

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15214

研究課題名（和文）確率微分動的計画法の不確定性モデルの一般化とロバスト軌道設計への応用

研究課題名（英文）Generalization of Uncertainty Models in Stochastic Optimal Control and Its Application to Robust Trajectory Design

研究代表者

尾崎 直哉（Ozaki, Naoya）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・特任助教

研究者番号：90836222

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：深宇宙探査ミッションにおいて、不確定性による影響を評価し、不確定性に対してロバストな軌道を予め設計しておくことは、宇宙ミッションの成功率を向上させるために重要な課題の1つである。本研究では、宇宙機の軌道設計問題に対して、Unscented Transformを用いて、不確定性に対してロバストな確率的軌道設計手法を確立した。また、更なる不確定性モデルの拡張を行うために、惑星軌道投入を例題として、一般の分布等の一般の確率モデルを考慮したロバストな軌道制御手法を確立した。これらのロバストな軌道設計手法を、MMXやDESTINY+等のJAXAが打上げ予定の実ミッションに適用し、その実用性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

軌道設計分野の研究において、不確定性が与える影響度を評価する研究は多いが、その不確定性の影響を考慮して軌道設計を行う研究は更に難易度が高く、研究例が少ない。一方、制御分野の研究においては、非線形確率制御問題を解くための手法は研究されているが、それらは制約条件・大規模最適化の観点から軌道設計問題への適用性が乏しい。本研究成果を通して、軌道設計分野において、「確率的軌道設計」という新たな研究分野が拓かれた。また、DESTINY+を始めとして、実ミッションの軌道設計に関しても、不確定性を考慮した軌道設計のニーズが加速している。本研究成果は、これらの実ミッションを実現する上でのキー技術となる。

研究成果の概要（英文）：In deep space exploration missions, evaluating the effects of uncertainties and designing trajectories that are robust against uncertainties is one of the most important issues to improve the success rate of space missions. In this study, we established a stochastic trajectory design method for spacecraft trajectory design problems that is robust against uncertainties by using the unscented transform. To further extend the uncertainty model, a robust orbital control method considering general stochastic models such as general gamma distribution is established using planetary orbit injection as an example problem. These robust trajectory design methods were applied to actual missions to be launched by JAXA, such as MMX (Martian Moons eXploration) mission and DESTINY+ (Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage with Phaethon fLyby and dUst Science) mission, and their practicality was demonstrated.

研究分野：軌道力学

キーワード：軌道力学 確率制御 ロバスト制御 ミッション設計

1. 研究開始当初の背景

深宇宙探査ミッションにおいて、不確実性による影響を評価し、不確実性に対してロバストな軌道(図1-1)を予め設計しておくことは、宇宙ミッションの成功率を向上させるために重要な課題の1つである。実際に小惑星探査機はやぶさ(JAXA)や Dawn(NASA)では、イオンエンジンが予期せず停止するという不確実性により、ミッション失敗にもなりうる危機に苛まれた。このような実ミッションに根ざした問題意識から、近年、軌道設計に対する不確実性評価(Uncertainty Quantification: UQ)に関する研究が盛んに進められてきている(Jones, B.A., et al., *JGCD*, 2013). また、研究代表者らは先行研究として、確率微分動的計画法(Stochastic Differential Dynamic Programming: SDDP)を確立し、不確実性に対してロバストな軌道設計手法を実現した(Ozaki, N., et al., *JGCD*, 2018).

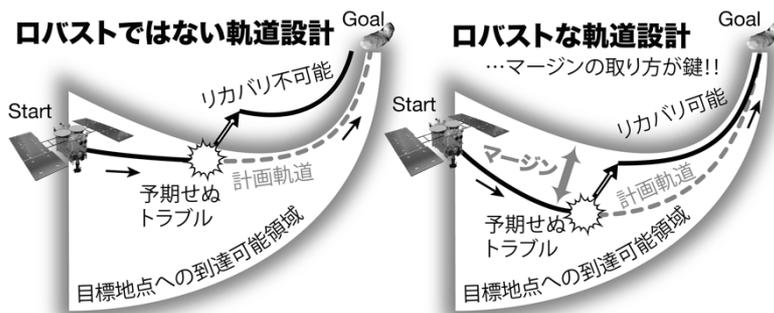


図1-1 「ロバストではない軌道」と「ロバストな軌道」

このような実ミッションに根ざした問題意識から、近年、軌道設計に対する不確実性評価(Uncertainty Quantification: UQ)に関する研究が盛んに進められてきている(Jones, B.A., et al., *JGCD*, 2013). また、研究代表者らは先行研究として、確率微分動的計画法(Stochastic Differential Dynamic Programming: SDDP)を確立し、不確実性に対してロバストな軌道設計手法を実現した(Ozaki, N., et al., *JGCD*, 2018).

