



ムーンショット目標3

2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し
人と共生するロボットを実現

終了報告書

未知未踏領域における拠点建築のための
集団共有知能をもつ進化型ロボット群

國井 康晴

中央大学 理工学部



1. 研究開発プロジェクトの実施概要

(1) 研究開発プロジェクトの概要

本研究開発プロジェクトは、難環境として宇宙環境を想定し、特に未知未踏領域である月面溶岩チューブ(火山性地下トンネル)での探査と拠点建築を AI ロボット技術により実現し、人類生活圏の拡大による宇宙社会を創造し、さらに未来に向け太陽系内外へのフロンティア拡大を目指す。月の溶岩チューブは天井の厚い土壌により、宇宙からの放射線と飛来物(大気がないため減速せず小さな物でも衝突は脅威)から堅く防御され、昼夜の温度差が安定し、比較的地球に近い環境を有し人類の恒久的安定居住環境として期待されている。一方、月の溶岩チューブは、軌道上からの観測にて存在が確認されているが、土壌に妨げられ内部環境に関する一切の情報がなく、地上と異なる物理パラメータのため生成過程などの予測が困難である。このような人類未踏の未知環境における探査や拠点建築などを考える時、複数の大型ロボットを用い、高性能化と高精度化による高度な自律制御と高い運用安全性の確保を目指すのが一般的である。しかし人による修理整備やインフラからの情報支援などが期待できず、さらにロケット輸送の能力や機会が限られる深宇宙環境において、その方向での高い未知環境適応と運用リスク回避の能力確保は現実的に困難であり、そもそも機体開発でさえ容易ではない。そこで本プロジェクトでは、従来と考え方を変え、小型で低機能なロボットを複数用い、群を成して協調、進化しながら持続・存続し、探査、輸送、拠点構築の作業を実現することを狙う。対象領域内のロボットの存在確率を制御することで各ロボットは高度な機能や高い計測制御精度を必要とせず、ロボット群が対象領域内を確率的に網羅し、その領域において場を形成することで作業を実現する。さらにより高度な戦略情報処理のため、ロボット間情報ネットワークと各ロボットでの分散処理により形成される集団共有型 AI:「ネットワーク知能」を構築し、環境や作業の状況に対し自律分散かつ自己組織的に機能し、空間的、情動的に分断される各所において局所的に進化成長し目的を達成する。そして知能の分散実装と進化に向け、小さく分解した機能の組合せと共有により機能構成が可能かつ柔軟に変更可能な仕組みを有することで知能とロボットの進化発展を支える可変構造型制御装置を実現する。これら群ロボットと集団共有型 AI を統合した AI・マルチロボットシステムにより難環境への生活圏拡大とフロンティア開発を実現する。

研究開発成果は、宇宙に限らず海中や森林、砂漠、農地、都市などのさまざまな環境で、存在の位置や時間が曖昧な事象の観測効率が向上できる新たな探査・観測・記録手段として様々な活用可能性がある。例えば資源探査、インフラなどの検査作業、危険・事故などの監視予見業務などへ適応し、さらに将来、ロボットがマイクロ・ナノ領域で構成可能になるなどにより、医療現場をはじめ、応用が広がる可能性を秘め、未来の基盤技術として人類の未来生活の維持と発展に貢献するものである。

(2) 研究開発プロジェクトの実施概要

本プロジェクトの技術内容を大きく分け、簡単化すると「ロボット群の制御技術(群知能と集合型知能)」、「機能と構成の小型制御処理技術(機能の成長と進化)」、「不整地用小型ロボットハードウェア技術(移動、輸送)」、「月面ミッション検討(宇宙環境利用)」となる。これらは基本的には各研究項目課題に対応している。我々は 2030 年(2050 年)に活用可能な技術確立を目指し、2022

年に作り込み、2023年より要素技術の研究開発をスタートした。まず提案構想の具体的検討に必要な新規技術パーツを揃えることを目指し、2025年以降に一部の要素技術融合により基礎的かつ具体的な提案構想の検討を可能にする計画となっている。

全体として計画通りに進捗し、2050年を見据えて提唱した実不整地で移動・活動する小型ロボット群を大規模に動作させた検討やネットワーク知能などの概念的な存在が現実的に実現可能なインフラ技術が揃い、総合的に構想技術の議論が可能な段階に達しつつある。また技術実証として、2030年までに世界初の月面縦孔探査の実現を目指した技術検討(2024年に開始)に関しても、利用環境解析、各研究開発成果に基づいた実装応用した宇宙仕様化の検討、フライトモデル探査ロボットの設計、開発および試作を行っており、先行して開発された技術要素の一部は、Artemis 3計画で月面に輸送される科学観測機器の制御装置などへ実装されるなど、すでに実用化も始めている。

以下に、各技術内容の実施内容を示す。

ロボット群の制御技術(群知能と集合型知能)

- 個々のロボット制御を確率行動によって単純化し、自己組織化的な群形成を促すことで、より大規模な群の構成を可能にし、50台規模の実ロボットを用いた群形成と群行動を可能にした(理論上の台数制限なし)。また、専用計測装置なく、確率的な環境相互作用情報を確率的に解析利用し理解することで、複雑環境に対して回避等の戦略行動を実現することが実現された。実現方式では、群制御の自由度が向上され、群によって様々な共同作業に発展でき、簡単なコンテナ輸送も初期実証した。
- 群制御技術をロボット以外に昆虫サイボーグにも適応し、群形成と群誘導制御を実現し、生物の行動制御との親和性を確認し、制御方式と昆虫サイボーグの可能性を実証した。昆虫サイボーグは、現状のロボット技術を凌ぐ移動能力を示す一方、それぞれに個性と意志を有するため制御性能には問題が生じるが、本結果により将来の活用可能性が開かれた。
- 群や群間協調などの上位戦略行動決定のためのAI機能として、複数のタスクに対して自律的な群形成や役割分担により目的作業を自律実現する機能を深層強化学習+分散協調アルゴリズム + LLM 活用の相互保管(助け合い)により実現した。実計測した自然洞窟地形形状と仮想物理法則のあるシミュレータ環境を構築し、提案AI機能が動作することを確認した。なおシミュレータ環境はプロジェクト全体構想と各技術を早期に検討可能なものとして実現させた。

機能と構成の小型制御処理技術(機能の成長と進化)

- 機能をモジュール化し、ソフトウェアとハードウェアにより実装、それらを接続・構築することで様々な機能が実現可能なアーキテクチャを設計し、実装した搭載処理装置として実現した。実ロボットに実装して、低消費電力(1[W]以下)で群行動、AI画像処理などが安定動作可能でロボットで実利用可能であることを確認した。またロボット間の通信にUWBによる通信機能を実装し、実環境実装に向けて電波ビーコンによる群形成と誘導を実現した。同時に今後の実証とネットワークを介した分散処理による集団生成型知能「ネットワーク知能」の実装インフラに向けた検討を可能にした。今後の研究開発ツールとして、機能の組み換えが可能な処理制御用のソフトウェア環境の開発し、基礎的な開発、運用環境を実現した。

不整地用小型群ロボットハードウェア技術(移動、輸送)

- ・車輪、跳躍などの研究成果を実装した融合設計の最適化を前進させ、設計完成度を向上した小型探査ロボット「RED」を実現した。想定環境により、車輪形状、車輪構成などの自由度を確保した柔軟設計を可能とし、それらの動作・性能を JAXA 探査実験棟の大型砂上走行実験設備および地上に存在する実際の溶岩チューブ(万野風穴など)にて動作実証した。提案構想の研究開発において、ロボットの実環境での移動・動作能力が足枷とならない状況を実現した。
- ・小型な跳躍移動装置を実現し、搭載した小型ロボット機を複数開発した。小型機の移動能力上の不利の回復できた。従来、回避が至上命題となる転倒や衝突などのリスクの受容戦略が絶対ではないことを確認した。
- ・テラメカニクス(柔軟地盤との接触力学モデル)を応用した車輪を複数設計、実現し、小型ロボットに搭載した。JAXA 探査実験棟の大型砂上走行実験設備の丘(最大斜度 25 度)を、従来難しいと考えられた小型機で登坂し、自由に移動できることが確認できた。また国内外の溶岩チューブや洞窟にて走行試験を行い実環境にて走破が可能であることを確認した。
- ・小型探査ロボットの未来構想モデル「Green」に対して提案構想に従い動作可能な初期試作モデルを実現した。これにより提案した新型走行機構:位相可変型車輪脚の想定していた走行能力が実際に示され、機械的な実現方式を実証、今後の議論に向けた課題議論などが進捗した。

参考) JAXA 探査実験棟の大型砂上走行実験設備は、砂(硅砂5号)で満たされ、中央に小山(丘)が存在する大型ローバなどの検討に使用される実験環境である。砂のみで構成し、粒径が揃い、実環境に対して過酷な走行環境となっており、特に小型機には厳しい環境となる。また月面の砂、レゴリスに比べても摩擦が少なく、その点でも過酷な環境と考えられている。

月面ミッション検討(宇宙環境利用)

- ・月面の縦孔への到達のためのミッション設計を実施し、国内月面輸送サービス企業と共同で輸送技術上における課題等を検討、反映しミッション設計を策定した。それに基づき、欧州などと国際協力を含めて打ち上げ機会獲得の議論を進めた。
- ・小型ロボットのフライトモデル設計において試作実験機 RED をベースに実施し、防塵や放熱、振動対策などを講じた上で試作機を設計・製造して設計確認を行なった(期待重量 2.5Kg 程度、最終目標 2.0Kg 以下)。また設計データを用いて、打ち上げ振動解析、月面上での機体の熱解析を実施し、課題点を明らかにして、反映した設計と試作機の改良を行なった。
- ・開発した処理装置に対して放射線試験を実施し、1[W]以下の動作電力、過去の耐放射線性能の数倍の耐性を確認した。この結果をロボットの熱設計と解析に採用したところ、従来の 50%減の発熱となり、宇宙用小型ロボットで課題となる熱設計の制約緩和に道を開いた。また社会実装と実環境試験のため Artemis3 で月面に輸送される科学観測機の制御装置として共同利用を検討し、実装を進めた。その際、将来の群ロボット利用時のコスト抑制に向けて地上部品を使った試験を実施し、良好な結果を得た。
- ・着陸機を含む月面到達法の議論より、可能な到達システムを設計検討し、空中投下型の現地投入カプセルを構想し、策定した多数のアイデアから実現性が高い2つのモデルを基礎設計、試作し、JAXA 探査実験棟を利用して砂上、約 6m からの落下実験により衝撃の状態を計測し、衝撃吸収とカプセルおよび探査機の展開などの機能を実証確認した。将来に向け、実験結果に基づいて、カプセル形状と展開、ロボット搭載法、衝撃吸収方式の設計を進展させた。

