

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04560

研究課題名(和文) 多体力学系の構造を用いた低推力宇宙機による惑星間ハイウェイ

研究課題名(英文) Low-Thrust Interplanetary highway in Multi-Body Problem

研究代表者

坂東 麻衣 (Bando, Mai)

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：40512041

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：多体力学系において、人工的な加速度を付加することで低コストで惑星間移行を達成するための手法を構築した。まず、一定加速度の大きさや方向を変化させることで、人工的な平衡点と周期軌道の位置を所望の場所に制御可能なことを明らかにした。次に、惑星間航行の単純化された問題として、異なる平衡点周りの周期軌道を考え、それに付随する不変多様体の構造を利用した周期軌道間の移行法を提案した。さらに、多体力学系の制御理論として、凸最適化を用いた燃料最小軌道の設計法を構築した。提案手法により、極めて小さな推力レベルの連続加速推進を仮定した惑星間移行の基礎が構築された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2001年NASAにより打ち上げられたジェネシスミッション以来、多体力学系の性質を積極的に利用することで効率的な軌道が実現され、2体問題では実現しえない特殊かつ工学的に有用な軌道がミッションにおいて多く用いられている。しかし、これまでの多体力学系の軌道設計は天体の重力場が作る力学系の運動から条件をみだす軌道を数値的に見つけたものであり、設計の自由度は高くなかった。そこで、設計の自由度を高めるため解析的なアプローチによって多体力学系の効果を利用した低推力宇宙機の軌道設計を行い「多体力学系の力学構造の効果を最大限利用するためには、低推力をどのように加えるのが良いのか」を明らかにすることができた。

研究成果の概要(英文)：In a multi-body dynamical system, a method to achieve interplanetary transition at low cost by adding artificial acceleration is considered. First, it was clarified that the position of the artificial equilibrium point and the periodic orbit can be controlled to the desired position by changing the magnitude and direction of the constant acceleration. As a simplified problem of interplanetary navigation, we considered periodic orbits around different equilibrium points and proposed a transfer method between periodic orbits using the structure of the invariant manifold that accompanies it. Furthermore, as a control theory for multi-body dynamical systems, a design method for the minimum fuel trajectory using convex optimization is proposed. Based on the proposed method, interplanetary transfer assuming continuous acceleration with extremely small thrust levels is achieved.

研究分野：アストロダイナミクス

キーワード：多体問題 低推力 三体問題 多様体

1. 研究開始当初の背景

「はやぶさ」や「はやぶさ2」に搭載されたイオンエンジンに代表される低推力連続加速を行う宇宙機(以下、低推力宇宙機)は高比推力であることからミッションの長寿命化・高精度化に貢献し、今後は深宇宙探査での利用の増加が期待されている。しかし、低推力宇宙機においては、天体の重力の他に常に人工的な推力が加わる運動となるため、これまでの軌道工学の理論を適用することができない。さらに、従来の化学推進によるインパルス型推力に比べ、推力が非常に小さく軌道を瞬時に変えることができない。そこでこの問題を解決するために多体力学系の力学的な特徴を積極的に利用することが解決策としてあげられる。しかし、低推力連続加速による軌道最適化の研究は現在盛んに行われているが、多体力学系と低推力連続加速の両方を同時に考慮した軌道最適化の理論的研究は極めて少ない。

2. 研究の目的

多体力学系とは、1つの天体の重力のもとでの物体の運動を考える2体問題に対して、重力を及ぼす天体が2つ以上の場合を指す。天体が作る多体力学系の平衡点近傍に存在する周期軌道は安定多様体、不安定多様体という力学的な構造(以下、マニフォールドダイナミクスとよぶ)を持ち、その構造を利用することでより低エネルギーな軌道移行が実現できることが明らかになってきた。安定(不安定)多様体上の軌道は燃料を使わずに周期軌道に移行(周期軌道から脱出)することができる。2001年にNASAにより打ち上げられたジェネシスミッションでは、多体力学系の性質を積極的に利用することで効率的な軌道が実現され、2体問題では実現しえない特殊かつ工学的に有用な軌道の存在が示された。しかし、これらの研究は天体の重力場が作る力学系の運動から条件をみだす軌道を数値的に見つけたすものであり、設計の自由度は高くない。本研究の目的は、低推力宇宙機が惑星の重力と低推力を効率よく利用し、惑星間を自由に行き来できる「惑星間ハイウェイ」を提案し、これまで試行錯誤的に行われてきた多体力学系の軌道設計において、制御理論に裏付けられたシステムチックな軌道設計法を展開することである。