2. 研究の目的

本研究では、宇宙機の軌道設計問題に対して、Gauss 分布以外の一般の確率分布の不確実性を扱うために、確率的軌道設計手法(SDDP)を拡張することを目的とする。また、打上げ予定の実ミッションに適用することで、その実用性を実証する。

3. 研究の方法

一般の確率分布や不確実性を扱うための確率的軌道設計手法を実現するために、問題設定ごとに異なるアプローチが必要となる。そのため、4. 研究成果に示す3つの項目それぞれについて、具体的な研究成果と合わせて記述する。

4. 研究成果

3-1. Unscented Transform による非 Gauss 分布に対応可能な確率的軌道設計手法

一般の確率分布を扱うための最も計算コストの低いアプローチとして、Unscented Transform を用いた確率的軌道設計手法を確立した。軌道の非線形ダイナミクスが引き起こす非 Gauss 性を捉えて、地球=火星間の低推力軌道設計問題を例として、ロバストな軌道設計手法を確立することに成功した(図3-1)。また、本研究を通じて、Unscented Transform であっても、膨大な計算時間が掛かることに気づき、より汎用的な Polynomial Chaos Expansion 等の方法を用いるためには、高速化が鍵となるという知見が得られた。本研究成果は当該学術分野で著名な AIAA の Journal of Guidance, Control, and Dynamics に掲載されており、2023年6月2日現在で35件の引用数となっている。

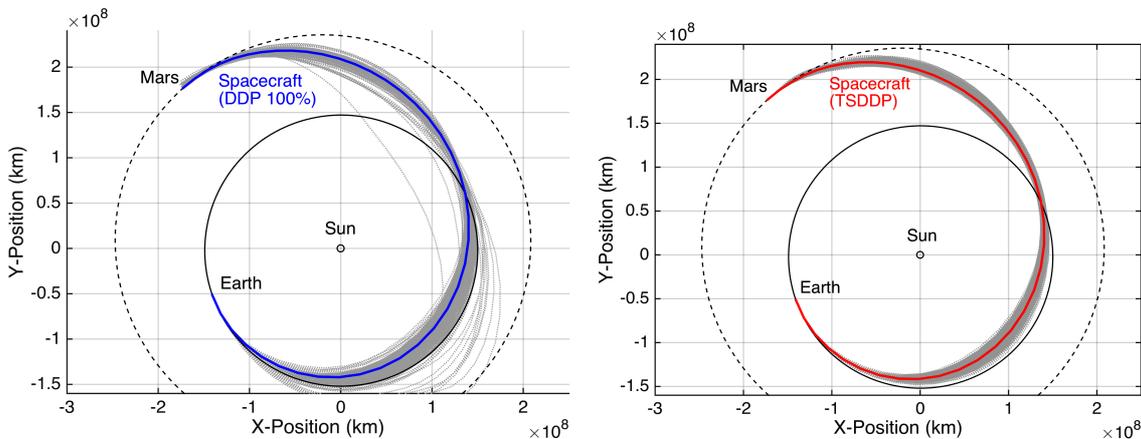


図3-1. 従来手法(左)と提案手法(右)のモンテカルロシミュレーション結果の比較

<引用文献> Ozaki, N., Campagnola, S., and Funase, R., "Tube Stochastic Optimal Control for Nonlinear Constrained Trajectory Optimization Problems," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 43, No. 4, pp. 645-655, 2020.

3-2. 不確定性モデルの一般化を目指したロバストな惑星軌道投入手法

本研究では、惑星周回ミッションにおいて最もクリティカルである惑星軌道投入に焦点を当て、ロバストな軌道投入手法を確立した。JAXAは2010年に打ち上げた「あかつき」において、この惑星軌道投入に一度失敗しており、その重要度とミッション全体に与える損失を経験している。本研究では、軌道制御マヌーバを「 γ 分布」と「多項分布」を組み合わせた確率モデルで表現し、その確率モデルを考慮した上でのロバストかつ最適な軌道投入アルゴリズムを確立した(図3-2)。軌道設計問題としてはシンプルかつ計算時間が掛からない問題だが、本研究を通じて、Gauss分布以外の一般的な確率モデルを扱うことに成功した。本提案手法は、2024年度の打上げを目指しているMMX(JAXA)の火星軌道投入に適用されており、その実用性が確認できている。

