



## 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

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. 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概要

#### a. プロジェクトの目標に向けた進捗状況

本プロジェクトは 2022 年度に採択され、プロジェクト開始当初の研究開発項目として、「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」「分散型・Plug and Play 可能な AI システムの実現」「自己修復・再生可能なロボットハードウェアの実現」の 3 つとしていた。

しかしながら 2024 年度以降は、研究開発方針をより明確にするため、ハードウェア・ソフトウェアを包含した月面 AI ロボットシステムの開発と、ロボットがなすべきミッションである月面拠点構築に資する研究開発の 2 本柱に項目を再編し、「(a) 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」および「(b) AI ロボットによる月面拠点の実現」の 2 つの項目に対してマイルストーン目標を掲げ、研究開発を実施した。

(a) については、具体的なモジュラー型ロボット MoonBot の設計・開発を行い、その制御システムとして階層型機械学習のコンセプトに基づく制御系の開発・実装を行った。機械学習のための物理シミュレーションを適切に行うために、力学環境を精度よく再現するデジタルツインモデルを作成し、模擬月面でのフィールド実験による実証試験を繰り返すことにより、シミュレーションモデルと実機モデルとの間の高精度な対応関係 (Sim-to-Real) の構築も行った。(図 1-1 参照)

(b) については、月面における展開型の大型建造物の例として、太陽発電タワーや、有人居住ユニット構築のためのインフレータブル型建造物 (HIDAS) の展開をミッションとして想定し、月面模擬フィールドにおいて実証試験を行った。特に HIDAS については、ハードウェアプロトタイプを用いた実験と、シミュレーションのためのデータ収集をすすめ、データ同化に基づくシミュレーションモデルの開発を進めるとともに、HIDAS 展開時にロボットがインタラクティブに作業支援を行うなどの連携動作についても実験を行った。(図 1-2 参照)

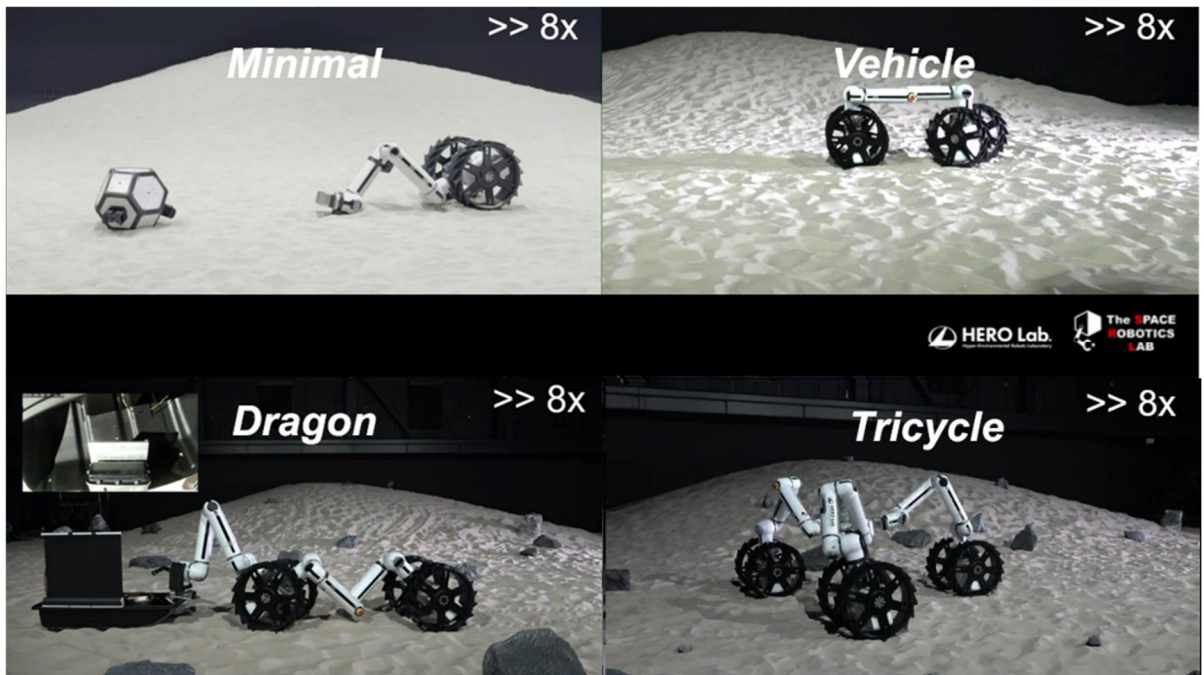


図 1-1 MoonBot のモジュール組み換えによる 4 つの基本形態



図 1-2 HIDAS と MoonBot-Dragon による協調作業の例

b. 研究開発の達成状況

本プロジェクトでは、

「再構成可能なモジュラー型ロボットの地上モデルを開発し、モジュール型ロボットとしての基本的なハードウェア構成、Plug and Play 型 AI による制御系の構成、複数ロボットの協調制御などのロボット機能を検証するとともに、月面拠点構築シナリオに沿って太陽発電タワー、無線中継局、および有人居住ユニット（HIDAS）からなる月面インフラモジュールの展開・組

立・設置の模擬ミッション実験を行い、その達成度および性能を定量評価する。」

を 2025 年度のマイルストーン目標と定め、研究開発を推進した。

具体的な検証方法・評価方法として、JAXA 宇宙探査実験棟、およびドイツ・ケルンにある ESA/DLR の LUNA アナログ試験設備の模擬月面フィールドを用いて、計 6 回のべ 13 週間にわたる統合試験を実施した。