(3) プロジェクトマネジメントの実施概要

プロジェクトマネジメント体制として、代表機関内では中央大学研究開発機構に研究開発ユニットを設け、研究のマネジメントおよび PM 支援体制を整えた。PM 支援チームとして、プロジェクト専従 URA2名、事務担当者2名を配置し、関係各所との連絡調整や取りまとめ等のマネジメントを行い、PM および PI を支援した。中央大学 ELSI センターと連携し、ELSI 課題への対応を実施した。海外での実験等により安全保障輸出管理へのさらなる対応が生じるため、中央大学研究支援室との連携を強化し対応にあたった。PM アドバイザーとして 2 名に依頼し、1 名には将来的な事業化や起業に関する助言を求め、1 名には研究開発項目4で目指す宇宙ミッションにおいて重要なステークホルダーとなる諸外国(UAE、オーストラリア等)との調整などを依頼した。その結果、事業化や起業に関する検討が進捗し、また、諸外国との調整も円滑に進捗した。

2. 研究開発プロジェクトの実施内容

(1) 研究開発項目1:進化型ネットワーク知能システム

群形成および群誘導に関わる技術ならびにその自律化アルゴリズムに関して議論検討し、分散して取得された情報の分析と意味理解や違和感の解析を行い、システムの戦略と行動の策定に対して提供する。さらにその戦略および行動策定のために群共有ネットワーク上に存在させる“ネットワーク知能”として構成するための自己組織化および行動戦略生成を AI 技術とロボット技術から構築する。探査・調査作業を対象にスキームを構築したのち、最終的に搬送行動機能を統合する。

研究開発課題1:進化型群ロボットの行動制御とネットワーク知能の搭載設計

実施内容:本課題では、個々の低機能小型移動ロボットによる群形成および群誘導に関わる技術ならびにその自律化アルゴリズムに関して議論・検討し、設計および実装することが目標である。計測制御能力の制限された低機能な個体ロボットにて担当領域やフォーメーションなどを固定せず、個体の位置制御などを行わずに群を形成する手法を検討し、環境情報と個体の行動記録などを用いた自律的な行動パラメータ設計手法と更新アルゴリズムを検討した。これにより個体ロボットによる群形成パラメータを更新し空間や作業などに対して適切な群サイズと行動等を決定、更新タイミングなども制御することで障害物や壁等で隔てられた空間に対する空間探査能力や各空間をつなぐ狭小空間を含む空間通過能力の向上を目指した。個体の行動と環境の相互作用により生じる個体行動のリミットサイクル状態による捕獲状態からの脱出率向上を、行動阻害に対する起因して定義するストレス状態により行動パターン変化や跳躍移動を行わせることで検討した。

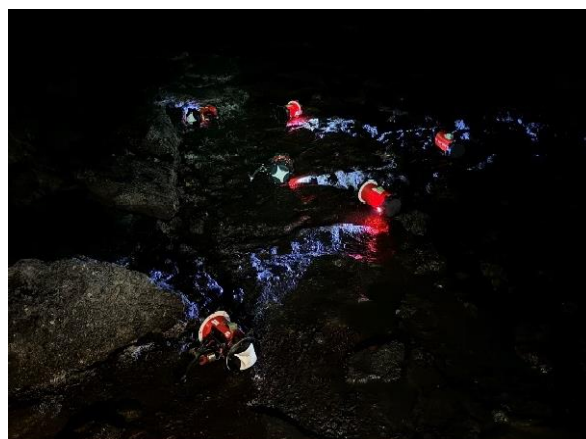
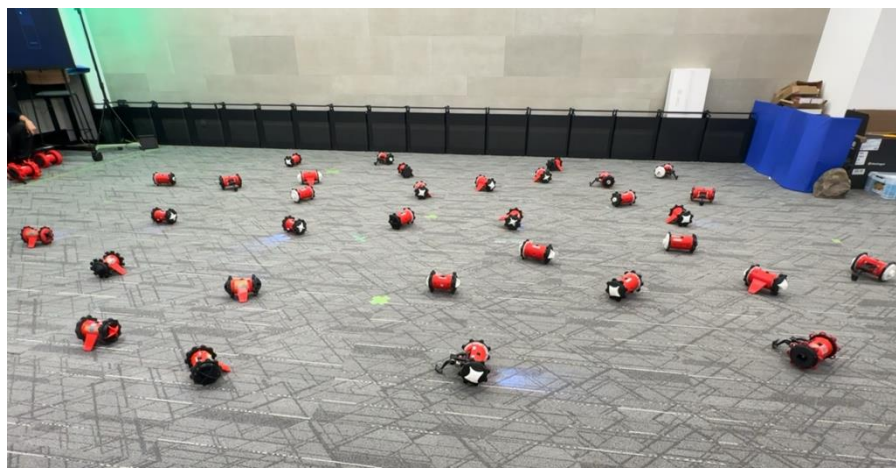
ある地点を指し示す存在をマーカ(群中心マーカ)とし、位置情報などに大きな誤差をもち高いあいまい性をもつと定義する。群形成はマーカ情報に基づき実施され、マーカを移動させることで個体及び群を誘導する手法を検討する。マーカには物理的に存在する実マーカおよび複数の実マーカの組合せにて仮想的に作り出される仮想マーカが存在する。ここで実マーカの生成法として光学式と電波式が想定され、適用環境、コスト等にて利用選択される。単群を対象にしたマーカによる基礎的な誘導方式の議論から、環境や個体、群の状態を考慮した群誘導方式、複数群の誘導方式および群間協調行動の議論へ発展させ、マーカ方式の違いを考慮した誘導法を検討した。さらに研究開発項目1-課題3と協力して、環境、個体、群の状態を考慮した複数群の誘導方式を議論し、複数群誘導による網羅率向上と対応領域の拡大及び群行動の知能化、群間の協調・協

働動作について検討し、群単位の作業役割分担や行動戦略策定機能の実現と自律化を目指した。

路面・周囲状態のセマンティックな理解からの個体および群の行動判断のため、ロボットが取得可能な情報を極力制限した状態での取得情報と環境状態解析および行動反映に関して検討を行った。さらに取得情報は上位層に提供され、他の群(個体)から収集・長期保存された情報を用いた解析と活用に関して課題2、3と協力して実施した。

各検討は研究開発項目1内の他の課題と協力して行い、それらの知見を活用することでロボットへ実装、評価を実施し、適宜フィードバックしながらマイルストーンの達成および実証実験の実現を目指した。また研究開発項目2の進化型制御装置の開発状況に合わせて共有ネットワーク上への実装を検討した。さらに月面ミッションの実現に向けてシステム性能などを考慮した検討結果の実装活用も目指し、研究開発項目4と協力して研究開発した。

その結果、ネットワーク知能構築のためのアルゴリズムの設計、検証、および実装が完了し、当初の目標を達成した。また複数群による自律的な群協調などの機能の検証も達成した。最終年度にて月面探査ミッションを想定した機能設計を行い、模擬環境にてネットワーク知能アルゴリズムによる自律探査が行えることを実証できた。



実環境における動作試験

課題推進者: 國井康晴(中央大学研究開発機構)

研究開発課題2: 群収集情報の解析による進化型ネットワーク知能の制御

実施内容: 本課題では、ロボットおよび群の情報および制御の管理運用システムを研究開発し、全体システムの運用を実現することが目標である。個体ロボットが取得する計測データ、個体および群の活動データを管理し、それらの解析からロボットおよび環境などの状態、周囲状況などの理解を行うことを目指し、ネットワーク知能の解析機能およびデータベース機能の基礎構築を目指した。

各個体ロボットと群の存在位置情報には大きな誤差を含んだあいまいな情報となることが前提となる場合、座標などの位置情報に代わり観測地の繋がり情報を幾何学的に扱う空間情報管理手法が求められる。研究開発課題1と協力して計測点または領域ノードに対するトポロジカルな表現を取り入れたデータ構造を検討して設計し、取得した個体、群の行動データより、領域ノードに対する行動ストレス情報を算出し、領域評価などに利用可能にするなど群行動などに活用可能な情報とデータ構造を検討した。また取得データから違和感情報を解析し、異常や危険認識などに活用できる様にし、研究開発課題1の知能化に協力する検討を実施した。さらに研究開発課題3および4と協力し、ネットワーク知能の設計検討を行い、データの利用の検討を本課題にフィードバックした。これらの検討結果に基づき、研究課題1と共に実ロボットを含む群ロボットシステムの完成を目指した。また、研究開発項目2 研究開発課題3で検討される管理運用システムとの統合を実施し、月ミッション実現に向けては月面探査システムからの情報に基づいた地上用のデータおよび探査システムの運用管理解析ソフトウェアの構築を目指し、研究開発項目4と協力して開発にあたった。

その結果、(1) 環境推定とロボットの状態(位置・姿勢)推定を同時に実施する物理情報付きニューラルネット(PINNs)を用いたアルゴリズムの検証が進行した。また、推定した自己移動経路と環境情報を基に地図を作成し、曖昧トポロジーマップを生成するアルゴリズムを構築した。

(2) ロボットが収集した情報を共有するためのデータ構造を設計し、シミュレータを用いてデータの生成とシステムの評価を行った。さらに、ネットワーク知能の概念整理を実施した。

(3) 物理ロボットと同等のセンサ(IMU、距離、モータ角度、モータスピードなど)を再現し、かつ物理ロボットと同一のアクチュエータを制御するプログラムで動作可能なシミュレータを構築した。このシミュレータにより、群行動や単独行動を決定するAIの学習に必要なデータや実行環境を提供できた。また、ロボットシステム全体の実行や評価も可能となった。

(4) 月面探査ミッションの想定シナリオを策定し、要素技術の抽出を行った。

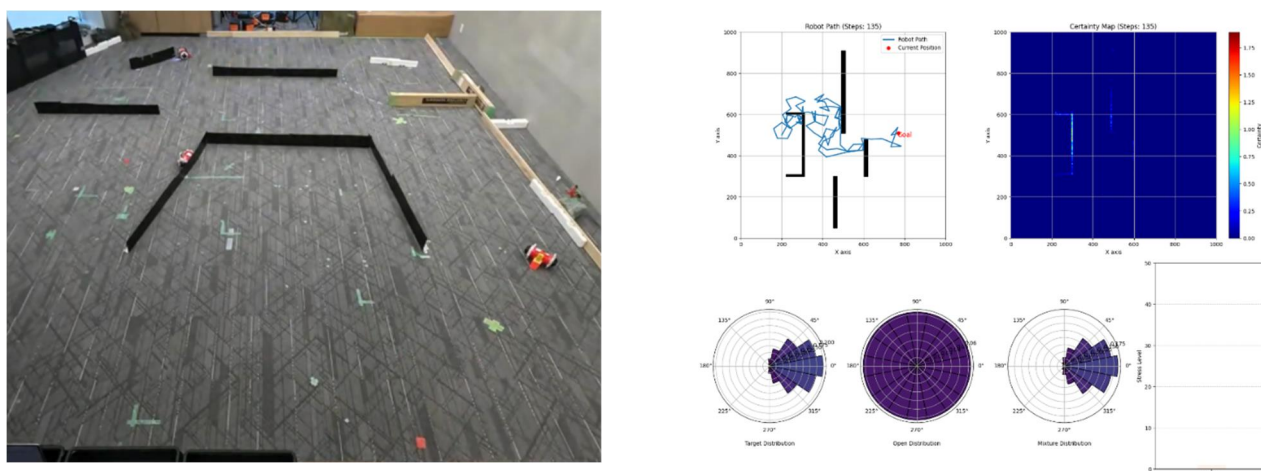
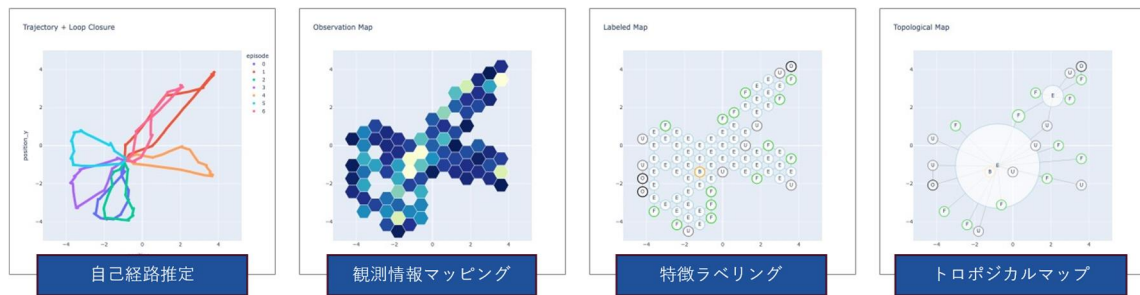


