



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

2024 年度版

月面探査／拠点構築のための

自己再生型 AI ロボット

吉田 和哉

東北大学 大学院工学研究科



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

本研究プロジェクトでは、月面という人が活動することが難しい環境で、科学的重要性の高い未踏エリアの探査や、人の長期滞在のための居住設備・環境の構築等のミッションを行う「変幻自在」な AI ロボットシステムを開発する。ここで開発する AI ロボットは、ミッションの目的に応じて自己再構成ができ、その部品は月面上で修理・自己再生できる「自己再生型 AI ロボット」であることを特徴とする。2030 年から 2050 年にかけてこのような AI ロボットを月面に送り込み、2050 年までには月面での持続的な資源利用拠点や有人滞在拠点を構築し、人が月面上で創造的な活動を行う時代を拓くことを目指す。

(2) 研究開発プロジェクトの実施状況

研究開発項目 1: モジュラー・マルチエージェントなロボットシステムの実現

研究開発課題 1: モジュラーロボットの設計、製作・機能解析

当該年度実施内容:

適応的に形態を変えて「変幻自在」にタスクを行うことができるモジュラーロボットの設計・試作・機能解析を行い、本プロジェクトの中核をなすモジュラーロボットシステムの設計・製作・動作解析を実施する。地上実証用ロボットモデルを段階的に開発し、①モジュール組み換えを可能とするシステム構築、②構造物組み立てに必要な位置・力制御や協調制御などの制御システムの構築を実施する。また、ロボットモジュールの構成法、モジュールの組み合わせにより生み出されるロボットの形態、それぞれの形態(デザイン)におけるロボットの動作や機能(タスク)については、それぞれデータベース(レポジトリ)として蓄積する。令和6年度は、以下の5つの点について研究開発を進めた。

- (1) モジュラーロボットの構造と制御のレポジトリの構築
- (2) 組み換えを可能とするモジュールの結合機構の設計と地上実証用モデルの製作
- (3) モジュール再構成アルゴリズムの開発とロボットモデルへの実装
- (4) モジュラーロボットの Plug and Play を柔軟に管理するシステムの開発
- (5) 異種モジュラーロボット群の自律分散協調制御系の構築

研究開発項目 1: モジュラー・マルチエージェントなロボットシステムの実現

研究開発課題 2: 階層型強化学習による分散型 AI の研究開発

当該年度実施内容:

「変幻自在」なモジュラー・マルチエージェントなロボットシステムに組み込まれ、自己成長していく AI システムの実現を目指す。ロボットの動作を生成し制御するための AI として深層強化学習が研究され成果をあげてきているが、現時点での研究成果は、単一身体 of ロボットや、個別のタスク学習での実装が中心である。組み換え可能な再構成型ロボットに適用するためには、学習成果を Plug and Play (転用、再利用、再構築) 可能とする手法の確立が必要であり、「階層型強化学習」を発展させることが有力なアプローチである。また本研究開発課題においては組立てタスクを用いて開発される AI 技術を評価する。

当該年度においては、吉田グループ(東北大)の開発した自己再生型モジュラーロボット(MoonBot)のモデルファイルを活用し、シミュレーション環境(Digital Twin)の構築と階層

型強化学習の開発を進めた。具体的には、アーム・ハンドモジュールと移動モジュールが統合したシステムによって対象物操作タスクをおこなうシミュレータ環境の実装および学習アルゴリズムを開発した。

研究開発項目 2: AI ロボットによる月面拠点の実現

研究開発課題 1: 複数ロボットによる拠点構築の統合制御

当該年度実施内容:

モジュラー型 AI ロボットを用いて、月面拠点として構築されるインフラの代表例として、太陽発電タワー、無線中継局、および有人居住ユニットの 3 種類の構造物を展開・組立・設置作業を行う技術の実現を目的とした統合制御系の開発を実施した。想定するミッションシナリオにおいては、太陽発電タワーおよび無線中継局は、分割または折りたたみ可能な「受動的」構造物として搬送され、同型もしくは異構造の複数ロボットによる協調作業により、現地での展開・組立が行われることを想定した。一方、有人居住ユニットについては、大型かつ内部空間を伴う構造が求められるため、インフレータブル構造などの「能動的」展開要素を用いた実装を前提とした。

令和 6 年度においては、ロボットハードウェアによるテレオペレーション実験を通じて、異構造の複数ロボットが協調し、太陽発電タワー、無線中継局、およびインフレータブル型の居住モジュールを模擬した月面拠点の基本構造物を対象とした展開作業のデモンストレーションを実施した。一部の機能については、Digital Twin 上での学習に基づき生成された制御方策を、実機上に実装して動作させる Sim2Real の実験も実施した。

研究開発項目 2: AI ロボットによる月面拠点の実現

研究開発課題 2: インフレータブル構造を用いた有人拠点構築

当該年度実施内容:

2050 年に月面に文明都市を作るためには、人類が居住する拠点の構築が重要である。本研究では、このような月面での有人活動の拠点の実現を目指し、ロボットとの協調動作により有人活動拠点を自律的に構築するインフレータブル構造物 Homeostatic Inflatable Decentralized Autonomous Structure (HIDAS: ハイダス)を実現する事を目的としているが、2024 年度は HIDAS の変形・移動機能を実現すると共に、複数の HIDAS とロボットとの相互協調による HIDAS の結合など居住空間拡張を目指し、HIDAS と外界、及び、HIDAS 相互の認知機能について研究を進めた。

具体的には、直径 1.4m、長さ 2m 程度の HIDAS 地上実証モデルを開発し、HIDAS に配置された「小型自律分散制御ユニット」が収集する各セルの圧力センサ・姿勢センサの情報に加え、外部に配置した小型カメラ群の情報を総合することで、自律的に展開し、所定の形状を実現し維持する機能を実現した。また、展開の不具合をロボットによりモニタリング・同定する実験も実施した。

研究開発項目 2: AI ロボットによる月面拠点の実現

研究開発課題 3: インフレータブル構造物ロボット化に向けたシミュレーション基盤構築と制御学習

当該年度実施内容:

本年度は、計測データに基づきモデルパラメータを調整するデータ同化機能を備えた HIDAS のシミュレーション基盤の構築に取り組み、実際の挙動に近いシミュレーションを実現した。各インフレータブルユニットの膨張・収縮による回転移動の実現可能性を検証し、圧力制御によって回転移動が達成できることを示した。シミュレーション環境に加えて、エアシリンダを用いた検証用モックアップを構築し、制御学習手法の検証も進めた。

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

PM および課題推進者 (PI) からなるプロジェクト全体会議を組織し、必要に応じて全体会議を開催した。また、PM および各 PI 間にて横断的な研究開発を効率よく推進するため、モジュラーロボットの設計・同プロトタイプを試作、およびモジュラーロボットに実装する AI システムの検討など、トピックごとに Weekly ベースの検討会や設計会議を実施した。モジュラーロボットのハードウェア設計に関してはロボット開発に実績のある企業、ソフトウェアに関しては AI に関する実用システムを開発している企業とも情報交換の場を持つなど、効果的な研究進捗のためのマネジメントを行った。

また、モジュラーロボットのハードウェアを用いた総合的な実証実験については、JAXA 相模原キャンパス宇宙探査実験棟・宇宙探査実験フィールドを、2024 年 10 月 21 日～11 月 9 日、および 2025 年 2 月 20 日～3 月 13 日の期間に渡って有償利用して実施した。それぞれの実証試験の準備は PM 支援チームを中心に準備を進め、全 PI の研究チームが参加して実験を遂行した。

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: モジュラー・マルチエージェントなロボットシステムの実現

研究開発課題 1: モジュラーロボットの設計、製作・機能解析

当該年度実施内容:

(1) モジュラーロボットの構造と制御のレポジトリの構築

1-1 機械学習によるロボットの構造と制御の同時最適化アルゴリズムの開発

グラフ構造の更新の際に用いるグラフ文法の表現と、グラフ文法にしたがって作成したロボット構造を表すグラフを物理シミュレータ上に実現するために必要な URDF ファイルの書き出しの機能をもつグラフ文法表現用コンピュータ言語 GGDL の開発を行った。令和 6 年度中に基本的な開発を終えることができた。GGDL の最新の仕様については、国際会議 SWARM2025 での発表を目指して準備を行っている。また、GGDL を活用したロボットの同時最適化プログラムを作成した。

1-2 予期せぬ故障にもロバストなロボットの構造と制御の同時最適化アルゴリズムの開発

まずは整地走破タスクを対象に、ロボットの構造と制御の同時最適化の枠組みを用いて設計することの有効性を統計的に示すために必要な結果を得た。この検証では、ランダムに故障を発生させながら学習させることにより、訓練中には経験していない故障状態においても歩行を継続できるロボットと制御器の獲得に成功している。この結果をまとめたものは国際論文誌に投稿中である。ただし、上記はモジュラーロボットに限定した手法ではない。そのため、モジュラーロボットに限定した場合および不整地走破タスクに対して同様の検証を行う準備を進めている。不整地環境としては、自然環境における地形の特徴をよく再現できると知られるパーリンノイズを基に高低差を生成する方法と一様ノイズにより高低差を決定する方法の2つを実装済みである。