JAXA 宇宙探査実験棟での統合試験の全景写真を図 1-3 に示す。

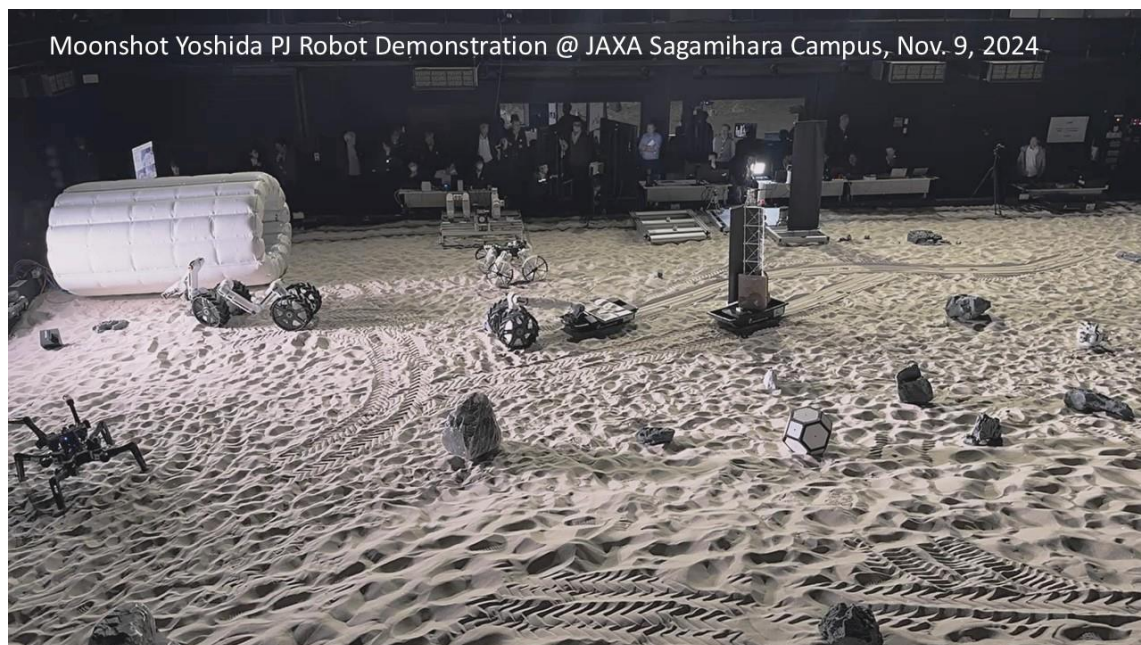


図 1-3 JAXA 宇宙探査実験棟・模擬月面フィールドの様子

プロジェクトの遂行にあたっては、2025 年度までに以下を達成することをマイルストーン目標とした。

---

模擬月面フィールドを使い、以下の項目を一連のシナリオ・デモとして実証し、技術の完成度を確認するとともに、月面での実証モデル開発に向けた技術的な見通しを得る。

- ① 1 台のロボットが、上位システムからの指示に従って、様々なロボットモジュールを選択し結合することにより、複数の異構造ロボットを組み立てられることを検証する。
- ② 複数の同構造もしくは異構造のロボットが協調し、月面拠点構築のための機器や構造物（太陽発電設備および無線中継局等）の組み立て作業を行う。これらの作業において、コンティンジェンシー（偶発事象）が起きた際に、適切なリカバリーができることを検証する。
- ③ 有人居住ユニットを模したインフレータブル構造物を、構造物自体の能動性と、同構造もしくは異構造の複数ロボットとの協調作業により、不整地上の所定の場所に展開・設置できることを検証する。

---

2025 年 11 月時点での達成状況は以下の通りである。

①については、1 台のロボットが様々なロボットモジュールを選択し結合することにより、複数の異構造ロボットを組み立てられることを、ハードウェア実験で検証することができた。ロボットモジュール間の結合機構について、地球重力場（1G 環境）にて自重を支える十分な機械的

強度を得ることは容易ではなかったが、試行錯誤を重ねながら実用的な設計に迫ることができた（松野 PI）。ロボット操作については、AI（機械学習）を用いたロボット制御の自律化を達成すべく、デジタルツインを用いたシミュレーションおよび機械学習結果のハードウェア実装（Sim-to-Real）も実現することができた（森本 PI）。一方、月面ミッションにおける現実を考えると、要所要所での大局的なコマンドについては地上オペレータからの指示を与えつつ、月面（ローカル）では 100%の自律化を図るのが理想的であると考えられ、そのインターフェースとして自然言語を介した **Supervised Autonomy** の実装および検証実験についても、研究開発を進めることができた（吉田 PI）。

②については、模擬月面フィールド実験において、複数の異構造のロボットが協調し、太陽発電設備および無線中継局を模した月面拠点構築のための基本構造物の展開作業の実証実験を実施した。様々なコンティンジェンシー（偶発事象）モードの洗い出し、および自律的なリカバリ方法の実装についても、目途を得ることができた（松野 PI）。

③について、有人居住ユニットを模したインフレータブル構造物（HIDAS）のハードウェアを用いて、構造物自体の能動性（転がり、縦方向移動）ができることを確認し、実験データを収集した。得られたデータに基づいたシミュレーションモデル（デジタルツイン）の開発も順調に実施した（木村 PI、山野辺 PI）。また、異構造の複数ロボットとの協調作業により不整地上の所定の場所に展開・設置することについても、シナリオデモにおいて検証した。

### c. 大胆な発想に基づく挑戦的かつ革新的な成果

(1) ロボットの構成をモジュラー型にすることにより、様々なデザインバリエーションを生むことができ、MoonBot-HERO と名付けたモデルでは、左右に 2 つの車輪をもつ「車輪モジュール」と 7 自由度の「アームモジュール」の 2 つの基本要素の組み合わせのみで、図 1-1 に示すように Minima, Vehicle, Dragon, Tricycle と名付けた形態が実現可能であり、フィールド実験においてそれぞれの形態が得意とする動作モード、作業形態を明らかにすることができた。これは、これまで多くの人々に固定観念を与えてきた NASA の 6 輪型火星探査ローバーや、4 輪型の月面ローバー（GITAI 社や ispace 社等の民間ローバーを含む）のデザインとは一線を画すものであり、今後の月惑星探査ロボットデザインの考え方を大きく革新するものである。

