

宇宙ごみの姿勢推定システムと実証衛星の開発 — より簡単に宇宙ごみを除去するための技術実証 —

1. 背景

宇宙空間に漂う不要になったロケットや人工衛星などを「宇宙ごみ」という。宇宙ごみの数は微小なものを含めると約 5 兆個あると言われており、また秒速 7 km という速度で地球を周回する。宇宙ごみが運用中の衛星に衝突した場合、衛星の機能に致命的な損傷を与える。このような事故が発生した場合、天気予報、災害対策など、我々が日常的に利用するサービスを利用できなくなる可能性がある。宇宙ごみの除去は、まず除去対象となる宇宙ごみを選定し、安全に除去するための除去方法を決定する。一般的な宇宙ごみは1分間に1回転ほどの角速度で回転していると言われるが、宇宙ごみは高速で地球を周回しているため、接近・除去するためには高度な技術を要する。また、最悪のケースとして宇宙ごみと除去衛星が衝突してさらなる宇宙ごみを発生させてしまう可能性も考えられる。そのため宇宙ごみの回転に関する情報は、ミッション設計段階で大切な判断材料となる。しかし現実的には、宇宙ごみの軌道上での回転の様子、つまり宇宙ごみの姿勢を推定することが非常に難しく、除去衛星が回転する宇宙ごみに接近して捕獲できた例はない。

2. 目的

本プロジェクトは宇宙ごみの除去対象や除去方法の決定プロセスの課題解決に取り組む。宇宙ごみの除去成功率向上のため、ライトカーブを用いた宇宙ごみの姿勢推定システムを軌道上で実証する。実証衛星 Q-Li の開発を行う。Q-Li は軌道上で自分の姿勢を計測し、地上へ送信する。一方地上からは Q-Li のライトカーブを取得し、姿勢を推定する。Q-Li は軌道上で自分の姿勢を計測し、地上へ送信する。一方地上からは Q-Li のライトカーブを取得し(図 1)、姿勢を推定する。

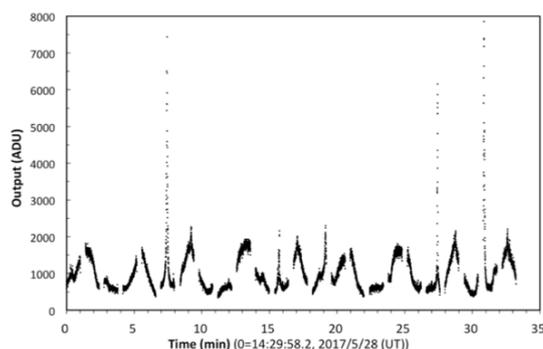


図 1: ライトカーブ

3. 開発の内容

ライトカーブのみで完結できる安価で高精度な姿勢推定システム

姿勢推定システムの目的はライトカーブのみで完結できる安価で高精度な姿勢推定手法の確立である。このシステムで推定した姿勢と衛星システムが測定した姿勢を比較することで、姿勢推定システムの実証を行う。従来手法では高精度な姿勢推定のためにレーダーや補償光学などの天文台レベルの高額な設備が必要であったが、プロジェクト期間内ではそれらを必要としない、ライトカーブのみで完結できる安価で高精度な

姿勢推定システムを完成した。

図 2 は従来手法で、図 3 は Interval Unscented Kalman Filter (IUKF) という新たなアルゴリズムを導入して姿勢推定を行った結果である。赤線が真値、青線が推定値である。図 2 と図 3 の比較から IUKF の導入によりレーダーや補償光学を使うことなく従来手法と比較して推定精度を向上することができた。

