Ω と軌道傾斜角 i のみとなる。そのため、 Ω と i の二次元上の分布を考えることである高度のデブリ環境の推定が可能となる。しかし、 Ω と i からなる格子に対して各点のデブリ数を直接定義したものを状態変数ベクトルとすると、状態変数の数が膨大となり、計算に適さない。そこで、本研究では以下のように分布を近似的に表現することで状態変数の数を抑えつつ軌道環境を表現する手法を提案する。

まず、式(1)のようにベッセル関数を用いて分布の形状を定義する。

$$F(\Omega, i, t) \equiv \exp \left\{ \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} J_i \left(\xi_{ij} \frac{i}{\pi} \right) \left(a_{ij} \cos i(\Omega - \Delta\Omega) + b_{ij} \sin i(\Omega - \Delta\Omega) \right) \right\} \quad (1)$$

ここで、 ξ_{ij} は i 次ベッセル関数の j 番目の根、 $\Delta\Omega$ は J2 摂動による昇交点赤経の変化を表す項であり式(2)で表される。 t は現在の時刻、 t_0 は初期状態の時刻である。

$$\Delta\Omega = -\frac{3J_2 a_e^2}{2p^2} n \cos i \times (t - t_0) \quad (2)$$

次に、これを式(3)のようにいったん正規化し、式(4)のように軌道全体のデブリ数 N_0 をかけることで Ω , i 上の時刻 t におけるデブリ分布 $N(\Omega, i, t)$ を定義する。

$$p(\Omega, i, t) \equiv \frac{F(\Omega, i, t)}{\iint F(\Omega, i, t) d\Omega di} \quad (3)$$

$$N(\Omega, i, t) = N_0 p(\Omega, i, t) \quad (4)$$

このように定義することで、 N_0 および係数 a_{ij} , b_{ij} を推定することによって軌道環境の推定が可能となる。すなわち、状態変数 $x = [N_0, a_{11}, a_{12}, \dots, b_{11}, b_{12}, \dots]$ と定義される。 Ω と i からなる格子に対して各点のデブリ数を直接定義した場合には格子を10度ごとに切ったとして状態変数が648次元となるのに対し、本手法では $i \leq 5, j \leq 4$ とした場合で41次元と、大幅な変数の削減が可能である。また、この手法のさらなる利点としては、分布形状と全体のデブリ数を分けて考えることができ、分布形状と全体のデブリ数それぞれのモデルを容易に変更できる点が挙げられる。

次に、モデルの時間変化を定義する。微小デブリ環境の変動としては摂動による軌道の変化、自然劣化による大型衛星・デブリからの微小デブリ発生、衝突による微小デブリの発生、大気圏突入による消滅が考えられる。本論文のモデルでは、軌道の変化としては上述した J2 摂動による昇交点赤経の変化のみを考慮し、デブリ総数 N_0 はランダムに変動するとして計算している。

最後に、観測データに対する状態変数 x の尤度を定義する。微小デブリの観測衛星に対する衝突は時刻によって発生確率の異なる点過程であると考えられるため、非定常ポアソン過程を適用する。非定常ポアソン過程の対数尤度は式(5)で表される。

$$\log L(\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_n) = \sum_{i=1}^n \log \lambda(r, t) - \iint \lambda(r, t) dr dt \quad (5)$$

式(5)で $\mathbf{y}_i = [r, t]$ はそれぞれの衝突データ(位置 r , 時刻 t) を、 $\lambda(\mathbf{y})$ はある位置・時刻における観測衛星に衝突するデブリ数の期待値を表す。また、右辺第二項はある期間に観測衛星に衝突する全デブリ数の期待値となる。計算された尤度が高い粒子ほど、観測データをよく説明する環境であるといえる。衝突個数の期待値は、MASTER の球形有限要素モデルでも用いられる衝突フラックスを用いて計算を行う。ある2つの軌道の衝突フラックス Φ は、衝突点まわりに検査体積(セル)を考え、その体積 V_{cell} 、宇宙機とデブリのセル内の存在確率(p, p')、宇宙機とデブリの相対速度 Δv を用いて式(6)のように計算される。

$$\Phi = \frac{pp' \Delta v}{V_{cell}} \quad (6)$$

これを用いて、ある軌道に存在するデブリ数は式(4)で与えられるため、位置 r , 時刻 t における衝突個数の期待値 λ は式(7)のように与えられる。ここでの総和記号は、衝突しうる全ての軌道に対し N と Φ を計算することを表す。

$$\lambda(r, t) = \sum N(\Omega, i, t) \Phi \quad (6)$$

また、2.1節で述べたように、微小デブリの分布を考える際には被追跡物体の分布を参考とすることも考えられる。

本論文では、被追跡物体の分布を考慮して推定を行う場合には、次のように計算を行った。まず、式(8)に示す kernel 関数を用いて被追跡物体の分布を平滑化・正規化したものを定義する。ここで \mathbf{a}_n は被追跡物体の軌道面、 h は広がり標準偏差、 N は被追跡物体の総数である。

$$p_{tle}(\Omega, i, t) \equiv \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{2\pi h^2} \exp\left(-\frac{\|\mathbf{a} - \mathbf{a}_n\|^2}{2h^2}\right) \quad (8)$$

