



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

実施状況報告書

2023 年度版

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. 当該年度における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化的に機能し、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状況

小型ロボットの群が領域探索しながら目的地に到達するための技術要素を確認、群誘導方式の知能化により到達通過効率向上を確認、進化機能実現のため低粒度機能の接続にて高粒度機能およびデータ制御機能を確認することを目指し、以下の研究開発内容を実施した。

研究開発項目1: 進化型ネットワーク知能システム

環境形状に対する群形成制御と誘導に関して検討し、実験によりその到達能力の確認を実施した。様々な形状の領域を2つ以上連結した空間で、奥の空間を目指して群を誘導するものである。次の空間への移動条件として領域網羅率を設定し、それを満たした場合に次の領域に向かうものとした。また接続領域を狭くするなどにより、群形成とマーカによる誘導能力を確認し、今後の自律化に向けた情報の収集を行った。また計測データより網羅率の推定等を検討し自律的な探査空間切り替え機能などの試験を実施した。なお実験に用いたロボットは現在の試験機に改良を加えて対応した。走行路面はロボットの走行性能に依存するところが多いが、車輪径の15%程度の障害物または起伏が存在する路面を基本として、より荒れた複数の環境で段階的に路面状態を上げて試験を実施し、溶岩チューブ内の探査、調査を想定したデモンストレーションを実施し、今後の検討・研究開発に活用するための情報収集を行った。

研究開発項目2: 個体進化および群共進化機能の実現

個体進化機能の基礎となる低粒度機能モジュールを用いて高粒度機能モジュールを構成する機能およびモジュールの追加、削除、接続変更などの機能が実現できていることをFPGAなどにて確認した。30種程度の低粒度モジュールを用意し、10個程度を接続した規模の高粒度タスクを3つ程度構成する。各タスクの構成と変更等を実施するため管理運用ソフトウェアを構成し実験に用いた。各タスクを用いてモジュール間の仮想接続とタスク全体としてデータ制御の実現を、接続共有メモリ上の入出力情報、データフローなどの動作情報の収集および解析を行い、構成タスクが機能し実現されていることを確認した。実現動作速度に関しても評価した。さらに進化型制御装置の内部アーキテクチャなどの検討結果と基礎設計を明らかにし、機能共有ネットワークを構成する通信インフラとなる通信システムに関する検討結果として基礎設計および初期実験を実施した。

研究開発項目3: ネットワーク知能 RT プラットフォーム

現行の小型移動ロボットに対して課題解決と改良を議論し、研究開発課題1の実験で用いる実験機の開発を行った。現行ロボットの跳躍ユニットの小型化、機体統合を主な課題とし、車輪形状検討による不整地対応性能の向上、跳躍と走行を考慮したパッドの最適化などを検討し、現行システムをベースとして改良設計を行い、実証実験に用いるロボットとして整備した。

また開発結果より、2025年に向けた機体の設計構想をまとめ、提示した。さらにロボットコネクタに関する機能設計および試験結果、設計構想等の提示を行った。

ステージゲート評価を踏まえ、研究開発内容の実現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の新設について議論・検討を実施した。

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

初年度に引き続きプロジェクトマネジメント体制の構築と運用開始および各課題の実施で予

定する研究課題推進者の追加などの研究開発組織の構築を行なった。マネジメント体制としては、代表機関内での支援協力を受ける受皿となる研究開発ユニットの設置、機関内における運営体制の整備、専属運営スタッフの採用と実務開始による体制整備を行った。また知財運営会議において、より専門性の高い支援協力を受けるため、知財系コンサルタントを選定契約し、関連知財の調査、知財面からの技術開発動向の把握などを行い、一部、研究成果の知財化の検討を進めた。さらに外部からの研究内容に対して理解を得るため、ホームページの整備、長短2種類の研究プロジェクト紹介動画を作成公開、2つの展示会へ出展、開発したロボットを利用した中高生へのプログラミングセミナーなどを実施した。一方、各研究課題推進者とプロジェクト内容に関わる情報共有と実施依頼および指示、今後の発展などに対する議論と認識合わせ等を行い、参加研究機関の足並みを揃え、ステージゲート評価に向けた成果出しと集約の調整を実施した。

