

令和 6 年 5 月 2 日現在

機関番号：35403

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14951

研究課題名（和文）深宇宙探査に有用な周期軌道に生起する高次元・多体モデルに特有の不安定ダイナミクス

研究課題名（英文）Unstable Dynamics Associated with Periodic Orbits Useful in Deep-Space Exploration Peculiar to High-Dimensional Multi-Body Models

研究代表者

大島 健太（OSHIMA, Kenta）

広島工業大学・工学部・講師

研究者番号：20868335

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、複数の天体の重力を考慮した多体モデルにおいて、周期軌道に生じる不安定性に着目することで、高次元相空間をもつ多体モデルに特有の遷移現象を探索した。具体的には、代表的な多体モデルである空間円制限三体問題、楕円制限三体問題、円制限四体問題において軌道傾斜角、離心率、ヤコビ定数（エネルギーに相当）がそれぞれ一方向的に変化する現象を見出した。その際、弱い不安定性であっても対象の物理量が一方向的かつ長期的に変化する軌道を抽出できるよう、ロバストに解に収束する軌道最適化の手法を構築した。また、地球まわりを月と反対方向に公転する逆行周期軌道の深宇宙探査における有用性を示唆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の意義は、軌道力学モデルの高い次元の相空間を考慮してはじめて現れる不安定性を抽出し、特定の物理量の一方向的な変化と関連づけたこと、およびそれらを宇宙機の軌道間遷移に利用することで、燃料消費量を低減できるメリットを示した点にある。また、本研究課題の副産物として得られた軌道最適化手法は、目的関数や拘束条件の勾配に現れる特異点を除去してロバストに収束解を得られるため、宇宙機の軌道設計のみならず他分野の最適化問題への応用可能性も期待される。

研究成果の概要（英文）：This research explored transport phenomena peculiar to high-dimensional multi-body models by focusing on the instability associated with periodic orbits. The study identified dynamical phenomena exhibiting unidirectional changes in the inclination, eccentricity, and Jacobi energy in the spatial circular restricted three-body problem, elliptic restricted three-body problem, and bicircular restricted four-body problem, respectively. To handle delicate weakly unstable cases that can cause difficulties in extracting the corresponding instability, a regularized direct optimization method was developed to robustly find solutions. This study also indicated the usefulness of retrograde periodic orbits around Earth in deep-space exploration.

研究分野：軌道力学

キーワード：軌道力学 制限三体問題 制限四体問題 周期軌道 不変多様体 最適化 正則化 逆行軌道

1. 研究開始当初の背景

深宇宙探査の活発化とともに、推進薬量を抑えて航行の自由度を高めることを可能とする、新たな軌道制御技術が望まれている。地球から遠く離れた深宇宙では、複数の天体の重力を利用した軌道設計することで、探査に必要な推進薬量を節約できる。

本研究は、深宇宙探査に有用な周期軌道に生起する高次元な多体力学系に特有の遷移メカニズムを、力学系理論および最適制御を用いることで解明し、その利用手法を構築し、様々な宇宙ミッションへの応用を提案する。本研究を推進していくことで、新しい軌道制御技術の開拓につながるとともに、周期軌道が司る状態遷移が現象の理解に重要な流体力学や分子反応などの他分野への寄与が期待される。

2. 研究の目的

地球から遠く離れた深宇宙では、複数の天体の重力を利用した軌道設計することで、探査に必要な推進薬量を節約できる。申請者は最近、多体モデルの高次元ダイナミクスに特有の不安定性を利用して、遷移に要する推進薬量を低減する手法を提案した。しかし、不安定性を十分に利用できる軌道が少ないこと、他の高次元・多体モデルは時間に陽に依存するため解析が難しいことが、さらなる軌道制御技術の開拓を阻んでいる。

そこで本研究は、申請者の提案手法に最適制御を導入することで、高次元・多体モデル特有の不安定性を効率的に利用できる手法を構築する。さらに、簡易モデルの周期軌道を時間依存モデルに収束させたときに生じる、時間依存モデル特有の不安定ダイナミクスが駆動する遷移メカニズムを解明する。得られた知見を基に、推進薬量を抑えて航行の自由度を向上させる新たな軌道制御法を構築し、様々な深宇宙探査ミッションへの応用を提案する。

