

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15020

研究課題名（和文）デブリ除去衛星の小型化を可能とする軌道上外乱を積極的に用いた姿勢制御に関する研究

研究課題名（英文）Attitude Guidance and Control for Rapid Deorbit of Space Debris by Aerodynamic Drag

研究代表者

佐々木 貴広（Sasaki, Takahiro）

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

研究者番号：00835168

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙デブリの自然増加の抑制には、大型デブリ除去が有効である。本研究では、大気抵抗を積極的に利用することで、搭載燃料が限られている小型衛星でも素早く大型宇宙デブリを除去できる姿勢誘導則を提案した。また、モデル誤差があった場合でも制御量からオンボードで学習し、正しい目標姿勢へと修正する適応誘導則を提案し、宇宙空間やモデルの不確かさにロバストなデブリ降下システムが確立できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙デブリの自然増加の抑制に有効である大型デブリ除去は、年間除去目標における費用対効果を考えたとき、小型衛星によって実施される必要がある。小型衛星に搭載可能な非力なアクチュエータシステムで大型デブリを効率的に落とすには、大気抵抗を積極的に利用することが有効である。本研究で確立された誘導制御方式は、500kg級の小型衛星で3000kgの大型宇宙ゴミの除去を可能とするものであり、将来の持続的な宇宙ゴミ除去システムの構築へと役立つ成果であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：This research introduces AMTEA, an altitude-dependent mean torque equilibrium attitude (TEA) characterized around an equilibrium (balance) point in attitude dynamics, which is affected by aerodynamic and gravity gradient torques for each altitude. Introducing a new adaptive function, we propose the adaptive TEA guidance technique, which corrects the guidance error from model uncertainty while it learns the actuator inputs during one orbital revolution. As a result, AMTEA avoids wheel spin saturation. Solving the mixed H_2/H_∞ constraints of linear matrix inequalities (LMIs) representation, the robust controller guarantees overall stability and control performance and manages large disturbance torque and model uncertainty using the RWs/MTQs steering law for controlling wheel spin rates and wheel unloading. This new adaptive guidance and the robust controller are demonstrated by comparing the results of numerical simulations.

研究分野：制御工学

キーワード：制御工学 誘導則 ロバスト制御 デブリ除去 姿勢制御 トルク平衡姿勢 軌道制御 軌道降下誘導則 適応

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

国際機関宇宙デブリ調整委員会 (IADC)は、デブリの自然増加抑制のために、デブリ除去の取り組みに対する根本的改善が必要であることを結論づけている[1-1]。大型デブリの除去は、衝突による大量の微小デブリの発生を未然に防ぎ、年間 5 機の除去が自然増加を抑制するために必要不可欠である[1-2]。大型デブリ除去は、ロケットの打ち上げ頻度や年間除去目標における費用対効果を考え、打ち上げ機会が多く、開発コストが低く、そして開発期間が短い小型衛星により実施する必要がある。一方で小型衛星には、小型が故に推薬量、航法センサ、姿勢制御用アクチュエータなどの搭載スペースに厳しい制約がある。また、大型デブリ結合後に質量特性が大きく変化するという特有の難しさがあり、通常の人工衛星を前提とした、航法誤差や推定誤差を考慮した適応制御や、軌道上外乱にロバストな制御器設計といった先行研究を単に適用するだけでは、課題を解決するには不十分である。

[1-1] IADC-12-08, Rev. 1, Jan. 2013.

[1-2] J.-C. Liou, The 3rd International Space World Conference, Frankfurt, Germany, 2012.

2. 研究の目的

本研究は、宇宙デブリの自然増加の抑制に有効である大型デブリ除去を小型衛星で実現できる航法・誘導・制御手法を確立することを目的とする。具体的には、500kg 級の小型衛星が、3000kg 級の大型デブリへと安全に接近できるランデブ軌道設計および航法システムの最適構成、大型デブリと結合後に大きく変わる質量特性を、最小限のセンサシステムで推定し、非力なアクチュエータシステムで、軌道上外力を利用して、効率的にデブリを落下させるための姿勢誘導則および制御器設計手法を確立する。

3. 研究の方法

上記の研究目的を達成するために、主に以下 3 つの研究を実施することで、小型衛星による大型デブリ除去の実現可能性を明らかにする。

(1) 非協力ターゲット (デブリ)への安全な接近軌道設計と航法センサシステムの構築

宇宙デブリのように通信が行えない非協力ターゲットへの安全な接近方法について考える。小型衛星の厳しい燃料制約の中で安全に接近でき、かつ距離に応じて切り替えが生じるランデブセンサや航法方式を加味した軌道設計手法および航法システムの構築について明らかにする。