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} \Omega \\ i \end{bmatrix}$$

次に、式(7)によって平滑化・正規化した被追跡物体の分布および式(3)で定義された正規化した推定微小デブリ分布の積を全軌道面について積分し、式(5)の右辺に加え式(9)のようにする。

$$\log L(\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_n) = \sum_{i=1}^n \log \lambda(r, t) - \iint \lambda(r, t) dr dt + \log \left(\iint pp_{tle} d\Omega di \right) \quad (9)$$

追加された式(9)の第三項は、推定している微小デブリの分布と被追跡物体の分布に近い形状となるほど高い値となるため、この項を加えることで推定結果が被追跡物体の分布により近づくこととなる。また、 h の値を調節することで推定に与える影響の大小を変更することができる。

3. シミュレーションによる検証

3.1 実験方法および条件

本論文で提案する手法の検証のため、シミュレーションにより生成した擬似的な観測データを用いて粒子フィルタにより推定を行った。

まず、観測データの生成について述べる。観測データの生成には球形有限要素モデルを用いた。球形有限要素モデルは図3に示すように宇宙空間を緯度経度および地心距離でセルに区切ったものであり、2つの物体の軌道が同じセルを通過する場合に2物体が衝突する可能性があるのみならず式(6)に基づき衝突フラックスが計算される。したがって、デブリの軌道と観測衛星の軌道を与えることで、衝突点となりうる位置・時刻の一覧とそれぞれの衝突確率が得られる。

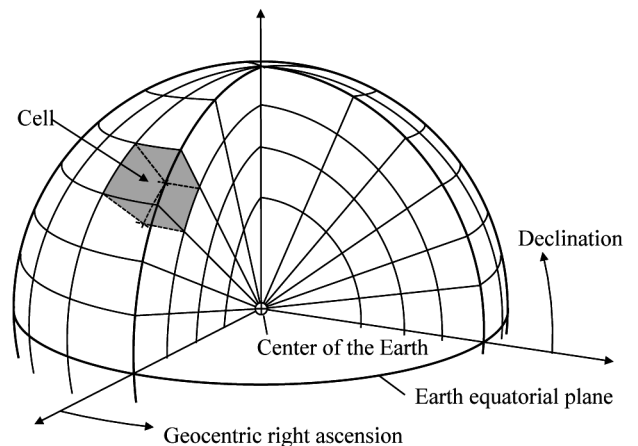


図3 球形有限要素モデルの概念図

次に、球形有限要素モデルから得られた衝突点の候補の中から、それぞれの確率に基づき非定常ポアソン過程に従うようランダムに抽出する。そのようにして抽出された衝突の位置・時刻と、その時刻の衛星の軌道情報を観測データとして、前節で提案された手法に基づき微小デブリ分布の推定を行い、シミュレーションに与えた真の分布と比較を行った。

表 1 に本論文で行った数値実験の条件を示す。case1・2では微小デブリは図 4 に示す 1 個の軌道面のみに 4×10^7 個が集中して存在する。case3・4 では微小デブリは図 5 に示すような被追跡物体の分布に比例して存在し、被追跡物体 1 個あたり 5×10^5 個の割合で存在する。推定の際には、case1・3 では観測データのみを用いて推定を行い、case2・4 では被追跡物体の分布を加味した推定を行った。

また、全 case に共通する条件として、観測衛星の軌道は高度 800km の太陽同期軌道、シミュレーション期間は 60 日間である。なお、図 4・5 に示すデブリの軌道面は、次節で示す推定結果との比較が容易なようにシミュレーションで 60 日が経過した後の分布を示している。

表 1 シミュレーション条件

	シミュレーション時の デブリ分布	被追跡物体の考慮
case 1	1 つの軌道のみ	なし
case 2	4×10^7 個	あり
case 3	被追跡物体と同じ軌道	なし
case 4	5×10^5 個	あり