3. 研究の方法

本研究では、まず最も基本的な軌道力学モデルである平面円制限三体問題において周期軌道のファミリーを continuation 法によって求める。特に、分岐や fold に直面しても同じファミリーを追跡できる pseudo-arclength continuation 法を採用する。平面円制限三体問題の相空間は4次元であるが、より高次元の相空間をもつ空間円制限三体問題や楕円制限三体問題、円制限四体問題のモデルにおいて、状態遷移行列の固有値に基づき元の周期軌道の安定性を解析することで現れる、高次元モデルに特有の不安定性およびそれに付随する安定・不安定多様体のふるまいを調べる。

高次元モデルを用いて安定性解析を行う際、空間円制限三体問題においては軌道面外成分をゼロとおくだけで周期解が得られるが、楕円制限三体問題や円制限四体問題に対しては元の周期軌道を予想解として、pseudo-arclength continuation 法を適用して厳密に周期解へと収束させる必要がある。そこで本研究では、楕円制限三体問題および円制限四体問題がもつ対称性に基づき、元の周期解が2通りの周期解へと分岐する際に課せられる条件を導出し、周期解への収束計算を単純化することで収束性を向上させる。図1に各軌道力学モデル間の関係を示す。

また、元の周期軌道がもつ不安定性に比べて高次元モデルに特有の不安定性がはるかに弱い場合、その不安定性に付随する軌道を抽出することが困難になる場合がある。そこで本研究では、速度の不連続量(Δv)を許容して周期軌道の近傍にとどまりつつ、高次元モデルに特有の不安定性によって物理量が一方的に変化する軌道を予想解として求めた後、 Δv の大きさの合計が最小となるように最適化を行う手法を用いる。

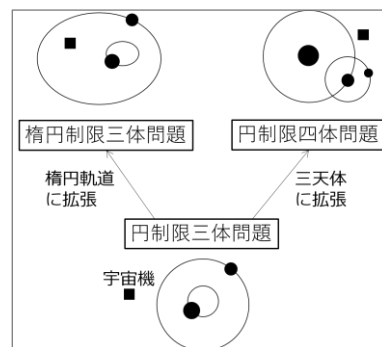


図1. 軌道力学モデル間の階層構造

4. 研究成果

- (1) 自身の先行研究の手法 (<https://doi.org/10.1007/s10569-019-9892-6>) に対して最適制御を付加することで、遠方への脱出を回避して周期軌道の近傍にとどまりつつ、高次元モデルに特有の不安定性によって物理量を一方的に増幅させる手法を構築した。時間

に陽に依存しないが高次元な相空間を持つモデルである空間円制限三体問題に適用した結果、以前の手法では適用できなかった低エネルギー条件において、軌道面外成分を大きく変化させられた。応用として、月近傍の周期軌道間の遷移軌道の設計を行い、先行研究と比較して遷移時間および燃料消費量を大きく低減できることを示した。以上の研究成果は主に、学術雑誌 (<https://doi.org/10.2514/1.G005159>) にて発表した。

さらに、時間に陽に依存するモデルに特有の不安定性を抽出するため、楕円制限三体問題および円制限四体問題に特有の不安定性を探索した。楕円制限三体問題における周期軌道を網羅的に探索し、安定性を解析することで、軌道離心率を一方向的に変化させる軌道を見出した。応用として、軌道離心率の大きい二重小惑星系において宇宙機の軌道離心率を増幅させることで、小惑星に近づきながら観測を行う手法を提案した。以上の研究成果は、国際会議(2021 AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference)にて発表した。円制限四体問題に特有の不安定ダイナミクスについては、地球-月系の円制限三体問題においては線形安定であった周期軌道を、太陽重力の摂動を考慮して収束させると不安定性が生じる場合があることを見出した。この円制限四体問題に特有の不安定性に付随する安定・不安定多様体を調べた結果、円制限三体問題では保存されるヤコビ定数が大きく変化した後、元の値に戻るホモクリニック現象を見出した。以上の研究成果は主に、学術雑誌 (<https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.12.020>) にて発表した。

- (2) 深宇宙探査に有用な周期軌道の候補として、地球まわりを逆行する周期軌道に滞在し、月および地球スイングバイを利用して深宇宙に脱出するミッションシナリオを検討した。さらに、逆行周期軌道の天体力学における意義を探索した。

