

氏 名 Roger Gutierrez-Ramon

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 2348 号

学位授与の日付 2022 年 9 月 28 日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Phasing Methods for a Deep Space Orbit Transfer Vehicle

論文審査委員 主 査 津田 雄一
JAXA 宇宙科学研究所 教授
川勝 康弘
宇宙科学専攻 教授
坂井 真一郎
宇宙科学専攻 教授
徳留 真一郎
宇宙科学専攻 准教授
坂東 麻衣
九州大学 大学院工学研究院 准教授

Summary of Doctoral Thesis

Name in full: Roger Gutierrez-Ramon

Title: Phasing Methods for a Deep Space Orbit Transfer Vehicle

With recent years' development in space exploration, scientific objectives have become more diverse, including numerous missions to small celestial bodies (Rosetta, OSIRIS-Rex, Hayabusa, Hayabusa2, DART) and recurring visits to Solar System planets (BepiColombo to Mercury). These wide arrays of objectives have driven the development of novel space travel techniques (IKAROS, OKEANOS with solar sails, DESTINY+ with continuous low thrust engines), as well as systems that enable repeatable access to space. In parallel, NASA's Artemis program has been taking the center stage on human spaceflight with the Lunar Gateway. This has kickstarted a renewed interest in the development of space infrastructure for recurrent use, but most importantly, it has made apparent the necessity of studies on the feasibility, use and dynamical environment surrounding auxiliary spacecraft and their interactions with other spacecraft.

The DS-OTV has been introduced in the past as a concept to separate the roles of 'transportation to the destination' and 'exploration at the destination' to two spacecraft, instead of one. The main merit of such a design is the specialization of each spacecraft on each role, decreasing complexity, and the possibility of standardization of the spacecraft between different mission. The DS-OTV concept introduced in this research leverages technical heritage from Hayabusa2 to design an architecture with recurring access to deep space by placing an OTV in a parking orbit in the Earth's vicinity. Using the OTV for refueling purposes in future missions would bring the launch mass down, increase the availability of launch windows and allow flexibility against delays and launcher vehicles used.

The first part of this work details the DS-OTV concept, describing the technical heritage that can make it possible, introducing the phases of such a mission and the orbital requirements to fulfill its objective. A main topic that requires an in-depth look is the phasing possibilities for the DS-OTV. In an architecture in which rendezvous between spacecraft is recurrent, being able to get them into a favorable situation for docking from different positions is paramount. In this section, candidate parking orbits are obtained, evaluated and classified, and promising candidates are selected to further study them.

In the next part, transfers between different candidate orbit families are studied in the context of the DS-OTV. The tools used to find transfers with different characteristics are introduced, and single and multiple periodic transfers between these periodic orbits in the vicinity of the L_1 and L_2 Sun-Earth Lagrange Points are systematically searched, and their properties studied. The potential use of these transfers as a phasing mechanism for spacecraft is evaluated with the creation of performance parameters and comparison tools. Additional methods for improving the phasing capabilities of these transfers are introduced with a three-impulse transfer design algorithm, working around the limitation of periodic transfers between orbits, and the evaluation over the lifetime of a DS-OTV mission is done with regards to fuel usage and time constraints. Insights are drawn from the results with regards to the possibility of usage of these orbits in the context of this architecture, highlighting the advantages and drawbacks with regards to detailed phasing situations.

The third part of the research changes the focus to phasing maneuvers between spacecraft along the same periodic orbit but with different starting locations. With this idea, firstly, Lagrange Point and Lyapunov Orbit stand-by transfers are introduced, in which a spacecraft placed in the Lagrange Point exploits the stationary location to facilitate the phasing with regards to other candidate periodic orbits in the study. With the same objective, direct transfers from and to the different periodic orbits at different positions are also taken into account. The study does not focus on specific unique or optimal maneuvers, but on the overall structure of possible solutions, especially in the existence of low energy transfers by leveraging the stable and unstable manifold structures emanating from the periodic orbits. To aid in the study, new tools and algorithms are designed and executed. These methods are applied to the candidate orbits and their performance are compared to try to establish a baseline for the viability of these maneuvers with regards to timing possibilities and fuel spent, as well as the possibility of usage in ad hoc trajectory design for specific missions.

Finally, mission feasibility analyses are performed taking into account the different phasing possibilities found in the previous parts. Special care is put into trying to design lifetime analyses that can emulate an actual DS-OTV mission scenario, used to evaluate the feasibility of the concept and the operations proposed with a focus on the entire operation of the mission.