1-3 モジュラーロボットの設計指針の確定

モジュラーロボットの構造更新ルールをグラフ文法で与え、ロボット構造を表すグラフと対応する制御則を同時最適化するプログラムを作成した。このプログラムを利用し、整地・不整地の走破タスクにおいて最適と判断されるロボットの自動設計を実行中である。このプログラムでは、「1-1 機械学習によるロボットの構造と制御の同時最適化アルゴリズムの開発」で作成しているグラフ文法記述言語 GDDL を活用している。一方で、グラフ文法に依らない別の枠組みでロボットの構造と制御の同時最適化を実施するプログラムも作成中である。グラフ文法を利用する方法では、グラフの更新をあらかじめグラフ文法で規定したものに拘束している。グラフ文法に依らない枠組みでは、ロボット構造の更新における選択肢を広げる一方で、グラフ同型の判別をより綿密に実施することで探索空間の爆発的な増大を抑えつつ探索を行う。

1-4 モジュールの構造と制御のレポジトリの構築

移動タスクについては、モジュラーロボットの構造と制御の同時最適化アルゴリズムの基本的な実装を終え、整地および不整地での移動タスクに関して最適化を実行中である。この結果を今後レポジトリとして蓄積していく。なお、上述のプログラムではロボットの左右対称性を仮定するなどしてロボットの複雑さに制約を置いているが、より複雑なロボットを構成しうるアルゴリズムの検討を進めている。また、より具体的なタスクに適した報酬を設定するための検討を進めている。

1-5 モジュールロボット群システムの構成と方策の同時最適化およびレポジトリの構築

同時最適化されたロボット群のレポジトリの構築はまだ開始したところであるが、タスクアロケーションのアルゴリズムはロボットの構成に依らずに利用できると考えられる。そのため、まずは現時点で妥当性が高いと思われる構成でタスクアロケーションについて考察を進めている。

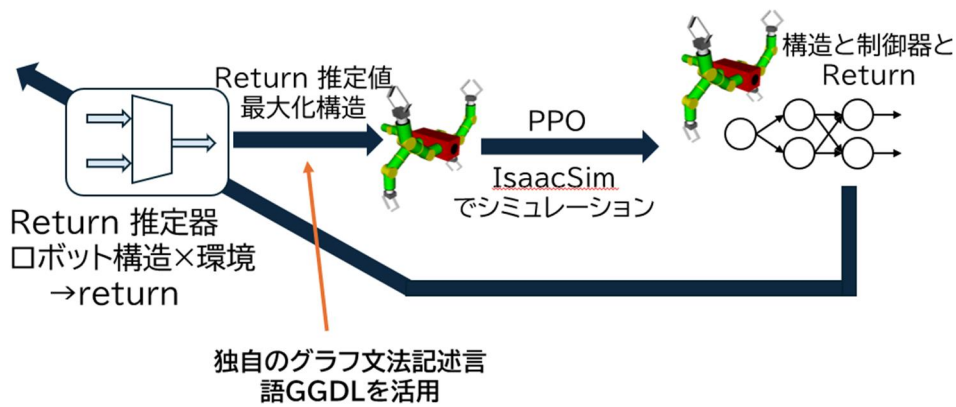


図 1 グラフ文法記述言語 GDDL を用いた構造と制御の同時最適化

(2) 組み換えを可能とするモジュールの結合機構の設計と地上実証用モデルの製作

2-1 組み換えを可能とするモジュールの結合機構のハードウェア設計

機械的結合機構：

月面のレゴリス環境を想定した金属薄板による防塵機能を持った結合機構の開発を行った。サイズについては直径 100mm、厚み 40mm と目標値を達成した。重量については剛性と結合力の確保のため 400g と目標より 30%重い結果となった。結合力については計測により 35Nm 以上の許容トルクを持つことを確認した。また、本結合機構には、結合時の姿勢誤差について、 $\pm 13^\circ$ の誤差を許容することが可能な誤差吸収機構を搭載した。柔剛可変の受動関節からなる誤差吸収機構は柔軟状態から剛状態への遷移時に 12Nm の復元トルクを発生させることを確認した。今後は軽量化と結合力強化に向けた設計の改良を進めていく。

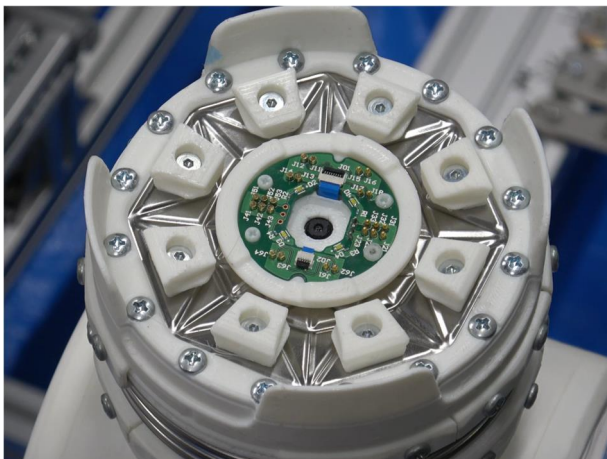


図 2 ロボットモジュールの結合機構のハードウェア

電氣的結合機構：

電氣的結合としてモジュール間で LAN 通信、RS485 通信、電力供給電を可能とする直径 35mm の円形状基板を作製した。LAN 通信能力の評価として、まず物理的特性を計測したところ NEXTが 1.4dB、リターンロスが 4.8dBという結果になり、LAN通信路として十分な物理的特性を有していることを確認した。また、この電氣的結合基板を2つ結合させたものを經由して、2つのPC間で 1000BASE-T規格でリンクアップできることを確

認め、iperf3 を用いてスループットを計測すると 948Mbps で通信を行うことが可能なことを確認した。また、RS485 通信能力については、作製した電氣的結合経由で PC と dynamixel モーターとの間で 2Mbps の通信速度で通信可能であることを確認した。さらに、モジュール間電力受給電能力については、あるリムモジュールから結合したほかのリムモジュールやグリッパーモジュールに 15V 最大約 0.3A で電力供給が行えることを確認した。

ボディーモジュール:

異種モジュール群におけるモジュラーロボットシステムの機能多様性の向上を図るため、ボディーモジュールの結合面数の増加とリムモジュールの駆動制約を考慮した、斜方立方八面体形状のボディーモジュールの開発とそれを用いた実験を行った。移動のタスクにおいて車輪数の異なる形態 (3 車輪および 4 車輪形態) を構成し、形態多様性やエネルギー効率の観点からボディーモジュールの有用性を評価した。その結果、ボディーモジュールの多方向結合性と対称性により複数の移動形態の実現が可能となり、形態構成の多様性とタスク適応性の向上を確認した。

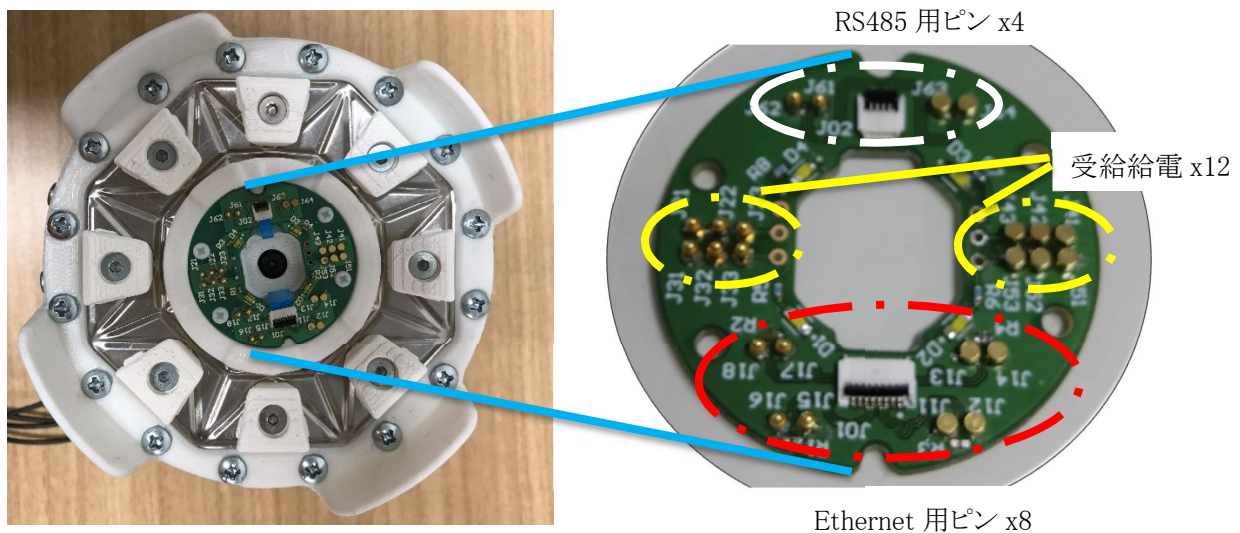


図 3 ロボットモジュールの電氣的結合部

グリッパーモジュール:

グリッパーモジュールとして、反転結合可能なグリッパの設計と製作を行った。グリッパは、2指とし、受動結合機構を2か所 (リムおよびグリッパーモジュールの軸方向に対して、0度と180度の位置) 装備した。2台のサーボアクチュエータにより把持機能、および2指の180度反転動作を実現する機構とした。設計要求に従って把持力50N、質量500gを目指したが、詳細設計段階での強度解析の結果、質量500gを達成することには強度上の不安が生じたため、把持力を20Nとし、質量は800g程度に変更した。これによりグリッパモジュールのリム間での受け渡し、自己組み立てタスクの実現などが期待できる。