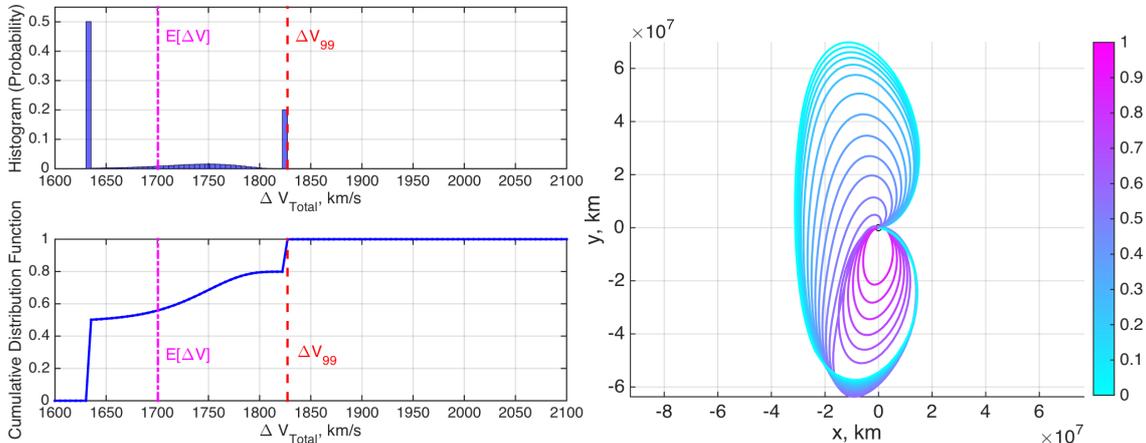


図3-2. γ 分布と多項分布を組み合わせた確率モデル(左)とロバストな軌道投入の例(右)
<引用文献> Ozaki, N., Chikazawa, T., Kakihara, K., Ishikawa, A., and Kawakatsu, Y., "Extended Robust Planetary Orbit Insertion Method Under Probabilistic Uncertainties," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol.57, No.6, pp.1153-1164, November-December 2020.

3-3. ロバストな軌道設計手法のアプリケーション

本研究のアプリケーションの一つであるDESTINY+ミッションの軌道設計に関する詳細検討を遂行した。DESTINY+は地球周回軌道に打ち上げられ、イオンエンジンをういて深宇宙離脱する世界初のミッションとなる。そのようなミッションを実現するために、「ひてん」等で用いられた月スイングバイ、「はやぶさ」等で用いられたイオンエンジンを駆使した軌道設計が採用されている。特に、打ち上げてから最初の月スイングバイを迎えるまでの期間(=スパイラル軌道上昇フェーズ)は、約1.5年間ほとんど連続的にイオンエンジンを動作させた後、然るべき時刻・位置・速度で月スイングバイを行う必要があるため、不確定性に対するロバストな軌道設計が求められる。本年度の検討では、スパイラル軌道終盤に時間的マージンを設け、また、月スイングバイを余分に挿入することでロバストな軌道達成している。ロバスト性と最適性を同時に追求する軌道設計に関しては、今後の検討課題である。DESTINY+の軌道設計に関する研究成果は、当該分野で権威的であるActa Astronauticaに採択されている。