3. 研究の方法

以下の①～④の研究項目を実施した。

最適制御理論によるマニフォールドダイナミクスの高次元化

多体力学系の軌道が低推力宇宙機によりどのように自由度が増すかを明らかにするため、最も単純なマニフォールドダイナミクスにおいて推力を加えない力学系では、宇宙機の運動は初期状態が安定な固有ベクトル上にある場合、外力を使わずに平衡点に到達することができる(安定多様体)。一方、低推力を加えた運動では、平衡点に到達できる初期状態の集合は、飛行時間・消費燃料に応じて決まる領域であり、消費燃料や飛行時間が大きいほど大きな楕円体となる。この低推力により拡張された領域を「低推力に拡張されたマニフォールドダイナミクス」と定義し、消費燃料を評価関数とする最適制御理論により解析的に表す。

多様体の交差領域の検出

マニフォールド内の軌道の交差領域に存在する軌道は異なるマニフォールドダイナミクスを接続する重要な役割を果たす。このため、マニフォールド内に存在するトランジット軌道といわれる軌道の集合を3次元軌道に対応する6次元相空間において網羅的に計算する求める手法を提案した。提案手法を地球-月系、太陽-地球系、太陽-火星系を接続する軌道の設計に応用する方法を示した。

V最小軌道の数値解放の構築

では、解析的な扱いを容易にするために評価関数として入力のエネギーを用いるが、実際のミッションにおいては入力の絶対値の総和である V を最適化した V 最小軌道が望ましい。一般に、エネルギー最小軌道と V 最小軌道は異なるが、評価関数の指数部を連続的に変化させることでエネルギー最小軌道から最適性を保ちつつ V 最小軌道を求めることが可能である。エネルギー最小軌道から V 最小軌道を求める計算ツールを開発し、ミッションの実現性を評価する。

惑星間ハイウェイの設計

例として、太陽-地球-宇宙機3体問題と太陽-火星-宇宙機3体問題という異なる2つの3体力学系を考える。それぞれの3体力学系の平衡点・周期軌道・不変トーラスを求め、 V で構築した理論により低推力によるマニフォールドダイナミクスに拡張する。次に V で構築した手法を用いて、それらをつなぐ軌道を求め、異なるシステム間の移行(惑星間ハイウェイ)を実現する。その上で、 V で構築したツールにより飛行時間や V の制約を変化させることで惑星間ハイウェイの実現性を評価する。

4. 研究成果

人工的な加速度を付加することで不変多様体の構造を変化させる手法を構築した。まず、一定加速度の大きさや方向を変化させることで、人工的な平衡点と周期軌道の位置を所望の場所に制御可能なことを明らかにした。次に、惑星間航行の簡単化された問題として、異なる平衡点周り