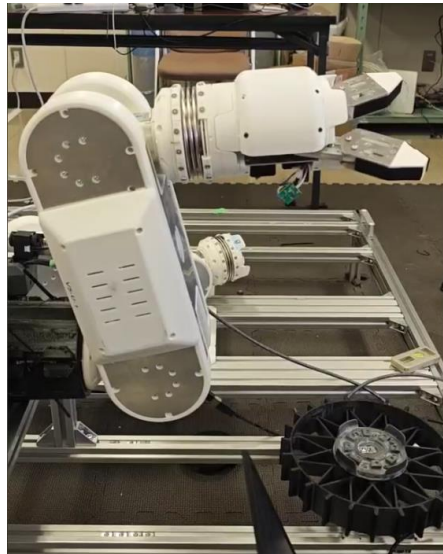
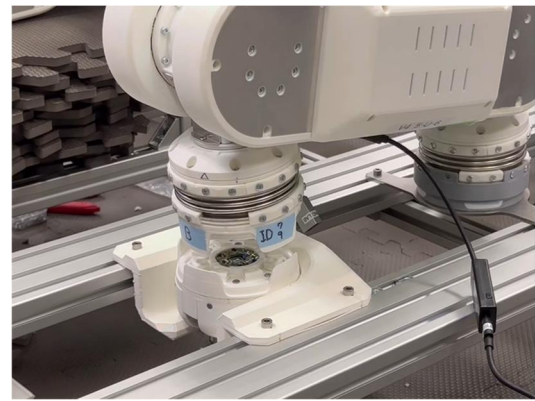
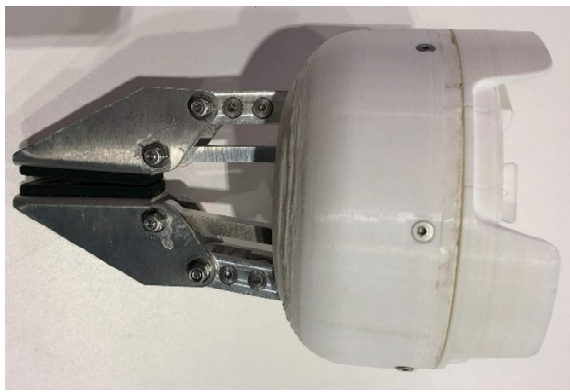


図 4 開発したロボットモジュール群

多機能エンドエフェクタ:

昨年度までは、多機能エンドエフェクタの4機能(車輪・グリップ・スコップ・ドリル)を発揮することに注力するため、構造が若干異なる4種類のエンドエフェクタを作成してきた。今年度は、それらを一つのエンドエフェクタに統合することで、変形によって4機能を適応的に実現可能な多機能エンドエフェクタを実現した。さらに、実際にボディモジュール・リムモジュール・多機能エンドエフェクタモジュールを結合させて、杭埋め作業をタスクとしたマニピュレーションを行った。具体的には、まずスコップ機能により砂表面を平らにし、その後ドリル機能により砂を掘り、その後グリップ機能により杭を把持して、掘った砂部に杭を挿し込むというタスクである。その一方で、リムモジュール単体と多機能エンドエフェクタモジュールを結合させ、多機能エンドエフェクタモジュールを車輪として機能させることで、リムモジュール単体移動を実現した。



図5 開発した多機能エンドエフェクタ

2-2 組み換えを可能とするモジュールロボットシステムのソフトウェア設計

モジュール結合形態が時々刻々と変化していくときにあっても、モジュール間のデータ通信路を確保する通信プロトコルと運用規約、それらを実装したシステムを開発した。これによれば物理的結合していないモジュール間は無線通信し、物理的に結合した場合は、結合機構の機能として接続される有線通信路によるデータ通信が自動的に始動する。逆に、モジュールが物理的に分離した場合は、当然の帰結として有線通信路は切断されるが、無線通信路によるデータ通信が継続される。有線通信路と無線通信路を共存させることも可能で、その場合には重複データは捨てられる。いずれかの通信路が断じたときには概ね途絶なくデータ通信が継続する。通信路を片方だけにする場合は自動切り替え時の通信途絶時間がより長くなる。いずれの場合も、モジュールの結合分離時にデータ通信が途切れず、その結合分離形態に併せてそのときに最高速のデータ通信路が自動的に確保されるという意味で、モジュールの組み換えが可能となる効果を得る。

2-3 地上実証用ロボットモデルの製作とシステムインテグレーション

組み換えを可能とする概念を実現するために、リムモジュールを12本、ボディーモジュール2種類合計3台、車輪モジュール2種類の合計8台、多機能エンドエフェクタ、グリップパーモジュールを製作した。また、リムモジュール単体の移動、複数のリムモジュールの間の自律結合、結合後に走行などの機能を実現できるシステム構造を提案し、実装した。システムはROS2を使用し、分散システムを実現した。試作したモジュールとシステムを用いて、以下の実証実験を実施した。

1. リムモジュール単体の自律結合実験

リムモジュールがARマーカーを認識して車輪モジュールやグリップパーモジュールと自律結合する動作を実現した。グリップパーモジュールの結合機構を介して、バッテリーやコンピュータを持たない、グリップパーモジュールの制御を実現した。

2. リムモジュール単体の走行実験

単体のリムモジュールが2つの車輪モジュールと結合した2輪車走行モードを実現した。JAXAの月面模擬実験場の砂環境での坂登りを実現した。

3. リムモジュール2本の自律結合実験

リムモジュール2本が自律結合をして、7自由度アームを構成することを実現した。

4. 結合したモジュールの走行実験

ボディーモジュール 1 台、リムモジュール4台、および車輪モジュール 4 台で 4 輪ローバーを構成した。また、リムモジュールとボディーモジュールの結合位置を組み換えることによって、異なる形状のローバーを構成して、それぞれのローバーの移動性能を砂環境で実験した。

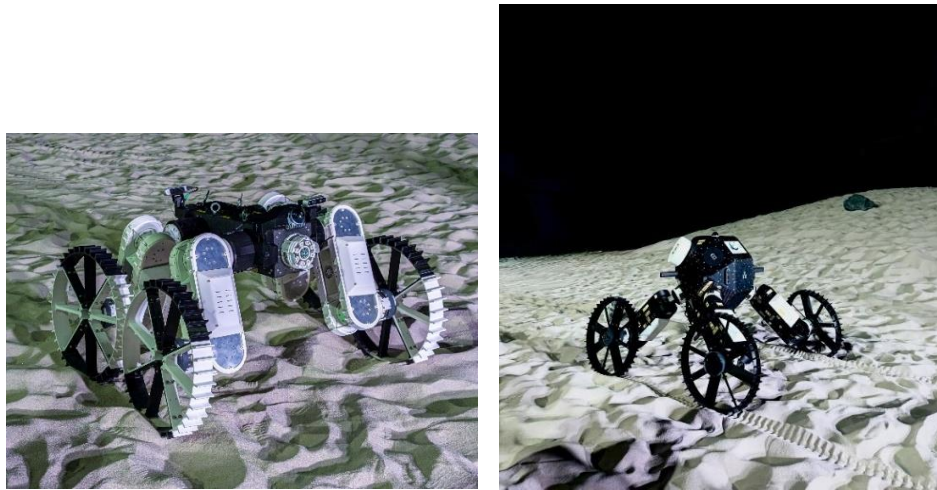


図 6 開発したモジュールを結合した車輪型ロボット

(3) モジュール再構成アルゴリズムの開発とロボットモデルへの実装

3-1 モジュール再構成アルゴリズムの開発

探索グラフの構築、同形判定手法、およびニューラルネットワークを用いた同形判定手法の開発を行った。モジュールとしてボディ 2 個、リム 5 本、エンドエフェクタ数個程度までのロボット構造において、それらの手法が正しく機能していることを確認した。シミュレーションによる実行可能性の検証のため、物理シミュレータ NVIDIA IsaacSim、運動プランニングフレームワーク MoveIt、通信フレームワーク ROS2、および自作の C++、Python プログラムの整備を行い、シミュレーションのための環境構築を実施した。非連続的であるが、上記の探索グラフに基づく変形プランの可視化が可能となった。

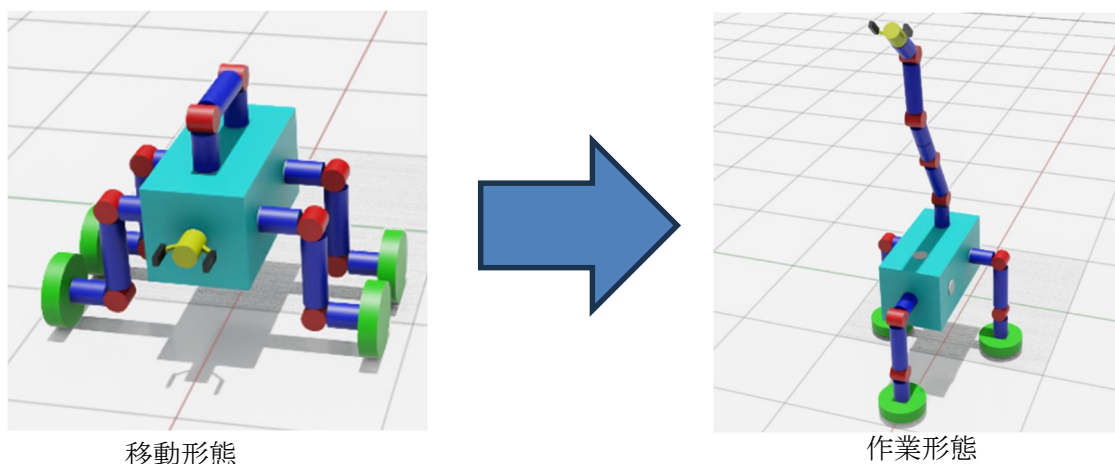


図 7 モジュール型ロボットの形態変形例

3-2 開発したアルゴリズムの地上実証用ロボットへの実装

開発したアルゴリズムを地上実証用のロボットに実装するための第一段階として、前述のように物理シミュレータ上で変形プランを可視化し、ハードウェア側との変形アルゴリズムの検証を実施した。