ユニークな形態のロボットシステムを使って、月面模擬フィールドにて各種のベンチマーク試験を行うことにより、想定以上のタスク遂行能力を実証することができた。

(2) 上記の Tricycle モデルにおいて不整地環境（凹凸地形や段差のある地形）での機械学習をおこなった結果、各部の能動自由度を巧みに連携して、ロボット本体の姿勢を保つためにアクティブサスペンションのような動作を発現することが明らかとなった。力・モーメントの釣り合いを考慮した力学的な方程式に基づく古典的な制御手法では得られる解は限定的であるが、機械学習を用いることにより、人間では想像しにくいユニークな解が得られ、それらが月面という特殊環境で性能を発揮する可能性があることを、いくつかの例においてデジタルツインによるシミュレーション環境および MoonBot ハードウェアにて、具体的に検証することができた。

本研究開発プロジェクトにおける中心課題の一つに据えた「階層型」の機械学習手法の、実ロボットへの適用性およびモジュールロボットのタスクに対する柔軟性を明らかにすることができた。これは、本研究開発プロジェクトの重要な成果のひとつであり、今後の難環境・未知環境対応ロボットにおける AI（機械学習）の新たな適用可能性に道を拓くものである。

### (3) プロジェクトマネジメントの実施概要

#### a. 研究資金の効果的・効率的な活用(官民の役割分担及びステージゲートを含む)

本プロジェクトの PM・PI はいずれも大学および国研（アカデミア）の研究者であり、研究開発のバックグラウンドとして、これまでの各々の持っている知識や経験、および所属組織の研究インフラが十分に活用されている。一方、実際のロボットハードウェアおよびソフトウェア開発においては、完成度の高さを追求するために、民間企業への発注（開発仕様を定めた特注製作）を中心に進めており、研究資金の効果的・効率的な活用がなされている。

#### b. 国際連携による効果的かつ効率的な推進

世界中から研究者の英知を結集するため、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、延べ 30 名以上の外国人研究員、博士課程学生、修士課程学生、および海外大学からの交換留学生が本プロジェクトに参加した。

2024 年 6 月にルクセンブルクで開催された International Conference on Space Robotics (iSpaRo) 2024 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実施した。この他にも、ICRA2023, ICRA2024, SII2025, ICRA2025, RSS2025 などの国際会議ワークショップを活用した情報交換およびプレゼンス向上を積極的に実施した。なお、iSpaRo2025 国際会議を仙台にて開催する誘致活動に成功し、2025 年 12 月 1 日～4 日を実施することとなった。

月面環境を模擬した屋内フィールド実験については、上述のように、JAXA 相模原キャンパス宇宙探査実験棟を利用し、計 5 回にわたり総計約 12 週間の期間にわたって実験を積み上げてきたが、JAXA のフィールドでは珪砂 (Silica Sand) が使用されている。より月面に近い月模擬砂 (Lunar Regolith Simulant) を用いた屋内試験フィールドを国際的に探し求め、2025 年 6 月に欧州宇宙機構(ESA)／ドイツ航空宇宙センター(DLR)が所有・管理する LUNA アナログ施設 (ドイツ・ケルン、広さ 20m×35m, 平均深さ約 1m) を使用して、DLR との共同フィールド実験を実施するに至った (図 1-4 参照)。Silica Sand よりも粒子の細かい Lunar Regolith Simulant がロボットに与える影響や、レゴリスの踏みしめによる走行性能評価などのデータを取得するとともに、国際的な月面探査・開発コミュニティへのプレゼンスを示すことができた。



図 1-4 ESA/DLR LUNA アナログ試験設備における月レゴリスフィールドでの実験の様子

c. 広報・アウトリーチ活動(国民との科学・技術対話に関する取組み)

日本ロボット学会学術講演会のオープンフォーラム(2023, 2024, 2025 年)、日本科学未来研での目標3公開シンポジウム(2025 年 3 月)など、広報・アウトリーチ活動(国民との科学・技術対話に関する取組み)に積極的に取り組んだ。特に、大阪・関西万博で実施されたの「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～11 日に「ロボットがつくる月面世界で、何がしたい？」の期間展示を実施し、6 日間で計 180 回の映像上映+ロボットデモを行い、計 4,500 人以上の来場者にアウトリーチを行い、好評を博することができた(図 1-5 参照)。



図 1-5 大阪・関西万博におけるロボットと映像を連動させた展示の様子

d. データマネジメントに関する取組み(研究データの保存、共有、公開の状況)

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。研究成果は知財として新規性の高い要素も含んでいるので、データの公開は行っていない。

e. その他(ELSI/数理科学等の取組み含む)

今後の月面探査および月面資源の利活用を進めていくためには、国際的な合意に基づくルールのもとで、活動を推進していくことが重要であるとの観点から、國井プロジェクトとともに、目標3アドバイザーの友枝 敏雄 先生のリードのもと、宇宙法について学ぶ機会を設け、特に 2024 年 9 月 3 日に日本ロボット学会学術講演会(大阪)の付帯行事として一般市民向けのオープンフォーラムの中で、宇宙法に関する講演および討論の機会を催した。

## 2. 研究開発プロジェクトの実施内容

(1) 研究開発項目1: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

### 【研究計画と達成した成果】

(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(令和4年11月~令和7年11月)

