

小惑星表面探査のための CubeSat 放出型多脚式自律移動ロボット研究

千葉工業大学 先進工学部 未来ロボティクス学科

22C1704 鷲尾 優作

2025 年 5 月 8 日

1 目的

本計画書は、修士課程の研究計画を明確化し、指導教員との合意形成を図ることを目的とする。

2 研究背景

近年、小惑星探査は、地球衝突天体への対処や、宇宙資源の活用を目的とした探査の観点から注目を集めている。従来の小惑星探査機は、サンプル採取ミッションを除けば、探査機本体へのリスク低減のため、天体表面への極端な接近を避け、上空からのリモートセンシングによって観測を行ってきた。しかし、この方法では表面の微細構造観測に限界があるため、日本の「はやぶさ2」では、図1, 図2に示す表面観測用ロボットの投下が実施された。



図 1: 小型探査ローバ MINERVA-II1[7]

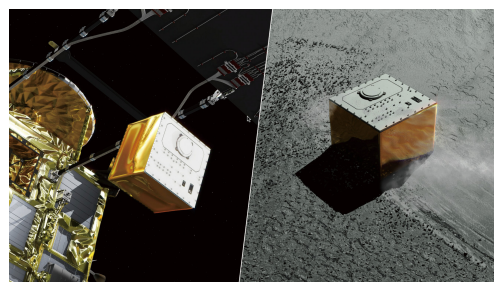


図 2: 小型着陸機 MASCOT[4]

MINERVA-II1A/B[7] は天体表面着地後ホッピング移動で観測を行うことができたほか、MASCOT[6] は着地後1度だけ姿勢変更できる装置を備えていた。ただしどちらも、任意の地点への選択的な移動は困難であり、実証用の実験機の性格が強い。そもそも小惑星表面探査機は、表面の所望する任意の地点に着地しデータを取得できることが理想であるが、微小重力かつ不整地での運用が求められ、移動以前に着地そのものが困難である。初代はやぶさのMINERVA[8] が放出後の方向不良で失敗した事例、欧州の彗星探査機ロゼッタ搭載のフィラエ [2] がアンカー作動不良により意図しない場所に着地した事例など、着地後の位置制御・固定に課題が存在する。こうした課題に対し、以下の2つの方向性が考えられる。

- 探査機の台数を増やし、着地の不確実性を緩和する手法
- 各探査機に移動機能を持たせ、着地後に自律的に目的地へ移動する手法

後者の点では ETH Zurich 大学が Space Hopper と呼ばれる小惑星向け多脚式ホッピング型ロボットを開発中であり、脚を用いることで小惑星表面の不整地を移動することが可能となる可能性が示唆されている [3]。

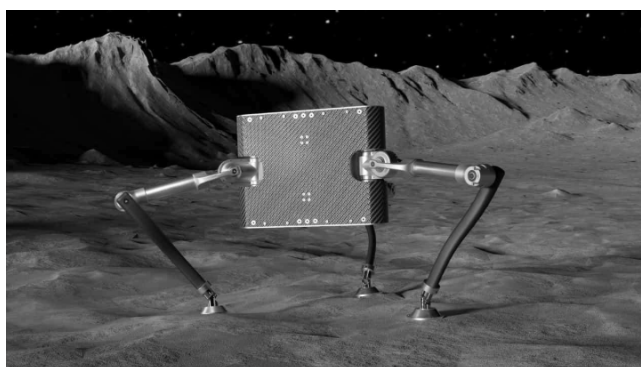


図 3: Space Hopper[3]

一方で、近年普及が進む CubeSat は、1U（10cm 立方）を基本単位とする規格化された小型衛星であり、低コスト・短期開発を実現している。ESA の「Hera」ミッションでは 2 機の CubeSat が深宇宙へ輸送されるなど、応用範囲が拡大しつつある [1]。

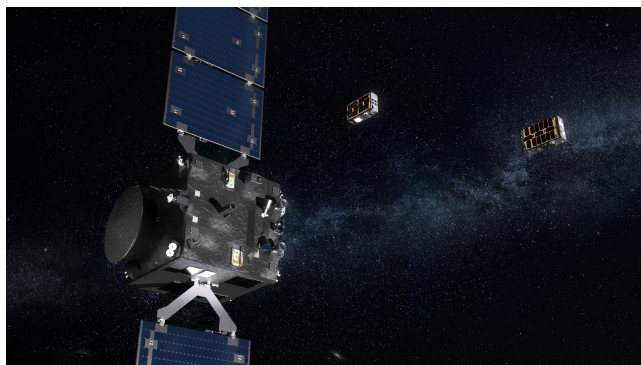


図 4: Hera ミッションにおける CubeSat の放出 [1]

