

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：学術変革領域研究(B)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H05749

研究課題名（和文）高頻度な深宇宙探査のための準自律的な軌道決定・計画手法に関する研究

研究課題名（英文）Semi Autonomous Orbit Determination and Planning Method for Frequent Deep Space Missions

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） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：近年、超小型衛星の飛躍的發展により、月・火星等の深宇宙探査ミッションの高頻度化が進もうとしている。地球周回ミッションと深宇宙ミッションの大きな違いの1つが、軌道決定・設計技術であり、高頻度化にとっての大きな障壁の1つになる。本研究では、地上局リソースへの依存度を下げた準自律的軌道決定・計画手法を実現することを目標とする。目指すべき準自律的な軌道決定・計画手法を実現するために、自律的軌道決定手法と軌道制御・軌道決定の統合的計画手法を導入する。そして、定常運用時には自律的軌道決定・運用を取り入れ、クリティカルな時には地上局が割り当てられるようなメリハリをつけた軌道計画手法を確立する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、アルテミス計画等の国際宇宙探査が始まり、超小型衛星を利用して大学・新興企業が盛り上がり始めた今だからこそ意義があるものである。アストロダイナミクス（＝軌道力学）分野の研究領域においては、これまで分かれていた軌道決定（航法）と軌道計画（誘導・制御）を統合的に扱う研究であり、今後、新しい学術領域の創出につながると考えている。更に、本研究成果は深宇宙ミッションの高頻度化だけではなく、地上局を介さないことで伝搬遅延に縛られない自律探査（例えば、遠方でのランデブ・ドッキング・着陸・サンプル回収等）が可能となり、深宇宙探査の技術高度化にも資する。

研究成果の概要（英文）：In recent years, the number of satellites, especially for Earth-orbiting missions, has increased explosively due to the rapid development of nano-satellites, and the trend of increasing the number of satellites (i.e., higher mission frequency) is about to expand to deep space exploration such as the Moon and Mars. One of the major differences between Earth orbit missions and deep space missions is orbit determination technology, which is one of the major barriers to high frequency missions. The goal of this study is to realize a quasi-autonomous orbit determination and planning method that is less dependent on ground station resources. To achieve the desired quasi-autonomous orbit determination and planning, we introduce an autonomous orbit determination method and an integrated orbit control and orbit determination planning method. The autonomous orbit determination and operation will be adopted for routine operations, while ground stations will be assigned for critical operations.

研究分野：軌道力学

キーワード：軌道決定 自律化 軌道設計 確率制御 超小型衛星 軌道力学 ロバスト制御

1. 研究開始当初の背景

近年、超小型衛星の飛躍的発展により、地球周回ミッションを中心に衛星数が爆発的に増加しており、その衛星数増大(=ミッションの高頻度化)の潮流が月・火星等の深宇宙探査領域へと展開しようとしている。地球周回ミッションと深宇宙ミッションの大きな違いの1つが、軌道決定・設計技術であり、高頻度化に比べての大きな障壁の1つになる。深宇宙ミッションでは、直径数十m規模の大型地上アンテナを利用した軌道決定を行う必要があるため、このままでは地上局リソース不足が深宇宙ミッション数増大の足枷となってしまう。実際に、NASAのArtemis 1ミッションで打ち上げられる13機の超小型宇宙機において、地上局アンテナのリソースが逼迫していることが大きな問題として挙げられている。そのため、地上局リソースへの依存度を下げた深宇宙ミッション遂行の新しいスタイルを提案が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、地上局リソースへの依存度を下げた準自律的軌道決定・計画手法を実現することを目標とする(図2-1)。目指すべき準自律的軌道決定・計画手法を実現するために、自律的軌道決定手法と軌道制御・軌道決定の統合的計画手法を導入する。そして、図2-2に示すように、定常運用時には自律的軌道決定・運用を取り入れ、クリティカルな時には地上局が割り当てられるようなメリハリをつけた軌道計画手法を確立する。