図 低センシング性能における未知環境の障害物回避(左)と内部マップ



曖昧トポジーマップ生成アルゴリズム

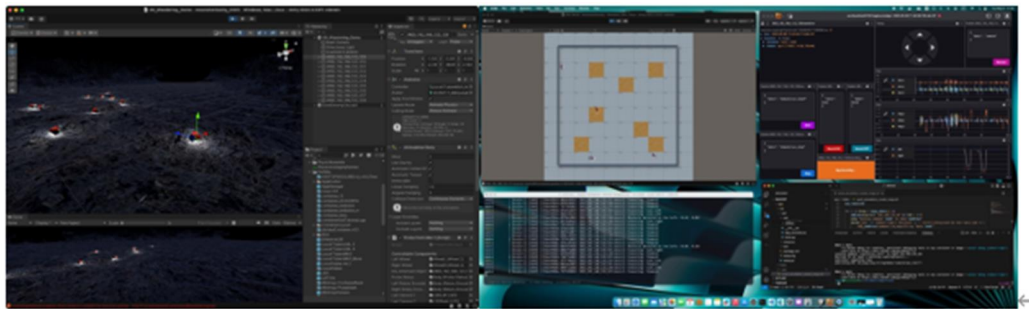


図 シミュレータ画面：左) 画面構成の例、右) シミュレーション実施中の画面

課題推進者: 宮口幹太(竹中工務店技術研究所)

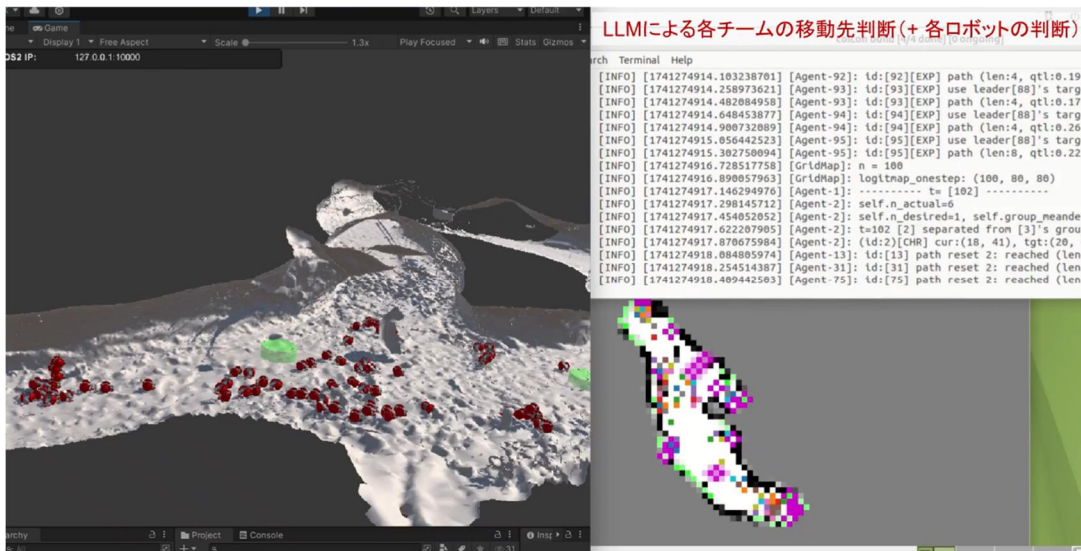
研究開発課題3: 進化共進化をともなう自律分散型ネットワーク知能の設計と実現 1

(ネットワーク知能: 群の組織および行動の自己組織化と相互作用)

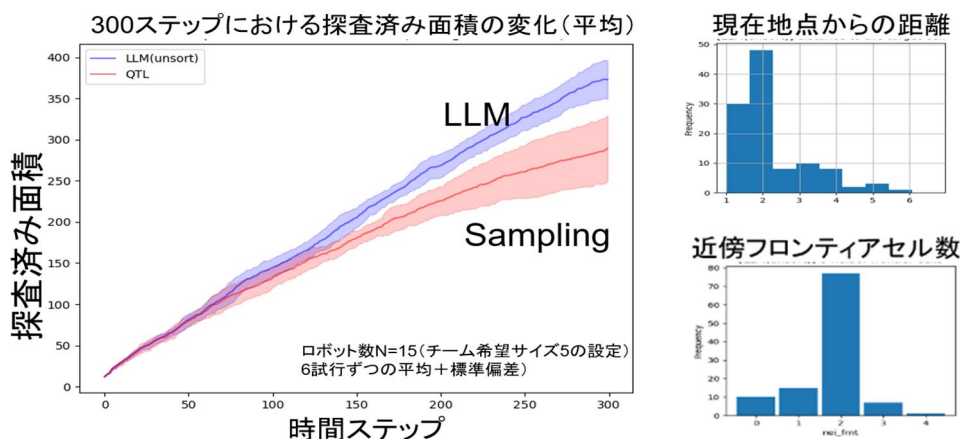
実施内容: 本課題では、事前環境情報がない溶岩チューブ内で探査・調査・コンテナ搬送などの作業を行うために、動的に個体配属及び群組織構造を変化させ、自律的に個体と群の役割と行動を決定できるネットワーク知能および必要機能を設計し、機能統合を可能な限り行いながら実現を目指した。溶岩チューブ内は暗闇であるため、システムに発電機能は搭載されず、用意された中継地点などのパワーバンクなどからの供給となると想定され、電力量など考慮したアルゴリズム設計、同様に通信距離等を考慮して設計を行った。また、群システムが有する情報は共有データベース内に格納されるが、各群は存在距離、通信状況などにより常に同期できるとは限らず、非同期状態での行動を考慮したシステム設計を行った。利用可能なデータに関しては研究開発課題2と共に議論・設計検討し、研究開発するアルゴリズムおよびシステム内で活用する。また初期的には各個体の機能と性能は基本的に同等で均一な状態であるとして仮定し、数の代替性から環境等に対する運用リスクを管理し、個体と群の組織と行動を検討した。さらに製造上の性能差や経年変化、学習状況などによる個体差を盛り込んだ検討も行い、特に役割分担では、個体性能の製造上のバラつき、経年劣化、破損などの状態を考慮した判断を可能にする。本検討では、研究開発課題2との協力を重視して進め、実装においては課題1および2と協力した。さらに、月面探査ミッションの実現に向けては研究成果をカスタマイズし、ミッション仕様に沿った学習機能を設計、実装を目指し、研究開発項目4と協力して研究開発した。

初年度においては各機能の基本設計を具体化し、単純化した状況において機能とアルゴリズムの検討を、シミュレーションを通して進め、マルチエージェント強化学習に基づく探査戦略獲得の定式化を進めた。次に、事前環境情報がない溶岩チューブ内での探査・調査・コンテナ搬送などの作業

を動的に個体配属及び群組織構造を変化させ、自律的に個体と群の役割と行動を決定できるネットワーク知能および必要機能を設計し、機能統合を可能な限り行いながらのシステム実現を目指し開発継続し、最終年度には「(1) 蓄電量などのシステム制約条件下の複数群協調による探査能力の向上」、「(2) 機械学習を利用した自律的な群組織生成の実現」、および「(3) 情報接続密度に濃淡がある環境におけるモデル共有機能の実現」に関する研究を実施するとともに、初期ネットワーク知能の実証評価が進行した。結果、深層強化学習や大規模言語モデルなどの機械学習手法を用いた探査や運搬などの個々のアルゴリズムを設計し、ロボット群の自己組織化、探査範囲拡大の評価、さらには自律的タスク切り替えについて、シミュレーションレベルで実現した。さらに、研究開発課題2および研究開発課題1と協力し、より緻密な評価が可能な統合シミュレータを開発し、地図獲得やトポロジマップの表現方法に関する検討を深めることができた。



大規模言語モデル(LLM)による溶岩チューブ内での探査例シミュレーション



近傍フロンティアの確率的サンプリング vs LLM の探査効率 (左) および中期的探査目的地として選ばれたフロンティアセルの特徴を表すヒストグラム (右)

課題推進者: 川嶋宏彰(兵庫県立大学)

(2) 研究開発項目2: 個体進化および群共進化機能の実現

個体進化および群共進化は、個体ロボットに搭載されるタスク機能の更新機能と搭載機能の個体間共有機能を基礎とする。個体搭載機能は、基本的に低粒度の機能群(機能モジュール)に分解される。ロボットが動作する際に必要とする最低限の基本機能は低粒度機能(モジュール)として全ての機体に搭載され、速度、消費電力等のために ROM や FPGA 等によりハードウェア実現される。それ以外の個体固有の機能拡張のための機能モジュールや、あとから追加された機能は RAM などに展開する。そして、より複雑なタスクは、低粒度機能モジュールの共有メモリを利用した仮想接続により高粒度機能(タスク)として実現され、頻繁に利用される高粒度機能はマクロモジュールとして定義、他のモジュール群やタスクからモジュールとして利用可能にする。ロボット上のタスク実現は、モジュールの接続情報、接続ネットリストとして管理され、機能生成や更新は接続ネットリストおよび追加モジュールの送信により容量を抑えて実現され、これにより個体は常に変化、成長、進化が可能になる。そして機能生成過程は、将来的に自律化されモジュールや接続の選択などが環境や作業に応じて行われ、自律的な進化過程に入ることが想定される。また各個体が有するモジュールは、個体間をつなぐ通信ネットワーク(個体共有ネットワーク)を介して共有可能であり、自らが持たない他の個体が有する機能を自在に利用となる。このため、ある個体の機能更新は群の機能更新にあたり、新規機体の追加、機体損耗による入れ替えなどが新陳代謝的な効果として群全体の進化・成長につながっていく。さらに学習においてはハードウェアや環境などが影響を与えるが、他の機体への機能提供により他の機体情報による学習なども可能になるため、群全体の共進化が可能となる。そして共有ネットワークおよび機能共有により、フォグコンピューティングやグリッドコンピューティングの形態を可能とし、直接的な期待機能ではないが各機体に分散搭載された知能の構成が可能となり、将来的にネットワーク知能として存在へ発展することとなる。

