

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 14 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18781

研究課題名（和文）データ駆動型サイエンスによる宇宙機軌道力学におけるカオス現象の解明

研究課題名（英文）Data-driven approach for understanding chaotic phenomena in spacecraft orbital mechanics

研究代表者

坂東 麻衣（Bando, Mai）

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：40512041

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では動的モード分解などのデータ駆動型手法と遅延埋め込みの手法を組み合わせることで、宇宙機多体力学系のバリスティックキャプチャ軌道を復元・予測するモデルを生成した。その結果、有限の時間ステップの予測は、十分なデータ数を用いることで十分な近似精度でカオス的な遷移現象を予測できるモデルが構築可能であることがわかった。さらに、データ駆動解析と力学系解析から得られた知見を踏まえ、バリスティックキャプチャ軌道の特徴付ける力学系のindexについて検討を行いバリスティックキャプチャが起こるまでの時間とFTLEの関連を調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により得られた知見は、宇宙工学、天体力学の惑星形成論と異なる研究領域にまたがる多体力学系のカオス的現象について、統一的な解釈を可能とする。そして、現象のメカニズムをデータ駆動型アプローチでモデル化することにより、そのメカニズムの積極的な抽出が可能となり、宇宙ミッション策定の際の軌道設計への応用が期待される。また、データ駆動型サイエンスの非線形力学系のカオス現象への予測精度の限界などを明らかにすることは、他の学問分野においても一般化でき重要な意味を持つ。

研究成果の概要（英文）：In this study, we combine data-driven methods such as dynamic mode decomposition and delay embedding to generate a model that recovers and predicts the ballistic capture trajectory of a spacecraft multi-body dynamical system. The results show that for a finite number of time steps, it is possible to construct a model that can predict chaotic transition phenomena with sufficient approximation accuracy by using a sufficient number of data. Furthermore, based on the findings from the data-driven analysis and the dynamical system analysis, we investigated the dynamical system indices that characterize the ballistic capture trajectory, and examined the relationship between the time until the ballistic capture occurs and FTLE.

研究分野：アストロダイナミクス

キーワード：多体問題 カオス データ駆動 バリスティックキャプチャ 宇宙ミッション

## 1. 研究開始当初の背景

現在のアストロダイナミクス研究の主要なテーマである複数の天体の重力を考慮する多体問題における宇宙機の軌道設計では、複数の天体の重力が均衡する領域が存在し、平衡点の近傍の多様な運動を作り出す。特に、運動のエネルギーレベルが低い領域では、天体間の重力相互作用が運動を支配し、周期軌道や不変多様体といった多体問題特有の力学系を利用した燃料効率のよい軌道が設計できる。このような低エネルギー軌道にイオンエンジンをはじめとする低推力連続加速型の推進機構を搭載することにより、さらに軌道設計の自由度があがり、多体力学系特有の力学構造を格段に増強できると期待される。このような低エネルギー軌道の設計はアストロダイナミクスの最重要課題であるが、いまだその全容は解明されておらずヒューリスティックな方法による設計が行われている。このため、「数値的な探索による発見以外に、システマチックな理論をベースとした設計や解析が可能か？」が本研究課題の革新をなす学術的な問いである。申請者はこれまで約10年にわたり、上記の問題意識を根底におきながら、アストロダイナミクスの様々な問題に制御理論を基礎とした軌道設計論を展開してきた(「これまでの研究活動」参照)。本研究ではそれらの研究を基盤に、データサイエンスの手法を取り込み、アストロダイナミクスにおける制御・最適化理論の発展を目指す。

近年の計算機の発展を背景に、人工知能や機械学習などのデータ駆動型のアプローチが様々な分野へ応用され注目されている。しかしアストロダイナミクスの問題に対して、機械学習などのデータ駆動型のアプローチを適用した報告例はあるものの、その主な目的は最適解の発見であり、理論基盤の構築を目指した研究は極めて少ない。データサイエンスの一分野である機械学習はしばしばブラックボックスモデリングが用いられるが、本研究で用いるクーブマン作用素を用いたデータ駆動型アプローチはブラックボックスモデルからは得ることができない非線形現象の物理的理解を可能とする。このことは、データから発見した解の信頼性や、アストロダイナミクス全般における設計問題への展開において非常に重要な意味を持つ。

## 2. 研究の目的

軌道の数値解を求める手法は汎用性が高く、現代の高度で複雑なミッションに理想的である反面、理論解析が難しい。本研究は最先端宇宙ミッションを支える軌道設計研究の流れを組み、データ駆動型サイエンスを取り込みこの分野をさらに前進させるため“アストロダイナミクス・データ駆動型サイエンス・最適制御”全てを融合した軌道設計論を展開する。具体的には、観測データからデータにより駆動される線形モデル表現が可能なデータ駆動力学系を構築し、従来の力学系に基づく軌道設計論、最適制御理論をデータ駆動力学系上に展開し、従来の軌道設計を高次元のデータからなる力学系へ一般化する。

