

氏 名 Nishanth Pushparaj

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 2305 号

学位授与の日付 2022 年 3 月 24 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 Transfer design via bifurcated retrograde orbits around  
Phobos

論文審査委員 主 査 坂井 真一郎  
宇宙科学専攻 教授  
川勝 康弘  
宇宙科学専攻 教授  
吉川 真  
宇宙科学専攻 准教授  
坂東 麻衣  
九州大学 工学研究院 准教授  
Nicola BARESI  
サリー大学 サリー宇宙センター 講師

(Form 3)

## Summary of Doctoral Thesis

Name in full: Nishanth Pushparaj

Title: Transfer design via bifurcated retrograde orbits around Phobos

Scientific speculations regarding the origin and evolution of the Martian moons have made Phobos and Deimos attractive bodies for space exploration. Quasi-satellite orbits (QSOs) or Distant Retrograde Orbits (DROs) are stable retrograde orbits in the restricted three-body problem that have gained attention as a viable candidate for future deep-space missions towards remote planetary satellites. The curiosity to explore the Martian moons served as a catalyst for several spacecraft missions that would supposedly land on Phobos. Unfortunately, all of these attempts failed while either en route or in the vicinity of the Martian moon, leaving the mystery of their origin unsolved. Japan Aerospace Exploration Agency's robotic sample return mission Martian Moons eXploration (MMX) will utilize QSOs to perform scientific observations of the Martian moon Phobos before landing on its surface and attempting sample retrieval. In comparison to other planetary systems, the dynamical environment around Phobos is distinctive, as a simple two-body approximation with Mars as the main body is not a good approximation in the vicinity of Phobos. Because Phobos' size causes two-body motion to be perturbed during proximity operations, MMX's proximity operations are immensely challenging and require novel and sophisticated techniques for maintaining and transferring between different quasi-satellite orbits.

This thesis uses dynamical systems theory to investigate new transfer design techniques for the proximity operations around the Martian moon Phobos. The developed transfer techniques use bifurcated QSO families to transfer spacecraft between relative QSOs in the Mars-Phobos Hill Problem with ellipsoidal gravity secondary framework. This thesis firstly introduces a systematic approach to compute the bifurcated families of retrograde orbits from in-plane and out-of-plane stability perturbations, namely Multi revolution Periodic QSOs (MP-QSOs) and Spatial QSOs (3D-QSOs).

Secondly, geometric characteristics of in-plane bifurcated families of MP-QSOs are leveraged to introduce a novel and robust planar transfer design method. Transfer design strategy via MP-QSOs is explored through transfer maps that illustrate transfer design space between different altitude QSOs. It is found that transfers via MP-QSOs provide insights on minimum  $\Delta V$  transfers and the parameters determining the transfer cost between relative QSOs. This transfer methodology provides a basis for robust and stable retrograde transfer trajectories around Phobos. Even if the spacecraft skips the  $\Delta V$  maneuver at the designated point, the spacecraft remains in the MP-QSO, and crossings occurring later can be used to perform the orbit injection into the target orbit. This

method involves two impulse transfers, one to escape the initial QSO and another to insert into the desired lower altitude orbit. The proposed transfer method is explicitly applied to MMX baseline QSOs. Furthermore, these transfer maps deliver accurate initial guesses for optimal transfer trajectories in the vicinity of Phobos. Based on the primer vector analysis of the impulse transfer trajectories, it is found that departing and arriving at the same periphobian sides with an additional mid-course impulse result in the optimal impulse solution.

Later this thesis explores the application of invariant manifolds of unstable retrograde orbits to design out-of-plane transfer trajectories around Phobos to aid high-latitude coverage and scientific observation capabilities to a mission. Computed families of three-dimensional QSOs using out-of-plane bifurcations near planar orbits show that most of these orbits are weak to highly unstable. The invariant manifolds of an unstable 3D-QSO are computed by perturbing the states along the direction of 3D-QSO's local eigenvectors. The intersection of capture and escape trajectories propagated from different locations along candidate 3D-QSOs with an oblate cylinder passing through the two relative planar QSOs are evaluated to extract transfer trajectories connecting a planar and the spatial QSO. This out-of-plane transfer technique provides a baseline to estimate the costs and time-of-flight associated with ballistic dynamics between high-altitude and low-altitude QSOs. The feasibility of using unstable 3D-QSO family members as staging orbits between high-altitude and low-altitude QSOs of MMX mission is later assessed. The final candidates of intermediate 3D-QSOs are ranked based on MMX scientific requirements, transfer analyses, and station-keeping costs by nullifying the growth of orbit injection errors along the unstable eigenvectors of candidate 3D-QSOs.