本研究開発項目では、以上の個体進化、群共進化の機能と仕組みおよびネットワーク機能に関して研究を実施し、その成果を用いて各機能の設計後、最終的に制御装置を設計・製作した。また各機体への搭載機能や共有ネットワークならびに進化機能および個体ロボットと保有情報の管理運用を行うためのソフトウェア群を開発した。これらの制御装置およびソフトウェアは、研究開発項目 3 で開発した個体ロボットに搭載され、実証実験を行った。

研究開発課題1: 個体進化および群共進化のため制御機能の柔軟性向上と高速処理化

実施内容: 月面溶岩チューブ内におけるロボット間通信方法の策定と確立を目指すにあたり、小粒度の機能をモジュール化し、それらを接続して高粒度タスク化する仕組みを基礎とし、個体ロボットや中継局のシステム搭載機能の柔軟な更新と拡張を可能にすることで個体ロボットの進化、個体ロボット間に情報共有ネットワークを構築する機能、共有ネットワークを介して機能モジュールを共有する制御機能を研究開発した。

まず、機能構造の柔軟化を可能にする提案アーキテクチャの設計と実装について、探査機 LEV1 のシステムを用いた検討を実施し、さらに研究開発課題 2-2 と連携して試作機の評価を行った。その結果、研究開発課題 2-2 の低消費電力かつ高速処理を実現可能な処理装置の開発につながり、本研究の進展に大きく貢献した。

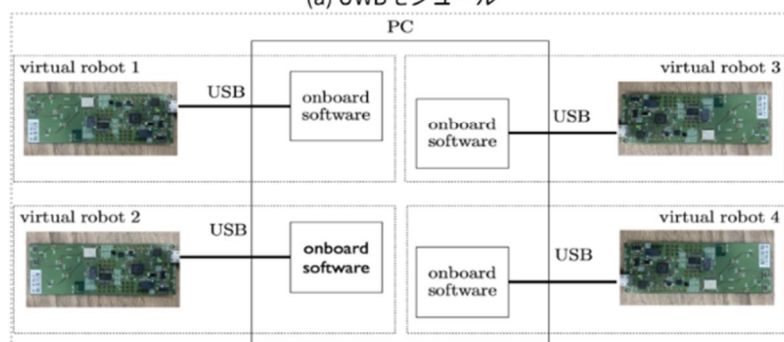
次に、群ロボットの社会実装に向けた基盤技術として、群形成の物理的要素となる通信システムに着目した。具体的には、UWB 通信を用い、富士宮市内にある溶岩洞窟内部およびオーストラリアにある鍾乳洞において電波測定試験を行い、多重反射の影響を調査した。この試験により実装課

題と将来性を評価することができた。加えて、通信アルゴリズムについては、多対多通信を模擬した数値シミュレーションを実施し、位置・姿勢精度を評価した。その成果に基づき、研究開発課題 1-1 と連携し、群形成の実証に成功した。

さらに、月面探査ミッション実現に向けた要素技術の検証として、電子回路部品に関する放射線照射試験を実施した。これにより、地球直接通信を可能とする S 帯送受信機や電力制御回路を含む電子回路部品を試作し、月面ミッションに適用可能であるとの見通しを得ることができた。



(a) UWBモジュール



(b) 実験構成

UWBモジュールと実験



洞窟内電波測定試験

課題推進者: 吉光徹雄(宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所)

研究開発課題2: 高処理速度に向けた低消費電力アーキテクチャおよび共有ネットワークを有する進化型制御装置の設計実現

実施内容: 本課題では、小型ロボット搭載用の機能進化型制御装置の完成、すなわち、処理速度の確保と低消費電力を可能にした小型ロボットの制御装置のアーキテクチャ、モジュール接続形式のタスク実現、データ処理・管理機能のハードウェア上での実現および個体間ネットワークが構築可能な進化型ロボット制御システムの実現を目指した。

画像や AI などのために高度情報処理などが可能な処理速度と消費電力のバランスを考慮した小型ロボットの制御装置を構成するため、FPGA などを用いた計算機回路アーキテクチャの設計検討を実施し、シミュレーションまたは実験による評価から設計を確定する。またモーションレベルの将来的な AI 化を想定したアーキテクチャ検討した。さらにモジュール接続形式のタスク実現に関わるデータ処理・管理機能のハードウェア上での実現方法を検討、設計、実装評価を行い、研究開発課題2-1と協力して実装設計を行い制御装置の開発を実施した。個体間機能共有ネットワーク機能を実現するための通信回路を研究開発課題2-1と協力して統合設計、通信装置として実現し小型ロボットと共に実装評価を行った。そして機能モジュールのネットワークを介した共有機能のハードウェア上での実現設計に関して検討し詳細実装設計および他の機能を制御装置上にて統合実現し、機能モジュールをネットワーク共有可能な進化型制御装置を試作、研究課題2-4と協力しての動作試験から課題検討と機能評価を行い、試作・改良のループを経て、研究開発項目3の小型ロボットに実装評価可能な試作制御装置を完成させた。また開発した制御装置の月面環境での使用を想定し、研究開発項目4と協力して宇宙部品の選定や、宇宙仕様化試験を実施し、月面探査ミッションにて利用可能な制御装置の検討を進めた。

結果、計画通りに研究開発を完了し、進化型制御装置の試作・実証およびネットワーク知能の統合を実現した。本制御装置を搭載した実機ロボットによる群制御や進化機能の実証は、今後の月面探査のみならず、他の宇宙ミッションへの展開にも資する重要な成果である。計画した全ての開発・実証工程を完了し、当初設定した機能要件(低消費電力・高処理能力・耐環境性)を備えた進化型制御装置を実現した。複数の粒度モジュールの同時実行およびロボット間の情報共有を可能とするネットワーク知能機能を統合し、実機ロボットによる群制御や進化機能の有効性を確認でき、プロジェクト全体の成果の確立に大きく貢献できた。また、得られた成果は、将来の月面環境適応仕様の開発や他の宇宙探査ミッションへの応用可能性を示すものであり、技術的基盤の確立という本課題の目的を達成した。

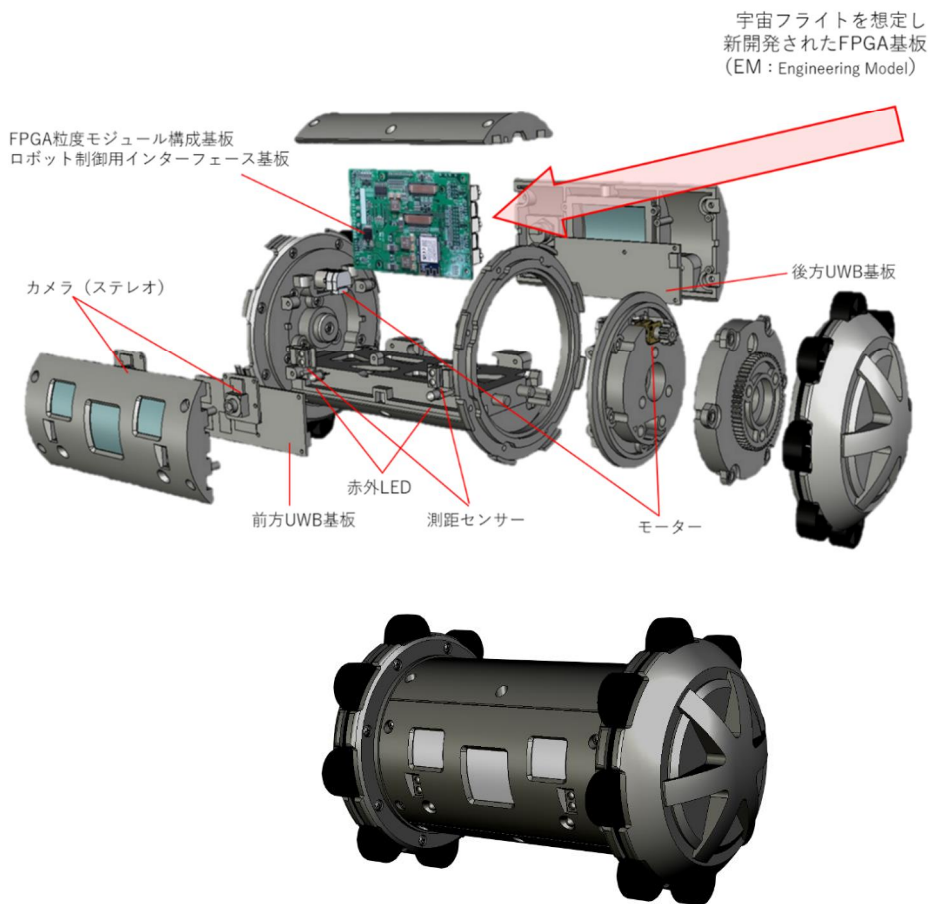


図 ロボットへの制御装置組み込み

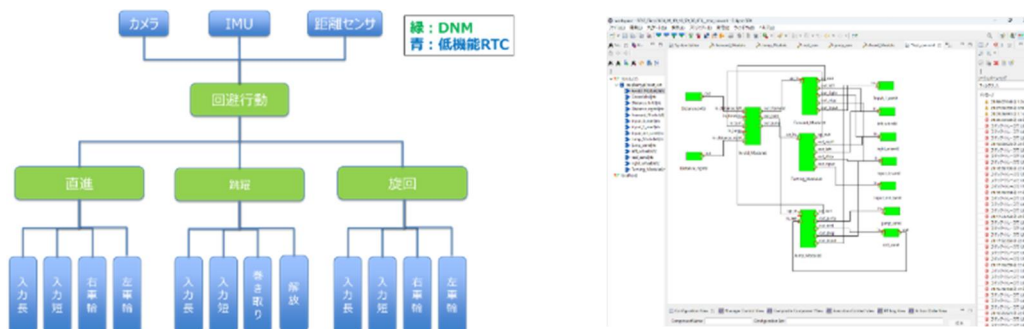
課題推進者: 廣瀬智之 (デジタルスパイス・株)