深宇宙探査への応用については、地球と深宇宙をつなぐ中継軌道として、逆行周期軌道の利用を提案した。その理由として、月スイングバイおよび太陽潮汐力を利用することで、十分小さい打ち上げエネルギーおよび投入マヌーバによって、地球から逆行周期軌道に遷移および投入可能であること、逆行周期軌道の弱不安定性により少ないマヌーバ量によって軌道保持が可能であること、また逆行周期軌道から月スイングバイおよびパワード地球スイングバイによって実用的な遷移時間とマヌーバ量で深宇宙に脱出可能であることを示した。以上の研究成果は主に、

学術雑誌 (<https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.07.012>),

国内学会(第65回宇宙科学技術連合講演会)にて発表した。

天体力学への応用については、太陽重力の摂動下において、地球まわりを逆行する軌道の広い長期安定領域を発見し、その要因となる線形安定な逆行周期軌道のファミリーを同定した。従来は地球-月系において、ラグランジュ点 L4 および L5 周辺や月近傍の擬周回軌道など、地球まわりを順行する長期安定な軌道が、宇宙塵などが捕捉され得る領域として注目されていたが、本研究は逆行軌道も有力な候補であることを示唆した点において意義があると考えられる。以上の研究成果は主に、

学術雑誌 (<https://doi.org/10.1007/s10509-021-03994-8>),

学術雑誌 (<https://doi.org/10.1007/s10509-022-04071-4>),

学術雑誌 (<https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.06.009>) にて発表した。

- (3) 天体の重力ポテンシャルの特異点を除去するために従来用いられてきた正則化の手法を、非線形計画法の枠組みに組み込むことで、宇宙機の新しい軌道最適化の手法を構築した。平面問題では Levi-Civita 変換、空間問題に対しては Kustaanheimo-Stiefel 変換に基づいて multiple shooting 法に正則化変数ベクトルを導入し、瞬間的な速度変更を表す Δv ベクトルを変換した。本手法では、 Δv ベクトルの大きさの総和として定義される目的関数の勾配から特異点を除去したため、最適解において不要な Δv は精度良くゼロ近傍に抑えられ、また予想解に与えられておらずとも最適解に必要な Δv は自動的に生成されるという利点がある。本手法の実装においては、数値計算ソフトウェア MATLAB の非線形計画法ソルバー fmincon を用いた。

応用として、月近傍の周期軌道間の遷移軌道の最適化を行い、従来よりも燃料消費量が大幅に少ない解を得ることができた。また、高次元の相空間をもつ空間円制限三体問題において、不安定平衡点まわりで軌道面外成分が大きく変化する軌道を求めるにあたり本手法を適用することで、2020年度に本研究課題で実施した結果と比較して、不要な Δv をより精度良く除去することができた。さらには、低推力推進を想定した定式化も行い、空間円制限三体問題に特有の不安定性を利用して2020年度に求めていたインパルス推進を想定した遷移軌道を、低推力推進を想定した遷移軌道に変換できることも示した。また、提案手法の計算性能を向上させるため、目的関数および拘束条件の変数に関する一次導関数および二次導関数を解析的に導出し実装した。それにより、非線形計画問題におけるラグランジアンへのヘッセ行列を正確に求められるようになったため、従来手法や本手法に一次導関数のみを実装した場合と比較して、計算速度やロバスト性の向上を確認できた。以上の研究成果は主に、

学術雑誌 (<https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.05.055>),

学術雑誌 (<https://doi.org/10.1007/s42064-023-0176-2>),

学術雑誌(<https://doi.org/10.1142/S2737480724500018>),
国内学会(2022年度アストロダイナミクスシンポジウム)にて発表した.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Oshima Kenta	4. 巻 8
2. 論文標題 Regularizing fuel-optimal multi-impulse trajectories	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Astrodynamics	6. 最初と最後の頁 97 ~ 119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s42064-023-0176-2	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 -
1. 著者名 Oshima Kenta	4. 巻 -
2. 論文標題 The Impact of Second-Order Analytical Derivatives on Regularized Direct Multiple Shooting Method for Impulsive Spacecraft Trajectory Optimization	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Guidance, Navigation and Control	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) 10.1142/S2737480724500018	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 -
1. 著者名 Oshima Kenta	4. 巻 72
2. 論文標題 Regularized direct method for low-thrust trajectory optimization: Minimum-fuel transfer between cislunar periodic orbits	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advances in Space Research	6. 最初と最後の頁 2051 ~ 2063
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.asr.2023.05.055	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 -
1. 著者名 Oshima Kenta	4. 巻 70
2. 論文標題 Multiple families of synodic resonant periodic orbits in the bicircular restricted four-body problem	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advances in Space Research	6. 最初と最後の頁 1325 ~ 1335
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.asr.2022.06.009	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 -