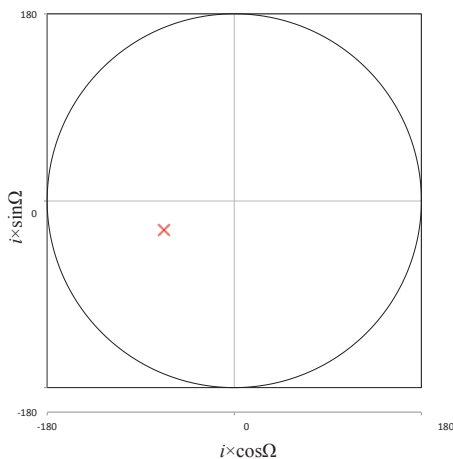


図 4 case1・2 で与えたデブリの軌道面分布

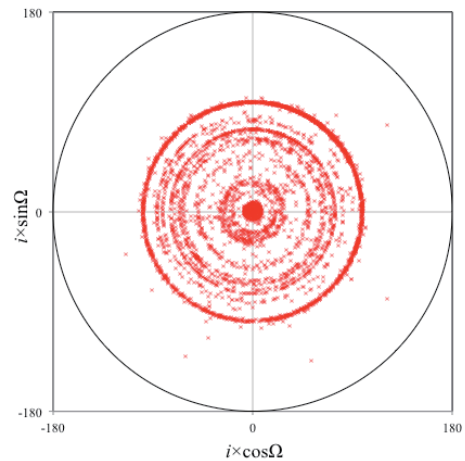


図 5 case3・4 で与えたデブリの軌道面分布

3.2 結果

図 6～9 に、case1～4 で行った推定の結果を示す。ここで示す結果は、繰り返し粒子フィルタを実行し、60 日が経過した後の最終的な推定結果である。

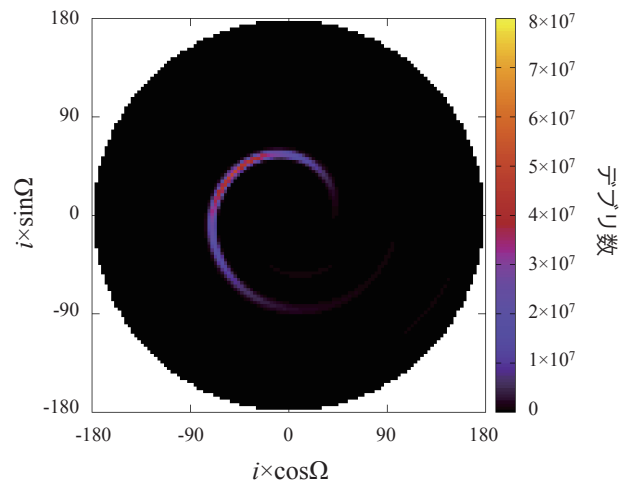


図 6 case1 推定結果

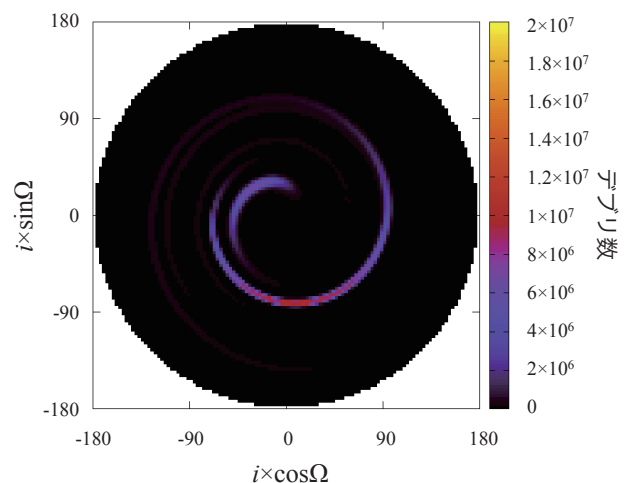


図 7 case2 推定結果

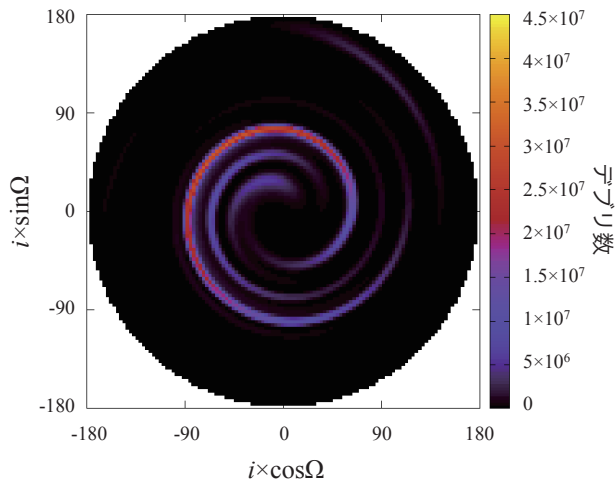


図8 case3 推定結果

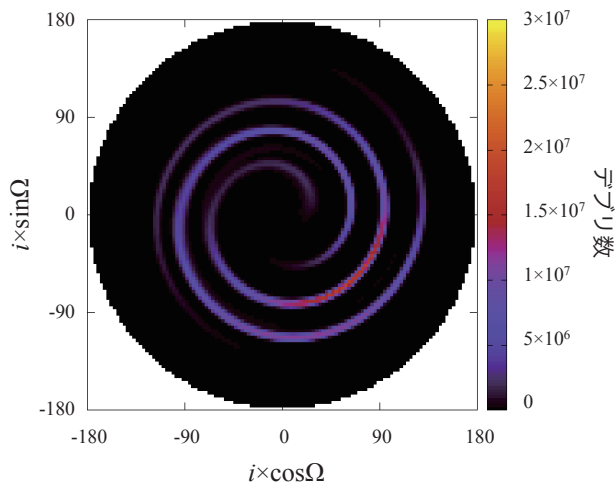


図9 case4 推定結果

これらの結果を順に考察する。

まず、特定の軌道面のみにデブリが集中した環境で観測データのみから推定を行った case1 では、ピークを一箇所のみ持つ分布であるという点、そのピークの個数がおおよそ 4×10^7 個であるという点については真の分布の特徴を再現することができている。しかし、軌道傾斜角はおおよそ合っているが、昇交点赤経に真の分布との誤差があり、正確にデブリの軌道を特定できているとはいえない。

次に、case1 と同じ観測データを用い、被追跡物体の分布を考慮して推定を行った case2 を見ると、二峰性の分布となっている。これは、観測データと被追跡物体の双方に近づけようと推定が行われた結果ではないかと考えられる。推定の精度としては case1 と比べ悪化しているが、真の分布とは大きく異なる被追跡物体の分布を推定に取り入れているため、想定通りの結果である。case1 と case2 の比較から、真の微小デブリ分布と被追跡物体の分布が大きく異なる場合には観測データのみから推定したほうが良い結果が得られることがわかる。

つづいて、様々な軌道からの衝突を観測した場合である case3 および case4 について考える。どちらの推定結果においても、軌道傾斜角 90 度前後に最も多くデブリが分布するような推定となっている点、複数の軌道傾斜角にピークを持つ多峰性の分布となっている点では、真の分布の特徴をある程度捉えているのではないかといえる。しかし、どちらも渦巻のような形状が支配的となっている点について、真の分布の特徴とは異なる。これは式(1)による分布形状の近似において、初期分布を変形させることで J2 摂動の影響を表現していることが原因である。J2 摂動による昇交点赤経の変化は軌道傾斜角に依存するため、初期から長く時間が経過した状態では分布が長く引き伸ばされたようになると考えられる。このような近似の方法による形状の特徴はバイアスとなるため好ましくなく、本論文で提案する手法に改善の必要があることを示すものである。