研究開発課題3: 高粒度タスク化のためのデータフロー制御による個体進化・群共進化機能の実現

実施内容: 本課題では、低粒度機能モジュールの接続による高粒度タスク化において、通常動作時・構造変更時などにおけるモジュール間接続データの制御、モジュール接続の変更・追加・削除等を実現可能にするデータフロー制御の検討と設計、ソフトウェア的な動作評価と実装が目標であった。各検討はソフトウェアやシミュレータ上で実施し、下位ハードウェア層での実現とそのため課題解決に関しては研究開発項目2-課題1および課題2と協力して議論し、ソフトウェア層を担当した。また実現に対するロバスト化や制御機能や周辺機能等に関しては課題4と協力して議論を行い、同時にモジュールのネットワーク共有機能の統合を共に実施した。検討結果を研究開発項目2-課題1および課題2に統合し、進化型制御装置を完成を目指した。また個体内およびネットワークを介した機能モジュールによるタスク実現のための操作、管理などを実現する環境の構築、個体ロボット、群、ネットワーク知能の各機能や共有データの管理運用を可能にし、動作状態を監視できるソフトウェア環境を、AI 技術、ヒューマンインタフェース技術、GUI などを用いた支援機能を付加しつつ実現

を目指した。さらに将来的な月面情報空間の出現を想定し、ネットワーク知能での活用を検討した。実現に際しては主に研究開発項目1および項目2の各課題と連携し、RTMを用いて設計、実現を検討した。モジュール構成等の支援を自律的に実施する機能を検討し、ヒューマンインタフェース技術等により運用管理オペレーションの最適化を図ると共に、システム動作情報の整理と解析から違和感情報の抽出による事故回避などを研究開発項目1ー課題2と協力して進め、最終的な統合環境の実現を目指した。共有ネットワーク上に存在する全ての情報に、月面、溶岩チューブ上で想定されるデータを仮定した情報空間におけるサービス機能を、AI技術、Web技術等を利用または発展させて設計、実現を目指した。また月面探査ミッションでの利用を目指し、探査ミッション用に次世代の運用管理システムを検討した。

その結果、個体進化および共進化のためのモジュール型アーキテクチャの設計、シミュレーション検討および動作確認が完了した。GUIによるモジュール操作と動作の可視化についても動作確認および課題検証を行った。群ロボットによる探査タスクを提案アーキテクチャに基づき構成し、月面模擬環境を利用したシミュレーションと複数群による探査動作の検討を行った。他の研究開発課題におけるハードウェア的なモジュール型アーキテクチャを搭載した実機ロボットとの連携についても検討が進み、月面探査ミッションを想定した搭載機能検討を行うことができた。



実験用車輪跳躍型ロボットでの動作確認用のモジュール型アーキテクチャの接続層
(左:接続層の構成、右:GUIによる可視化)

課題推進者: 國井康晴 (中央大学研究開発機構)

研究開発課題4: 個体間ネットワークを介したモジュール共有および接続機構の実現

実施内容: 本課題は、ネットワークを介した機能モジュールおよびタスク共有による接続機能と安定運用のための周辺機能を開発し、通信遅延や情報欠落における接続および動作情報の非同期状態などへの対応などを検討し、ネットワーク上でのデータ管理機構およびデータフローの制御機能を設計実現して共有ネットワーク上にネットワーク知能を搭載するため基盤技術を確立することが目標である。共有タスクの大規模化における課題の解決、特に個体および群の物理的な存在位置(距離)、ネットワーク強度、通信状況などを考慮した各個体への動的なモジュール割り付けとそのロバスト化を検討した。また研究開発課題3と共に、固体内接続あるいはネットワーク接続されたモジュールおよびタスクとの接続、タスク実現構造に関して議論し設計を実施した。検討結果よりモジュール共有機能をソフトウェアまたはシミュレーションに実装・完成させ、課題1および課題2に提供し、進化型制御装置の完成を目指した。さらに RTM の資産活用・統合・拡張を検討し、月面探査ミッションにおけるソフトウェアシステムの利用、搭載検討を研究開発項目4と協力して実施した。その結果、多数台の移動ロボットにおけるネットワーク知能を構成する上で、機能の共有による作

業の効率化や、障害発生時に群ロボットシステムを継続して稼働させソフトウェアプラットフォームを開発した。ロボット同士が無線 LAN により通信するシステムを前提として各機能の動作検証を実施したが、実際に月面で作業するフライトモデルのロボットにおいては電力・通信速度等の制約環境での機能実現を検証する必要性が残され、フライトモデル実装時には月面を想定した通信環境での動作確認が必要な状況であるものの、共進化機能の開発において使用した DNM (Database Node Module) において、複数の DNM を接続した場合にみられた課題については改善することができ、当初目標を達成した。

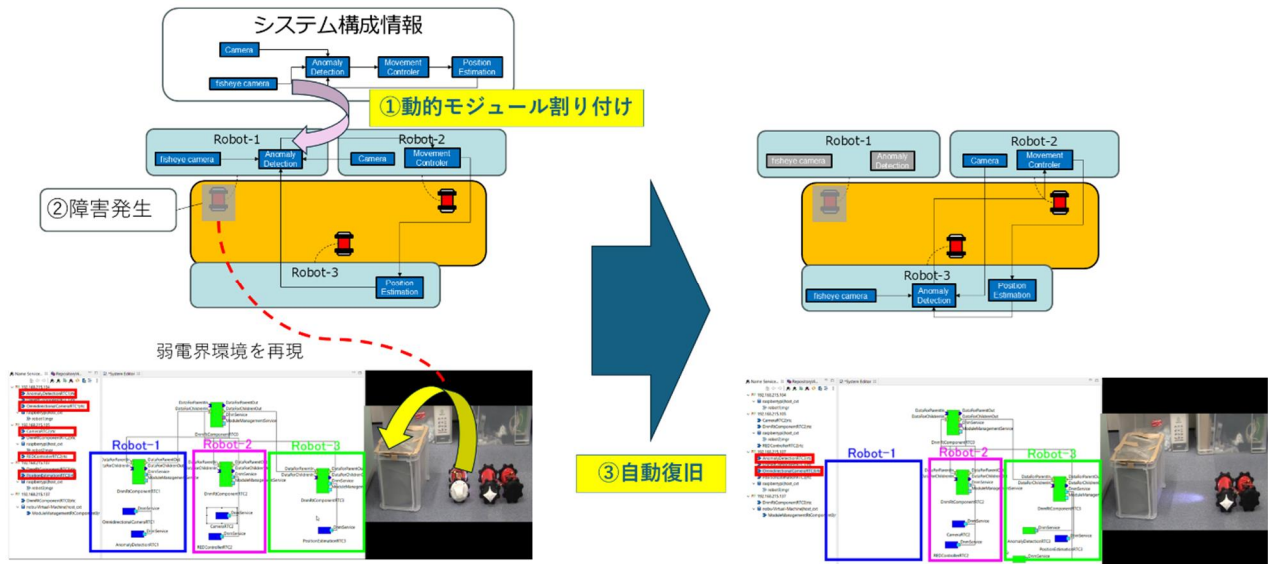


図 動的モジュール割り付けとロバスト化を実現する機能の動作概要

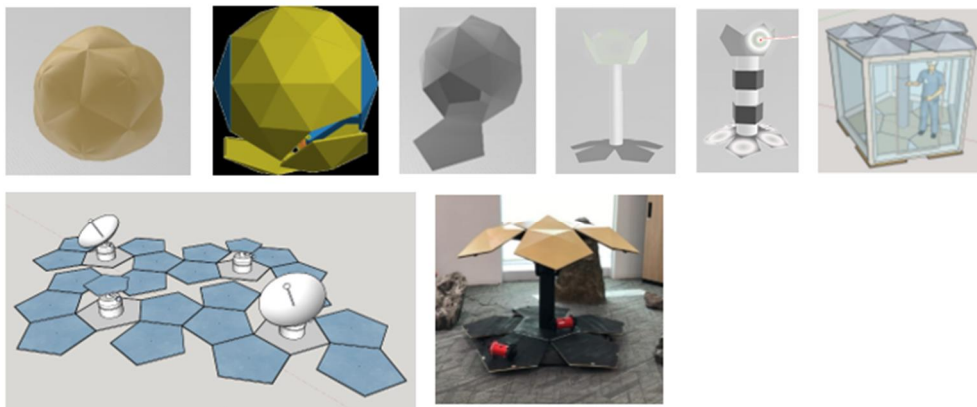
課題推進者: 安藤慶昭 (産業技術総合研究所)

(3) 研究開発項目3: ネットワーク知能 RT プラットフォーム

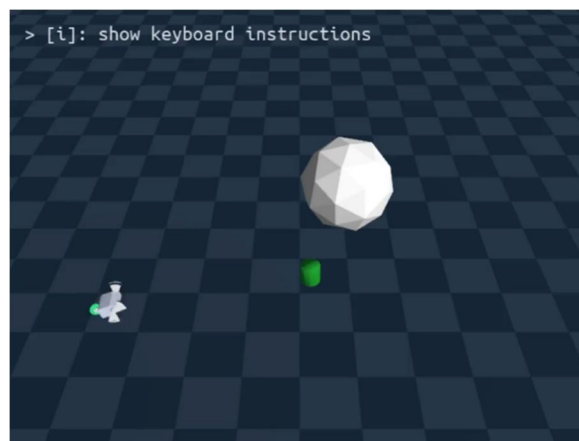
現在開発中の小型移動ロボットにおける課題を解決し、その結果から将来の月面上での作業小型ロボットを想定したロボットプラットフォームの設計、試作、開発を行った。既存ロボットの課題として、表面走行性能と跳躍性能の向上と安定化、そのための機械設計およびシステム統合設計などが挙げられる。これらに対する議論と過去の知見から、建築現場での利用を想定した現行ロボットをベースにした機体の開発に取り組んだ。また、その知見を活かし、溶岩チューブ内の探査、建築適地の調査、コンテナの搬送、移動機構、作業機構、制御装置などを統合した小型ロボットの検討を進め、研究開発項目1および2における各課題での実装評価を実施した。月面での利用を想定しているが、地上試験機のため不整地走行、跳躍移動、探査調査、搬送作業そして総合試験機などのバリエーション機の試作も実施した。また拠点資材や通信・エネルギーの中継装置などを収め、ロボット群により搬送されるコンテナの検討も実施した。コンテナは、搬送時にロボット群を支援し協働する機能(群協働機能)、折り紙と膜テンセングリティを利用し路面通過補助や拠点構築に展開するインフレータブル構造機構などを想定した試作を実施した。また、各機能を統合した群協働型ロボットコンテナの設計検討を実施し、地上試作機を製作した。

研究開発課題1: 探査・輸送・建築機能を有する RT プラットフォームの統合実現

実施内容:本課題では、将来の月面溶岩チューブ内で用いられる低機能小型ロボットを構想し、ロボットへの支援機能を組込んだ輸送コンテナと共に設計、試作、開発を行うことが目標であった。月面(溶岩チューブ内部)で探査、調査、搬送作業が可能な小型月面作業ロボットの実現のため、コンテナとの作業連携、協働機能などを研究開発し、現有小型ロボットの研究開発知見を発展させ、移動機能、制御装置の議論と成果を統合した小型ロボットの設計・試作を実施した。月面環境で活動可能なモデルの開発と同時に、地上で動作試験が可能な地上試験機も開発を進めた。本課題においては、探査、調査、搬送などの作業機能のためにコンテナとの協働を可能にする機能を検討しロボットへの搭載可能性も検討した。走行・移動機構においては研究開発課題2および課題3と協力し各検討結果を融合し、また研究開発項目2の進化型制御装置などの情報処理制御システムを搭載し、移動ロボットとして統合設計を行い、実験機を試作した。月面探査ミッションや建築現場などの実応用に向け、実装評価を実施し、安定化したシステムづくりを目指した。コンテナの研究開発においては、拠点や通信・電力中継などのペイロードを格納し展開することで形態を変化させる等、各種機能が設置可能なあり方を検討した。ロボット群の格納と落下投入機能およびロボット群に対して情報または物理的な移動の支援を可能にする協働機能をもつロボットコンテナを検討し、各搭載機能試作機の製作を行った。群協働型ロボットコンテナとしての月面用ロボットコンテナ機能試作機およびモックアップを製作し、機能検討を実施した。



