

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：37501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K11945

研究課題名（和文）AdmissibleRegionを用いた微小デブリ破砕由来同定の研究

研究課題名（英文）A Study on Event Identification for Small-sized Space Debris Based on Admissible Region

研究代表者

藤田 浩輝 (Fujita, Koki)

日本文理大学・工学部・教授

研究者番号：00315110

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、地球を周回する人工天体（運用中およびミッション終了後の人工衛星やロケット上段部、それらを起源とする人工物体）のうち、特定の物体が爆発・衝突することによって生じた破砕物体（いわゆる破砕デブリ）群について、レーダーもしくは光学望遠鏡による地上観測で検出された人工物体群のデータからそれらを分類するための手法の導出と、実観測データを用いた検証を行った。ここで、特に Admissible Region と呼ばれる、軌道力学上の拘束条件によって算出される不可観測量の存在可能領域の概念を援用し、観測データから推定されるそれぞれの人工物体の軌道特徴に基づく分類手法を導出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人類の宇宙開発が進む中、宇宙空間における人工物体の混雑化がますます進む状況にあり、地上からの観測結果に基づき、それら人工物体群が既知・未知いずれのものであるか、また、どのような起源を有するものか同定を行ったり、破砕由来や軌道運動の特徴に基づいて分類することは、安全かつ持続的な宇宙環境利用にあたって意義が大きいと考えられる。特に本研究では、Admissible Region と呼ばれる、軌道力学上の拘束条件から算出された地上観測では直接得られない不可観測量の存在可能領域を算出し、機械学習手法と組み合わせて、観測物体群に対する特徴分類手法の導出を行ったことに学術的意義がある。

研究成果の概要（英文）：This study derives a method for classifying artificial space objects detected through radar or optical observation, focusing on fragmentation debris generated from explosion or collision of uncontrolled human-made objects in Earth orbits. In the framework of the proposed method, a constraining condition on orbital dynamics called Admissible Region is used to classify fragmentation debris with respect to a specific breakup event, which is combined with a machine learning algorithm based on Gaussian Mixture Model. That was finally verified with actual data obtained through some observation campaigns, comparing results of making direct correlations between observed data and known cataloged space objects.

研究分野：宇宙状況認識

キーワード：スペースデブリ観測 軌道上物体同定 軌道上物体特徴分類

1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙環境利用の機会増加に伴い、宇宙空間における人工物体の数が増大・混雑化している。特に、運用終了後の人工衛星や衛星打ち上げに使用されたロケットの上段部は、これまで宇宙空間にいわゆる「宇宙ゴミ（スペースデブリ）」として放置され続けており、これらの経年劣化による爆発や制御されていない放置物体同士の衝突によって生じる「破碎デブリ」が新たな宇宙ゴミとして宇宙環境利用に悪影響をおよぼす深刻な状況となっている。

(2) 上記の破碎デブリを含め、地上での（レーダーもしくは光学）観測や、軌道上に一定期間暴露された人工物体を地上回収するミッション等を通して、宇宙空間における人工物体の分布状況や個々の物体の軌道把握・追跡（カタログ化）が行われているが、主に地上からの観測が困難な微小サイズの破碎物体を中心に未知の物体がカタログ物体よりもはるかに多く存在することが予想されている。また、地上観測で実際に検出された微小な人工物体（群）について、既知未知含めそれらがどのような起源を有するものか即座に判断する術がない状況であった。

2. 研究の目的

以下の2点を本研究の目的とした。

(1) 既にカタログ化されている破碎物体の軌道情報を用いて、地上観測により得られた人工物体群の破碎起源に基づいた特徴推定や分類を行う。

(2) (1)を実現するにあたり、Admissible Region と呼ばれる軌道力学上の概念を活用し、発生要因や軌道特徴を共有する破碎人工物体群を分類するための手法を導き、実観測データを用いた検証を行う。

3. 研究の方法

当初の研究計画に基づき、以下のような方法で研究を行った。

(1) まず、カタログ化されている破碎デブリの軌道特徴を把握するために、それらの軌道情報(TLE データ)を収集し、地上観測（観測計画立案）や観測物体同定を行う際にも役立つ特徴(特徴量)について調査・検討を行う。