(4) モジュラーロボットの Plug and Play を柔軟に管理するシステムの開発

4-1 モジュールの相互接続の管理システムの開発

モジュール結合・分離が行われるたびに自動的に結合形態を更新し記憶するレポジトリを設計・実装した。モジュール、ロボット基地側施設、通信中継施設の名前付けルール、モジュールの結合機構の名前付けルール、各通信ノードへのネットワーク上の固有番号 (TCP/IP 通信における IP アドレス) の付与と運用のルール、無線 LAN のチャンネルなどパラメータ運用ルール、ネットワーク階層構造のルールなどを策定し、モジュール結合形態が時々刻々と変化していくときにあっても、モジュール間のデータ通信路を分散的に、かつスケーラブルに確保するシステムを開発した。

4-2 モジュール Plug and Play システムの UI の開発

各モジュールが持つ情報とモジュールの接続状況を統合して管理者に提示するために、ROS2 を援用したモジュール・UI 用サーバー間の通信プロトコルを策定し実装した。これにより、これまで開発してきたインターネットを介した UI の 3 次元空間内に、モジュラーロボットの構造や各モジュールの状態を提示可能となり、モジュラーロボット単体あるいはロボット群の状況を管理者が把握できるようになった。これと同時に、UI からロボット群への通信プロトコルも策定・実装し、モジュラーロボット内のアクチュエータを動かすことも可能となった。モジュール構成を遠隔で指示する UI については、今年度新たに 3 次元空間内でのモジュール構成を組み換えられる UI を開発し、その操作性を検証した。検証の結果、これまで開発してきた 2D の UI と比べると、組み換えに要する時間は増大したものの操作ミスの回数は減少させることができた。この UI については次年度時間短縮のための改善を行い、インターネットを介した UI との統合を図る。

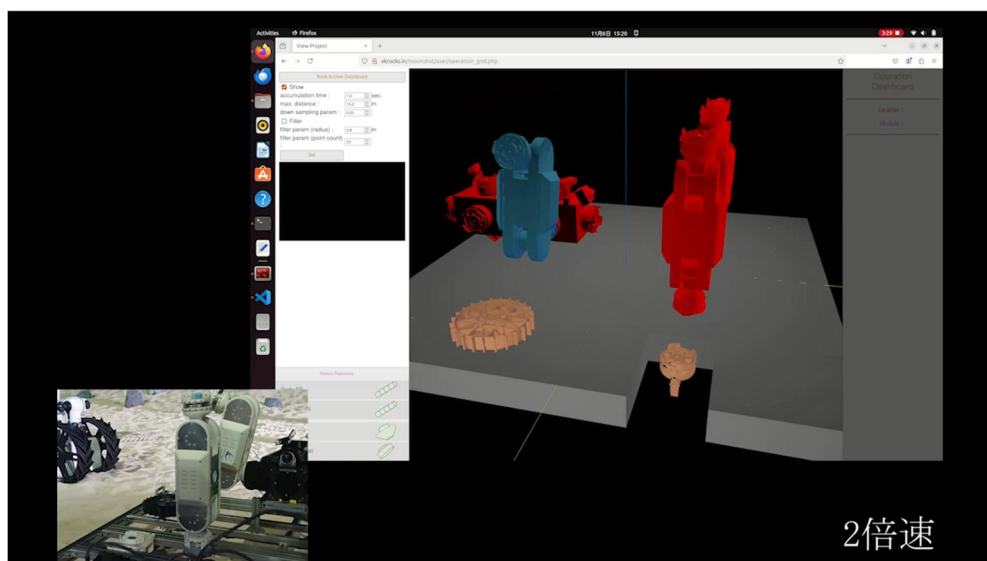


図 8 モジュール Plug and Play システムの UI 表示例

(5) 異種モジュラーロボット群の自律分散協調制御系の構築

5-1 リーダーによるフォロワー群の誘導制御系の構築

複数のリーダーと複数のフォロワーから構成される異種ロボット群が複数の障害物が存在する環境において目標位置に移動するための自律分散型制御系を設計した。牧羊犬が羊を追い立てる Shepherding 行動に着想を得て制御器を設計した。フォロワーは近傍のロボットと障害物までの相対距離を取得可能で、リーダーはすべてのロボットと障害物までの相対距離および目標位置を取得可能である。フォロワーは他のフォロワーから離れるとフォロワー間に引力が生じ、他のフォロワー、リーダー、障害物に近づくとその間で斥力が生じる。これにより、フォロワーは群れ構造を保ちつつ障害物を回避することができる。リーダーはフォロワー群を追い立てることで目標位置まで誘導する。制御系の有効性を検証するためにシミュレーションを行った。シミュレーション環境には様々な形状の障害物が存在しており、ロボット群が障害物を回避しながら目標位置に到達可能であることを確認した。

5-2 大型物体の異種モジュラーロボット群による分散協調運搬制御系の構築

1台のリーダーと複数のフォロワーから構成される異種ロボット群が車輪を持つ大型の任意形状の物体を目標位置まで運搬するための分散協調運搬制御系を構築した。ロボットは物体の周囲を取り囲み、物体を押しながら移動することで運搬を行う。フォロワーはリーダーまでの相対距離などの自身の近傍のローカル情報のみ取得可能で、リーダーは目標位置などのグローバル情報も取得可能である。フォロワーはローカル情報に、リーダーはグローバル情報に基づいて制御器の入力を求める。制御系の有効性を検証するために動力学シミュレーションを行い、異種ロボット群が車輪を持つ物体を目標位置まで運搬可能なことを確認した。

5-3 正常性監視・異常検出と故障時のリカバリー制御

ロボットモジュール間の機械的結合機構の正常性監視における結合動作時の結合爪の異常な噛み合いのリアルタイム検出問題に取り組んだ。具体的に、結合機構の結合爪を押し出す軸の回転角度のサンプリングデータを利用した幾何移動平均管理図と一般化尤度比アルゴリズムに基づくオンライン異常検出法を開発した。さらに、開発した異常検出法を実際の機械的結合機構に実装し、実機実験により有用性を実証した。

5-4 複数の群れのタスクアロケーションの実現

月面環境におけるモジュラーロボット群の協調動作を効率的に行うため、ロボット群の構成とタスクアロケーションを同時に最適化する二段階最適化フレームワークを構築した。まず、ロボット群の構成に対して多目的最適化を行い、再構成に要するモジュールの運搬コストや作業パフォーマンスに基づいて有望な群れ構成を抽出した。次に、それらに対して詳細なシミュレーションを用いたタスクスケジューリングを実施し、複数タスクの同時実行効率を評価した。さらに、モジュール故障などの不確実性を含むシナリオをシミュレーションに導入し、群れのスケーラビリティや頑健性を検証した。本フレームワークにより、限られた計算リソース下でも効率的かつ柔軟なタスク遂行が可能であることを確認した。