検討されたコンテナの機構および形態バリエーション

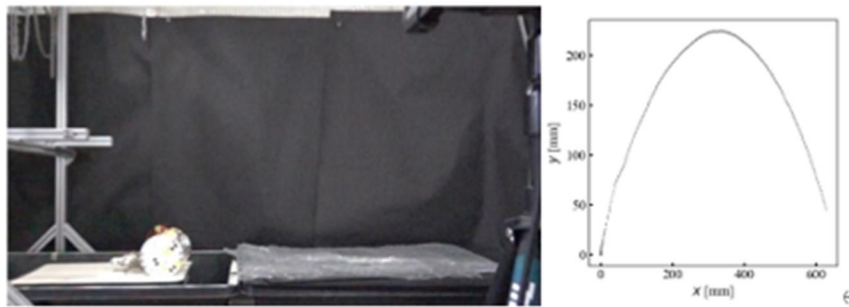


シミュレータによる「Green」のコンテナ運搬強化学習

課題推進者:宮口幹太(竹中工務店技術研究所)

研究開発課題2： 小型 RT 跳躍機構の設計と搭載実現

実施内容:本課題では、小型ロボットの移動手段として跳躍機構の最適化の検討および跳躍移動と走行移動の両立に向けた検討を実施し、ロボット機体設計への反映および移動実証を実施することが目標であった。月面の溶岩チューブにおいて想定される不整地地形において、小型軽量化のため、また、環境とのスケール比などにより相対的に低下した不整地移動能力を補償するため、小型ロボットに搭載することが可能な跳躍機構を、消費エネルギー、テラメカニクスからの効果を考慮した機械システムを小型ロボットに実装する。そのため地上および月面の不整地において、機械工学、生物学などやテラメカニクスの観点と知見により、効率的な跳躍手法に関して研究し、種々の方式を提案し、設計検討により試作評価を実施した。また小型ロボット搭載のための統合設計として、重心や取り付け角度などの各設計パラメータに対して実移動動作などを考慮したシミュレーションや実験を実施し、試験機を試作した。課題1で研究開発する機体への融合設計を、課題1、課題2と協力して実施し、小型個体ロボットを完成させることを目指した。同様にコンテナへのロボットの格納展開方式の検討、エアバック等を利用したコンテナおよびロボットの現地への投入機能などに対しても研究開発を実施し、各技術、各機器の実証試験を経て、探査ミッションを想定した実証実験を実施した。また、ロボットおよび群によるコンテナ輸送の方式に関する検討を実施し、跳躍機構と走行機能の最大化を検討した。月面環境上で利用可能な移動機能の設計を行い、研究開発課題1および研究開発項目4と協力して探査ミッションの実現のための機体検討を実施した。その結果、ロボットの移動機構として、複数リンクにより構成される脚型を念頭においた跳躍メカニズムを考案し、GA 等による最適化を実施した。脚型メカニズムはそのリンク長の組み合わせで跳躍効率や跳躍後の姿勢が大きく変わるため、設計制約の範囲内で、障害物乗り越えに適した姿勢変動を有し、かつ跳躍のエネルギー変換効率が高く、かつメカニズムの占有体積が小さくなる構造を導出した。さらにこの結果を反映した実験装置を製作し、模擬実験フィールドおよび自然の溶岩洞窟において動作試験を実施し、その有効性を確認した。これによりこの跳躍機構が、月面や月面の溶岩チューブ内で実用できる見通しを得た。また、跳躍機構は車輪と統合して使用されるため、車輪を有する機体においてどのように跳躍機構を搭載するかを検討し、走行機能を妨げない跳躍機構、あるいは走行機能と両立する跳躍機構の知見を得ることができた。



月面むけ設計を取り込んだ試験モデルによる緩詰珪砂上での跳躍試験

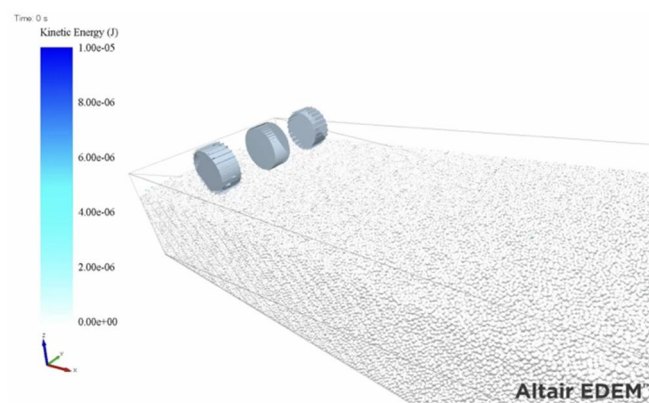


車輪と跳躍機構の統合設計試験モデルによる模擬フィールド走行実験(左)と模擬コンテナ搬送実験(右)

課題推進者:前田孝雄(東京農工大学)

研究開発課題 3: 小型 RT 表面移動機構の設計と搭載実現

実施内容:本課題では、月面溶岩チューブあるいは月面において、小型ロボットの移動に最適な車輪形状を導出することが目標であった。月面の溶岩チューブにおける不整地地形において活動する小型ロボットに搭載可能な表面移動メカニズムを、テラメカニクスの観点、消費電力、搭載容積・重量などを考慮して研究開発し、方式の検討を行った。小型ロボット搭載を想定した各設計パラメータの適正値を、シミュレーションやまた試験機の設計・試作を実施し、小型個体ロボットへ搭載可能であり小型軽量である表面移動機構を検討した。課題1で研究開発する機体に対する融合設計を、課題1、課題2と協力して実施し、同時に、コンテナへのロボットの格納展開方式の検討、エアバック等を利用したコンテナおよびロボットの現地への投入機能などに対しても検討を実施した。さらに、月面環境上で利用可能な移動機能の設計を行い、研究開発課題1および研究開発項目4と協力して探査ミッションの実現のための機体開発を実施した。車輪型移動機構に関しては、シミュレーションと簡易実験を繰り返し実施し、理論と実証を相互に検証することで知見を蓄積した。その結果、本プロジェクトで開発する小型ロボットにおいて顕著な性能向上が確認され、従来は小型機で困難と考えられていた均一砂上や急峻な20度の傾斜地においても自由な移動が可能となった。その成果は研究開発項目1-課題1に応用された。また、新規に提案した位相可変型車輪については要素試作と簡易評価を行い、その有効性を確認したことで、今後の実装に向けた展望が得られた。さらに、研究開発項目4-課題1で検討が進められている跳躍装置と最適形状車輪を併せ持つ探査ロボットを月面ミッション用として提案するとともに、投入カプセルに関しては緩衝機能を開設計・試作し、落下試験による評価を行った。その成果は研究開発項目4-課題1に提供された。



個別要素法による砂地走行数値シミュレーション

課題推進者:吉光徹雄(宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所)

(4) 研究開発項目4: 月溶岩チューブ探査ミッションおよび探査システム

研究開発課題 1: 探査計画に基づく月面環境対応小型探査ロボットの実現

実施内容:2025 年度以降に月面上に存在する溶岩チューブにおけるロボット探査の実現を目指し、

探査ミッションの計画設計、探査システムの開発を実施した。探査ミッションの計画においては、月面までの輸送機会(ロケットおよび着陸機)の検討を行い、溶岩チューブ縦穴へのシステムの投入方法、探査方式・計画を立案し、計画実現に向けたシステム仕様決定を目指した。またミッション計画に沿って探査システムの仕様を決め、探査システムの機械系、電気系の設計および宇宙環境試験等を実施し、月面ミッションで使用可能な探査システムを検討した。探査システムは、投入カプセル(コンテナ)および小型探査ロボットから構成され、探査ロボットは投入カプセル内部に格納され、カプセルごと着陸機へ搭載、カプセルが現地投入されることになる。現時点では着陸機での現地投入は3パターン程考えられ、カプセルの落下投入が想定される。カプセル、ロボットの実現においては、研究開発項目1,2,3と連携して研究成果活用と各技術の月面環境試験を経て宇宙仕様化の検討および、月面環境で使用可能な探査システムを検討した。小型探査ロボットにおいては、フライトモデルレベルの機体試作を実施し、投入カプセルに関しては地上実験モデル程度の試作を実施した。これらの検討や試作機製作は、世界初の溶岩チューブ探査を目指し、月面溶岩チューブ環境の把握、プロジェクトの研究開発成果を用いた世界最小レベルの小型探査ロボットの設計、宇宙仕様化など、世界初の作業の実施であると言える。本課題の研究開発には、通常の課題と異なり研究開発中の成果の活用、打ち上げ機会の獲得検討、そして探査ロボットに加えて、新規にロボットを現地に安全に輸送、投入するカプセルの検討などが含まれる。宇宙仕様化では、解析や設計において専門業者の支援も必須であり、社会状況など、スケジュール的に予測が難しい外的要因を含んだ社会実装上のチャレンジが含まれる。そのため限られる国内リソースと各研究課題の進捗の状況のバランスをとり、柔軟な対応が求められる。そして、近年、世界的に宇宙技術が注目される中、我が国の戦略と小規模の新興企業などの台頭によって、専門的作業の提供リソースの枯渇が急速に進行し、加えてコロナ後の経済状況の回復に伴い他産業との競合も生じており、その状況において、当初計画の維持のため、最善を尽くしていると考えられる。当初計画よりも遅れている部分も見られるが、ミッション実行に向けて十分に回復可能な状態にある。

課題推進者: 國井康晴(中央大学)

(5) 研究開発項目5: ネットワーク知能システムの制御対象拡大と応用展開

本プロジェクトで研究開発するネットワーク知能システムでは、自己の制御誘導機能が制限され、機体制御性能が低い状態の同種で複数の小型ロボットを AI により制御することで探査などの高度な作業をロバストかつ継続的に実現することを目指している。特に下層 AI(群知能)では、小型ロボットの制御性と精度の低さを想定し、ロボット単体の存在位置や制御状態などを考慮することなく群形成させる制御手法を検討し、個体の配置、制御状態などを考慮する必要はなく、ロボットが保有する制御パラメータも限定的であることより個体の状況によらないシステム全体の安定性を担保する。すなわち上位層 AI に対して個体を意識させない制御手法を提供する点に特徴を有する。さらにロボットより得られる位置や環境情報に大きな曖昧性が存在することを下位、上位の AI にて想定し、曖昧なデータの取り扱いとロバストな動作を実現する。