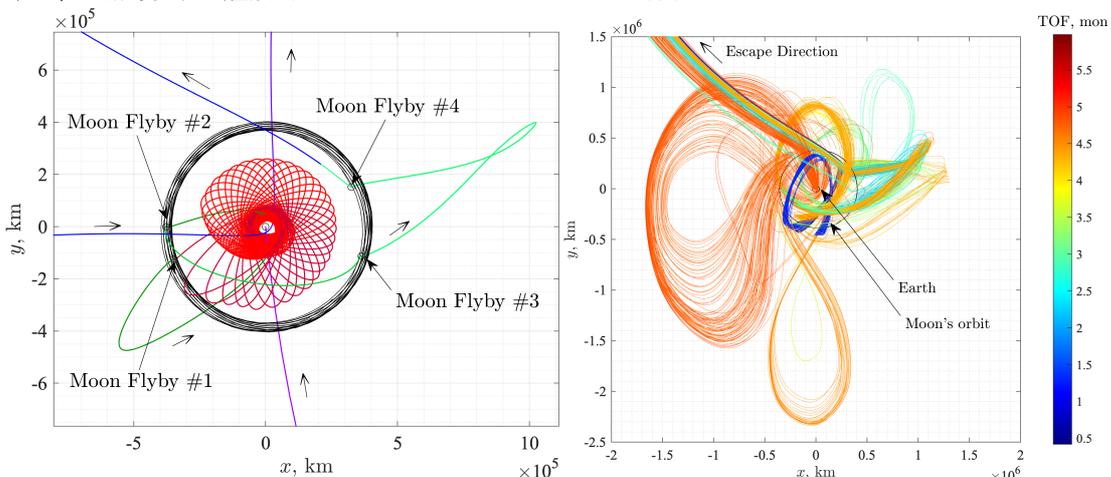


図3-3. DESTINY+の地球近傍軌道設計(左)と月スイングバイ軌道群(右)
<引用文献> Ozaki, N., Yamamoto, T., Gonzalez-Franquesa, F., Ramon, R.G., Pushparaj, N., Chikazawa, Dei Tos, D.A., T., Celik, O., Marmo, N., Kawakatsu, Y., Arai, T., Nishiyama, K., Takashima, T., "Mission Design of DESTINY+: Toward Active Asteroid (3200) Phaethon and Multiple Small Bodies," *Acta Astronautica*, Vol. 196, pp.42-56, July 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ozaki Naoya, Yanagida Kanta, Chikazawa Takuya, Pushparaj Nishanth, Takeishi Naoya, Hyodo Ryuki	4. 巻 0
2. 論文標題 Asteroid Flyby Cyclor Trajectory Design Using Deep Neural Networks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Guidance, Control, and Dynamics	6. 最初と最後の頁 1~16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.G006487	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 Ozaki Naoya, Yamamoto Takayuki, Gonzalez-Franquesa Ferran, Gutierrez-Ramon Roger, Pushparaj Nishanth, Chikazawa Takuya, Tos Diogene Alessandro Dei, ?elik Onur, Marmo Nicola, Kawakatsu Yasuhiro, Arai Tomoko, Nishiyama Kazutaka, Takashima Takeshi	4. 巻 196
2. 論文標題 Mission design of DESTINY+: Toward active asteroid (3200) Phaethon and multiple small bodies	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 42~56
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.actaastro.2022.03.029	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 Ozaki Naoya, Chikazawa Takuya, Kakihara Kota, Ishikawa Akihiro, Kawakatsu Yasuhiro	4. 巻 57
2. 論文標題 Extended Robust Planetary Orbit Insertion Method Under Probabilistic Uncertainties	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Spacecraft and Rockets	6. 最初と最後の頁 1153~1164
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.A34755	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 Ozaki Naoya, Campagnola Stefano, Funase Ryu	4. 巻 43
2. 論文標題 Tube Stochastic Optimal Control for Nonlinear Constrained Trajectory Optimization Problems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Guidance, Control, and Dynamics	6. 最初と最後の頁 645~655
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.G004363	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 Kenshiro Oguri, Kenta Oshima, Stefano Campagnola, Kota Kakahara, Naoya Ozaki, Nicola Baresi, Yasuhiro Kawakatsu, and Ryu Funase	4. 巻 -
2. 論文標題 EQUULEUS Trajectory Design	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of the Astronautical Sciences	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) 10.1007/s40295-019-00206-y	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 Stefano Campagnola, Javier Hernando-Ayuso, Kota Kakahara, Yosuke Kawabata, Takuya Chikazawa, Ryu Funase, Naoya Ozaki, Nicola Baresi, Tatsuki Hashimoto, Yasuhiro Kawakatsu, Toshinori Ikenaga, Kenshiro Oguri, Kenta Oshima	4. 巻 34
2. 論文標題 Mission Analysis for the EM-1 CubeSats EQUULEUS and OMOTENASHI	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Aerospace & Electro. Systems Magazine	6. 最初と最後の頁 38-44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/MAES.2019.2916291	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7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Naoya Ozaki
2. 発表標題 Mission Design of DESTINY+: Toward Active Asteroid (3200) Phaethon
3. 学会等名 International Astronautical Congress (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoya Ozaki, Takuya Chikazawa, Kota Kakahara, Akihiro Ishikawa and Yasuhiro Kawakatsu
2. 発表標題 Extended Robust Planetary Orbit Insertion Method Under Probabilistic Uncertainties
3. 学会等名 AIAA Scitech 2020 Forum (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kanta Yanagida, Naoya Ozaki, Ryu Funase
2. 発表標題 Exploration of Long Time-of-Flight Three-Body Transfers Using Deep Reinforcement Learning
3. 学会等名 AIAA Scitech 2020 Forum (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Diogene A. Dei Tos, Takayuki Yamamoto, Naoya Ozaki, et al.
2. 発表標題 Operations-driven Low-Thrust Trajectory Optimization with Applications to DESTINY+
3. 学会等名 AIAA Scitech 2020 Forum (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kota Kakihara, Naoya Ozaki, Akihiro Ishikawa, Takuya Chikazawa, Ryu Funase
2. 発表標題 Tube Stochastic Optimal Control with Imperfect Information: Application to Navigation and Guidance Analyses
3. 学会等名 AIAA Scitech 2020 Forum (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takayuki Yamamoto, Naoya Ozaki, et al.
2. 発表標題 DESTINY+ Low thrust trajectory design from Earth orbit to Asteroids flyby
3. 学会等名 70th International Astronautical Congress (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoya Ozaki, Takuya Chikazawa, Yasuhiro Kawakatsu
2. 発表標題 Robust Planetary Orbit Insertion Algorithm Using Resonant Orbit Considering Missed-Thrust Uncertainty
3. 学会等名 Joint Symposium of 32nd ISTS & 9th NSAT (国際学会)
4. 発表年 2019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