## 3. 研究の方法

本研究提案手法の特徴はデータ駆動型アプローチと多体力学系をいかにリンクさせるかという点にあり、具体的には以下の研究項目によりアストロダイナミクスと融合した理論体系の深化を図る。

### 1. 宇宙機の運動データから生成されるデータ駆動力学系の構築と解析

宇宙機の運動の時系列データを生成するため位置・速度ベクトルからなる6次元状態空間において一様に分布する初期状態(X)とそのごく短い時間間隔  $t$  後の状態(Y)を多体力学系の微分方程式を伝播することでデータを作成する。次に、それぞれのデータを基底関数と呼ばれる連続関数により関数空間上に写像し、関数空間においてそれらの関係を記述する線形作用素であるクーブマン作用素( $Y \approx AX$  となる行列 A に相当する)を数値的に近似することで高次元力学系を構築する。不安定多様体方向に伝播された軌道は直ちに発散してしまうため、十分な密度のデータをとることが不可能であるため本研究では、アストロダイナミクス分野の知見を生かし、力学系のセパトリクスにより分断される領域ごとのクーブマン解析法を新たに提案する。さらに領域ごとに時間逆伝播を組み合わせることで多体力学系の構造を利用したデータ観測法を提案する。解析対象として以下を考えた。

1-1 円制限三体問題の線形安定な平衡点周りの非線形周期軌道の解析：クーブマン固有関数と非線形周期軌道ファミリーの関係を明らかにする。

1-2 円制限三体問題の不安定な平衡点周りの解析：領域分割と時間逆伝播を応用し、不安定平衡点周りの力学系を線形表現するクーブマン作用素を求め、不変多様体や周期軌道をデータ駆動力学系において解析する。

1-3 クーブマン固有関数による大域的な輸送構造の創出：構築したクーブマン作用素から未知の大域的な輸送構造を抽出する。

### 2. データ駆動型サイエンスと最適制御理論の融合による低推力軌道設計理論の構築

研究項目1での解析は推力を用いない自然の多体力学系の解析であるのに対して、研究項目2ではデータ駆動最適制御理論を開拓する。申請者が過去に構築してきた軌道最適化手法を用いて、最適低推力軌道のデータを作成することが可能である。このような低推力の最適化の問題に対

して、1) 連続関数で表される低推力連続加速を離散化し、有限個のパラメータを用いて近似し最適化を行う非線形計画問題による直接法と 2) 変分原理により連続関数を直接最適化する最適制御理論の間接法の 2 つのアプローチが知られている。本研究提案では、2) のアプローチでは随伴変数とよばれる状態変数と同じ次元をもつ変数を用いて最適軌道を記述する点に着目する。研究項目 1 の手法を随伴変数により拡張された状態空間に対して適用することでデータ駆動力学系を構築する。これにより、最適軌道のサンプルデータから大域的な非線形最適制御則を抽出することが可能となる。