ステージゲート評価後には、新たな研究課題推進者の追加検討を実施し、1名の追加を決定、また 2026 年度以降に向けた月溶岩チューブ探査ミッションの検討を行い、新たな研究開発項目を2つ追加し、そのための研究開発実施調整をプロジェクト内で行い、次年度に向けて議論を進めるとともに、契約作業支援を実施した。

2. 当該年度の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

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

当該年度実施内容:

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、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を用いて自律的な行動パラメータ設計手法と変更アルゴリズムを検討する。また環境や個体、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・協働動作を設計し、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す。

令和 5 年度は引き続き、「①個体および群の誘導のためのマーカ(群中心)による誘導法の設計」と「②基本探査行動(領域網羅)における領域通過と目的領域への到達における課題調査と解決」「③複数群誘導に対するマーカの扱いの設計」、「④複数群の協調・協働による探査領域の通過」、「⑤複数群誘導による網羅率向上による探査領域形状への対応」に関して研究開発を行った。①においては研究開発項目1の研究開発課題2の複数群誘導に対する観点、また項目1課題4また5のネットワーク知能における誘導機能などと絡むため、議論の進捗に合わせて本課題の検討を叩き台として修正、発展も検討した。③に関しては研究開発項目1の研究開発課題1の単群によるマーカの扱いと融合し検討した。④、⑤に関しては項目1も課題4または5における議論と整合性を図りながら知能化要素の導入も検討した。

課題推進者:国井康晴(中央大学)

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

当該年度実施内容：

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、それらの解析から状態、対象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を構築する。

令和 5 年度は、「①曖昧な観測位置情報に基づく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の検討」、「②個体および群間、観測データ間のトポロジー解析」、「③観測データベースの構築と意味理解」に関して検討を行った。①および②に関しては研究開発項目1の研究開発課題1に対して情報提供を行い協力した。③に関しては項目1の課題3の議論との調整と協力を行った。

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： 進化共進化をとま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)

当該年度実施内容：

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実現を目指す。令和 5 年度は、マイルストーン「①ネットワーク知能の全体構想と AI 機能の基本設計」、「②ネットワーク知能システム内における分散的な確率推定とデータ共有の設計と実装」、「③複数群を用いた領域通過群誘導戦略の設計とシミュレーションまたは実機での実証」に取り組んだ。

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

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

当該年度実施内容：

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機能を実現した制御機能を研究開発して実現を目指す。また障害物が存在する火山性の筒状閉鎖空間において、電磁波を用いたロバストな個体間情報通信および情報ネットワークを構築でき、送受信間で距離または位置が認識可能な通信機能を研究開発し、進化型制御装置と共に個体ロボットに実装可能な装置として実現を目指す。

令和 5 年度は、「①小粒度機能モジュール接続により高粒度タスク化が可能な機能をハードウェア上で実現を検討し、小規模のタスク実現を確認」、「②低消費電力かつ高速処理が可能な設計の検討」、「③個体ロボットに標準搭載を見据えた低粒度モジュール構成を設計」、「④電波系マーカ技術の検討と試作評価」、「⑤共有ネットワーク構築に関する検討と火山性閉鎖空間における通信安定性評価」、「⑥ネットワーク知能構築に向けた通信システムの検討」の研究開発を実施した。①に関しては研究開発項目2の研究開発課題3の知見を取り込んで議論を行った。②に関しては項目2の課題2の検討結果を取り込み協力し検討を行った。③に関しては項目1および2との協力し議論し設計を行った。④に関しては、試作装置を研究開発項目1の研究開発課題1および2と協力し性能評価を行った。⑥に関しては項目1、2の各課題との議論を通して情報を集約し検討を行った。

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

当該年度実施内容:

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を検討し、モジュール接続形式のタスク実現、データ処理・管理機能をハードウェア上に実現され、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を研究開発し実現を目指す。