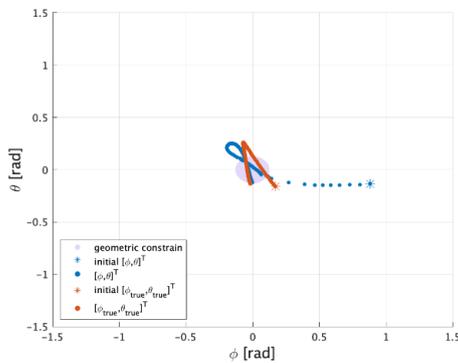


図 2: 従来手法

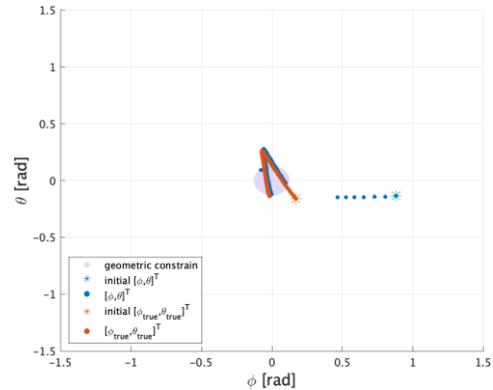


図 3: 本プロジェクトで開発したシステム

衛星上で姿勢データを測定し、地上へ送信するための衛星システム

衛星ソフトウェアの目的は姿勢データの取得である。定期的にジャイロセンサ、太陽センサ、地磁気センサを取得し、データをメモリに保存、保存したデータを地上に下ろす。軌道上では姿勢制御システムに姿勢データを提供し、地上では姿勢推定システムで推定した結果と姿勢データを比較検証する。衛星システムでは CPU として Arduino を 2 つ搭載して、片方で姿勢データを取得するループ処理を行い、もう一方で地上との通信などの割り込み処理を行う。プロジェクト期間ではブレッドボードモデルを作成し、環境試験の一つである真空試験を行った。ブレッドボードモデルは図 3 のように作成した。Arduino のプログラムとして、ジャイロセンサの通信可否の確認 (WHO_AM_I というデバイスを識別するための値の確認) と 3 軸角加速度の測定、磁気センサの 3 軸磁気の測定、メモリの正常動作確認を実装した。真空条件下で約 3 時間 30 分の間試験を行った結果、どのセンサも正常に動作しており、図 4 に示すように電流値と電圧値から特に異常な挙動がないことが示された。この結果、真空試験は成功したと判断した。