研究開発課題 1: 昆虫サイborgの AI・ロボット技術との連携および地上応用

実施内容: 本研究課題項目では、ネットワーク知能システム、特に下位層 AI が提供するシステムおよび制御的な枠組みと特徴を活かせる月惑星探査ロボット以外の制御対象への展開、様々なロボッ

トシステムとの協働スキームなどを検討し、人々の生活により密接な地上を中心とした応用展開の可能性を検討した。機体自体に制御が不要であるが原理的に制御性が低い対象として、本課題ではサイボーグ化された昆虫を制御対象として選定し、ネットワーク知能システムからの制御実現可能性を検討した。一般に生体サイボーグは、生物をベースとするため、外部から制御信号による制御精度を期待することは難しく、また一定時間制御を離れることも予想されるため、本研究開発項目における制御対象として有望なものと考えられる。そのため機能的特徴の異なる数種の昆虫をサイボーグ化し制御する技術を確立し、ネットワーク知能システムからの制御実現を想定して制御に必要な課題を洗い出した。下位 AI システムとの制御指令プロトコルを議論して設計し、指令プロトコルに従い制御可能な状態を実現し、群形成や群誘導などの制御における課題検討を実施した。その成果に基づき、ロボットとの組合せ使用や協働のスキームを念頭に置き、災害、防災、インフラ点検、遺跡調査などの身近な生活環境における利用検討を実施し、ネットワーク知能システムの宇宙利用以外での可能性を探った。なお研究開発および実験の実施においては、生命倫理や国際的な社会通念等に配慮した。

その結果、昆虫サイボーグにネットワーク知能システム応用可能であることを証明し、当初計画の範疇である AI による地形理解・経路生成などの技術開発に加え、当初は予見し得なかった新たな知見が得られた。具体的には、昆虫サイボーグと牽引型ロボットを融合させた探索システムや、生体センサー化した昆虫行動解析による環境認識など、計画段階では具体化していなかった技術が実証段階にまで発展した。また、陸運庁や通信会社からの具体的な実証依頼が寄せられるなど、社会実装に直結する展開が進んでおり、計画を上回る成果として学術的貢献と産業的応用の両面で高い波及効果が期待される。

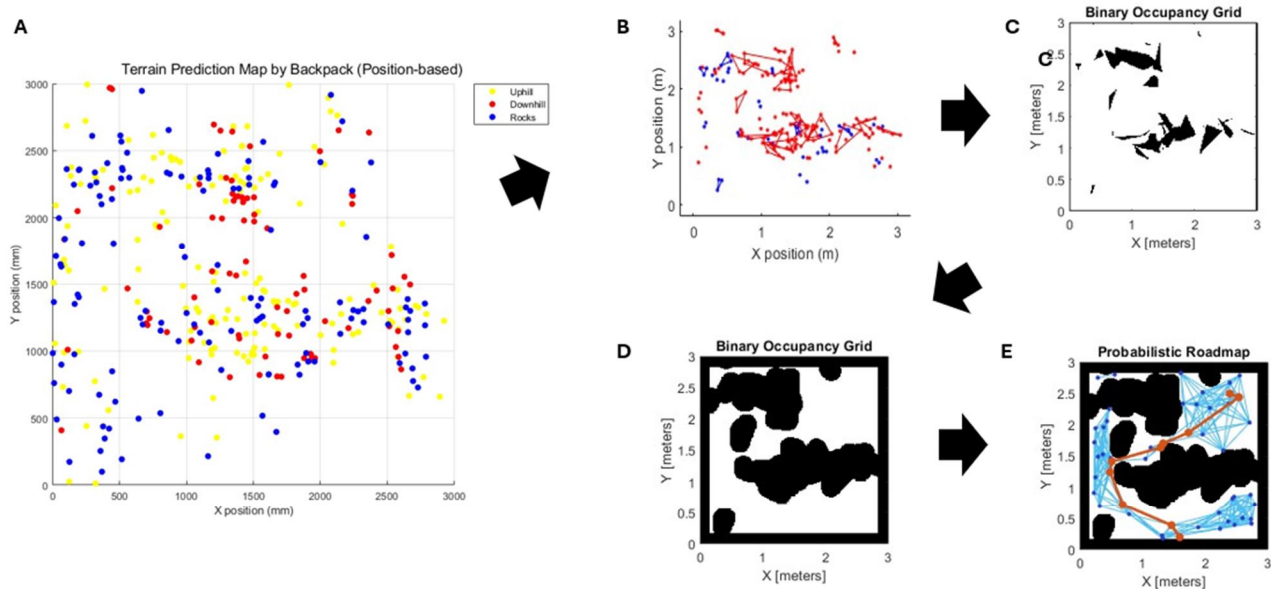


図 (A) 昆虫サイボーグのデータから生成された地形予測情報。(B) 上り斜面と下り斜面をまとめた丘地形（赤色領域）および岩地形（青色領域）が、障害物クラスターとして分類される。(C) 障害物クラスターに基づいて生成されたバイナリ占有グリッド。(D) 占有グリッドをロボットの大きさに合わせて膨張処理し、走行可能領域と走行不可領域を示す。(E) ロボットの経路計画結果。

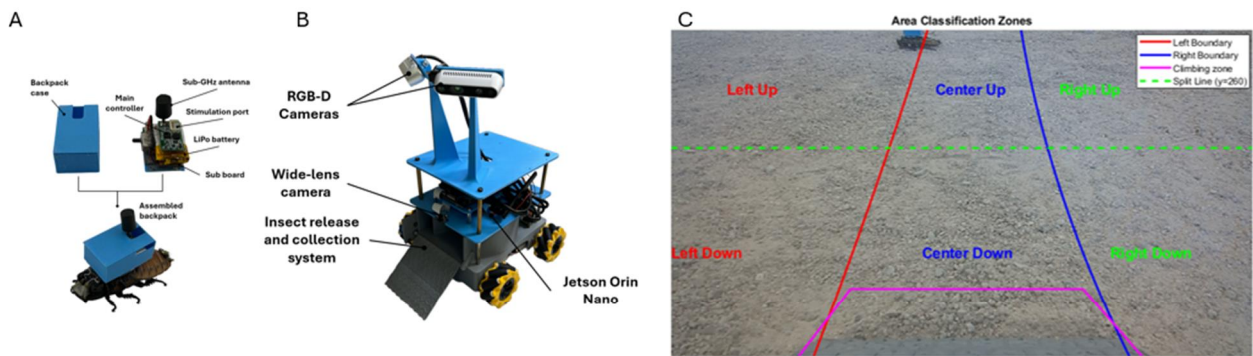


図 昆虫サイボーグを用いたシステム概要

(A) メインコントローラ、IMU、刺激回路、Sub-GHzアンテナ、電源を一体化した軽量バックパックを搭載した昆虫サイボーグプラットフォーム。

(B) サイボーグ昆虫の展開と回収の中核として機能する自律移動ロボット。RGB-Dカメラによる位置追跡、広角RGBカメラによる個体確認、Jetson Orin Nano によるオンボード処理、およびモーター駆動式のサイボーグ昆虫収納・回収システムを備える。

(C) 視覚誘導に基づく展開・回収のために、画像空間を6つの領域（左上・中央上・右上・左下・中央下・右下）に分割した分類ゾーン。航行中の行動切替を定義するため、登坂ゾーンおよび水平分割線を設定している。

課題推進者: 佐藤裕崇(南洋理工大学)

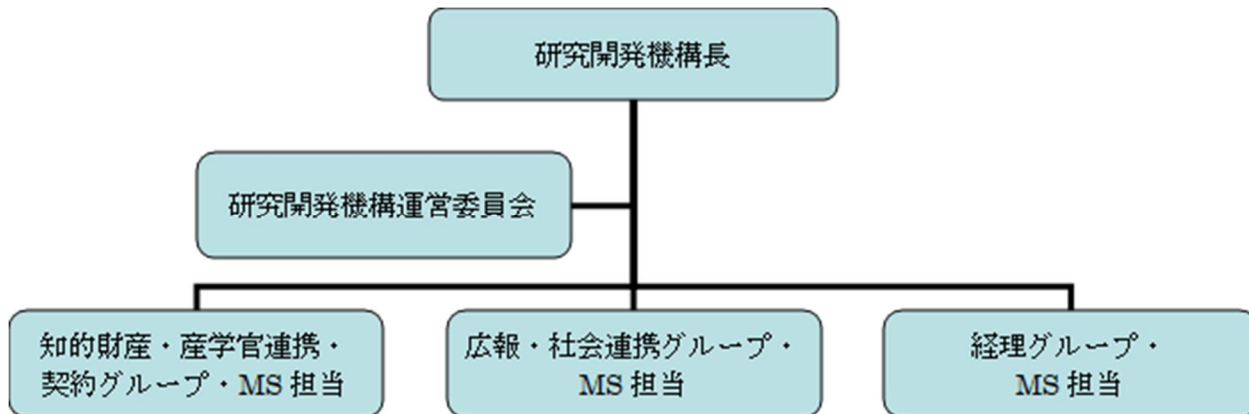
3. プロジェクトマネジメント実施内容

(1) 研究開発プロジェクトのガバナンス

進捗状況の把握

○ 代表機関の PM 支援体制チーム

代表機関内に PM をユニット長とする研究開発ユニット「進化型群 AI ロボット研究開発ユニット」を設け、図の組織下にて支援を受ける体制をとった。



また、安全保障輸出管理に関する国内外からの要請に対して適切な管理を行うため、代表機関が所属する中央大学研究支援室安全保障輸出管理体制と協力して実務的な対応を行っている。

PM の直接的支援体制として PM 支援チームを設け、URA、事務担当が PM、PI の支援を実施した。また知財運営のため弁理士系コンサルタント事務所に業務委託を行った。

○ 重要事項の連絡・調整(運営会議の実施等)

運営会議を2回開催し、実施規約の改定、研究開発項目5の追加、課題研究者の追加(南洋理工大学 佐藤裕崇 PI)に関する承認手続きを行った。

○ 研究開発機関における研究の進捗状況の把握

プロジェクト全体会議を 3 回実施し、研究開発に関するディスカッションや研究進捗状況の把握、プロジェクトのデモに向けた打合せや結果の共有を行った。また研究開発項目ごとに随時研究打合せを実施すると同時に、研究開発項目間の連携強化を図った。特に研究開発項目4に関連する各研究機関間の打合せは定例化し、研究の進捗状況や海外との連携情報等の共有を行った。

知財運用会議を 2 回実施し、また出願予定特許に関する打合せは月 1 回以上実施した。

研究開発プロジェクトの展開

研究開発体制面の強化について、プロジェクト内で研究開発計画を加速する議論を行い、令和 6 年度より研究開発項目 4 月溶岩チューブ探査ミッションおよび探査システム、また令和 6 年度 6 月には研究開発項目 5 ネットワーク知能システムの制御対象拡大と応用展開を新設し、体制の充