3. 研究の方法

準自律的軌道決定・計画手法を実現するために、「自律的決定手法」「統合的な軌道計画手法」「アプリケーション探求」の3つの方向性から研究に取り組んだ。

4. 研究成果

3-1. 自律的軌道決定手法の確立

自律的軌道決定手法に関して、専攻研究の網羅的なサーベイを行い、電波航法(レンジ・ドップラー・DDOR)、光学航法(対惑星、衛星間光通信)、レーダー航法、X線パルサー航法などの手法のメリット・デメリットの整理や定量的な精度評価を行なった(表3-1)。本研究成果は、日本航空宇宙学会主催の宇宙科学技術連合講演会にて発表した。

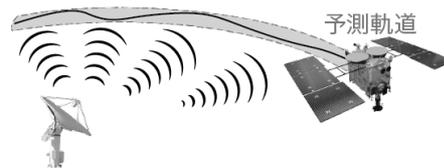
<引用文献>尾崎直哉, 菊地翔太, 佐々木貴広, 他, "月近傍および深宇宙ミッションのための準自律的軌道決定手法に関する検討," 第65回宇宙科学技術連合講演会, 2108, オンライン, 2021年11月.

3-2. 「軌道制御計画」と「軌道決定計画」の両方を統合的に最適化する手法に関する研究

電波航法(レンジ・ドップラー・DDOR)等の地上局をベースとした軌道決定の頻度を下げるために、軌道決定誤差の不確定性を考慮した確立的な軌道設計を行うことで、必要最低限の軌道決定が遂行できるような手法を確立した。提案手法は、研究代表者が先行研究として確立した確率的軌道設計手法に対して、状態量の観測の不確定性モデルを組み込むことで、「軌道決定の観測実施時期」と「軌道制御」を同時に最適化することで実現されている。本研究成果は日本航空宇宙学会主催の宇宙科学技術連合講演会および33rd ISTSで発表されている(図3-2)。

また、統合的な最適化の応用例として、地球・月圏のハロー軌道に対する軌道維持手法の研究を行なった。提案した確立的軌道設計手法を用いることで、従来手法より確率的に必要な燃料消費量を抑えることに成功している。本研究成果は日本航空宇宙学会主催の33rd ISTSで発表さ

従来手法 = 地上局への依存度が高い



提案手法 = 地上局への依存度が低い

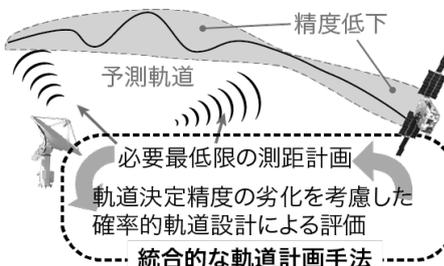
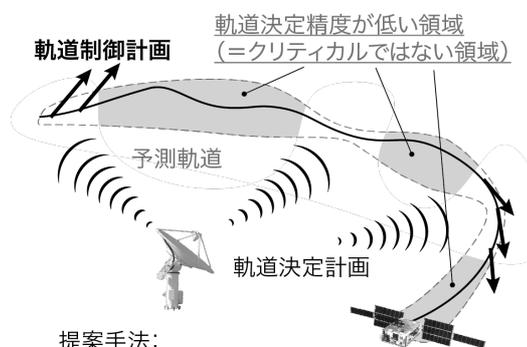


図2-1 提案手法の概要



提案手法:
「軌道制御計画」と「軌道決定計画」を
の両方を統合的に最適化する手法

※軌道制御計画のためには軌道決定精度が
軌道決定精度評価のためには制御計画が
必要であるため統合的に最適化する必要がある

図2-2 統合的軌道計画手法の概要

表3-1 自律的軌道決定手法

自律的な深宇宙軌道決定手法
<input type="checkbox"/> 天体(惑星・衛星)光学航法 (Riedel, J. E., et al., 2000)
<input type="checkbox"/> 宇宙機間光学航法(光通信) (Martin-Mur, T., et al., 2017)
<input type="checkbox"/> 宇宙機間電波航法 (Hill, K. and Born, G.H., 2007)
<input type="checkbox"/> X線パルサー航法 (Sheikh, S, et al., 2006)

