

1. 担当 PM

田中 邦裕（さくらインターネット株式会社 代表取締役社長）

2. クリエータ氏名

松下 悠里（九州大学工学府航空宇宙工学専攻 修士 2 年）

近藤 耕太（九州大学工学部機械航空工学科 2020 年 9 月卒業）

平岩 尚樹（九州大学工学府航空宇宙工学専攻 修士 1 年）

3. 委託金支払額

2,736,000 円

4. テーマ名

宇宙ごみの運動推定システムと実証衛星の開発

5. 関連 Web サイト

なし

6. テーマ概要

本プロジェクトの目的は宇宙ごみの除去成功率を向上するため、ライトカーブを用いた宇宙ごみの姿勢推定システムを人工衛星の軌道上で実証することである。

本プロジェクトでは「宇宙ごみの姿勢推定システムと実証衛星」として、「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」、「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」、そして「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」の開発を行った。

7. 採択理由

スペースデブリ（宇宙ゴミ）が人類の宇宙開発において問題になっており、その除去をどのようにするかは大きな課題であるが、ひとつひとつのデブリの動きが複雑であり、その運動を地上から推定することは非常に重要である。

そのような中で、ライトカーブ（地球から見たときの対象物の明るさの時間的

変化) から、デブリが太陽面に対してどのように変化をしているかを安価な機器で高精度に推定、かつ運動を導き出し、世界で初めてその技術を宇宙空間で実証するという本提案は、大変未踏性が高い。

実際に衛星を使って検証することは未踏期間終了後を予定しているため、未踏期間中に実現できることは大きな目標の中の一部かもしれないが、プロジェクト全体において未踏期間における大きな飛躍を期待して採択した。

8. 開発目標

本プロジェクトでは、ライトカーブを用いた宇宙ごみの姿勢推定システムの実証衛星 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 が送った姿勢データと地上の推定結果を比較し、結果を検証する。Q-Li を使用してライトカーブを用いた宇宙ごみの運動推定システムを実証することができれば、形状や軌道に関係なく

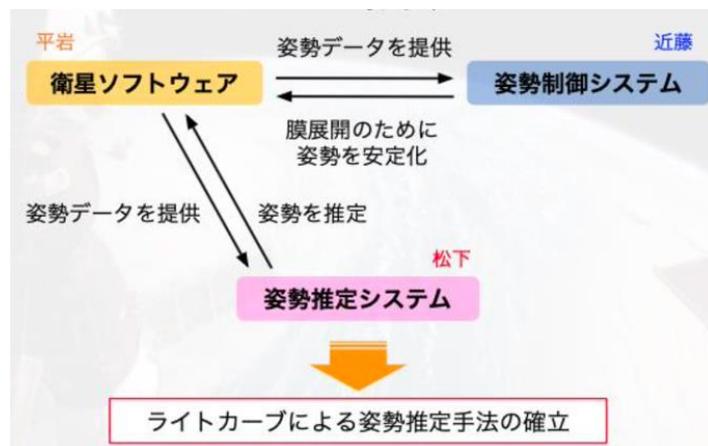


図 1：開発システムの相互関係

く様々な宇宙ごみにも同じ手法を適用できる。そのため、ミッション設計段階で宇宙ごみの回転情報が得られ、安全で成功率の高い宇宙ごみの除去を実現できる。プロジェクト期間中以下の 3 点のシステムを開発する。

- 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
- 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
- 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

これらの関係性は、図 1 の通りである。

9. 進捗概要

本プロジェクトの進捗は、項目ごとに以下の通りである。

- 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という点が特徴である。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る。また観測施設に限られるため、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
衛星システムの開発成果は、プロジェクト期間内においてブレッドボードモデルの完成直前の状態まで開発できたことである。ブレッドボードモデルに必要なセンサを搭載し、Arduino にプログラムを実装し、システムを構築した。そして、環境試験として真空試験を実施し、良い結果を得ることができた。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大きく進展したことはこのプロジェクトの成果である。
- 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
衛星の姿勢制御システム開発は、実際に打ち上げて実証するまで、そのシステムの検証ができない。ロボットやドローンの開発では、アルゴリズムの実装と検証は、実際にハードウェアを作り上げ、コーディングを行えば、実験室で行える。しかし、衛星開発ではアルゴリズムを開発・修正するたびに衛星を打ち上げて実証することは出来ない。姿勢制御システムの研究開発は、理論考察で実証しシミュレーションでその結果を論文執筆等で示すというのが一般的な流れである。本プロジェクトでも論文を執筆し理論的な根拠を示した上で、シミュレーションでアルゴリズムの実装と検証を行った。衛星の姿勢シミュレーションを 0 から構築し、シミュレーション環境を整えた。新規手法である NMPC (Nonlinear Model Predictive Control、非線形モデル予測制御) に PWM (Pulse Width Modulation、パルス幅変調) を応用する手法を理論から構築し数値シミュレーションで示したことが今回の開発成果の特徴である。

なお、実施計画に示した衛星メーカーが簡単に使用できるという目線での開発はできなかったものの、宇宙ごみの姿勢推定システムについて、任意の軌道上にある宇宙ごみのライトカーブシミュレーション、シミュレーションで得られたライトカーブから宇宙ごみの姿勢を推定するシステムは完成した。

ただ、衛星システムに関しては、ブレッドボードモデルの環境試験の一つである真空試験まで終了したが、ブレッドボードモデルの放射性試験は試験施設の

調整が難航し実現できなかった。

実施計画から追加で開発したものとしては、Q-Li の膜面を安全に展開するための姿勢制御システムである。

10. プロジェクト評価

採択当初より、全てが完成するプロジェクトではなく、どのような成果発表を行うかが課題であったが、宇宙ごみの除去のためにキーとなるいくつかのプロジェクトに対して取り組めた。

特に、当初の実施計画に含まれていなかった姿勢制御システムについては、先行事例のサーベイなどを十分に行い、実際にその成果を論文発表するとともに、実装が行うことができた。

今後、プロジェクト期間に生み出した成果を、どう社会に伝えていくか期待したい。

11. 今後の課題

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、試作機であるエンジニアリングモデルの開発、打ち上げ機であるフライトモデルの開発を行う。並行して国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）が提供する「ロケット相乗り超小型衛星打上げ機会の提供事業」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普及させるため、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。