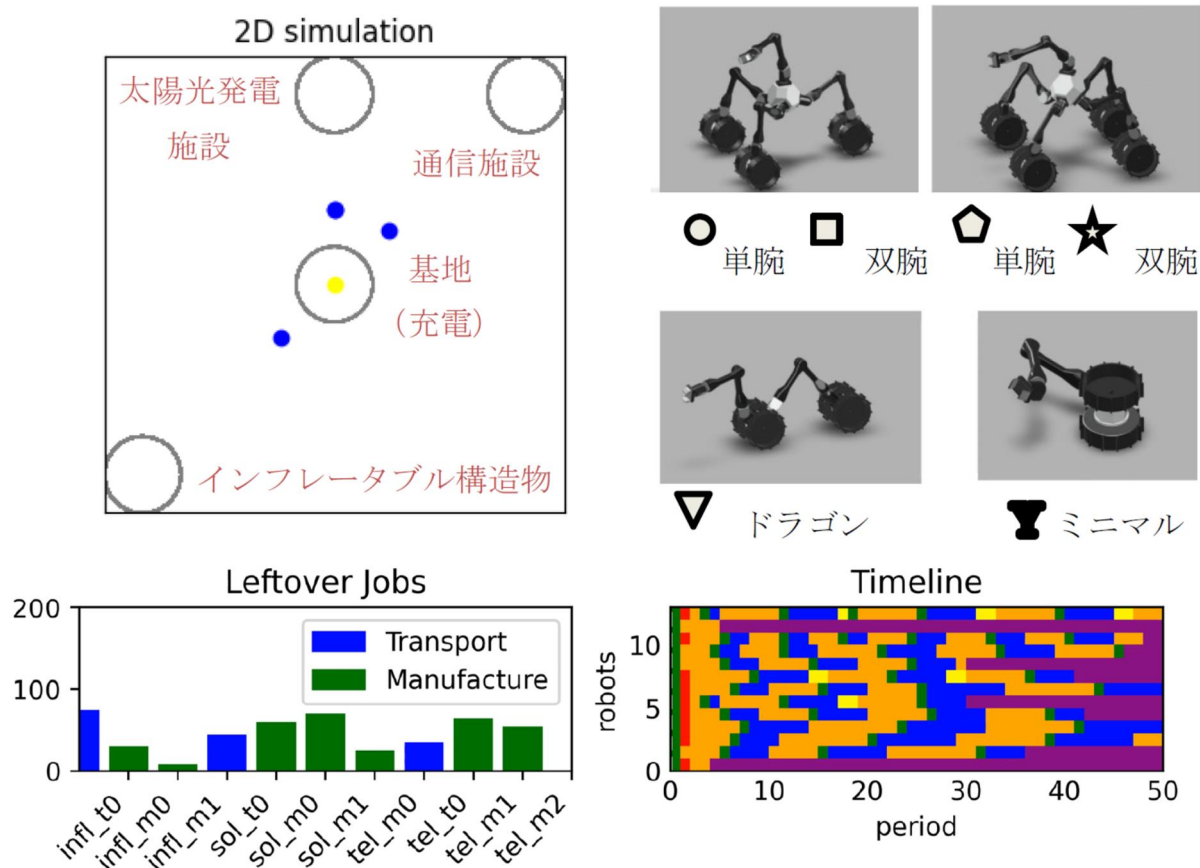


図9 タスクアロケーションのシミュレーション例

課題推進者: 松野文俊 (大阪工業大学)

研究開発課題2: 階層型強化学習による分散型 AI の研究開発

当該年度実施内容:

本プロジェクトで開発が進められている月面モジュールロボット(MoonBot)への実装を念頭に、昨年度まで検討に用いたアームモジュールとハンドモジュールを有するロボットシステムに移動ロボットモジュールを新たに加えた統合ロボットシステムのシミュレーション環境の構築を吉田グループ(東北大)から提供を受けたモデルファイルにもとづいて進めた。さらに、これらの統合ロボットシステムを制御するための階層型強化学習システムを新たに導出し、アーム・ハンド・移動モジュールを有する統合ロボットシステムにおいてマニピュレーション課題への適用をおこなった。具体的には、所定の位置まで移動し、操作対象物を把持・回転するタスクを実施するモジュール群の方策を学習した。下位側の階層では一つの学習モジュールが腕ロボットの手先を目標位置に持っていく腕ロボットのリーチ動作のための方策 (arm) を獲得。さらに一つの学習モジュールがバルブの把持動作のための方策 (gripper) を獲得。さらに、別の学習モジュールが移動ロボットモジュールを所定の位置まで移動させる方策 (rover) を獲得する。上位側の階層はそれら下位側のモジュール群を活用する上位方策として、バルブまでの移動動作と手先を最適な角度、位置に動かす方策を統合的に学習するような階層

構造を考えた。事前に下位側の各学習モジュールが方策を獲得した後に、モジュラー構造を構築することにより、把持、移動、バルブ位置、角度を合わせるようなタスクの実行を可能とした。その結果として、下図に示すように所定の位置へ移動し、バルブを適切な角度へ操作する方策を獲得するに至った。一方で、階層構造のない学習手法ではそもそもタスクを達成することができなかった。結果として、提案するモジュラー性を利用したカリキュラム学習の要素を含む階層型強化学習によって移動・マニピュレーション課題において適切な方策を効率的に獲得できることを実証し、マイルストーンを達成した。

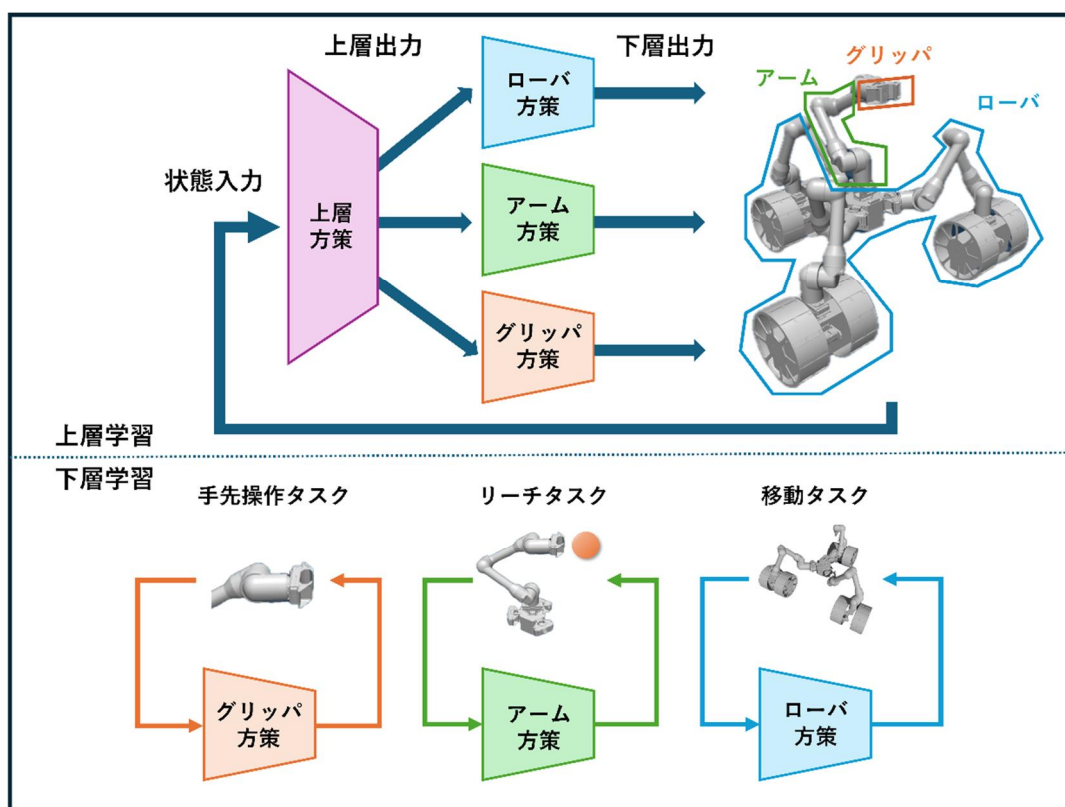


図 10 階層型強化学習の概念図(3 階層の例)

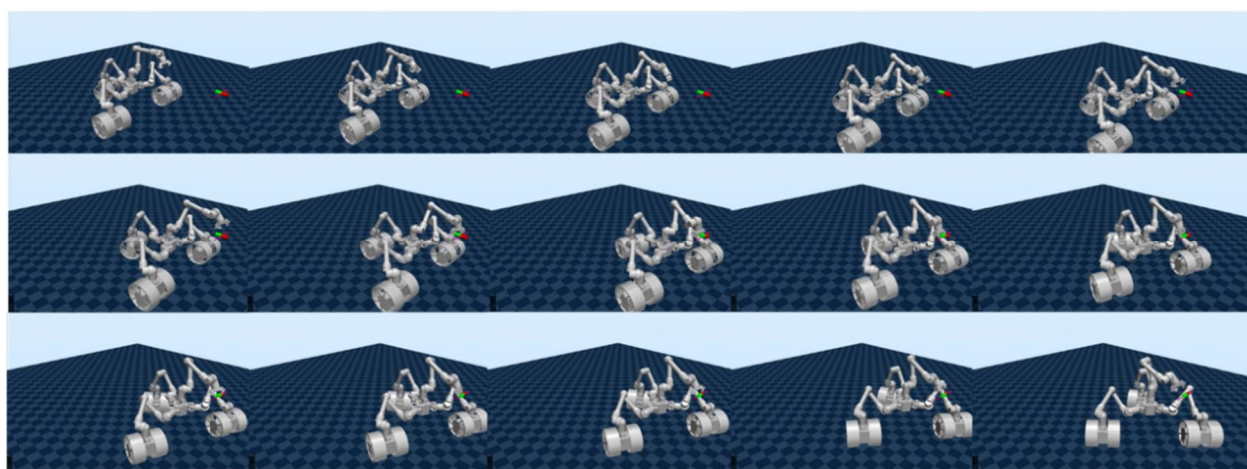


図 11 統合ロボットシステムにおける移動・操作方策の獲得例

課題推進者: 森本淳(京都大学)

(2) 研究開発項目2:AI ロボットによる月面拠点の実現

研究開発課題1:複数ロボットによる拠点構築の統合制御

当該年度実施内容:

研究開発マイルストーン達成に向けて、本年度前半にはモジュラー型ロボットのプロトタイプ「MoonBot」を完成させ(図 12)、JAXA 宇宙探査実験棟内の宇宙探査実験フィールドにて、各種ベンチマークタスクに対応した実証実験を実施した(図 13)。

開発したロボットやインフラ構造物の動作検証は、現時点では人による遠隔操作(テレオペレーション)が中心であるが、作業計画立案を担うシミュレーション系の整備や、各ロボットの制御方策を導出するための Digital Twin の構築および Sim2Real の実現も着実に進展しており、マイルストーンの達成が十分に見込まれる状況である。