(2) 特徴量として、軌道要素（軌道6要素）の統計的な分布状況を用いることが想定できるが、一般的に、地上光学観測もしくは地上レーダー観測では個々の人工物体の検出データから必要な観測量を全て得ることはできないため、不足する観測量（不可観測量）を補うために Admissible Region を用いた存在可能領域の概念を援用し、そこから特定の観測物体に対する軌道6要素それぞれの存在領域を特徴量として算出する。

(3) 観測物体から得られる特徴量を用いて、破碎由来毎の特徴に基づく分類を行うための手法（特徴分類手法）を導出する。ここでは、一般的な機械学習手法を利用する。

(4) 上記特徴分類手法をレーダー観測および光学観測に適用するための観測実験を実施する。なお、レーダー観測として、北欧 EISCAT レーダーを用いた観測実験（国内共同利用

の枠組みを利用した特別実験)を実施する。さらに、光学観測として、市販の光学望遠鏡を用いたシステムの構築と研究代表者が所属する大学構内における観測実験を実施し、それぞれの有効性についての検証を行う。

4. 研究成果

(1) カタログ化(地上観測による物体の発見や定期的な追跡)されている複数の破碎事象由来のデブリに関して、最新の元期(epoch)を有する軌道情報(TLE データ)の収集を行い、それらの軌道要素(軌道 6 要素)それぞれの統計的な分布状況を調べた。比較的規模が大きく、カタログ化されている物体数が多い(100 個以上)破碎デブリについては、破碎事象毎に 6 要素それぞれに関する統計的な分布状況が把握できることが確認された。(図 1 参照。ただし、後述の特徴分類手法で実際に使用した特徴量に合わせて 4 種類の軌道要素のみ示す)

(2) 先述の EISCAT レーダーによって得られた低軌道上人工物体個々の観測データ(観測方向, レンジ, レンジレート)から Admissible Region (図 2(a)参照)を算出し、その領域内の離散点(グリッドデータ)に対する軌道 6 要素の計算を行い、各軌道要素と破碎由来毎に特徴ある軌道要素との距離計算に基づく特徴分類手法を導いた。ここで、Admissible Region 内の特定点に対する軌道 6 要素中の 4 要素と、(1)の破碎由来毎の軌道要素の分布状況を確率密度分布とみなした場合の両者の距離を GMM と距離尺度(マハラビノス距離)に基づき計算し、クラスタリングを実行した。これによって、Admissible Region の破碎由来毎の絞り込み(Constrained Admissible Region, 図 2(b)参照)と同時に、観測物体群の(破碎由来に応じた)特徴分類が実現できた。

(3) EISCAT レーダー観測実験で得られた観測データは、カタログ物体の最新(観測日時に最も近い元期を持つ)の TLE データとそれによって算出される観測データ予測値を用いて既知破碎デブリとの直接的な相関解析(同定解析)を行うことができる(表 1, 2 参照)。そこで、最新の単年度の観測データを用いた上記特徴分類手法の適用結果について、この同定解析結果との比較による検証を行ったところ、特定の破碎由来物体と同定された観測物体が同じ破碎由来毎の特徴分類結果に現れる割合は、4%-20%程度となることが分かった(表 3 参照。ただし、(2)の距離尺度 2 種類, A, B それぞれの結果を示す)。これは、観測実験で検出された物体群にはカタログ化されていない未知物体が含まれる可能性、特定の破碎事象で生じた物体と似た軌道特徴を有する物体が同じ破碎デブリとして特徴付けられる可能性、さらに(2)で述べた特徴分類に関わる距離尺度の閾値によって分類結果が変化する可能性を考えると、妥当な結果と見なせる。

(4) 地上観測による観測データ取得および解析結果取得の機会を増やすため、市販の光学望遠鏡(自動追尾機能を持つ経緯台を含む)システムを導入し、レーダー観測と同様の観測計画立案と研究代表者が所属する大学構内における観測実験を試み、実験手順や観測手法の有効性確認を行うことができた。