令和 5 年度は、「①処理速度、消費電力、モジュール接続による処理実現のためのアーキテクチャ設計」、「②モジュール接続によるタスク実現が検討アーキテクチャにより実現可能か議論し評価」、「③進化型制御装置を設計し研究開発方針を提示」に関して研究開発を行った。①に関しては検討結果を示し研究開発項目2の研究開発課題1と協力して検証を行った。②に対しては項目2の課題3の検討結果に基づき協力して検証を行った。

課題推進者: 廣瀬智之(株式会社デジタル・スパイス)

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

当該年度実施内容:

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および追加、削除等を実現可能にするデータフロー制御を検討、設計、ソフトウェア的に動作を評価し、実現課題を洗い出して解決と実装を目指す。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て実現を目指す。

令和 5 年度は、「①モジュール接続のためのデータ構造を設計・評価」、「②データフローの管理機構と接続構造変化法を検討し検証」、「③データ監視による動作状態把握および進化機能への展開可能性を議論」、「④機能モジュール接続によるタスク実現のための操作系の設計」、「⑤モジュール接続機能に対する動作状態可視化と監視機能」、「⑥機能操作およびシステム管理運用のための支援機能の設計」に関して研究開発を行った。①、②に関しては研究開発項目2の研究開発課題4と協力しネットワーク共有化および安定化のための提案手法の実装に向けた強化を検討した。

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

当該年度実施内容：

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設計し、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。

令和 5 年度は、「①機能モジュール設計の検討」、「②モジュール接続による高粒度タスク化の実装に向けた安定化」、「③ネットワークを介したモジュール接続における接続情報管理とデータ接続の維持」に関して研究開発を行った。①に関しては検討成果を研究開発項目2の研究開発課題1、2、3に提供した。②に関しては項目2の課題3に提供した。

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

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

当該年度実施内容：

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、コンテナの搬送作業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、制御装置の議論及び成果を統合した小型試作ロボットを設計し実現する。また拠点や通信・電力中継などのペイロードを格納し展開することで設置可能であり、複数の小型ロボットの群によって玉転がし搬送される際にロボット群に対して情報または物理的な移動などにおいて支援する協働機能を有するロボット化されたロボットコンテナを検討し、必要な搭載機能を研究開発し、機能試作機など設計し実験などにより評価する。

令和 5 年度は、「①現行ロボットの改良設計と試作機の開発」、「②ロボット群によるコンテナ輸送方式および設計」、「③2025 年に向けた小型個体ロボットの基礎設計」「④コンテナ搭載機能の検討および試作実験機を用いた評価」、「⑤拠点および路面对応のためのコンテナ展開機構の検討」、「⑥月面用コンテナのデザイン検討」に関して研究開発を行った。①に関しては研究開発項目2の研究開発課題2、3の検討結果を取り込み統合し改良設計を行い、項目1の課題1、2と共に評価しフィードバックして改良し実証実験を実施した。③に関しては項目2の課題2および項目3の各課題との議論から研究開発を行った。④では、搬送協働機能に関しては研究開発項目1の研究開発課題2、3と協力して議論を行った。

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

当該年度実施内容：

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、テラメカニクスなどの考慮から研究開発し、機械システムとして実現して小型ロボットに実装する。

令和 5 年度は、「①現在の跳躍機構の改良と機体搭載のための一体設計」、「②宇宙利用、テラメカニクスなどを考慮した跳躍移動方式の提案と検討」、「③今後の開発方針の検討と試作ロボットの基礎設計」に関して研究開発を行った。①③に関しては成果を研究開発項目3の研究開発課題1に提供し、課題1および3と協力して統合設計を行った。

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

当該年度実施内容：

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ロボットに搭載可能な表面移動メカニズムや車輪等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、小型ロボットに実装評価する。

令和 5 年度は、「①現行システムの走行性能向上のため車輪形状等の検討と搭載評価」、「②宇宙利用およびテラメカニクスを考慮した小型ロボット用表面移動方式の提案と検討」、「③今後の開発方針の検討と試作ロボットの基礎設計」に関して研究開発を行った。①に関しては検討結果に基づき研究開発項目3の研究開発課題2の検討結果と共に課題1と共に現行機に適応し協力して改良を行った。同様に③に関しても検討結果を融合して基礎設計をまとめた。