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

#### 研究計画

月面という宇宙環境における移動とマニピュレーションタスクを遂行するために、ロボットの離散的構造変数(モジュールの数や接続関係)および連続的構造変数(モジュールのサイズや質量や関節の取り付け位置姿勢)と連続的制御変数(制御器のパラメータ)の同時最適化手法を開発する。また、モジュールを所与としてロボットの構造と制御を同時に最適化するための、ロボットの表現方法と同時最適化手法を開発する。同時最適化を一般的に扱うために、ロボット構造のグラフ表現に適したグラフ文法とそれを扱うためのコンピュータ言語も合わせて開発する。

#### 達成した成果

ロボットの同時最適化を考える上で必要なロボットのパラメータ設定法を提案(図 2-1)した。特にロボット構造を根付木で表現することを提案し、その更新方法として monotonic decrease method (MDM) と isomorphic classification method (ICM) の2つの方法を提案した。MDM は脊椎動物の進化における骨格構造の変化傾向から着想を得た方法であり、効率的に幅広い構造を探索できる。一方、ICM は効率よくロボット構造の全探索を実施するための方法である。根付木からロボット構造への写像は単射ではないが、グラフ同型で類別することで全単射を作成できること、グラフ同型の判定は一般に容易ではないが、根付木のグラフ同型判定は比較的容易に実施可能であることに着目した。MDM と ICM に加え、ロボットの変数全体を最適化するための枠組みを提案した。これにより歩行ロボットの設計を効率よく実施することに成功している。この結果は、機械学習に関するトッ

ブジャーナルである IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems にて発表済みである (R. Koike, R. Ariizumi, and F. Matsuno, “Simultaneous Optimization of Discrete and Continuous Parameters Defining a Robot Morphology and Controller,” IEEE Trans. Neural. Nets., vol. 35, issue 10, pp. 13816–13829, 2023)。

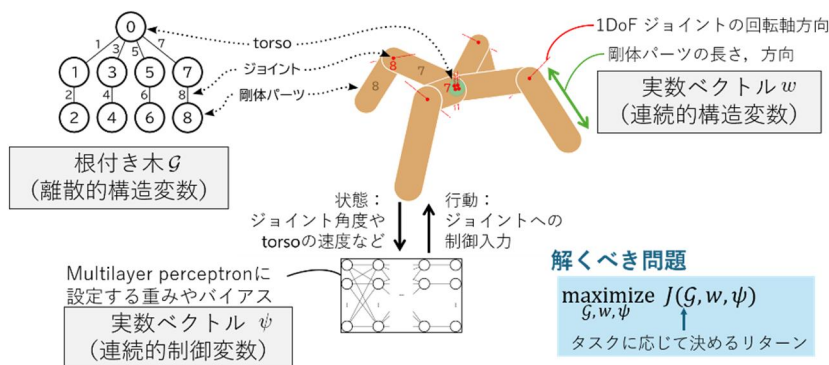


図 2-1 Koike et al., 2023 において提案したロボットパラメータの設定

一方、上述の方法ではリンク長などロボット構造を定めるパラメータの一部を連続変数としてモデル化していた。これにより計算の大幅な効率化を達成しているが、モジュールが規格化されているモジュラーロボットに対する設計手法としては必ずしも適切ではない。そこで、(Koike et al., 2023) のモジュラーロボットに対する拡張を目指すとともに、グラフニューラルネットワーク(GNN)を活用した別の方法も模索した。新たに提案する枠組みにおいては、ロボット構造に対する性能推定器を GNN で構築し、性能推定器から予想される適切なロボット構造の探索と、性能推定器の推定性能向上の 2 つを同時に考慮しながらロボット構造の探索を行う。この際、探索対象のロボット構造はあらかじめ定めたルール(グラフ文法)に従って構築されるものとする一方で、実現不可能な構造の探索を抑制するものとした。Koike et al., 2023 のモジュラーロボットに対する拡張に関しては、ICM においてグラフ同型判定を実施する際に用いる符号化について、本プロジェクトで想定するモジュールを全て考慮できるように変更を加えた。加えて、計算の高速化とプロジェクト内でのツールの共通化のため、「(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」で提案するグラフ同型判定法を活用している。

また、探索に用いるグラフ文法の表現に関して、従来研究で使用されていたほぼすべてのグラフ文法を統一的にまとめ直したうえで、グラフ文法の表現に特化した使いやすいコンピュータ言語として Graph Grammar Definition Language (GGDL) を開発した。

## 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

### 研究計画

月面上で作業するロボットには、故障が発生しても自力で基地まで帰還できるような耐故障性が求められる。故障が生じた場合にも最低限の機能を損なわないロボットの構造と制御の同時最適化手法を構築する。

### 達成した成果

提案している 2 つの手法 MDM と ICM (Koike et al., 2023) を適切に組み合わせることで、高い耐故障性を有するロボットと制御器を同時設計することを考えた。MDM は素早く幅広い構造を探索するために適しているが、耐故障性を高めるために必要な冗長性を獲得するためには不向きである。一方、ICM の探索効率は高くないが、冗長性の獲得が可能である。そこで、最初に MDM を活用して適切な初期構造を生成し、続いて ICM を適用することにより必要な冗長性を獲得する方法を提案した。故障の状況として、関節にトルクを印加できなくなる場合と関節が固定されてしまう場合の 2 種類を考え、どちらか一方の故障しか生じないとした場合に対し、シミ