This work's findings could serve as initial guesses for real-ephemeris implementations to be adopted for the actual MMX mission design. The transfer methodologies and analysis presented in this paper can be extended for future missions that seek lower  $\Delta V$  transfer opportunities between stable retrograde orbits around Phobos or any small irregular planetary satellites in the solar system.

## 博士論文審査結果

Name in Full  
氏名 Nishanth Pushparaj

Title  
論文題目 Transfer design via bifurcated retrograde orbits around Phobos

本論文は、火星衛星フォボスの周りの、高度が異なる擬周回軌道 (QSO: Quasi-Satellite Orbit) の間の軌道遷移を主題とし、その新しい設計手法を提案するものである。火星-フォボス三体系における周期運動解において、QSO から分岐する多周回周期軌道を遷移に用いる点に独自性があり、従来手法に対する優位性を定量的に示した。とくに火星衛星探査のミッション計画に寄与する、独創的かつ有用な研究である。

論文は全 6 章からなるが、その核となるのは第 3~5 章である。第 3 章で QSO から分岐する多周回周期軌道の体系的な構築方法を示したのち、第 4、5 章では、それを QSO 間の軌道遷移に活用する 2 つの方法を示している。

第 1 章では導入として、研究の背景、鍵となる概念、本論文の構成、主要な貢献を提示している。第 2 章では、後続の議論の礎となる力学モデル、用語の定義、数値解析手法を示している。

本論文の第 3 章では、後続する軌道遷移の議論に先立って、QSO から分岐する多周回周期軌道を体系的に構築する方法を確立している。力学系理論に基づき、QSO からの周期多倍分岐により生ずる MP-QSO (Multi revolution Periodic QSO)、接線分岐により生ずる 3D-QSO (Spatial QSO) を連続変形法により拡張していった軌道群を構築する手法である。そして、これを火星-フォボス三体系に適用して、フォボス周りの MP-QSO、3D-QSO の解空間の構造とその特性を明らかにしている。

第 4 章、第 5 章では、実際の火星衛星探査計画 MMX を具体的な題材として、この MP-QSO、3D-QSO を、高度が異なる QSO 間の軌道遷移に活用する方法を示している。

第 4 章では、まず MP-QSO を QSO 間の軌道遷移に用いる手法について論じている。体系的に構築された MP-QSO 群の中から、起点/終点の QSO と交差する MP-QSO を抽出することで、2 つの QSO をつなぐ遷移軌道を構成する。フォボスを周期的に周回する MP-QSO を用いることにより、フォボスと衝突したり、フォボスから離脱したりすることがない、安定、かつ安全な QSO 間の遷移が可能になる。また解空間を分析し、従来手法よりも少ない制御量で遷移を実現できる軌道が存在することや、最適解となる遷移軌道が示す幾何学的な特徴を明らかにしている。さらに、Primer ベクトルを用いる軌道最適化理論を適用し、遷移途上の中間軌道制御も許容することで、遷移に必要な総制御量をさらに削減できることを示している。

第 5 章では、3D-QSO を QSO 間の軌道遷移に用いる手法について論じている。フォボスの高緯度域上空にまで到達できる 3D-QSO は不安定な性質を持ち、力学系理論における不変多様体を構成する。そこで、体系的に構築された 3D-QSO とその安定/不安定多様体から構成される 3 次元軌道群を準備し、その中から起点/終点の QSO と交差するものを抽

出することで、2つの QSO をつなぐ 3次元遷移軌道が構成できる。フォボス赤道面内にある通常の QSO からでは困難な、高緯度域の観測を可能にする 3D-QSO を介することで、ミッション上の付加価値が高い QSO 間の遷移が実現できる。この章では、以上の考え方に基づく、3D-QSO を介した遷移軌道の体系的な構築手法を提示し、この種の遷移軌道の特性を明らかにしている。

最後に第 6 章では、本論文の貢献と成果をまとめ、研究の発展性について議論している。

このように、本論文は、三体力学系における第二天体周りの、高度が異なる擬周回軌道間の軌道遷移について新しい概念と設計手法を提案し、その有効性を示したものである。とくに、擬周回軌道から分岐する多周回周期軌道を遷移に用いる点に独創的な着眼があり、これにより安定かつ安全、あるいは有用な遷移軌道の選択肢を大きく広げ、従来手法よりも有利な遷移軌道を構築できることを示した。本論文では 2024 年度打上げ予定の火星衛星探査計画 MMX を題材にして、提案手法の優位性を定量的に示したが、本論文で提案される手法は、生命探査で注目される木星・土星系の衛星探査など、これからの太陽系探査の最前線で広く活用されうる、有用な研究成果である。

以上、出願された論文は独自性・有用性を併せ持ち、博士論文としてふさわしいものであるとして合格と判定した。