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)

3. 当該年度の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

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。代表機関内研究開発機構知財、広報、経理、それぞれのグループは、PM 支援チームと連携しながらプロジェクトの円滑な推進に貢献した。

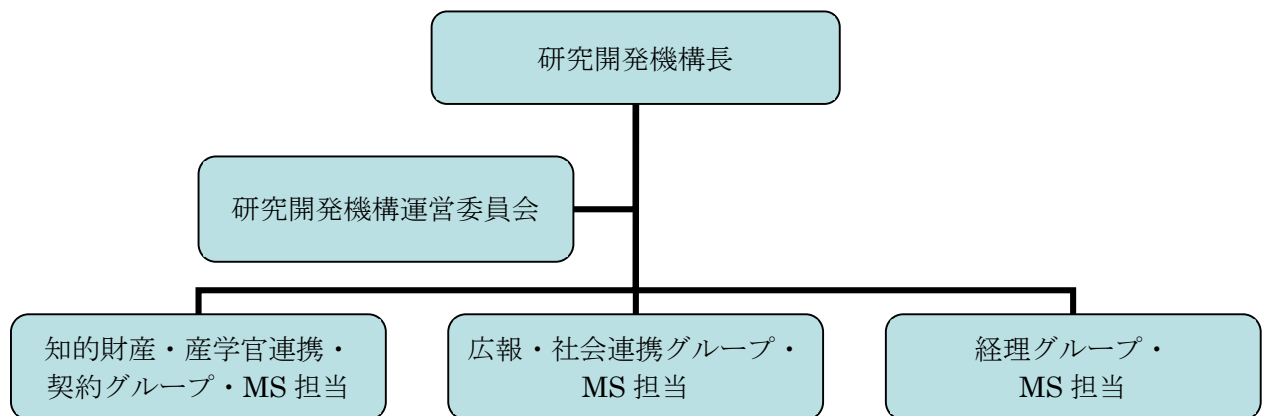


図 代表機関内における本プロジェクトへの支援体制

プロジェクトマネジメント体制として PM を直接的に支援する PM 支援チームを整備し、PM 補佐 (URA) および事務スタッフの採用を行なった。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なった。

進捗状況の把握：

重要事項の連絡・調整の場として運営会議を 1 回開催し、実施規約変更に関する承認手続きを行った。プロジェクト全体会議を 5 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・ステージゲート評価会に向けた打合せや情報の共有を行い、プロジェクトとして丸となって研究開発を推進した。また連携する研究開発項目間の調整会議に関しては、適宜実施しステージゲートに向けた成果調整と集約を実施した。

研究開発プロジェクトの展開：

研究開発プログラム計画の実現のため、ステージゲート評価を踏まえ、研究開発内容の実現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、研究開発項目 5 を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することとなった。

国際連携については、タイ宇宙機関 GISTDA およびその副長官との情報交換を行い、内閣府の要請にて応じてタイ国を訪問し講演を行った。また UAE、オーストラリアとも協力に関して模索を行っており、タイ国と合わせて可能性を追求する。また今後、欧米との研究交流や協力に関しても大学や宇宙機関などと積極的に議論する予定である。

(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を行い、技術動向および市場調査を実施した。調査内容は月に 1 回定期的に報告の場を設け、情報共有を行った。またプロジェクト内の各企業出身課題推進者の専門分野においては各社でも調査を実施した。

将来的な顧客獲得や議論の場として、国際ロボット展 2023、国際宇宙産業展 2024 にて出展を実施した。まだプロジェクト将来動画を作成、公開し、外部理解に努めた。

(3) 広報、アウトリーチ

研究プロジェクト紹介のためのホームページを立ち上げた。まだ試作段階であり、今後、コンテンツやデザインを充実させ、SEO 対策を行い、プロジェクトの周知に貢献する Web サイトに仕上げていく予定である。