(2) 軌道上外乱を積極的に利用する姿勢誘導則の提案

小型衛星で大型デブリを落下させる際、大気抵抗による減速が最大となる姿勢に制御することで落下速度を最大化することができるが、そのような姿勢では大きな外乱トルクが働き、小型衛星による制御が困難である。そこで、外乱トルクの平衡点であるトルク平衡姿勢をデブリ除去 (制御落下)問題へ適用する手法を確立する。

(3) モデル化誤差に対してロバストな誘導則および制御則の提案

トルク平衡姿勢を計算する際、大気密度等のモデル化誤差により想定外の外乱が宇宙機へと働くことが懸念される。そこで、軌道上の制御量等から目標姿勢を学習し、修正する誘導則の提案および、残留する外乱に対してロバストな制御器の設計手法を確立する。

4. 研究成果

主な研究成果を以下にまとめる。

(1) 非協力ターゲット（デブリ）への安全な接近軌道設計と航法センサシステムの構築

軌道情報を共有できない非協力ターゲットである宇宙デブリへの接近は、スラスタ故障時でも衝突しない安全な軌道を設計する必要がある。また、小型衛星に見合った消費燃料で接近するといった制約がある。本研究では、安全な近傍接近軌道であるスパイラル軌道に着目し、消費推薬量、ロバスト性、姿勢角変動、運用期間の観点でのトレードオフを実施し、パラメータ設計方針を提案した[4-1]。(図1)

設計した軌道の安全性を確認する際、センサ誤差をランダムで振り、1000回のモンテカルロシミュレーションを実行することで精度よく確認することが可能であるが、多くのパラメータを設計する初期段階では計算時間の観点から安全性の確認が困難である。そのようなとき、誤差楕円を伝搬することで1回のシミュレーションで安全性を現実的な計算時間で評価可能な線形共分散解析(LCA)が有効であるが、[4-1]で示したスパイラル軌道への適用例はない。本研究では、スパイラル軌道へLCAを精度よく適用する手法を定式化し、シミュレーションによりモンテカルロ解析と比較することで、精度良い近似となっていることを確認した[4-2]。

[4-1] T. Sasaki, et al., Trans. JSASS, 64(3) pp. 136-146, 2021.

[4-2] T. Sasaki, et al, 31st AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, 2021.

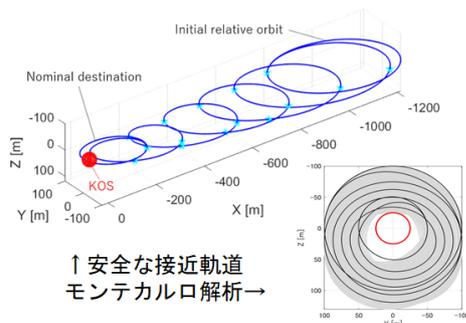


図1 安全な接近軌道の設計例

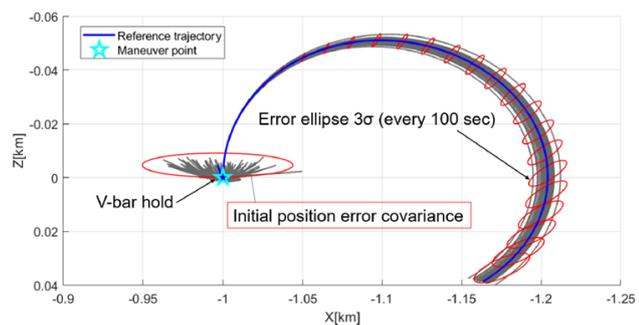


図2 提案するLCAとモンテカルロ解析の比較

(2) 軌道上外乱を積極的に利用する姿勢誘導則の提案

小型衛星に搭載可能な非力なアクチュエータシステムで大型デブリを効率的に落とすには、大気抵抗を積極的に利用することが有効である。大気抵抗による降下速度を大きくしつつ衛星に働く外乱トルクや角運動量増加を緩和できる姿勢として国際宇宙ステーション (ISS) ではトルク平衡姿勢 (TEA) が採用されている。しかし、ISSでは平均軌道高度を約400kmに維持しているため、空力トルクの計算で要する大気密度は一定として近似可能であり、空力トルクと重力傾斜トルクの平衡点で表されるTEAも一定として扱うことが可能であった。一方でデブリ除去衛星の場合は、再突入に向けて軌道高度を時々刻々と変化させるため、大気密度を一定と仮定することはできない。

本研究では、空力トルクと重力傾斜トルクの釣り合い点を軌道高度ごとに求める高度依存型TEA誘導則を新たに設計し、軌道高度変化を要するデブリ除去ミッションへTEAを適用する方策を提案した[4-3]。(図3) これにより、非力なアクチュエータを持つ小型衛星でも、無理のない範囲で空力断面積が大きくなる姿勢をとることができ、より速くデブリを落下させることが可能となった。

[4-3] T. Sasaki, et al., 70th International Astronautical Congress, 2019.