また、実験の繰り返しを通じて、多様な偶発事象(コンティンジェンシー)モードの抽出と、それに対するリカバリー手法の検討を進めており、2025 年に向けた自律化の実現にも確かな見通しが立ちつつある。

- (1) ベンチマーク・タスク1:ロボットが自身のモジュール、あるいは他ロボットのモジュールを着脱・交換する。
- (2) ベンチマーク・タスク2:太陽発電設備や無線通信局等の組立作業を想定し、挿入・引出し・ラッチングなどの基本動作を、事前学習によって得られた組立手順、動作制御方策に基づいて自律的に実行する。
- (3) ベンチマーク・タスク3:有人モジュールを想定したインフレータブル・ユニットである(HIDAS 地上実証モデル)の展開において、HIDAS の能動性と協調して、2つの HIDAS 間の位置決め作業、結合作業を実施する。

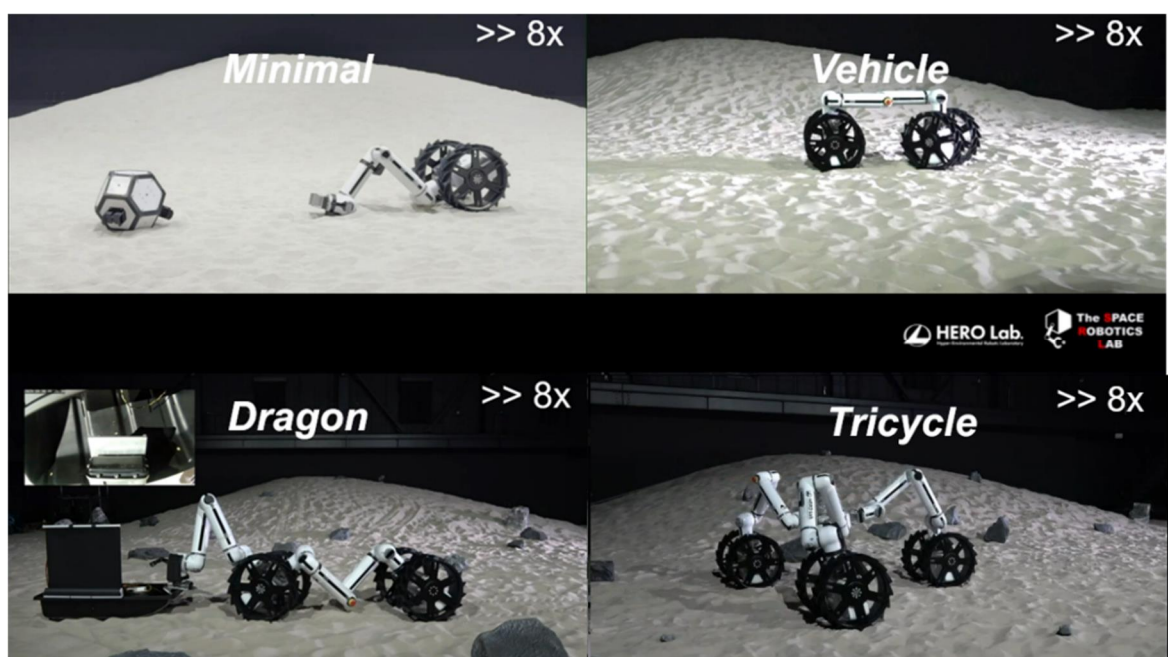


図 12 MoonBot のモジュール組み換えによる 4 つの形態

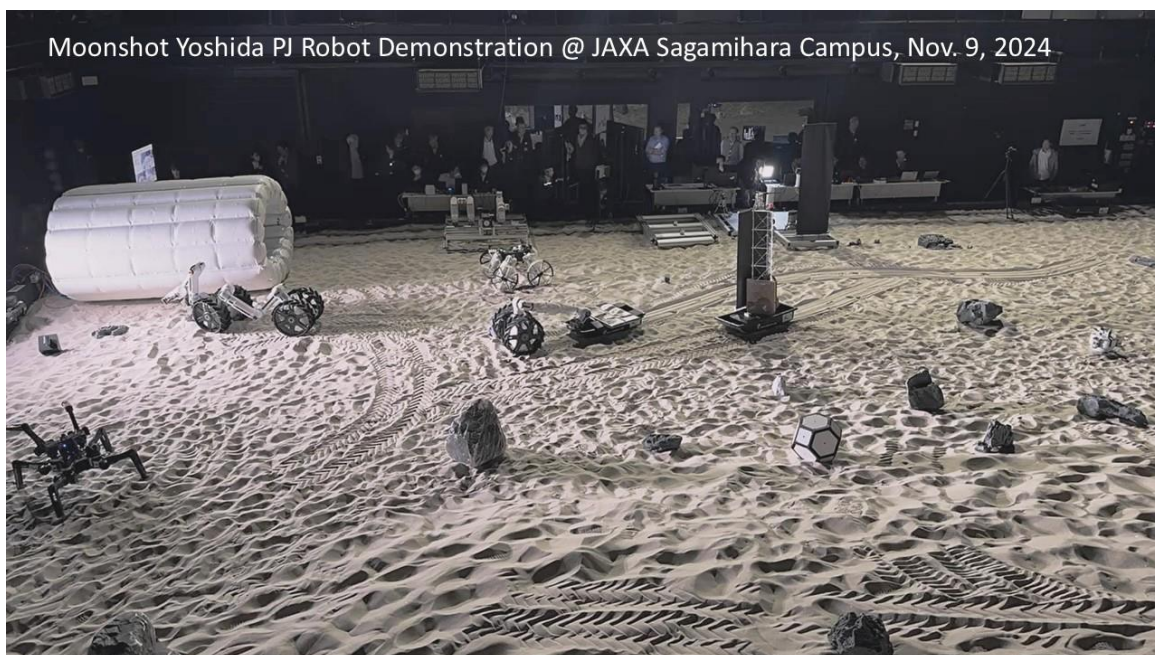


図 13 JAXA 宇宙探査実験棟・宇宙探査実験フィールドの様子(2024 年 11 月 9 日)

ベンチマーク・タスク1:ロボット自身の自己組み立て

ベンチマーク・タスク 1 では、月面着陸直後を想定したパレット上での組立(結合・着脱・交換)作業のデモンストレーションを実施した(図 14)。2024 年 11 月に JAXA 宇宙探査実験棟で実施した実験では、主に遠隔操作(テレオペレーション)による制御を用いた動作検証を行ったが、2025 年 3 月に実施した再実験では、AI 画像認識を用いた自律制御の要素を組み込み、定型作業については自律組み立てを実施できる基盤を整えることができた。

完成したハードウェアを活用しつつ、森本 PI との連携のもとで、機械学習技術を取り入れた自律制御ソフトウェアの実装を本格的に進めている。この取り組みにより、各ベンチマークタスクにおける自律化の実現と、それに伴う動作シーケンスの高速化・高効率化が早期に達成できると期待される。

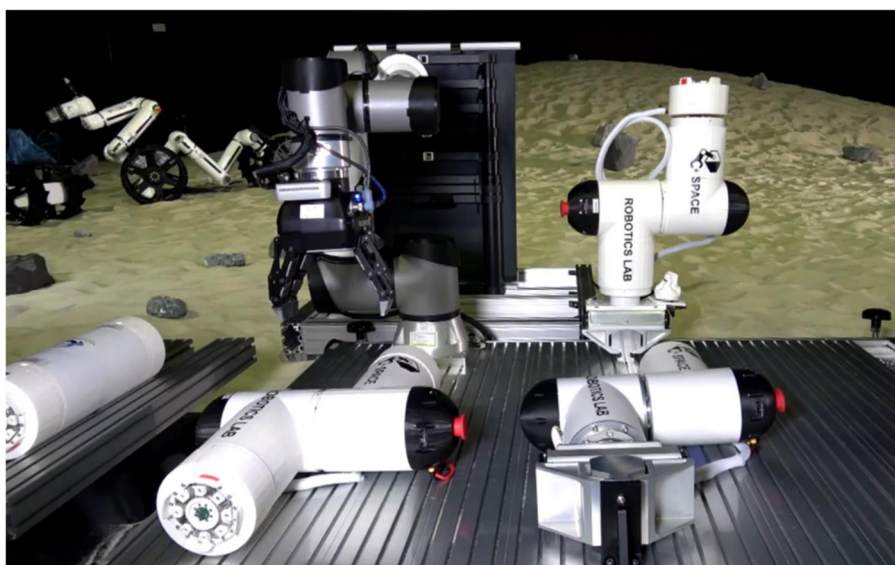


図 14 モジュールロボット MoonBot のパレット上での自己組立の様子

ベンチマーク・タスク2 太陽発電設備および無線通信局等を想定した組立作業

ベンチマーク・タスク 2 では、今年度、複数ロボットによる協調動作の具体例を提示することに成功した。松野 PI および森本 PI との連携のもと、与えられたタスクを達成するためのマルチエージェント制御手法の開発を進め、シミュレーション環境上でのタスク動作の可視化、およびその結果を実機を用いたハードウェア検証へと展開する Sim2Real の構築を前進させることができた。

また、高さ 1m 以上の模擬太陽発電タワーの展開を想定した実験も実施し、3 つの方式―①能動的に伸展するマスト型、②ロボットによって受動的に展開されるはしご型、③ロボットが設置するパネル型―すべてにおいて展開動作の成功を確認した(図 4)。