シミュレーションにより耐故障性の高いロボットの設計を行った。設計されたロボットは、学習時のデータにはない故障状態においても、高い確率で移動できることを確認した(図 2-2 参照:故障によりトルクを印加できなくなった関節を青い球で示し、その関節に接続されているリンクも青色としている)。現時点では 2 種類の故障状態のうちどちらか一方のみが生じる場合しか考えられていないが、2 種類の故障が混在する場合などより複雑な場合に対しても、耐故障性獲得のために必要な考え方は同一である。得られた結果をまとめたものは Scientific Reports に掲載されている (K. Kikuzumi, R. Ariizumi, and F. Matsuno, “Automatic Robot Design for Fault-Tolerant Robots,” Scientific Reports, vol. 15, no. 29642, 2025)。

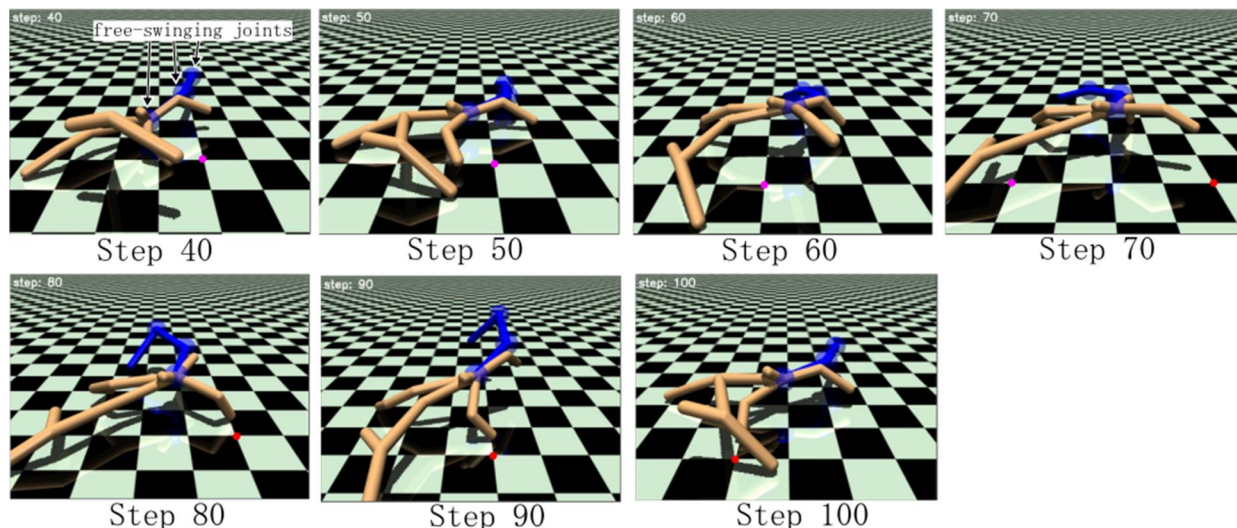


図 2-2 提案する方法により設計したロボット挙動の例 (Kikuzumi et al., 2025)

### 1-3 モジュラーロボットの設計指針の確定

#### 研究計画

シミュレーションにより、ロボットの最適な構造と制御系の同時設計を実施し、実機製作における各モジュールのスペック策定に指針を与える。

#### 達成した成果

モジュラーロボットの構造設計法として、Koike et al., 2023 で提案した手法を拡張したものと、GNN を活用するものの 2 つを並行して考察し、開発を行った。それぞれの方法で得られた最適なモジュール構成を参照して、実機製作における各モジュールのスペック策定に指針を与えた。

### 1-4 モジュールの構造と制御のレポジトリの構築

#### 研究計画

移動やマニピュレーションなど様々なタスクに対して構造と制御を同時最適化したロボットモジュール構成(構造と制御)をデータベース(レポジトリ)として蓄積する。レポジトリをモジュール再構成や異種モジュラーロボット群の自律分散協調制御に活用するために、レポジトリに登録すべき情報を選定する。「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」の成果を用いて、ロボットの同時最適化を実施することにより、レポジトリを構築する。具体的には、モジュールの組み合わせにより構成される、ヘビ型、脚型、車輪型などのモジュールロボットの最適な構造と制御がレポジトリとして蓄積される。

#### 達成した成果

提案したモジュラーロボットの設計法に従って、ロボット構造と制御側の設計を進めた。得られた結果を基に、レポジトリの構築を進めた。

## 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(タスクアロケーション)およびレポジトリの構築 研究計画

月面構造物建設では複数の協調的に作業するロボットを利用し、複数のタスクを同時にこなす必要がある。タスクに合わせて、ロボット群の構成(どのモジュールロボットを何台用意して、いつどこでどのような構成にするか)とその構成ごとの群制御方策の同時最適化(タスクアロケーション)を機械学習の枠組みで検討する。「5-4 複数の群れのタスクアロケーション」により得られた結果をレポジトリとして蓄積していく。

### 達成した成果

使用するロボット構造と制御器については、提案するモジュラーロボットの構造設計法に従って、設計を進めた。ロボット群の構成については、「5-4 複数の群れのタスクアロケーション」の項目で実施したタスク配分を活用した。

## (2) 組み換えを可能とするモジュールロボットの設計と地上実証用モデルの製作(令和6年4月～令和7年6月)

### 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

#### 研究計画

モジュール単体の機能を決定し、組み換えを可能とする機械的・電気的結合機構を含めたモジュールの設計開発を行う。また、バッテリーをモジュールに内蔵し、充電できるバッテリーシステムの設計開発を行う。

#### 達成した成果

##### ・機械的結合機構

モジュール同士の“自由な”組み換えを実現する上での要件として次の4つに着目し、試作を3回行った。

1. オスメスの差異なく同一機構が結合可能であるという対称性を持つこと。
2. 片側の動力で分離結合が可能であること。
3. 結合前の位置決めにおいて誤差を許容できること。
4. 結合後にガタが生じず強固な連結が可能なこと。