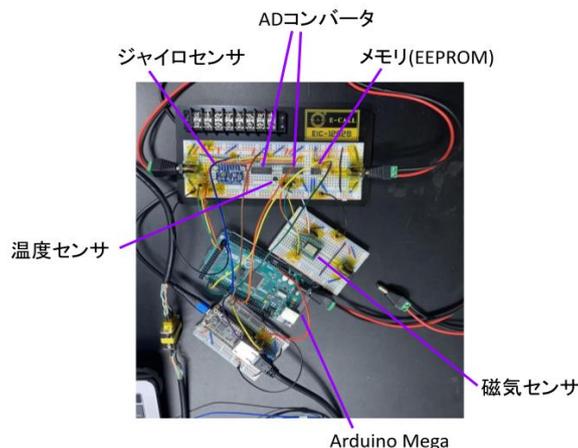


図 4: 開発したブレッドボードモデル

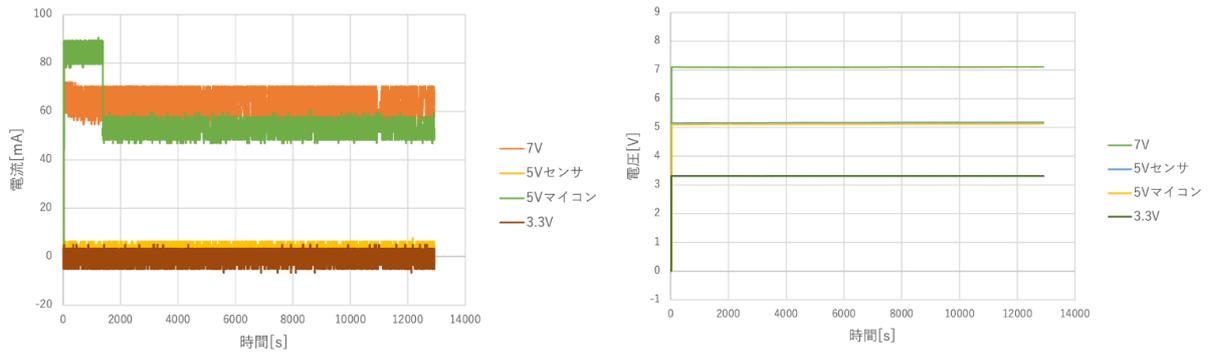


図 5: 真空試験中の電流値と電圧値の時間変化(左: 電流値、右: 電圧値)

安全な膜展開の実現に向けた一軸磁気トルカによる姿勢制御システム

Q-Li は軌道上で膜機構を展開し、ライトカーブをより検出しやすくする。しかしながら Q-Li が高速で回転している場合、膜展開により Q-Li 本体、もしくは膜機構そのものを損傷する危険性があるため、Q-Li の角速度を小さくする(デタンプリング)必要がある。デタンプリングを達成する上で Q-Li 衛星には予算、大きさ、重さ、なるべく少ない制御入力を使用することという制約条件が課せられている。この制約を克服し、デタンプリング制御を達成できる姿勢制御システムを開発した。

本プロジェクトでは実時間最適化制御則である非線形モデル予測制御(Nonlinear Model Predictive Control: NMPC)を Q-Li に応用した。NMPC を用いた場合の方が短い時間、少ない制御入力でデタンプリングを達成できた。図 6 は従来手法としてよく使用されてきた B-dot 制御と NMPC を用いて姿勢制御した結果の比較である。また NMPC が生成した滑らかな制御入力を PWM で離散化することにより、アクチュエータにかかる負担を大幅に低減することができた(図 7)。

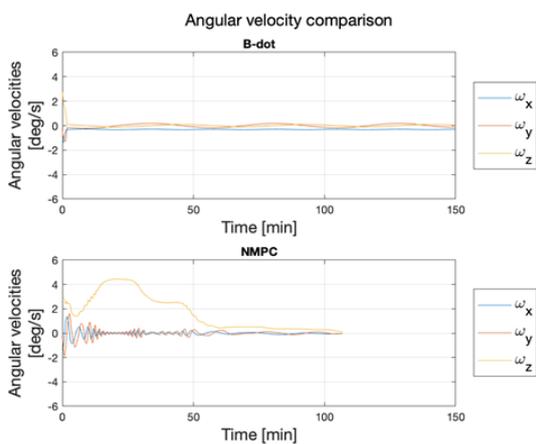


図 6: B-dot と NMPC の比較

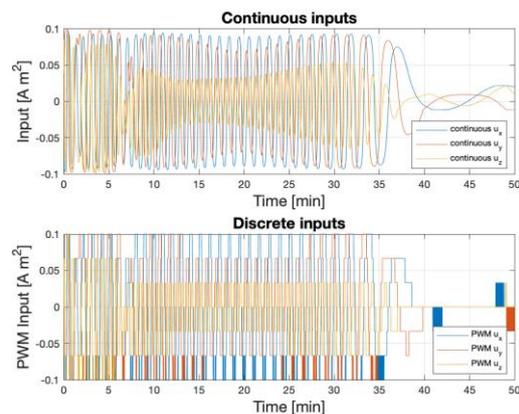


図 7: NMPC への PWM の応用の結果(制御入力比較)

4. 従来の技術(または機能)との相違

ライトカーブのみで完結できる安価で高精度な姿勢推定システム

本プロジェクトで確立した姿勢推定システムは、安価で高精度な姿勢推定システムである点で未踏性がある。従来手法では高精度に宇宙ごみの姿勢を推定するためにはレーダ

一や補償光学などの天文台レベルの高額な設備が必要である。また観測施設が限られるため、多点観測や観測回数を増やすことが難しく、得られるライトカーブのデータ数が少ないという課題がある。しかし、本プロジェクトで確立したシステムはそれらを必要としない、安価で高精度な姿勢推定システムである。