れている (図 3-3)。

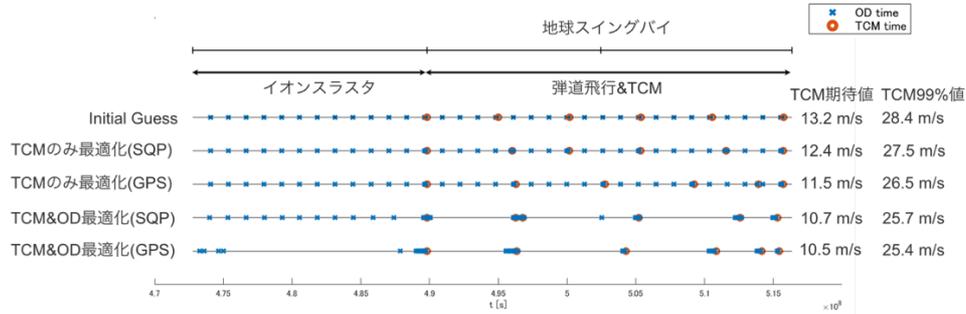


図 3-2. 軌道決定と軌道制御の統合的な計画手法による軌道修正マヌーバの最適化

<引用文献> Kakahara, K., Ozaki, N., Ishikawa, A., et al., "Integrated Optimization of Guidance and Navigation Scheduling for Deep Space Exploration via Stochastic Trajectory Optimization Approach," Joint Symposium of 33rd ISTS, 10th NSAT & 14th IAA LCPM, 2022-d-74s, Online, February 28-March 4, 2022.

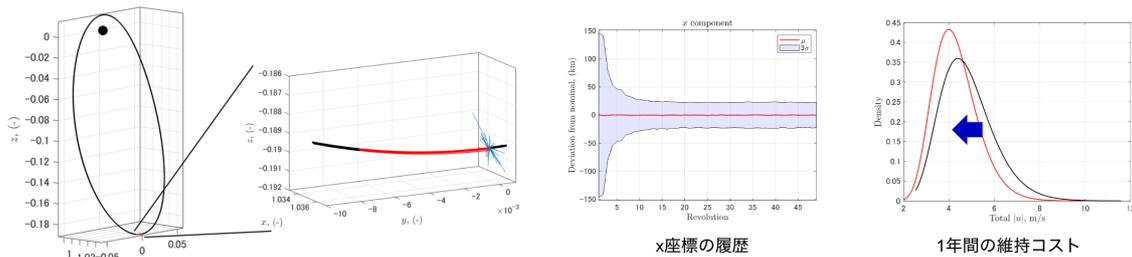


図 3-3. 地球・月系のハロー軌道に対する軌道維持手法に関する研究

<引用文献> Chikazawa, T., Ozaki, N., Kakahara, K., et al., "Covariance Control Approach for Stationkeeping of Halo Orbits in the Earth-Moon System," Joint Symposium of 33rd ISTS, 10th NSAT & 14th IAA LCPM, 2022-d-14, Online, February 28-March 4, 2022.

3-3. 準自律的な軌道決定手法が必要となるアプリケーション

準自律的な軌道決定手法が強く求められるアプリケーションを探求し、小惑星マルチフライバイと恒星間天体等の即応型フライバイ探査を同時に実現する深宇宙コンステレーションのコンセプトを創出した (図 3-4)。深宇宙コンステレーションのコンセプトでは、地球から最大 0.5au 程度まで離れた 深宇宙空間に 5~10 機の (超小型) 深宇宙探査機を配置させ、それぞれが年間 1 個の頻度での小惑星フライバイを実現するというものである。本コンセプトでは、10 機以上の深宇宙探査機を同時に運用する必要があり、自律的軌道決定手法が課題となる。本研究成果は、日本航空宇宙学会主催の宇宙科学技術連合講演会、超小型衛星利用シンポジウム、IAA 主催の Planetary Defense Conference にて発表された。また、本深宇宙コンステレーション構想への適用を前提とした航法誤差の不確定性を考慮したロバストな軌道設計手法に関する研究を行い、AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting にて発表している。「自律的な軌道決定手法」を実現する方法としては、電波航法 (宇宙機間測距を含む) と光学航法 (対惑星・衛星) が主流になると考えており、これらの手法を用いた場合の軌道決定精度の劣化を考慮したロバストな軌道設計手法に関する研究は今後の課題として残されている。