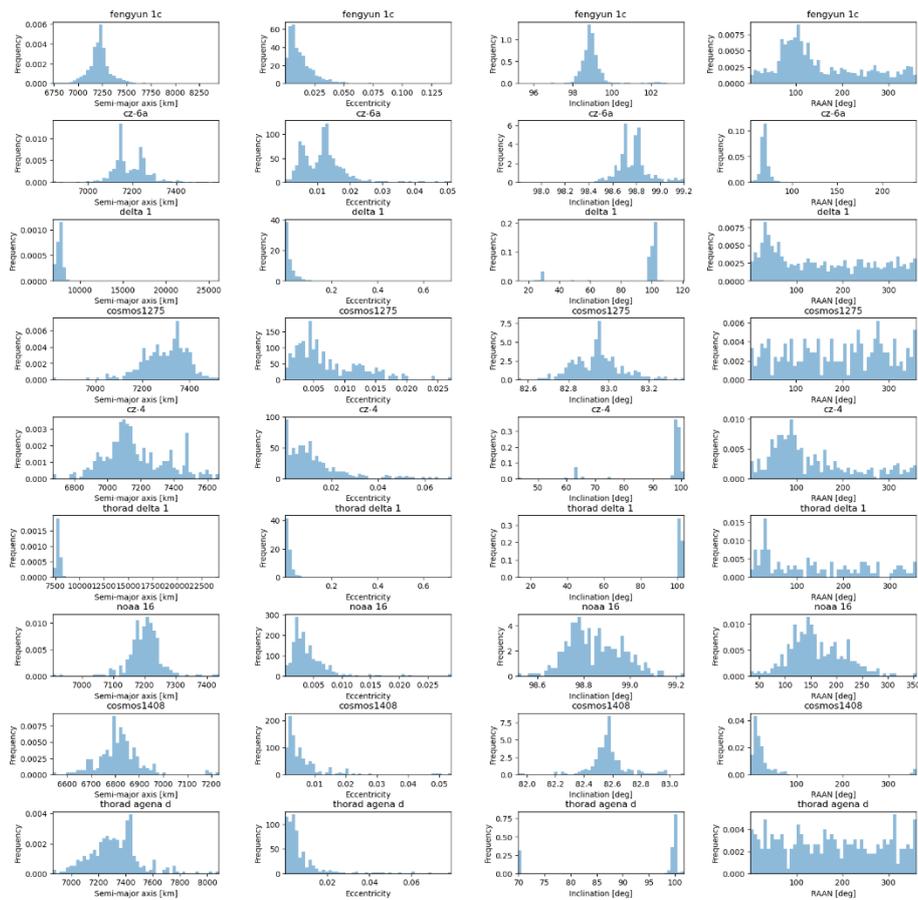
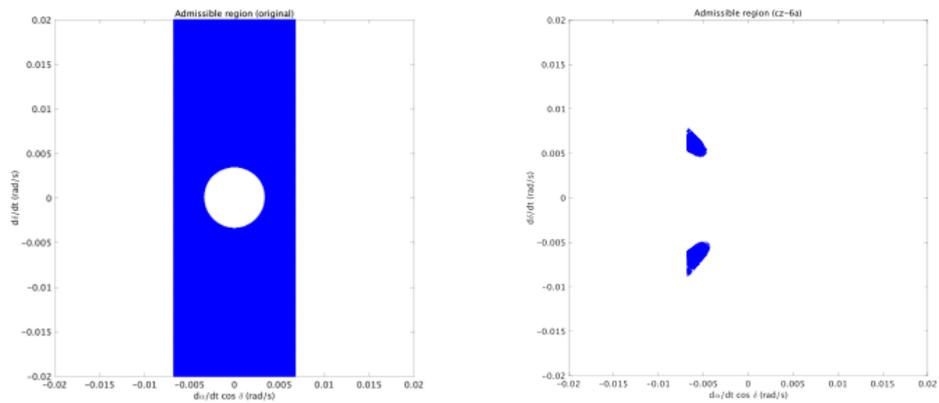


図 1. 9 種類の破砕デブリ(親物体: Fengyun1C, CZ-6A, Delta 1, Cosmos1275, CZ-4, Thorad Delta 1, NOAA-16, Cosmos1408, Thorad Agena D)の軌道 6 要素中 4 要素(軌道長半径, 離心率, 軌道傾斜角, 昇交点赤経)の分布状況(2023/3/1 時点).



(a) 観測データのみから算出された Admissible Region

(b) 特定の破砕由来物体(CZ-6A)の軌道情報を用いた Constrained Admissible Region

図 2. 観測データ(2023/3/1, EISCAT レーダー観測)から導かれた Admissible Region の例.

表 1. 2023/3/1 EISCAT レーダー観測データに対するカタログ物体との相関解析結果.