の周期軌道を考え、それに付随する不変多様体の構造を利用した周期軌道間の移行法を提案した。推力を付加した系の人工的な不変多様体を利用することによりエネルギーが異なる周期軌道間の移行も滑らかに接続可能となることを示した。さらに、移行に必要な飛行時間を短縮できること、加速度の大きさは現実的な制約上非常に小さいが、三体問題の力学系の持つ強い非線形性により加速度を加えない不変多様体では到達しえない地点への移行を実現可能であることが明らかとなった次に不変多様体構造を利用した惑星間遷移軌道の設計方法について検討を行ったトランジット軌道とよばれる。不変体内部の軌道を利用することにより、周期軌道をゲートウェイとして深宇宙遷移に移行するために必要な初速度を効率良く獲得できることを示した。そして、大域的最適化を行い、地球-火星間遷移軌道において有用性を示した。また、不変多様体の軌道を利用するには、不変多様体上軌道に投入することが必須である。このため、低推力連続加速により不変多様体上の目標軌道に投入するための最適制御理論を構築した。その際、線形化ダイナミクスと非線形性の項をうまく設定することで、最小限の制御入力で、線形化ダイナミクスの安定多様体を利用した効率の良い遷移が可能であることを示した。さらに、多体力学系の制御理論として、凸最適化を用いた燃料最小軌道の設計法を構築した。提案手法により、極めて小さな推力レベルの連続加速推進においても軌道最適化を行うことが可能となった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yuki kayama, Mai Bando and Shinji Hokamoto	4. 巻 -
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 -
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 Yang Zhou, Mai Bando, Shinji Hokamoto and Panlong Wu	4. 巻 -
2. 論文標題 Orbit Maintenance for Quasi-Periodic Orbit in Earth-Moon System	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 -
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 該当する
1. 著者名 Yang Zhou, Mai Bando, Panlong Wu, Shinji Hokamoto	4. 巻 163
2. 論文標題 Integrated Orbit Determination and Maintenance in Earth-Moon Unstable Dynamics Environment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 63-76
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.actaastro.2018.11.041	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 Akiyama, Mai Bando and Shinji Hokamoto,	4. 巻 160
2. 論文標題 Periodic and Quasi-Periodic Orbits Design based on the Center Manifold Theory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 672-682
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.actaastro.2019.02.029	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 Zhou Yang, Bando Mai, Hokamoto Shinji, Wu Panlong	4. 巻 163
2. 論文標題 Integrated orbit determination and maintenance in Earth-Moon unstable dynamics environment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 69-76
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actaastro.2018.11.041	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 Akiyama Yuki, Bando Mai, Hokamoto Shinji	4. 巻 160
2. 論文標題 Periodic and quasi-periodic orbit design based on the center manifold theory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 672-682
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actaastro.2019.02.029	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 YAMANE Motoki, BANDO Mai, HOKAMOTO Shinji	4. 巻 17
2. 論文標題 Optimal Trajectory Design of Formation Flying based on Attractive Sets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN	6. 最初と最後の頁 96 ~ 103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tastj.17.96	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 Bando Mai, Scheeres Daniel J.	4. 巻 41
2. 論文標題 Nonlinear Attractive and Reachable Sets Under Optimal Control in Three-Body Problem	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Guidance, Control, and Dynamics	6. 最初と最後の頁 1766 ~ 1775
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.G003334	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