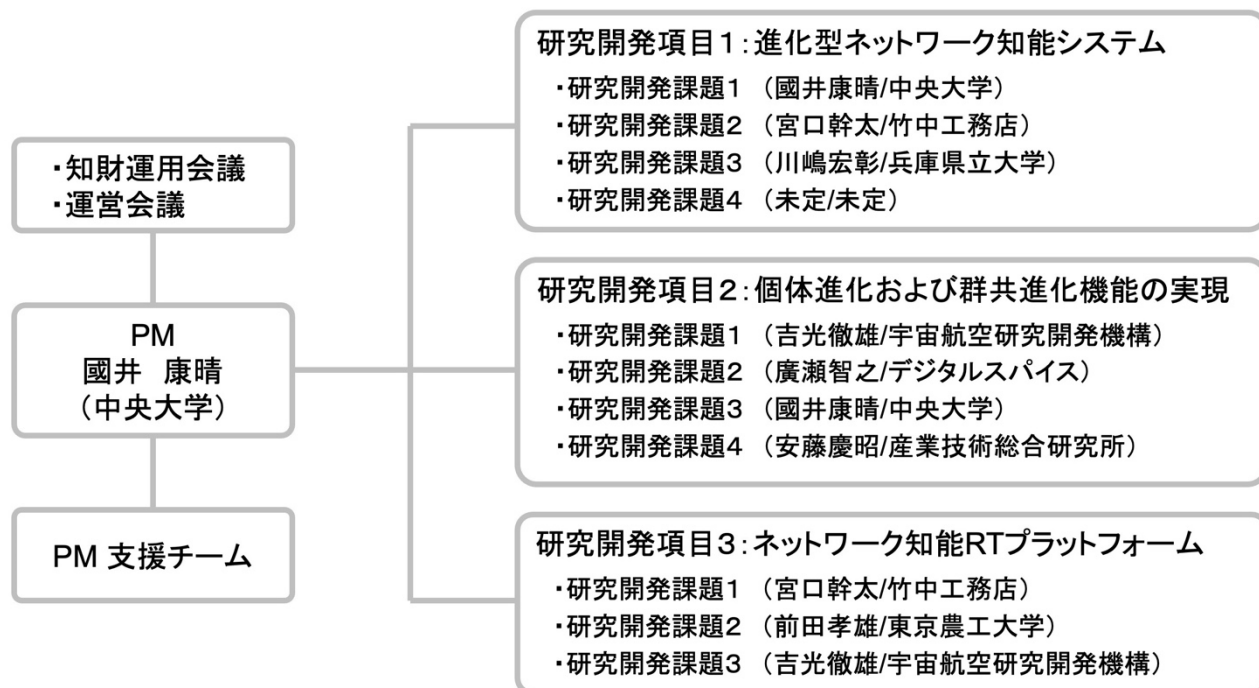
アウトリーチ活動として、学会等におけるプロジェクト紹介を 4 件、中高生向けワークショップ 1 件を実施し、幅広い世代や一般向けにプロジェクトの周知を行った。また、国際ロボット展 2023 および国際宇宙産業展 2024 に出展し、関連する企業等とのネットワーキングや一般向けにアピールする機会となった。

プロジェクトのプロモーションムービーを動画制作会社に依頼し制作した。プロジェクト立ち上げ早々の時期に制作を依頼した為、広報素材として利用可能な研究成果が限られていたが、CG 制作やシナリオの工夫により仕上げ、プロジェクト会や展示会にて活用した。

(4) データマネジメントに関する取り組み

研究進捗により生じると考えられるデータの想定と管理に関して検討を行った。今後、管理対象となり得る項目を雛形として挙げ、今後継続的にデータマネジメント体制や運用方法の検討を実施することとなった。

4. 当該年度の研究開発プロジェクト推進体制図



5. 当該年度の成果データ集計

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	0	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	0	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	1	0	1
口頭発表	3	1	4
ポスター発表	1	0	1
合計	5	1	6

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

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

受賞件数		
国内	国際	総数
0	0	0

プレスリリース件数
0

報道件数
1

ワークショップ等、アウトリーチ件数
7