試作第1号の機械的結合機構(R. Michikawa et al., Development and verification of connectors for modular robots to complete practical tasks on the moon, Artificial Life and Robotics, 2025)は、4個の爪を出し入れすることで結合分離を可能とするが、モジュール内部への異物の侵入を防ぐ機構にはなっていない。この問題を解決するために、試作第2号では、金属板の座屈を用いて8個の爪を動かすことで、結合分離を可能とし、防塵性を担保した。しかし、結合力が弱いという問題が生じたため、試作第3号(図2-3参照)では、最初に述べた4つすべての要素を直径125厚み50mmのサイズで実現し、結合力の大幅な改善を実現した。

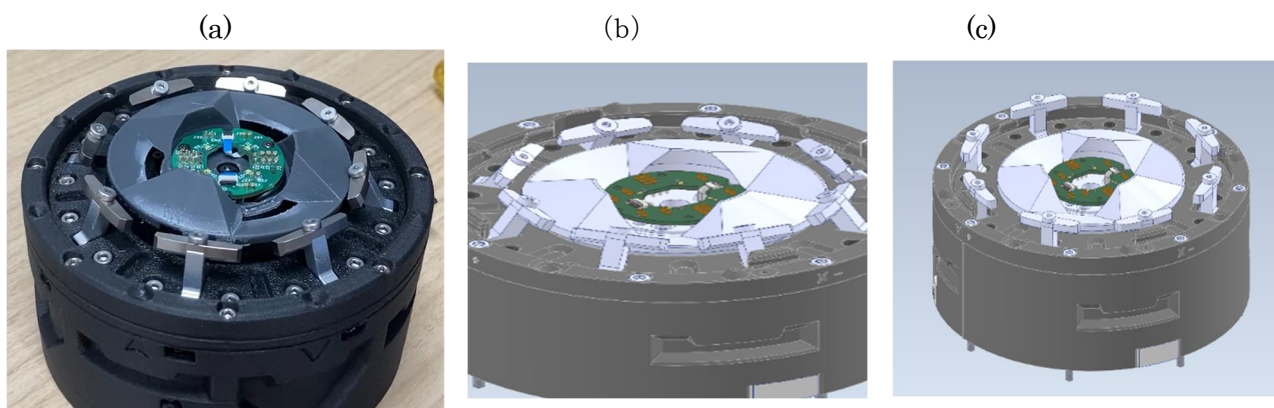


図 2-3 機械的結合機構 (a)実機写真、(b)結合爪を畳んだ状態、(c)結合爪を開いた状態

## ・電気的結合機構

本プロジェクトで開発したモジュールロボットは制御 PC やバッテリーを搭載したモジュールもあれば、モーターしか搭載されていないモジュールもある。制御 PC を搭載したモジュール間ではイーサネット通信を用い、制御 PC 搭載モジュールとモーターのみのモジュールとの間では RS485 を用いる。さらに、バッテリーを搭載したモジュール間での電力の受給電を最大 15V5A で行うことを目指した。これらのモジュール間の通信や電力受給電を行うために、図 2-4 に示す直径 35mm 円形状の電気的結合基板を作製した。2 つの結合機構が合体するとき、各結合機構に搭載された基板上のピンが向かい合わせで互いに接触することで有線通信路、電力供給路が確立される。開発した基板の通信能力、電力供給能力の評価を行った。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、この電気的結合基板を 2 つ結合させたものを経由して、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し 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。RS485 通信能力については、作製した電気的結合経由で 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 で安定して電力供給が行えることを確認した。

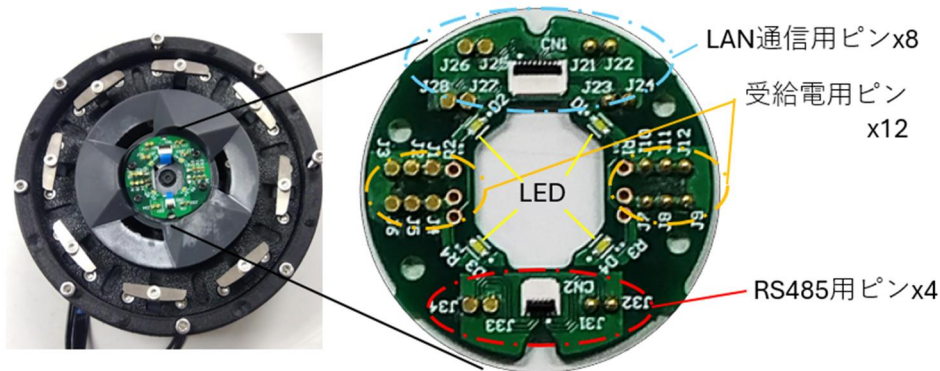


図 2-4 作製したモジュール間電気的接点基板

## ・バッテリー

バッテリーパックは、Molicel INR18650P28A セル(公称 3.6V、2、800mAh)を 4 直 2 並列構成とし、総電圧 14.4V、容量 5,600mAh(約 80Wh)を有する。入力は DC12~15V で、内部昇圧回路により充電を行い、充電電流は 5A に設定されている。最大放電電流は 20A で、約 288W の出力が可能である。セルバランス機能および温度センサーを備え、バッテリー管理 IC BQ4025 により SMBus 経由で状態監視・制御が行える。外形寸法は 90×50×15mm 以内で、φ 3.2mm の固定穴を 4 箇所備える。高出力かつ高信頼性を重視した設計である。

### 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

#### 研究計画

モジュールの組み換えを可能とする情報の結合に関して、モジュールロボットシステムの通信プロトコルを策定し実装する。

#### 達成した成果

- ① 月面上ロボットモジュール同士間、②月面上モジュール—月面基地局間、③月面基地局—地球間、④地球局—オペレータ間、⑤本システムと外部システム間、の仕様を策定し実装を行い、①②③④について実証試験を実施した。図 2-5 に①から④を示す。まず①および②の通信パケットについて通信バンド幅もしくはモジュール処理能力もしくはプロトコル自体のいずれかあるいはそれらの複合に起因する通信成立限界が発見されたため、図中の青色囲み部分に示すように、トラフィックを分割するネットワークシス

