

氏名（本籍）	アマラ スリ マドゥシャンカ ギリマラゲ Amila Sri Madhushanka Gilimalage (スリランカ)
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第 1123 号
学位授与の日付	2022 年 3 月 19 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	Fly Around Orbit and Capture Attitude Control for Space Debris Mitigation (スペースデブリ除去を実現する為のフライアラウンド軌道及び捕捉姿勢制御)

論文審査委員 (主査) 教授 木村 真一
教授 星 伸一 教授 中村 文一
教授 鈴木 英之 教授 溝口 博

論文内容の要旨

The utilization of space for human activities have expanded a lot over the past several decades. Both private and government sectors are actively involved in improving the commercial and scientific value of space. With the increased number of functional objects populating the orbits around earth, the amount of space debris has also accumulated at an alarming rate. This is hazardous for both current and future space missions as they require sudden evasive maneuvers and continuous monitoring of these objects. Therefore, space debris mitigation has become an important theme in sphere of space related research.

Dealing with this issue is not simple as there are multiple stages of work to be completed for a successful implementation of a mitigation mission. One challenge is that target bodies such as debris and malfunctional satellites can have arbitrary rotational motions. The chaser satellite needs to travel along a fly around orbit with close-proximity and formation flying. The velocity and position For vectors of both objects should align together simultaneously for safer docking

opportunities. To keep the chaser at a constant distance from the target requires firing chaser's thrusters intelligently. Since the resources are limited in space, optimizing the fuel consumption and while achieving the control requirements are a challenge. To overcome this issue a Model Predictive Control (MPC) based algorithm is developed for a target-chaser rendezvous situation to optimize fuel consumption while considering thruster constraints and memory usage. It is compared with several conventional controllers for evaluate the effectiveness.

Once the target and chaser are locked in fixed relative motion, the chaser satellite can move closer to capture the target using different types of grappling mechanisms. Here another challenge occurs in the form of ambiguities arise in inertial properties while capturing objects. To stabilize the attitude of a spacecraft, a typical control algorithm requires accurate inertia measurements. When the spacecraft captures an unknown object, its body configuration and mass change, causing changes to its dynamics and inertial properties. This can produce tumbling effects and possible deorbiting scenarios due to the sudden shift in momentum. As a result, the control algorithm needs robustness to cope with these ambiguities and parameter variations. To cope with this situation, an intelligent attitude control algorithm is developed for a satellite with partially known inertial properties. By combining inertia estimation with neural network-based controller the objectives of control design have been achieved. A comparison has been done with several other control schemes to evaluate the performance using simulation environments for validation.

論文審査の結果の要旨

本論文は、近年急速に関心が高まりつつあるスペースデブリ（宇宙のごみ）の除去を実現する上での課題となっている、対象物体への接近、及び、対象物体捕捉後の姿勢安定化について、制御の観点から新たな解決策を提案し、その実現を大きく推進する研究である。スペースデブリは人工衛星打ち上げの際に投棄されたロケットの残骸や使用を終えた衛星などであり、その軌道及び姿勢が制御されていないだけでなく、通信手段を持たないために、その状態についての情報を得ることが難しい。また、宇宙機は一般

に燃料や演算能力が非常に限られており、除去に向かう宇宙機はこうした制約の下で、安全確実な接近及び把持が必要となる。特に、対象物体の回転運動や慣性能率、残存燃料によるスロッシングの影響などの情報が不完全な状況での、フライアラウンド軌道制御や、捕捉後の姿勢維持については、これまで十分研究がなされておらず、スペースデブリの除去システム実現の上での障壁となっていた。

本論文では、まず非協力的対象物体に対して、安全に接近するために周囲を対象物体の回転に合わせて周回飛行するフライアラウンド軌道の制御を、限られた演算リソースのもとで、使用する燃料を極力低減する方法として、モデル予測制御 (model predictive control (MPC)) を活用することで、制御システムを実現している。コンピュータシミュレーションによる検証の結果、従来用いられてきた、様々な方法に対して、必要燃料に対する影響を低減し、演算能力に対する要求を小さく抑えつつ、速やかに目標軌道に収束出来ることを検証している。

スペースデブリ除去を実現する為には、対象物体へのフライアラウンドによる追尾を実現した上で、対象物体を捕捉する必要がある。対象物体を捕捉する際、対象物体と連結された力学系として運動することになるが、一体となって軌道制御を実現し、軌道離脱を実現する為には、姿勢を安定化させる必要がある。その一方で、対象物体の詳細情報について把握することは難しく、慣性能率などの力学的特性に関する情報に、不確かさがある状況において、捕捉後一体となった状態で姿勢を安定化させる必要があり、この点がもう一つの課題であった。この問題について、本論文ではニューラルネットワークを活用した適応的な制御手法を活用することで、不確かさに対して適応し安定な制御を実現する方法を提案している。コンピュータシミュレーションによる検証によって、ファジー制御など、この問題に対する従来のアプローチに対して、速やかな収束を実現できることを示している。

さらに、捕捉した対象物体内に残存燃料などが残っている状況も考えられ、そのスロッシングに対する対策についても考える必要がある。本論文では、この問題に対してスライディングモード制御を応用しすることで解決方法を見だし、新たな制御手法について提案を行っている。さらに、本制御手法について、残存燃料を保持した宇宙機にカンするコンピュータシミュレーションを実施することによって評価を行っている。その結果、従来法に対する優位性を確認している。

以上のように、本論文は、スペースデブリ除去を実現する上で、これまで十分解決されてこなかった対象物体への接近、及び、対象物体捕捉後の姿勢安定化について、新しい観点から解決方法を提案しており、スペースデブリ除去の実現に向けて大きく前進させる意義があると考えられる。

本論は全5章で構成され、第1章の「INTRODUCTION」では本研究の背景と目的について述べ、スペースデブリ除去実現における問題点を指摘し、本論文で取り扱う問題を説明している。第2章の「MPC-BASED ORBIT CONTROLLER DESIGN FOR THE FLY-AROUND SCENARIO CONSIDERING FUEL OPTIMIZATION」では、モデル予

測制御を活用したフライアラウンド制御について説明している。第3章の「NEURAL NETWORKS BASED ADAPTIVE ATTITUDE CONTROLLER DESIGN FOR A SATELLITE WITH PARTIAL KNOWN INERTIAL PROPERTIES」では、ニューラルネットワークを活用した適応的制御によって、対象物体の慣性能率などの力学的特性に関する情報に不確かさがある状況において、捕捉後一体となった状態で姿勢を安定化させる制御方法について説明している。第4章の「NOVEL SLIDING MODE CONTROL-BASED CONTROLLER DESIGN FOR A SATELLITE WITH LIQUID FUEL SLOSH DISTURBANCES」では、対象物体内の残存燃料に起因するスロッシングへの対応として、スライディングモード制御を活用した制御方法について説明をしている。第5章の「DISCUSSIONS AND CONCLUSIONS」では、本論文の結論と今後の展望について述べられている。

以上より本論文は博士（工学）の学位論文として十分に価値あるものと認められる。