これらの作業においては、限定的ながら画像認識を用いた自律制御の導入も行われ、ロボットハードウェアの性能が本タスクの遂行に十分であることを実証できた。

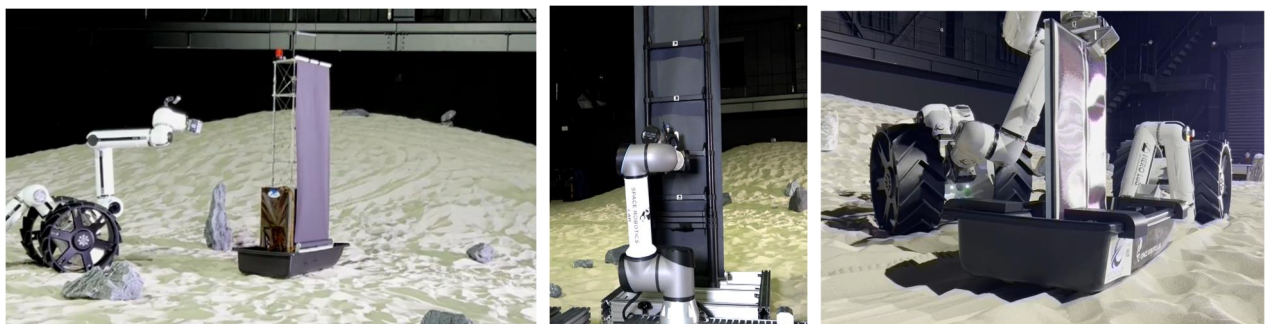


図 15 模擬太陽発電タワーのロボットによる展開・組立実験

(左:マスト型、中央:はしご型、パネル型)

ベンチマーク・タスク3 有人モジュールを想定したインフレータブル・ユニットの展開支援

ベンチマーク・タスク3については主に 2025 年度の実施内容としていたが、本年度においても一定の成果を得ることができた。インフレータブルモジュール HIDAS (Homostatic Inflatable Decentralized Autonomous Structure) の展開支援のためのロボットによる HIDAS 膨張状態のモニタリングおよび敷設後の安定化(輪留めの設置)についてデモンストレーションする実験を成功させることができた。ベンチマーク・タスクタリングについては、MoonBot のアームモジュールに取り付けたハンドアイカメラからの映像を入力とした画像ベース AI によって膨張が不足しているセルの自動検出を実証しており、後者の安定化については、本ベンチマーク・タスクとして掲げている2つの HIDAS 間の位置決め作業、結合作業のために必須となるプロセスであることから、本マイルストーンについても本年度に一定の進捗を得られたと判断する。なお、今後については複数の HIDAS の結合のためには HIDAS 自身の移動性能の向上が必要であり、木村 PI の連携の中で、HIDAS 自身の移動とそれら結合作業支援のためのロボットのタスクを詳細に定義して取り組むことで、2025 年度中に達成可能と見込んでいる。

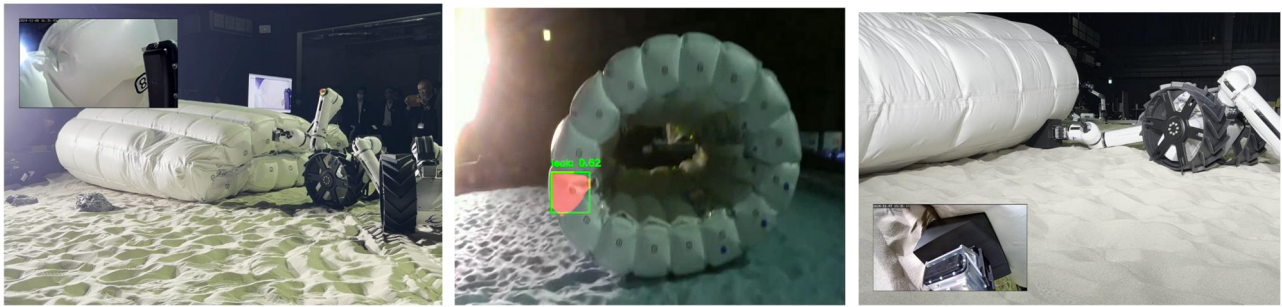


図 16 インフレータブルモジュールのロボットによる展開支援

(左:膨張状態をモニタリングする様子、中央:膨張が不足しているセルを画像 AI により特定した様子、右:ロボットによる輪留めの設置の様子)

課題推進者: 吉田和哉(東北大学)

研究開発課題 2: インフレータブル構造を用いた有人拠点構築

当該年度実施内容:

(1) HIDAS による不整地など環境条件に応じた自律的な展開・居住空間の構築

直径1.4m、長さ2m程度の HIDAS 地上実証モデルを開発し、HIDAS に配置された「小型自律分散制御ユニット」が収集する各セルの圧力センサ・姿勢センサの情報に加え、外部に配置した小型カメラ群の情報を総合することで、HIDAS の全体形状と環境条件を推定することで、不整地においても自律的に展開し、所定の形状を実現し維持する機能を実現した。

具体的には、各セルに配置したコントローラーが、セルの膨張収縮のパターンを変化させることで、不整地においても適応できる形状の変化を実現した。この機能について、宇宙科学研究所宇宙探査実験棟において、砂地に複数の岩を模した障害物のある環境で、デモンストレーションを行った。



図 17 JAXA 宇宙探査実験棟・宇宙探査実験フィールドでの HIDAS 展開実験

また、HIDAS の全体状況を外部から監視する小型カメラシステムを開発し、カメラシステムから得られる画像情報と、HIDAS に配置された小型自律分散制御ユニット」が収集する各セルの圧力センサ・姿勢センサをネットワーク上で共有することで、HIDAS の全体状況について推定するシステムを構築した。カメラとしては、SLIM に搭載された LEV-2 で活用された超小型 AI ボード Spresense を活用することで、小型省電力でありながら、AI を活用して形状の識別を効果的に実現するシステムを構築した。

(2) HIDAS のセルの膨張・収縮の時空間パターンを活用することによる変形や、簡易な移動機能の実現

推定した全体形状に基づいて、「小型自律分散制御ユニット」が各セルの加圧・減圧状態を自律分散的に制御することで、セルの膨張・収縮の時空間パターンを変化させ、HIDAS の全体形状を制御し、簡易な移動機能を実現した。

具体的には、HIDAS を構成する各セルに、収縮性を実現する要素を導入することで、内圧の状況によって展開だけでなく、収縮を実現する機能を実現する。(1)で開発した HIDAS の全体形状推定システムと効果的に連動することで、「小型自律分散制御ユニット」が状況に応じて、自律的にセルの膨張・収縮の時空間パターンを生成することで、簡易な移動機能を実現した。

課題推進者:木村真一(東京理科大学)

研究開発課題 3:インフレータブル構造物ロボット化に向けたシミュレーション基盤構築と制御学習

当該年度実施内容:

(1) HIDAS のシミュレーション基盤構築

- 離散要素法を用いた HIDAS シミュレーションを、WARP を用いて微分可能なシミュレーションとして構築し、計測データに基づくデータ同化によって、展開や回転動作時の形状変化や移動距離を再現可能とした。
- 圧力データの可視化など、CPS(サイバーフィジカルシステム)としての基盤整備を実施した。Isaac Sim との連携により、外部環境や他ロボットとのインタラクションについてもシミュレーション可能とした。
- 月面上での HIDAS 展開・移動を踏まえ、周辺環境の一つとして砂の流れのシミュレーションを行った。流体の計算手法に粒子法の構成式を導入することで、シミュレーション精度に対する粒子径および時間刻み設定の依存性が小さいことを確認し、スケールアップの可能性を示した。

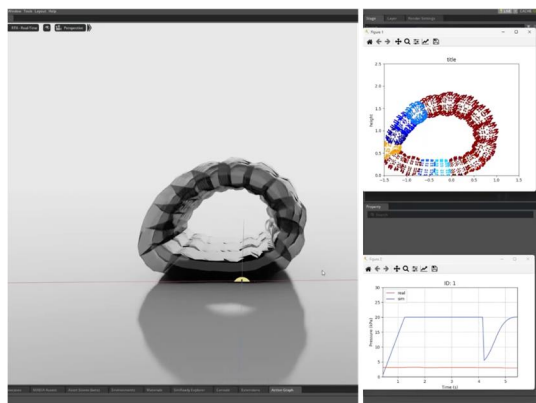


図 18 HIDAS シミュレーション環境

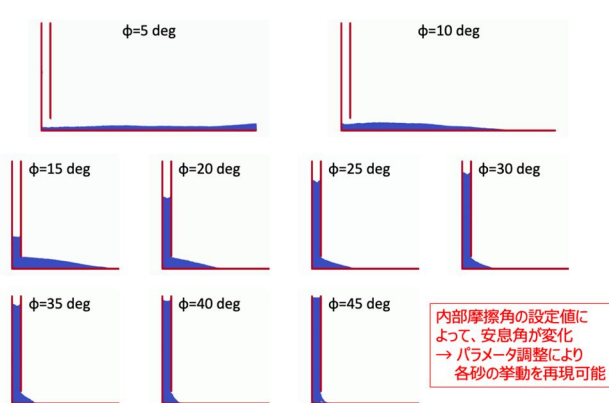


図 19 砂流シミュレーション結果

(2) シミュレーションを活用した HIDAS の制御学習

- 各インフレータブルユニットの形状変化により回転などの移動の基本機能が実現されることを確認した。(1)で構築した HIDAS シミュレーションを活用し、重心移動量を報酬とした強化学習により回転移動を実現した。
- 複数のエアシリンダを接続した模擬モデルを用いて、重心ヤコビアンに基づいた制御則を構築し、HIDAS の制御学習への展開を進めた。
- データ同化によるシミュレーション改善が制御学習に与える影響を検証するための、エアシリンダを用いた検証用モックアップを構築し、そのシミュレーション構築ならびに制御学習を進めた。