テム構成とパラメータを設計して実装した。具体的には IPv4 アドレス通信のみに限定してパケットサイズを縮小し理論上通信量を5分の1に削減、さらに Router をロボットモジュールのクラスタ毎に1台、複数クラスタに対してルータを複数台用いてマルチキャスト通信ドメインを分割した。この結果、①と②について多数のモジュール群が同時に正常に動作するようになった。この元で③と④が所期の機能要件を満たしていることを確認した。このネットワーク構成で理論上は例えば約6万台、最大約16万台のモジュールを区別して収容できる。

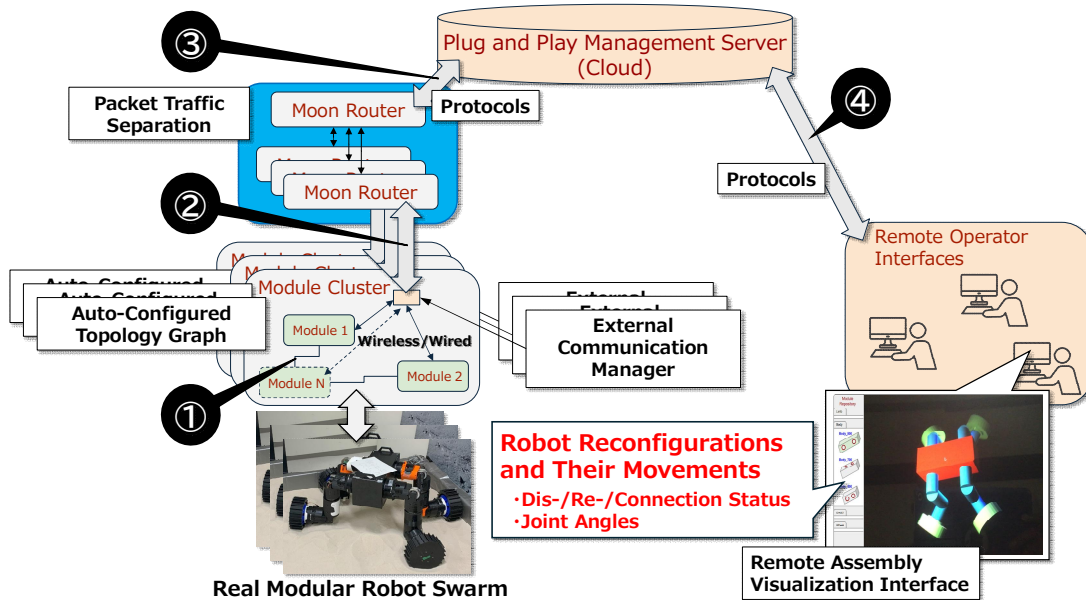


図 2-5 ネットワーク機能ブロック構成

次に⑤について、本システムを含むムーンショット目標3内の各システムが、外部のシステムとやり取りするためのフレームワークについて目標3のミドルウェア WG 内で議論し、ロボットシステムのモデル設計を実施した。

## 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

### 研究計画

項目 2-1、2-2 の設計結果を反映し、以下の基本性能を発揮しうるモジュール型ロボットのハードウェア・プロトタイプモデルを製作し、地上実証試験において性能・機能を評価する。具体的なミッションへの適用能力については、研究開発項目 4: AI ロボットによる月面拠点の実現の研究開発課題 1「複数ロボットによる拠点構築の統合制御」(吉田 PM, PI)において定義されるベンチマーク・タスクに基づいて評価する。

#### 【基本性能・機能】

- ① 1台のロボットは、ヘッド、ボディ(上部、下部)、リム(上肢、下肢)、エンドエフェクタ(車輪、グリッパー、フット)等の複数モジュールで構成され、各モジュールは能動的な結合機構を持つこと。
- ② 1台のロボットによる可搬重量は双腕協調状態で 5kg 以上とする。地上デモにて、1台のロボットが他のロボットモジュールを組立てられるよう、各モジュールの最大重量は 5kg 以下に抑える。
- ③ ロボットの下肢エンドエフェクタが車輪モードの場合、斜度 10 度の砂の斜面を登ることができること。フットモードの場合、高さ 10cm の凹凸からなる不整地を歩行移動することができること。
- ④ ロボットは電力により駆動されるものとし、地上デモにおいてバッテリーにより 1 時間以上稼働すること。
- ⑤ ロボットモジュール間には Ethernet を使った通信系を持つこと。結合部における機械接点式をベースラインとし、無線通信(Wi-Fi)も必要に応じて併用する。

## 達成した成果

### ・ボディモジュール

本研究で設計したボディモジュールの形状として、直方体と半正多面体の一種である斜方立方八面体を試作した。最終的に採用した斜方立方八面体は、二面角が  $120^\circ$  を超える鈍角によってリムモジュール移動時の干渉を回避しつつ、多数の面による形態多様性と高い対称性を確保している。外接半径は約 225 mm、一辺長約 187 mm、外形サイズは  $450 \times 450 \times 450$  mm で、実機重量は 8.59 kg、軽量化試験時は内部デバイスを外して 6.00 kg とした。構造は外装部品と内装部品に分割され、保守性・拡張性を高めている。強度設計では 3D CAD 解析により最大変位を 1.0 mm 以下とし、PPA-CF および CFRP の高強度素材を採用した。内部には制御用 PC とバッテリーを搭載し、センサーとして Depth カメラ(水平  $174^\circ$ 、垂直  $28.5^\circ$ ) と 3D-LiDAR(水平  $360^\circ$ 、垂直  $59^\circ$ ) を装備する。LIMB 結合機構は直径  $\phi 100$  mm、質量 400 g であり、リムモジュールの pitch 軸  $112.5^\circ$  回転により隣接面への移動が可能である。受動の結合機構は、ボディ面間遷移が可能な面対に計画的に配置されている。斜方立方八面体ボディの面に結合機構を搭載することで、ミッションの要求に応じて多様な形態変化の可能性を担保することができる。