衛星上で姿勢データを測定し、地上へ送信するための衛星システム

衛星システムの成果は、ブレッドボードモデルを作成し環境試験を行える段階まで開発できたことである。ブレッドボードモデルにジャイロセンサ、磁気センサ、温度センサを搭載し、Arduino にプログラムを実装した。プログラムとしては、各センサを簡単に取り扱えるように関数を作成し、環境試験中に PC からブレッドボードの挙動を確認するためのコマンドを実装した。そして、環境試験として真空試験を実施し、電流値・電圧値から異常な挙動がないことを確認できた。今後は放射線試験を実施してブレッドボードモデルを完成させ、エンジニアリングモデルの開発へと進んでいく。衛星システム自体は独創的な手法で構築しているわけではないが、膜展開のために姿勢制御系に姿勢データを提供し、ライトカーブによる姿勢推定システムを実証するために衛星の実際の姿勢の時間履歴を取得するという重要な役割を担っている。そのため、衛星システムの開発が進展したことはこのプロジェクト期間における成果の 1 つであると言える。

安全な膜展開の実現に向けた一軸磁気トルカによる姿勢制御システム

先行研究では広く 3 軸磁気トルカを用いた姿勢制御が取り扱われてきた。しかしながら Q-Li は大きさ、重量、コスト面で厳しい制約があることから、磁気トルカは 1 軸のみの搭載も考慮する必要がある。(3 軸の制御システムも現状選択肢として可能ではある。) 3 軸磁気トルカを用いた場合でも、衛星のデタンプリングは困難だが、1 軸磁気トルカのみを用いた場合はさらに問題が複雑になる。そこで本プロジェクトでは 1 軸磁気トルカの実現可能性に関して、シミュレーションと理論的な考察を行った。シミュレーションでは、非線形モデル予測制御(Nonlinear Model Predictive Control:NMPC)を Q-Li に応用することで 1 軸磁気トルカによる 3 軸のデタンプリングに成功した。また、NMPC は必要な制御入力が小さいことを示した。さらに NMPC が生成した滑らかな制御入力を Pulse Width Modulation Method(PWM)で離散化することにより、アクチュエータの負担を軽減できた。

5. 期待される効果

プロジェクトで得られる成果は宇宙環境保全に大きく貢献する。本システムと実証衛星で軌道上実証されるライトカーブによる宇宙ごみの姿勢推定手法は衛星メーカーの除去衛星の設計をサポートするツールとなり、宇宙ごみの姿勢を正確に推定できることで、除去対象の宇宙ごみの捕獲成功率を格段に向上することができる。その結果、世界初の宇宙ごみ除去を実現できる。宇宙環境の保全は軌道の安全を確保し、運用中の衛星を守るだけでなく、新たな衛星を軌道に投入することができるなど、今後の宇宙開発をさらに活発化することにつながる。継続的な宇宙開発により、現在は限られた人しか享受できない衛星を利用したサービスの敷居を下げるのが可能であり、地球上全ての人々が安価に安心して、災害予知や安全保障等の衛星サービスを享受できる社会が実現する。

6. 普及(または活用)の見通し

今後は実証衛星のブレッドボードモデルの放射性試験を行い、各センサの環境耐性の確認を行う。その後エンジニアリングモデル(試作機)の開発、フライトモデル(打ち上げ機)の開発を行う。並行して JAXA が提供する無償相乗りの公募に応募し、打上げ機会の獲得に向けて活動する。また Q-Li のミッションを広く知っていただき、社会の理解を得るためのプロモーション活動にも尽力する。

7. クリエータ名(所属)

松下悠里(九州大学工学府航空宇宙工学専攻修士 2 年)

平岩尚樹(九州大学工学府航空宇宙工学専攻修士 1 年)

近藤耕太(2020 年 9 月九州大学工学部機械航空工学科を卒業)