〔学会発表〕 計25件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 20件）

1. 発表者名 Noma Wataru, Zhe Xu, Mai Bando and Shinji Hokamoto
2. 発表標題 Trajectory Design to Mars from Earth-Moon System with Three-dimensional Transit Orbits
3. 学会等名 71st International Astronautical Congress (IAC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Keitaro Miyahara, Yuki Kayama, Mai Bando and Shinji Hokamoto
2. 発表標題 Cycler Orbit Design Using Low-thrust in the Sun-Earth-Moon system
3. 学会等名 71st International Astronautical Congress (IAC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takehiro Yasuda, Mai Bando and Shinji Hokamoto
2. 発表標題 Formation Control Using Differential Atmospheric Drag Considering Attitude Constraints
3. 学会等名 71st International Astronautical Congress (IAC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Naoki Hiraiwa, Mai Bando and Shinji Hokamoto
2. 発表標題 Trajectory design in the vicinity of 65803 Didymos based on the center manifold theory
3. 学会等名 2020 AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Kayama, Mai Bando and Shinji Hokamoto
2. 発表標題 Minimum Fuel Trajectory Design Using Sparse Optimal Control in Three-Body Problem
3. 学会等名 2020 AIAA SciTech Forum, (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Anviksha Sharma, Mai Bando, Shinji Hokamoto and Daniel Scheeres
2. 発表標題 Optimal Landing Problem for a Binary Asteroid System and Its Error Sensitivity
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Kayama, Mai Bando and Shinji Hokamoto
2. 発表標題 Low Thrust Trajectory Design with Convex Optimization for Libration Point Orbits
3. 学会等名 31st AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Zhe Xu, Mai Bando, Hideaki Ogawa and Shinji Hokamoto
2. 発表標題 Application of Halo Orbit on Extension for Launch Window Limited by Direct Earth-Mars Transfer
3. 学会等名 31st AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kyosuke Asaki, Mai Bando and Shinji Hokamoto
2. 発表標題 Riemannian Optimization for Spacecraft Trajectory Design
3. 学会等名 70th International Astronautical Congress (IAC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuri Hachiya, Yuki Kayama, Mai Bando and Shinji Hokamoto
2. 発表標題 Manifold-to-Manifold Transfers Using Low-Thrust Acceleration
3. 学会等名 70th International Astronautical Congress (IAC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yang Zhou, Mai Bando, Shinji Hokamoto, Panlong Wu
2. 発表標題 Manifold-based robust stabilization of libration-point orbit with navigational uncertainty,
3. 学会等名 70th International Astronautical Congress (IAC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Kayama, Mai Bando, and Shinji Hokamoto
2. 発表標題 Station-keeping of Unstable Orbits Based on Sparse Optimal Control
3. 学会等名 SICE Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Kayama, Mai Bando, and Shinji Hokamoto
2. 発表標題 Direct Method of Optimal Trajectory Design in Three-Body Problem
3. 学会等名 32nd International Symposium on Space Technology and Science (ISTS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yang Zhou, Mai Bando, Shinji Hokamoto, Panlong Wu
2. 発表標題 Orbit maintenance for quasi periodic orbits in Earth-Moon system
3. 学会等名 32nd International Symposium on Space Technology and Science (ISTS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野間航, 坂東麻衣, 外本伸治
2. 発表標題 3次元トランジット軌道の設計とミッション
3. 学会等名 第63回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮原圭太郎, 香山裕樹, 坂東麻衣, 外本伸治
2. 発表標題 太陽 地球 月系における低推力を用いた連続月スイングバイ軌道設計
3. 学会等名 第63回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野間航, 坂東麻衣, 外本伸治
2. 発表標題 円制限三体問題の接続による惑星間遷移軌道の設計/3次元トランジット軌道の設計
3. 学会等名 第29回 アストロダイナミクスシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 香山裕樹, 坂東麻衣, 外本伸治
2. 発表標題 Successive Sparse Optimal Controlの提案と三体問題を利用した軌道設計への応用
3. 学会等名 第29回 アストロダイナミクスシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮原圭太郎, 香山裕樹, 坂東麻衣, 外本伸治
2. 発表標題 B-planeを用いた三体問題におけるスイングバイ軌道の解析
3. 学会等名 第29回 アストロダイナミクスシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Kayama, Mai Bando and Shinji Hokamoto
2. 発表標題 Sparse Optimal Trajectory Design in Three-Body Problem
3. 学会等名 29th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Oshima, Mai Bando and Shinji Hokamoto
2. 発表標題 Trajectory Design in the Circular Restricted Three-body Problem Using Artificial Invariant Manifolds
3. 学会等名 29th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Akiyama, Mai Bando and Shinji Hokamoto
2. 発表標題 Extended State Space Approach for Trajectory Design in Elliptic Restricted Three-Body Problem
3. 学会等名 69th International Astronautical Congress (IAC 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomoya Sakamoto, Mai Bando and Shinji Hokamoto
2. 発表標題 Optimal Control of Spacecraft Attitude Motion using Port-Hamiltonian Systems
3. 学会等名 69th International Astronautical Congress (IAC 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Satoshi Nagashima, Mai Bando and Shinji Hokamoto
2. 発表標題 Optimal Trajectory Design for Safety Rendezvous Based on Sparse Modeling
3. 学会等名 69th International Astronautical Congress (IAC 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kyosuke Asaki, Mai Bando and Shinji Hokamoto,
2. 発表標題 LQ Optimal Artificial Potential Functions for Satellite Swarm Guidance
3. 学会等名 SICE Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2018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			
米国	コロラド大学ボルダー校			
米国	パデュー大学			