－ 既知もしくは未知（未相関）物体と同定された人工物体(個数)の内訳

破砕デブリ (DEB)	313
ロケット上段部 (R/B)	55
上記以外のカタログ物体	232
未相関物体	631
合計	1231

表 2. 2023/3/1 EISCAT レーダー観測データに対するカタログ物体との相関解析結果.

－ 破砕デブリと同定された人工物体の親物体毎の個数内訳

順位	カタログ物体名称	カタログ上の残留物 体数 (2023/3/1)	相関物体個数 (オリジナル)	相関物体個数 (重複除去)
1	FENGYUN 1C DEB	1593	92	86
2	CZ-6A DEB	519	52	49
3	DELTA 1 DEB	1014	48	40
4	COSMOS 1275 DEB	295	13	13
5	CZ-4 DEB	382	13	12
5	THORAD DELTA 1 DEB	131	12	12
5	NOAA 16 DEB	329	12	12
6	COSMOS 1408 DEB	209	11	10
7	THORAD AGENA D DEB	313	10	9

表 3. 2023/3/1 EISCAT レーダー観測データに対する特徴分類手法適用結果.

－ 破砕デブリ親物体毎の特徴分類結果と同定解析結果との一致個数

(特徴分類の際の距離尺度しきい値 A, B それぞれの結果)

順位	カタログ物体名称	分類個数 (A)	一致個数 (A)	分類個数 (B)	一致個数 (B)
1	FENGYUN 1C DEB	420	75	322	62
2	CZ-6A DEB	409	46	296	42
3	DELTA 1 DEB	297	22	141	9
4	COSMOS 1275 DEB	312	11	189	9
5	CZ-4 DEB	430	10	249	5
5	THORAD DELTA 1 DEB	123	7	78	7
5	NOAA 16 DEB	327	12	216	11
6	COSMOS 1408 DEB	18	1	0	0
7	THORAD AGENA D DEB	250	2	117	0

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 藤田浩輝, 渡邊陸, 小川泰信, 花田俊也
2. 発表標題 破砕物体群をターゲットとする観測計画立案手法の有効性についての検証
3. 学会等名 日本航空宇宙学会西部支部講演会2023
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 藤田浩輝, 有吉雄哉, 吉村康広, 花田俊也, 小川泰信
2. 発表標題 EISCATレーダー観測結果を用いたカタログ物体に基づく特徴分類
3. 学会等名 第67回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 藤田浩輝, 有吉雄哉, 吉村康広, 小川泰信, 花田俊也
2. 発表標題 EISCATレーダー観測データを用いたカタログ物体に基づく特徴分類
3. 学会等名 第67回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 藤田浩輝, 渡邊陸, 小川泰信, 花田俊也
2. 発表標題 破砕物体群をターゲットとする観測計画立案手法の有効性についての検討
3. 学会等名 日本航空宇宙学会西部支部講演会 (2023)
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 藤田浩輝, 有吉雄哉, 吉村康広, 小川泰信, 花田俊也
2. 発表標題 EISCATレーダー観測結果を用いた既知物体との相関解析
3. 学会等名 日本航空宇宙学会西部支部講演会2022
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 Koki Fujita, Yuya Ariyoshi, Yasuhiro Yoshimura, Yasunobu Ogawa, Toshiya Hanada
2. 発表標題 A Correlation Analysis between Space Debris Detected by an EISCAT Radar and Catalogued Ones
3. 学会等名 10th Space Debris Workshop
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 藤田浩輝, 有吉雄哉, 吉村康広, 小川泰信, 花田俊也
2. 発表標題 EISCATレーダー観測結果を用いた特定の破砕由来デブリ相関解析
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会講演集
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Koki Fujita, Yuya Ariyoshi, Yasuhiro Yoshimura, Yasunobu Ogawa, Toshiya Hanada
2. 発表標題 A Target Object Classification of Radar Observation Data with Constrained Admissible Region Analysis
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (33rd ISTS) (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 藤田浩輝, 有吉雄哉, 吉村康広, 小川泰信, 花田俊也
2. 発表標題 EISCAT検出データからの複数の異なる破砕由来デブリ同定手法
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤田浩輝, 矢野建, 花田俊也
2. 発表標題 複数の破砕由来デブリをターゲットとする地上観測計画効率化
3. 学会等名 第29回スペース・エンジニアリング・コンファレンス[SEC'20]
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	小川 泰信 (Ogawa Yasunobu)	国立極地研究所 (62611)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------