また、case3 と case4 での分布には一見して差があるものの、推定結果および真の分布がいずれも複雑であるため、どちらがより良い推定であるかの判断が困難である。したがって、今後の課題として真の分布と推定された分布の適合性を定量的に評価する手法の開発が求められる。

これらの結果を総合すると、本論文で提案した微小デブリの環境推定モデルによって、単純な環境の場合には観測データから大まかな環境の特徴を捉えることが可能であると示された。一方で、複雑な環境の場合には、現在用いている分布形状の近似の方法では表現が困難であることも明らかとなった。よって、推定モデルを改善するためには、適切な分布形状の表現を定義することが必要であると考えられる。

4. 結言

九州大学を中心として進められている IDEA 計画では、SDM を搭載した微小デブリ (100 μ m から 2mm 程度まで) の観測衛星を軌道上に配置し、微小デブリの環境推定を目指している。本論文ではデブリ分布の関数による近似と粒子フィルタを用いた推定モデルを提案し、シミュレーションによる検証を行った。その結果、本論文で提案する手法により単純な環境の特徴を捉えることに成功した。一方で、複雑な環境に対してはより良いモデルが必要であること、推定結果の定量的評価手法が必要であることも明らかとなった。今後はこれらの課題に取り組み、より正確な環境評価を目指す。

参考文献

- 1) Nitta, K., Kawakita, S., Takeda, A., Katayama, M., "The response of Cable Harness Subjected to High Velocity Impact", Trans. JSASS Space Tech. Japan, 8, ists27, pp.Pr_2_55-Pr_2_62, 2010.
- 2) Mehrholz, D., et al., "Detecting, tracking and imaging space debris", ESA Bulletin(0376-4265) 109, pp.128-134, 2002
- 3) Maki Nakamura, et. al., "Development of In-Situ Micro-Debris Measurement System", Advances in Space Research, Vol.56, No.3, pp.436-448, 2015.
- 4) Kitagawa, G., "Monte Carlo filter and smoother for non-Gaussian nonlinear state space models", J. Comp. Graph. Statist., 5: 1, 1996.