The results of this work can serve as a baseline for initial guesses for DS-OTV orbits and transfer trajectories design, as well as a baseline to determine requirements for the different subsystems that comprehend an entire DS-OTV architecture (OTV and mission spacecraft, docking equipment, launcher system, launch availability). The phasing and transfer trajectories presented in this research can be extended for different multi-spacecraft mission in the Earth's vicinity that share similar design constraints.

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 Roger Gutierrez-Ramon

Title
論文題目 Phasing Methods for a Deep Space Orbit Transfer Vehicle

本論文は、太陽＝地球ラグランジュ点（L1 ないし L2）まわりの弱安定領域に滞留し、深宇宙探査機に対して推薬補給サービスを行う「深宇宙軌道間輸送機（DS-OTV）」のフェーシング軌道の設計を主題とし、その新しい設計手法を提案するものである。太陽＝地球の三体系において、L1 ないし L2 点近傍と地球近傍を往来する周期軌道（LPO: Low-Prograde Orbit）に DS-OTV が配置されていることを想定し、深宇宙へ向かう探査機が、その途中で既配置の DS-OTV から推薬補給を受けるため、および、推薬補給後の探査機が目的とする惑星間軌道に乗るためのタイミング合わせ、すなわち「フェーシング」の必要性と、その手法を系統的に論じている。

論文は、8章の本論と、2章の Appendix で構成される。

第1章は、深宇宙軌道間輸送コンセプトを紹介しながら、その弱安定領域における軌道設計に関連する過去の研究、類例のミッションや技術を整理し、太陽＝地球系弱安定領域に滞留する DS-OTV コンセプトにおけるフェーシング（位相調整）の必要性を詳述している。

第2章は、本研究で用いる理論的背景を力学モデルである円制限三体問題について説明し、第3章ではそれをもとに、当論文で用いる軌道解析手法の整理と、弱安定領域下の周期軌道の力学構造についての理論展開を行っている。

第4章では、本論文が対象とする DS-OTV のシステム構想としての検討状況と、その中の当論文の位置づけを明らかにし、軌道位相調整のために2つの周期軌道の周期差を利用することを述べている。また、弱安定領域で実現しうる周期軌道解を列挙した上で、当論文では、主として LPO とリヤプノフ軌道を採用すると述べている。

第5章では、LPO とリヤプノフ軌道の間での軌道遷移を解析している。LPO とリヤプノフ軌道が1点で接する状態で、その接点で軌道遷移を行う単交点遷移(Single Periodic Transfer: SPT)と、2点で交わる状態で軌道遷移を行う複数交点遷移(Multiple Periodic Transfer: MPT)を導入し、両者についてフェーシング効果があること、所要燃料、所要飛行時間などの性能指標を定義した上で得失を整理している。

第6章では、第5章とは異なるフェーシングの実現法として、太陽＝地球系の定点である L1 ないし L2 点を待ち合わせに用いる Lagrange Point Stand-by Transfer (LPST)と、LPO 軌道上で若干の ΔV を印可し近道ないし遠回りをするすることでフェーシングを実現する Time Ahead Docking(TAD)と Time Delayed Docking (TDD)を提案している。LPSTは、第5章のフェーシング手法に比して、 ΔV コストと引き換えに実現可能な位相差の網羅性が高いこと、TAD や TDD は特定の条件では、SPT や MPT よりも小さな ΔV でのフェーシングができること等が示されている。

第7章では、前章までで提示した様々なフェージングの手法に対して、具体的なミッションプロファイルを定義した上で、ミッションライフサイクルでの得失を統合的に分析している。それによると DS-OTV が打ち上げ後に提供する補給サービスの回数によって、また補給を受ける探査機に許される打ち上げ質量や推薬タンク容量によって、DS-OTV およびサービスを受ける探査機にとっての最適な LPO のサイズが変化することが示された。

第8章は、本論文の結論であり、本論文の貢献をまとめ、研究の発展性について議論している。

以上要するに、本論文は、三体力学系における形状のまったく異なる2つの周期軌道間の遷移を繰り返すことで所望の周期差を実現するという概念とその新たな設計手法を提案し、有効性を示したものである。これは、新たな宇宙輸送系技術として研究がなされている深宇宙軌道間輸送機コンセプトにおいて具体的な軌道設計、運用手法を提示するという観点でも実用的な有用性がある研究成果である。

以上により、審査委員会は、本論文が学位の授与に値すると判断した。