課題推進者: 山野辺夏樹(産業技術総合研究所)

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

進捗状況の把握

PM、課題推進者(PI)、PD、SPD および JST 関係者が参加する全体会議として、2024 年 4 月にキックオフ会議、2024 年 11 月にロボットのデモンストレーションを伴う成果報告会を実施した。

また、PM、PI および各 PI の研究参画者、大学院生等も参加して研究方針を確認し、進捗を確認する場として、①モジュラーロボットの設計・研究開発に関する進捗会議、および②AI 技術に関する研究会を組織し、それぞれ週 1 回のペースで開催し、チーム一丸となって研究開発を推進した。

研究開発プロジェクトの展開

世界中から研究者の英知を結集し、研究開発プロジェクトの成果を国内外の学術コミュニティへ広く展開するため、PM および PI が持つ個人的なネットワークや、所属大学の国際交流の枠組みを活用して、若手研究者や大学院生の受入れや送り出しなどの人材交流を積極的に推進し、日本人メンバーに加えて、計 30 名以上の外国人博士課程・修士課程学生、および海外大学からの交換留学生在が本プロジェクトに参加した。その結果として、Proceedings を含む原著論文数 23 件、うち国際共著論文 5 件という成果をあげることができた。

2024 年 6 月にルクセンブルクで開催された iSpaRo2024 国際会議にて、吉田 PM が中心となって Workshop on Exploring the Lunar Frontier Leveraging Robotic Missions を開催し、4 名の基調講演、10 件のポスターセッション、パネルディスカッションを行い、米国および欧州における月面開発計画に関する情報交流を行った。

2025 年 1 月にドイツ・ミュンヘンで開催された 2025 IEEE/SICE International Symposium on System Integrations (SII 2025)において Workshop on Planetary Surface and Subsurface Exploration System and Technologies を企画・基調講演、また、2025 年 1 月に別府にて開催された 30th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 2025) 国際会議において Organized Session on Construction of Lunar Bases and Lunar Exploration by AI-powered Robots を企画・基調講演を行うなど、積極的な学術活動を行った。

(2) 研究成果の展開

本プロジェクトでは、当初より 5 年目(2025 年)マイルストーンは、モジュラー型 AI ロボットシステムを地上実証により検証すること、10 年目(2030 年)のマイルストーンにおいては、これらの成果を宇宙空間(軌道上および月面上)で実証することを目標として掲げている。10 年目マイルストーンに向けたフライトモデルの開発について技術開発体制強化を視野に入れつつ、打上げ機会および打上げ予算の確保については、国内外の宇宙開発、月探査開発プログラムの動向について情報収集を進めている。

(3) 広報、アウトリーチ

本研究開発プロジェクトの広報・アウトリーチ活動の一環として、2024 年 5 月に横浜で開催

された IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) におけるムーンショット目標3展示ブースにおいて、プロジェクトの概要を紹介した。

2024 年 9 月に大阪で開催された日本ロボット学会学術講演会では ELSI に関するオープンフォーラムを開催し、月面探査・開発に伴う宇宙法について議論した。

2025 年 3 月には日本科学未来館にてムーンショット目標3公開シンポジウムが開催され、吉田 PM より研究成果報告を行うとともに、開発中のロボット展示を行った。

2025 年 3 月には、JAXA 宇宙探査実験棟・宇宙探査実験フィールドにて、プレス公開実験を行い、数多くの報道機関によって、本プロジェクトの開発状況が紹介された。

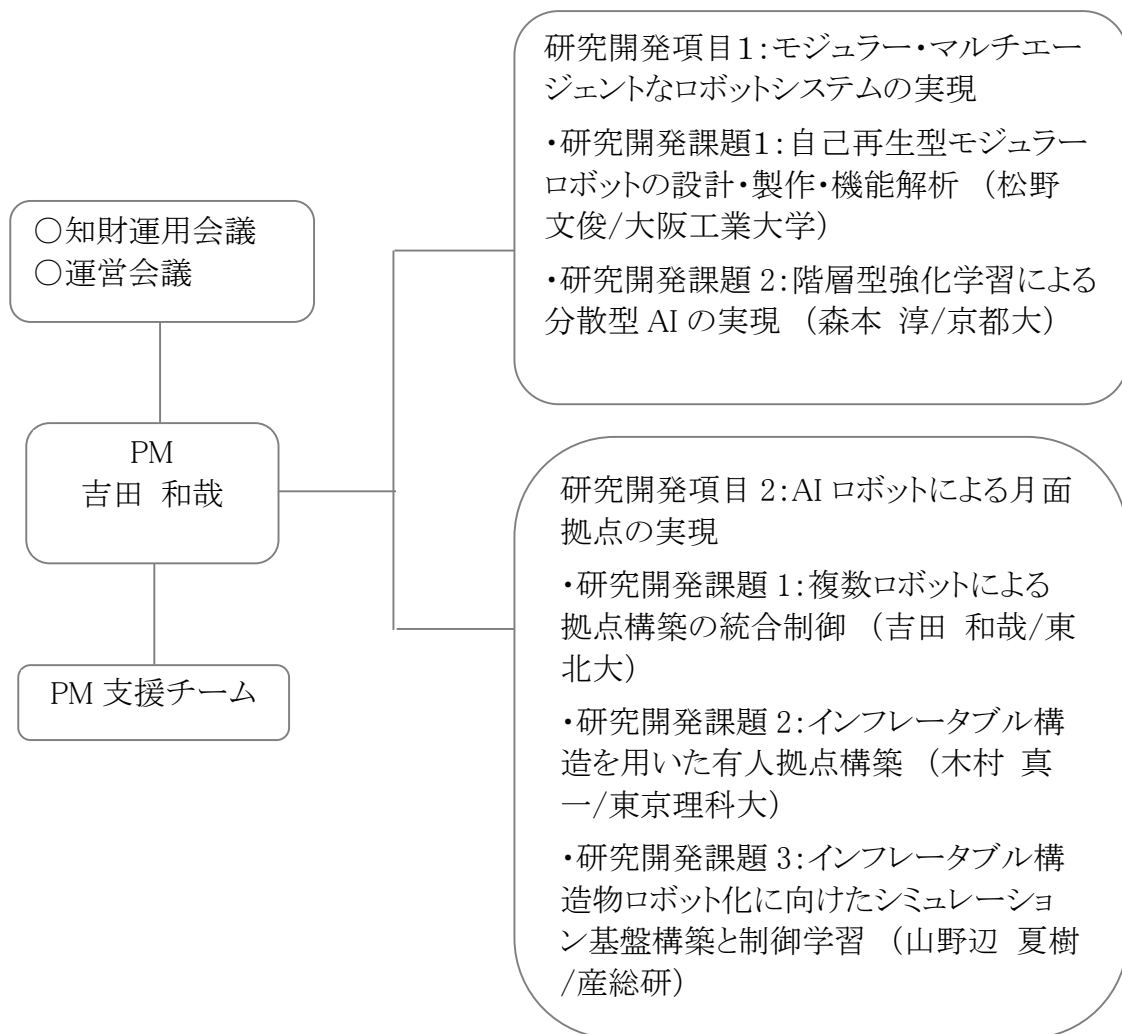
EXPO2025 大阪・関西万博にて実施予定の「ムーンショットパーク～見て！触れて！感じる！新・未来～」において、2025 年 8 月 6 日～8 月 11 日の期間、66 平米の空間を利用して、ロボットデモや映像表現をもちいた大規模なアウトリーチ活動を行う予定であり、そのための準備を進めている。

(4) データマネジメントに関する取り組み

データマネジメントプラン(DMP)を策定し、これに基づき、研究者から管理対象データのメタデータを集約して JST に提出するとともに、研究データ基盤システム等を用いて、管理対象データの保存、共有及び必要な範囲での公開を行う方針を定めた。

具体的には、各 PI 間で共有すべき研究情報を東北大学の GoogleDrive 上に集約し保存している。

4. 当該年度の研究開発プロジェクト推進体制図



知財運用会議 構成機関と実施内容

- ・構成機関: 東北大学、大阪工業大学、京都大学、JST
- ・実施内容: 知財申請に関する打合せ

運営会議 実施内容

- ・構成機関: 東北大学、大阪工業大学、京都大学、JST
- ・実施内容: 運営規約およびプロジェクト運営に関する打合せ

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	2	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	2	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	10	5	15
口頭発表	29	31	60
ポスター発表	4	0	4
合計	43	36	79

原著論文数(※proceedings を含む)			
	国内	国際	総数
件数	3	18	21
(うち、査読有)	3	18	21

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
8	2	10

プレスリリース件数
1

報道件数
11

ワークショップ等、アウトリーチ件数
8