1. 著者名 Oshima Kenta	4. 巻 367
2. 論文標題 3D stable and weakly unstable periodic orbits around the Earth near the retrograde co-orbital resonance with the Moon	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astrophysics and Space Science	6. 最初と最後の頁 1~14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10509-022-04071-4	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 -

1. 著者名 Oshima Kenta	4. 巻 69
2. 論文標題 Continuation and stationkeeping analyses on planar retrograde periodic orbits around the Earth	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advances in Space Research	6. 最初と最後の頁 2210~2222
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.asr.2021.12.020	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 -

1. 著者名 Oshima Kenta	4. 巻 68
2. 論文標題 Capture and escape analyses on planar retrograde periodic orbit around the Earth	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advances in Space Research	6. 最初と最後の頁 3891~3902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.asr.2021.07.012	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 -

1. 著者名 Oshima Kenta	4. 巻 366
2. 論文標題 Retrograde co-orbital orbits in the Earth-Moon system: planar stability region under solar gravitational perturbation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astrophysics and Space Science	6. 最初と最後の頁 1~11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10509-021-03994-8	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 -

1. 著者名 大島 健太	4. 巻 2181
2. 論文標題 地球重力圏脱出前の新たな中継軌道に関する初期検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 数理解析研究所 講究録	6. 最初と最後の頁 1~5
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 無
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 -

1. 著者名 Oshima Kenta	4. 巻 44
2. 論文標題 Optimization-Aided, Low-Energy Transfers via Vertical Instability Around Earth-Moon L1	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Guidance, Control, and Dynamics	6. 最初と最後の頁 389 ~ 398
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.G005159	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 1件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Oshima Kenta
2. 発表標題 Hessian-Accelerated, Regularized Direct Method for Impulsive Trajectory Optimization
3. 学会等名 2023 AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Oshima Kenta
2. 発表標題 Regularizing Fuel-Optimal, Multi-Impulse Trajectories with Second-Order Derivatives
3. 学会等名 10th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Oshima Kenta
2. 発表標題 Applications of the Regularized Direct Method for Nonlinear Trajectory Optimization
3. 学会等名 34th International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大島健太
2. 発表標題 Trade-Off between Fuel Consumption and State Variables Error from Reference Trajectory Induced by Delta-V Execution Error
3. 学会等名 第33回アストロダイナミクスシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kenta Oshima
2. 発表標題 Regularized Direct Method for Nonlinear Trajectory Optimization Part 1: High-Thrust Scenario
3. 学会等名 33rd AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kenta Oshima
2. 発表標題 Regularized Direct Method for Nonlinear Trajectory Optimization Part 2: Low-Thrust Scenario
3. 学会等名 33rd AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大島健太
2. 発表標題 V最小化問題を正則化する直接法
3. 学会等名 第66回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大島健太
2. 発表標題 インパルス Vの総和を直接的かつ自動的に最小化するための変数変換
3. 学会等名 JAXAアストロダイナミクスシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大島健太
2. 発表標題 正則化手法を直接法に融合した軌道最適化
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenta Oshima
2. 発表標題 Novel Co-Orbital Stability Region and Periodic Orbits in the Earth-Moon System
3. 学会等名 AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大島 健太
2. 発表標題 深宇宙への新たな中継軌道に関する諸解析
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大島 健太
2. 発表標題 深宇宙への脱出時間を短縮する待機軌道の提案
3. 学会等名 JAXAアストロダイナミクスシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenta Oshima
2. 発表標題 Stable Retrograde Periodic Orbits in the Earth-Moon-Sun System
3. 学会等名 International workshop on Co-orbital Motion: modeling, understanding and exploitation (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenta Oshima
2. 発表標題 Eccentric Excursions from Periodic Orbits in the Elliptic Restricted Three Body Problem
3. 学会等名 AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenta Oshima
2. 発表標題 Extraction and Exploitation of Instabilities for Spacecraft Trajectories Based on Hierarchies of Orbital Models
3. 学会等名 RIMS 研究集会「数理学の諸問題と力学系理論の新展開」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大島健太
2. 発表標題 楢円制限三体問題に特有の不安定性を利用した軌道設計
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenta Oshima
2. 発表標題 Low-Energy Transfers between Planar and Spatial Periodic Orbits via Vertical Instability around Earth-Moon L1
3. 学会等名 31st AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021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
---------	---------