#### 4. 研究成果

天体との再接近という物理的イベントとデータとをリンクさせることにより、領域間の軌道の遷移を引き起こす現象のモデリングを行った。多天体力学系においては、天体との接近により軌道がカオス化する現象がしばしば観測されるが、カオス的な挙動を示す力学系に対して、断続的な強制力を用いた HAVOK という方法でカオス的な振る舞いをモデリングした例が先行研究で報告されている。本研究では、月との接近イベントを強制外力として HAVOK を用いたモデリングし、カオス的な状態遷移に特徴的な機構を発見した。強制外力項が励起される状態を位相空間において解析することで、バリスティックキャプチャー軌道生成の力学的メカニズムをデータ駆動科学のアプローチにより明らかにすることに成功した。次に動的モード分解の手法と遅延埋め込みの手法を組み合わせることで、宇宙機多天体力学系のカオス運動を復元・予測するモデルを生成した。その結果、有限の時間ステップの予測は、十分なデータ数を用いることで十分な近似精度でカオス的な遷移現象を予測できるモデルが構築可能であることがわかった。データ駆動解析と力学系解析から得られた知見を踏まえ、バリスティックキャプチャー軌道の特徴付ける力学系の index について検討を行いバリスティックキャプチャーが起こるまでの時間と FTLE の関連について明らかにした。データ駆動解析の結果と関連付けて解析した共鳴軌道に付随するカオス的な力学構造を利用した軌道設計法に検討を行なった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Naoki Hiraiwa, Mai Bando, Isaia Nisoli and Yuzuru Sato	4. 巻 -
2. 論文標題 Designing robust trajectories by lobe dynamics in Hamiltonian systems	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Naoki Hiraiwa, Mai Bando, Isaia Nisoli and Yuzuru Sato,	4. 巻 -
2. 論文標題 esigning robust trajectories by lobe dynamics in Hamiltonian systems	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Taiga Kajikawa, Tatsuya Shiotsuka, Mai Bando and Shinji Hokamoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Data-Driven Guidance and Control for Asteroid Landing Based on Real-Time Dynamic Mode Decomposition	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 52622 - 52635
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2023.3276754	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Naoki Hiraiwa, Mai Bando and Shinji Hokamoto	4. 巻 1
2. 論文標題 Halo-to-Halo Low-Thrust Transfer via Successive Convex Optimization with Intermediate Orbit Design	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Evolving Space Activities	6. 最初と最後の頁 48
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.57350/jesa.48	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kanta Ikeda, Naoki Hiraiwa, Mai Bando and Shinji Hokamoto	4. 巻 1
2. 論文標題 Design of Low-Energy Transfer Trajectories from Jupiter to Europa with Ballistic Transfer	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Evolving Space Activities	6. 最初と最後の頁 35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.57350/jesa.35	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Naoki Hiraiwa, Mai Bando and Shinji Hokamoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Trajectory Design in Irregular Gravitational Fields Based on Center Manifold Theory	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Guidance, Control, and Dynamics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.G007151	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Mai Bando, Hamidreza Nemati, Yuki Akiyama and Shinji Hokamoto	4. 巻 3
2. 論文標題 Formation Flying Along Libration Point Orbits Using Chattering Attenuation Sliding Mode Control	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Space Technologies	6. 最初と最後の頁 919932
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/frspt.2022.919932	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yuki Kayama, Kathleen Howell, Mai Bando and Shinji Hokamoto	4. 巻 45
2. 論文標題 Low-Thrust Trajectory Design with Successive Convex Optimization for Libration Point Orbits	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Guidance, Control, and Dynamics	6. 最初と最後の頁 623-637.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yuki Kayama, Mai Bando and Shinji Hokamoto	4. 巻 19
2. 論文標題 Sparse Optimal Control for Nonlinear Trajectory Design in Three-Body Problem	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the JSASS / Aerospace Technology Japan	6. 最初と最後の頁 545-552
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 佐野嵩弥, Pan Shanshan, 坂東麻衣, 外本伸治
2. 発表標題 近点ポアンカレマップと有限時間リアプノフ指数を用いた脱出軌道の解析
3. 学会等名 第11回 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 加藤颯太, 坂東麻衣, 外本伸治
2. 発表標題 ベイズ最適化を用いたデータ駆動解析の最適化
3. 学会等名 第11回 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Naoki Hiraiwa, Mai Bando, Shinji Hokamoto
2. 発表標題 Analysis of Transfer Trajectories in Cislunar Space Using Sequences of Lobe Dynamics
3. 学会等名 74th International Astronautical Congress
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Mai Bando, Shohei Morimitsu, Takuro Nishimura, Shinji Hokamoto
2. 発表標題 The Role of Stable Manifolds in Optimal Control under Stochastic Noise
3. 学会等名 International Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Mai Bando
2. 発表標題 New Trends in Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy
3. 学会等名 International Workshop on Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy (IWCMDA-2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kyosuke Sato, Mai Bando, Shinji Hokamoto
2. 発表標題 A Data-Driven Nonlinear Optimal Control Using Koopman Operator on Hamiltonian Flow
3. 学会等名 73rd International Astronautical CongressKyosuke Sato, (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐野嵩弥, Pan Shanshan, 坂東麻衣, 外本伸治
2. 発表標題 近点ポアンカレマップと有限時間リアプノフ指数を用いた脱出軌道の解析
3. 学会等名 第11回 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 加藤颯太, 坂東麻衣, 外本伸治
2. 発表標題 ベイズ最適化を用いたデータ駆動解析の最適化
3. 学会等名 第11回 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Komsun Tamanakijprasart, Mai Bando, Shinji Hokamoto
2. 発表標題 Data-Driven Orbital Control in Perturbed Environment
3. 学会等名 SICE Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林勇太, 坂東麻衣, 外本 伸治
2. 発表標題 地球一月三体問題の周期軌道における姿勢運動の解析
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山口宗生, 坂東麻衣, 外本 伸治,
2. 発表標題 超小型衛星によるインターセプト式を用いた彗星遷移軌道の設計
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 平山翔大, 平岩尚樹, 坂東麻衣, 外本 伸治,
2. 発表標題 確率的勾配降下法Adamを用いた軌道最適化
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 千種 あゆ美, 平岩尚樹, 坂東麻衣, 外本 伸治,
2. 発表標題 外乱を考慮した火星エアロキャプチャの誘導制御系の検討
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoki Hiraiwa, Mai Bando and Shinji Hokamoto
2. 発表標題 Halo-to-Halo Low-Thrust Transfer via Successive Convex Optimization with Intermediate Orbit Design
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (ISTS) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kanta Ikeda, Naoki Hiraiwa, Mai Bando and Shinji Hokamot
2. 発表標題 Design of low energy transfer trajectories from Earth to Europa with ballistic capture
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (ISTS) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoki Hiraiwa, Mai Bando and Shinji Hokamoto
2. 発表標題 Analysis of Ballistic Escape based on Lobe Dynamics
3. 学会等名 72nd International Astronautical Congress (IAC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池田幹太, 平岩尚樹, 坂東麻衣, 外本 伸治
2. 発表標題 近点ポアンカレマップを用いたEuropaへの低エネルギー遷移軌道の設計
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会 (国際学会)
4. 発表年 2022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

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