また、民間による小惑星探査の試みも活発化しており、マクサー社の「サイキ」や、2028 年打ち上げ予定の ExLabs 社「SERV」に搭載される千葉工業大学製探査機（非移動型）など、ロボットの小惑星への輸送機会も増加しており、今後ペイロードは CubeSat 放出機構に収容可能なものが主流となると考えられる。

3 研究目的

従来の小惑星表面探査機は、移動性能、位置制御に課題が存在していた。一方、CubeSat に代表される超小型衛星は、規格化により複数機の同時投入が容易となり、探査機の冗長性確保や、着地失敗リスクの低減に寄与する可能性を有している。さらに、多脚機構の導入は、小惑星表面の環境に対応し得る移動機構であることが示唆されている。以上を踏まえ、本研究では CubeSat 放出機構に適合し、小惑星表面での観測機会を拡張可能な多脚式自律移動ロボットの設計および開発を行い、次世代の小惑星表面探査の手段を獲得することを目的とする。

4 研究内容

本研究では、以下の 2 点を中心に取り組む。

1. **機体設計**：CubeSat 放出機構に収容可能な多脚型機構を設計する。
2. **自律制御系**：ロボットの搭載コンピュータ上に経路計画アルゴリズムを実装し、任意の観測地点への経路計画が可能な自律移動機能を実現する。

設計・開発は、筆者が 2025 年度に実施する小惑星アポフィス向け探査機の設計知見を踏まえ、後継機としての要求仕様を随時反映しつつ進める。

5 研究スケジュール

2025 年 4 月から学部 4 年時に先行機の設計を行い、2026 年 4 月から修士課程に進学後、移動型ロボット試作機の構想設計を行う。修士課程入学後は、宇宙科学技術連合講演会、IROS、アストロダイナミクスシンポジウム等の学会において、研究成果を発表する。

表 1: スケジュール案

期間	内容
2025 年 4 月から 12 月	先行機の開発
2026 年 1 月から 3 月	具体的な後継機の仕様検討
2026 年 4 月頃から	試作機構造設計
2027 年 4 月頃から	試作機ソフトウェア設計
2027 年頃	国際学会への論文投稿

6 期待される成果

CubeSat 放出機構と組み合わせて運用可能な自律移動ロボットの試作機が完成する見込みである。小惑星表面探査機において、探査機の冗長性確保や、多点観測の柔軟性向上といった新しい観測手法の確立が期待される。

参考文献

- [1] Esa - hera asteroid mission' s cubesat passengers signal home. https://www.esa.int/Space_Safety/Hera/Hera_asteroid_mission_s_CubeSat_passengers_signal_home, accessed 2025-05-07.
- [2] Esa - rosetta. https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Rosetta, accessed 2025-05-07.
- [3] Spacehopper - legged locomotion for low-gravity environments ethz. <https://spacehopper.ethz.ch/>, accessed 2025-05-08.
- [4] 小型着陸機 mascot — トピックス — jaxa はやぶさ 2 プロジェクト. https://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20181002_MSC/, accessed 2025-05-08.
- [5] International Organization for Standardization. Iso 17981:2024 space systems — cube satellite (cubesat) interface. *ISO Standards*, 2024.
- [6] C. Krause, U. Auster, J. P. Bibring, J. Biele, C. Cenac-Morthe, F. Cordero, B. Cozzoni, C. Dudal, D. Embacher, C. Fantinati, H.-H. Fischer, K. H. Glassmeier, D. Granena, M. Grott, J. T. Grundmann, V. Hamm, D. Hercik, T.-M. Ho, R. Jaumann, K. Kayal, J. Knollenberg, O. Küchemann, C. Lange, L. Lorda, M. Maibaum, D. May, Y. Mimasu, A. Moussi, T. Okada, J. Reill, T. Saiki, K. Sasaki, M. Schlotterer, N. Schmitz, N. Toth, Y. Tsuda, S. Ulamec, T. Yoshimitsu, S. Watanabe, and F. Wolff. *MASCOT—A Mobile Lander On-board the Hayabusa2 Spacecraft—Operations on Ryugu*, pp. 559–575. Springer International Publishing, Cham, 2022.
- [7] 宇宙航空研究開発機構. アポフィス観測の国際状況. <https://www8.cao.go.jp/space/committee/27-kagaku/kagaku-dai62/siryou3.pdf>, accessed 2025-05-07.
- [8] 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所. 探査ロボット「ミネルバ」の放出 — 日本の宇宙開発の歴史 — isas. https://www.isas.jaxa.jp/j/japan_s_history/chapter09/06/09.shtml, accessed 2025-05-07.
- [9] 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所. 小惑星探査ローバ「ミネルバ 2」の開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 38, pp. 54–55, 2020.