実を図った。

研究開発した成果の一部を活用し、ミッションや国際連携、企業連携等の発展的な議論を行った。国際連携については、MBSRC(UAE)次期ローバ計画(MS ロボット搭載のオフア有)、トルコ宇宙機関次期探査機の議論、DLR(ドイツ)、CSIRO(オーストラリア)と溶岩チューブ探査について議論を進めることができた。また、アルテミス計画(アルテミス3)で搭載される月面環境観測機器への制御装置の提供、他の月面科学探査ミッションとの技術連携などを行った。企業連携については、ispace社とのMOUを締結した。また技術連携などをいくつかの企業と議論している。

ELSIへの取り組みとして、中央大学のELSIセンターと連携し、プロジェクトのPM、PI陣とELSI専門家チームとの協働体制を構築した。ELSIセンターの内部活動として本プロジェクトの内容に特化したELSIコミュニティアクティビティを1回開催し、センターの公開活動としてELSI全般に対するELSI大学サミットにプロジェクトとして参加し、議論を深めた。



PJ主催による月惑星探査国際ワークショップ
(2025.1.21 ドイツでの国際学会SH2025にて)



中央大学ELSIセンターとの協働活動
(2025.2.21 ELSIコミュニティアクティビティ)



ispace社とMOUを締結(2025.3.7 小型AIロボット群の月面への輸送実現のための協力)



オープンなELSI議論への参画
(2025.3.15 ELSI大学サミット)

(2) 研究成果の展開

知財コンサルタント系弁理士に業務委託し、技術動向および市場調査を含めた知財戦略立案を行った。研究開発期間中には、8件の特許出願を行い、また成果取りまとめ期間中にも特許出願の予定である。

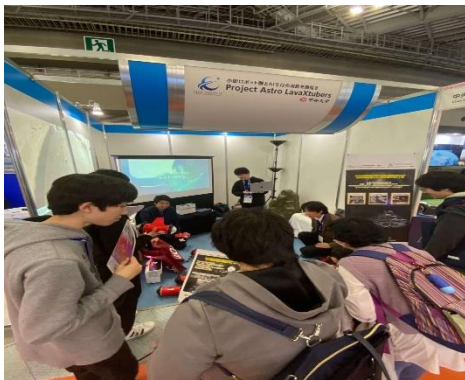
PM アドバイザーと、事業化戦略について継続して議論を実施した。昨今の業界市場やニーズに関するアドバイスを得て、成果取りまとめ期間においても今後の事業化に関する検討を重ねる予定である。

将来的な顧客獲得や議論の場として、ICRA や国際ロボット展、国際宇宙産業展にて出展を実施し、多くの市場関係者と活発に議論を実施できた。

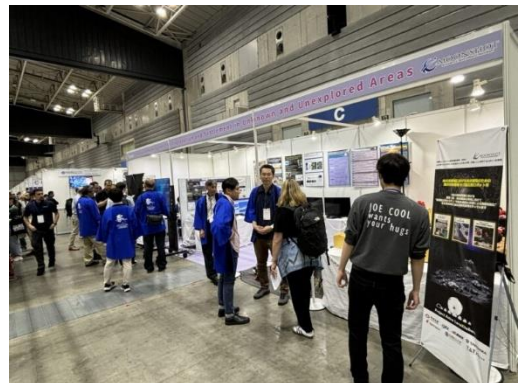
(3) 広報、アウトリーチ

プロジェクトのホームページ、プロジェクト紹介動画を製作した。ホームページでは、研究開発内容および研究開発機関の紹介をしているが、紹介動画の掲載をすることにより、研究者だけではなく広く一般にも興味を引くような成果のアピールに努めた。また SNS(X, Facebook)と連動することにより閲覧数の向上に努めた。学会や展示会等の情報を随時アップロードし、研究成果やプロジェクトの動向を効果的にアピールできる設えとなった。

アウトリーチ活動として、学会等におけるプロジェクト紹介、中高生向けワークショップや講演を実施し、幅広い世代や一般向けにプロジェクトの周知を行った。文部科学省エントランス展示に応募、採用され、約7週間の展示を行った。また、航空図書館にて1か月間プロジェクト紹介の企画展示を実施した。ICRA、国際ロボット展、国際宇宙産業展に出展し、月面開発フォーラムで講演するなど、関連する企業等とのネットワーキングや一般向けにアピールする機会となった。



国際ロボット展iREX2023に出展
(2023.11.29～12.2)



ICRA (IEEE International Conference on
Robotics and Automation) 2024に出展
(2024.5.13～5.17)



中央大学オープンキャンパスでの活動
(2024.8.7~8.8)



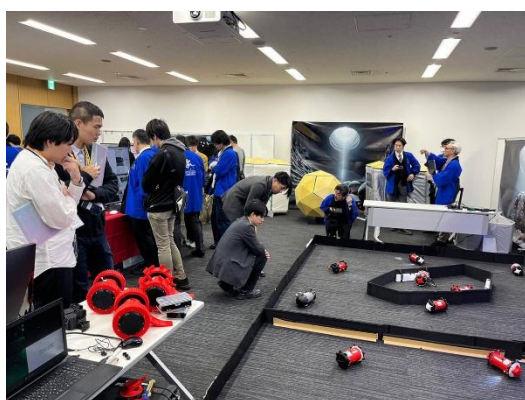
中央大サイエンスセミナー2024での活動
(2024.8.22)



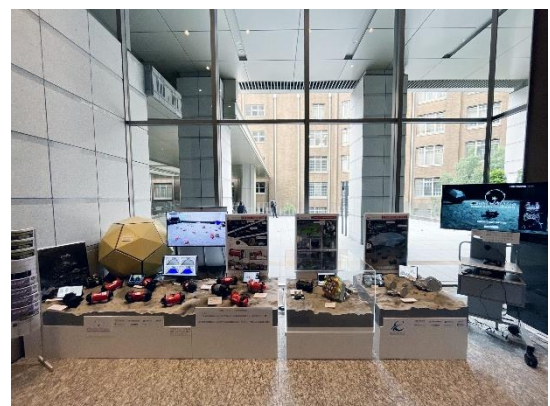
月面開発フォーラムでの講演
(2024.12.26)



国際宇宙産業展ISIEEX2025に出展
(2025.1.29~1.31)



ムーンショット目標3シンポに出展
(2025.3.7)



文部科学省エントランスでの展示
(2025.5.27~7.4)



宇宙科学シンポジウムへのブース出展
(2025.8.1)

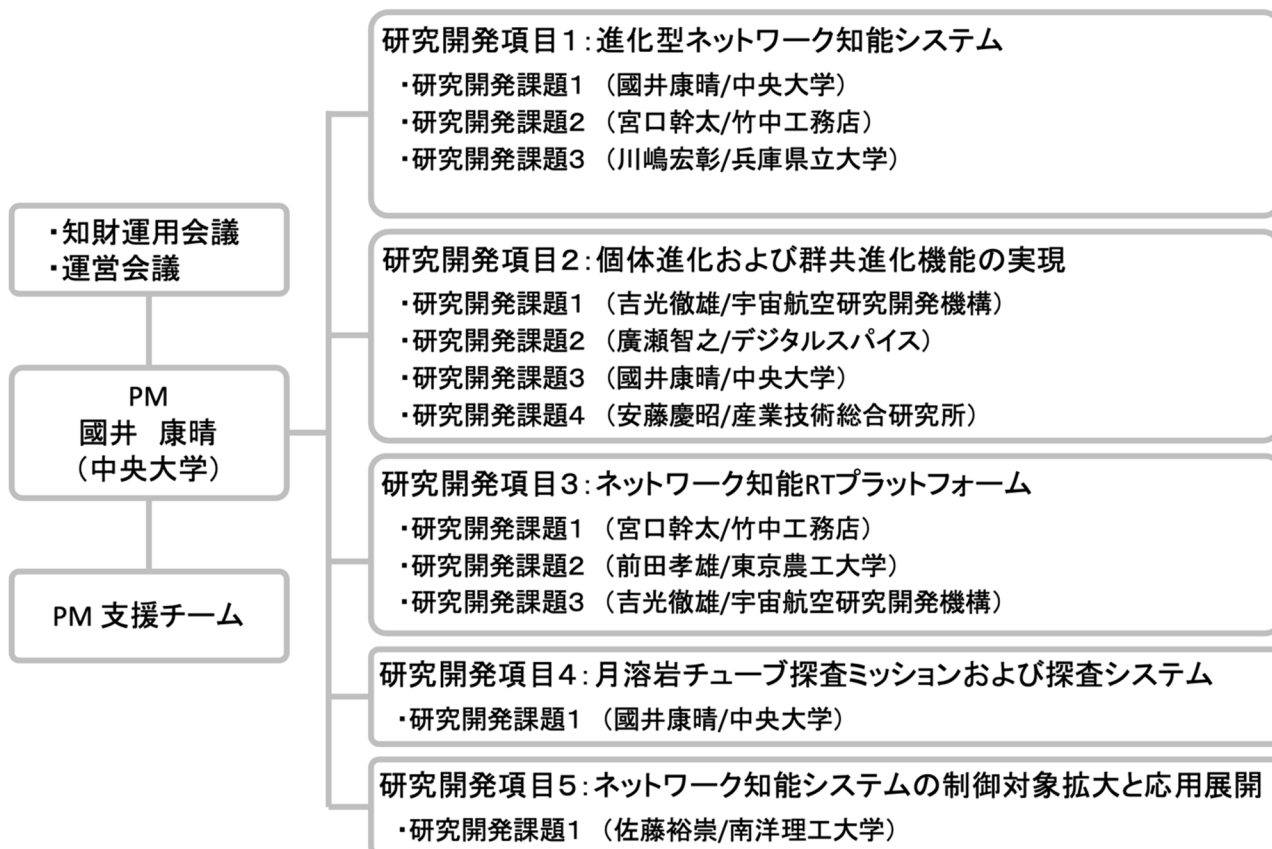


航空図書館での展示
(2025.8.10～9.10)

(4) データマネジメントに関する取り組み

各機関のデータマネジメント規程等の制定・運用状況に応じて、研究進捗により生じたデータの管理に関して検討し整理を行った。各機関の規程等の制定・運用状況を確認し、現段階では公刊した論文以外に公開するデータはない状況だと確認し、各機関内において研究データの確保策を講じた。

4. 研究開発プロジェクト推進体制図



5. 研究開発プロジェクト成果

知的財産権件数				
	特許		その他産業財産権	
	国内	国際(PCT含む)	国内	国際
未登録件数	6	0	0	0
登録件数	1	0	0	0
合計(出願件数)	7	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	2	2	4
口頭発表	24	13	37
ポスター発表	5	0	5
合計	31	15	46

原著論文数(※proceedingsを含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	7	7
(うち、査読有)	0	7	7

その他著作物数(総説、書籍など)			
	国内	国際	総数
総説	1	0	1
書籍	0	0	0
その他	6	0	6
合計	7	0	7

受賞件数		
国内	国際	総数
7	1	8

プレスリリース件数
2

報道件数
8

ワークショップ等、アウトリーチ件数
43