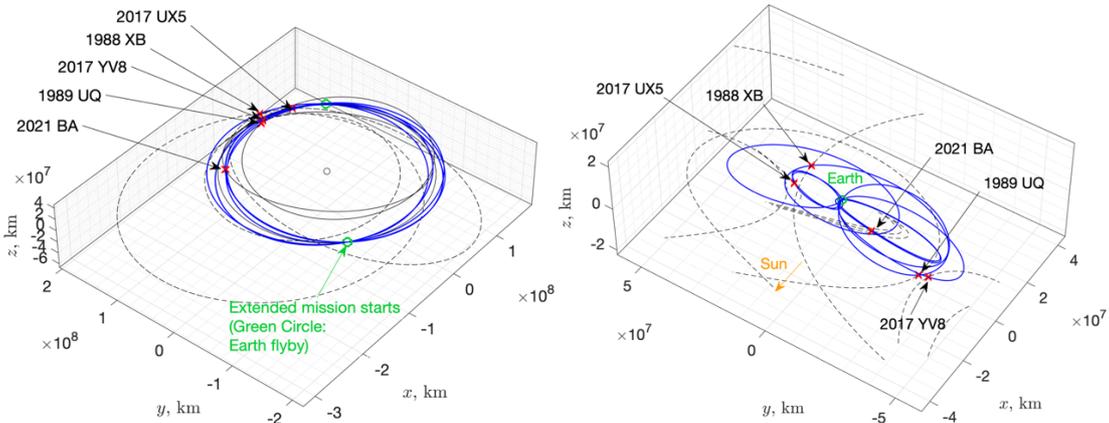


図 3-4. 深宇宙コンステレーションを構築する小天体フライバイサイクラー軌道の例

<引用文献> Ozaki, N., Yanagida, K., Chikazawa, T., Pushparaj, N., Takeishi, N., Hyodo, R., "Asteroid Flyby Cyclor Trajectory Design Using Deep Neural Networks," Journal of Guidance Control and Dynamics, Vol. 45, No. 8, pp. 1496-1511, August 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Takuya Chikazawa, Naoya Ozaki, Kota Kakahara, Akihiro Ishikawa, Yasuhiro Kawakatsu
2. 発表標題 Covariance Control Approach for Stationkeeping of Halo Orbits in the Earth-Moon System
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kota Kakahara, Naoya Ozaki, Akihiro Ishikawa, Takuya Chikazawa, Shinichi Nakasuka, Ryu Funase
2. 発表標題 Integrated Optimization of Guidance and Navigation Scheduling for Deep Space Exploration via Stochastic Trajectory Optimization Approach
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川 晃寛, 尾崎 直哉, 柿原 浩太, 近澤 拓弥
2. 発表標題 観測不確定性に対してロバストな宇宙機軌道制御および軌道決定運用タイミング同時最適化に関する手法提案
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 尾崎 直哉, 菊地 翔太, 佐々木 貴広, 石川晃寛, 柿原 浩太, 柳田 幹太, 近澤 拓弥, 川端 洋輔
2. 発表標題 月近傍および深宇宙ミッションのための準自律的な軌道決定手法に関する検討
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 柿原 浩太, 尾崎 直哉, 石川 晃寛, 近澤 拓弥, 中須賀 真一, 船瀬 龍
2. 発表標題 深宇宙探査機の軌道決定時刻と軌道修正時刻の統合的最適化
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

〔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
研究分担者	佐々木 貴広 (Sasaki Takahiro) (00835168)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究開発員 (82645)	
研究分担者	菊地 翔太 (Kikuchi Shota) (90830068)	国立天文台・RISE月惑星探査プロジェクト・助教 (62616)	

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
---------	---------