(3) モデル化誤差に対してロバストな誘導則および制御則の提案

宇宙環境でのモデル化誤差は大きいため、地上でのシミュレーションにより設定したパラメータを軌道上オンボードで修正できることは望ましい。大気密度モデル等のモデル化誤差を、軌道一周回分で働いたトルクの蓄積量から正しい平衡姿勢を学習し修正する適応誘導則を提案した。さらに、残留するモデル化誤差や軌道上外乱に対してロバストな制御器を設計することで、宇宙空間やモデルの不確かさにロバストな降下システムを確立した[4-4]。(図4)

[4-4] T. Sasaki, et al., 71st International Astronautical Congress, 2020.

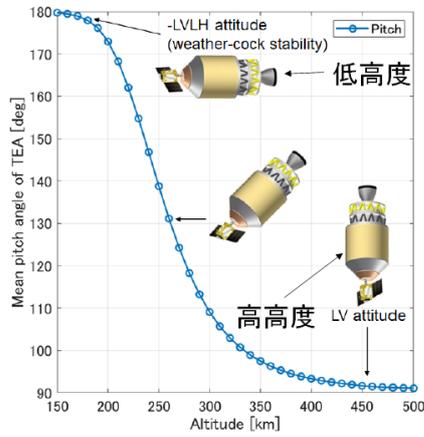


図3 高度依存型トルク平衡姿勢

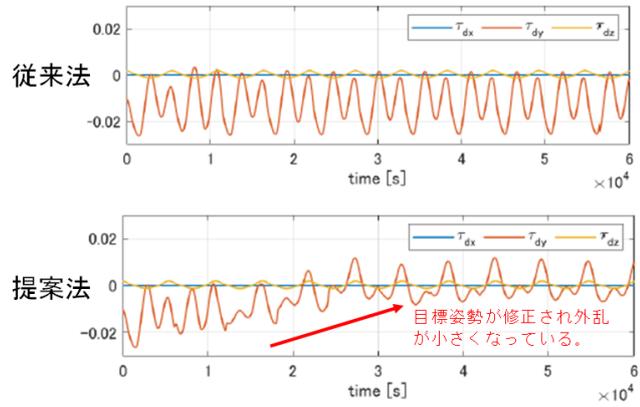


図4 外乱トルク総量の比較結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takahiro Sasaki, Yu Nakajima, Toru Yamamoto	4. 巻 64
2. 論文標題 Proximity Approaches and Design Strategies for Non-Cooperative Rendezvous: V-bar Hopping vs. Spiral Approach	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences	6. 最初と最後の頁 136-146
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2322/tjsass.64.136	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 佐々木貴広、中島悠、山元透
2. 発表標題 デブリ接近軌道のトレードオフ評価: V-barホッピング軌道vsスパイラル軌道
3. 学会等名 第29回アストロダイナミクスシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro Sasaki, Yu Nakajima, Hiroyuki Okamoto and Toru Yamamoto
2. 発表標題 Attitude Guidance and Control for Rapid Deorbit of Space Debris by Aerodynamic Drag
3. 学会等名 70th International Astronautical Congress (IAC) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々木貴広、中島悠、山元透
2. 発表標題 デブリ除去衛星の小型化を可能とする軌道上外乱を積極的に用いた姿勢誘導則の提案
3. 学会等名 第63回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro Sasaki, Yu Nakajima and Toru Yamamoto
2. 発表標題 Rendezvous and Proximity Operations for Active Debris Removal Satellites Considering Trajectory Safety
3. 学会等名 43rd Annual AAS Guidance, Navigation and Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahiro Sasaki, Yu Nakajima, Hiroyuki Okamoto and Toru Yamamoto
2. 発表標題 Adaptive Torque Equilibrium Attitude Guidance for Rapid Deorbit of Space Debris by Aerodynamic Drag Considering Model Uncertainty
3. 学会等名 71st International Astronautical Congress (IAC) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahiro Sasaki, Naomi Murakami, Yu Nakajima, Moeko Hidaka, Ryo Nakamura, Toru Yamamoto
2. 発表標題 Non-Cooperative Rendezvous and Proximity Operations for Active Debris Removal Missions
3. 学会等名 31st AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting (国際学会)
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

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