### ・リムモジュール

リムモジュールは 3 回の試作を実施した。最終版である試作 3 号機は、ロール・ピッチ・ピッチ・ロールの関節軸を持つ対称 4 自由度構成である(図 2-6 参照)。

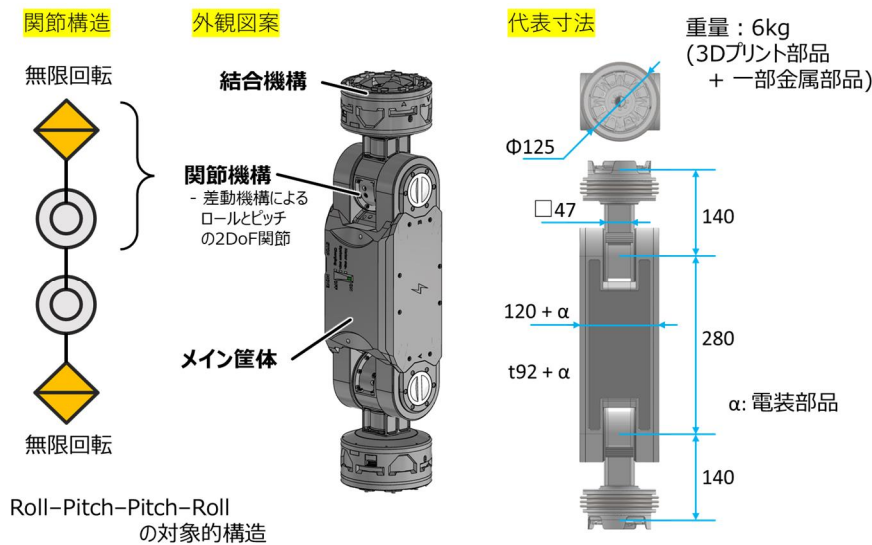


図 2-6 リムモジュールの関節構造と外観、代表寸法

コンパクト化を図った結果、重量は 6kg、ピッチ関節の可動域は  $+120 \sim -105$  deg となった。各関節は ロール関節ピッチ関節が一体となった差動機構であり、2 つのモーターの出力を合算することで効率よくトルク出力が可能である。内部はバッテリーと Raspberry Pi を持ち、独立して動作が可能である。Wi-Fi による外部との通信や、結合機構を通じてイーサネット通信や RS485 通信機能を持つ。

### ・リバーシブルハンドモジュール

ロボット自身の組み立てや外部とのやり取りに用いるハンド機構の開発を行った。ロボットの自律的な組立を効率よく行うためには、リムに結合したハンドを(地面に置くことなく)別のリムに受け渡す必要がある。そのため 2 つの受動結合機構を持ち、どちらかにリムが結合しても利用可能なリバーシブルなハンド機構を開発した。サイズは

直径 125mm 厚み 56mm と結合機構とほぼ同等のサイズであり、重量は 600g であった。根元リンクと指先リンクが独立稼働する 2 自由度系であり、根元リンクが対称に $\pm 100\text{deg}$  の可動域を持つことで、両面にある結合機構のどちらかがリムモジュールと結合してもグリップ機能を利用することができる。2 本のリムモジュールによるリバーシブルハンドの受け渡し実験の様子を図 2-7 に示す。図中で、左図はリバーシブルハンド機構と結合したリムモジュール、右図はリバーシブルハンドを別のリムに受け渡している様子である。

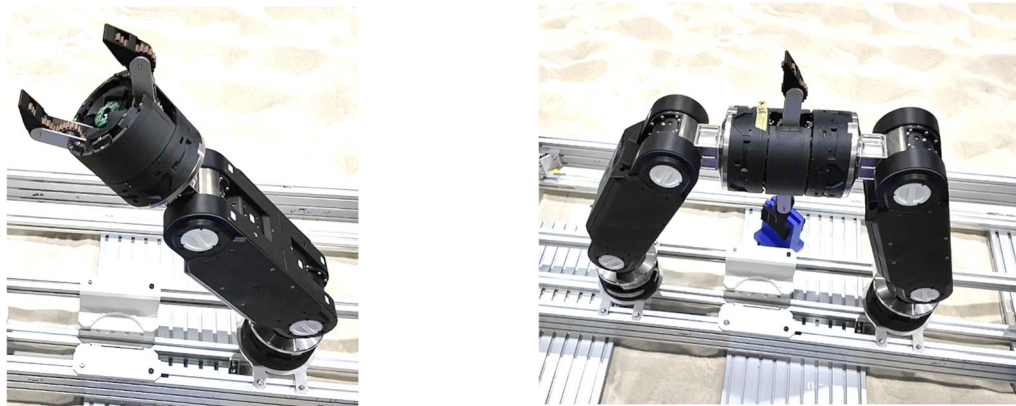


図 2-7 リバーシブルハンド

#### ・多機能エンドエフェクタモジュール

エンドエフェクタ自身の形態変形により 4 つの機能(車輪・グリップ・スコップ・ドリル)を有する多機能エンドエフェクタモジュールを具現化した。多機能エンドエフェクタモジュールは外部環境と相互作用する爪部と爪部を駆動する 4 節リンク機構から構成される(図 2-1-8 左図)。設計課題として、車輪機能時の高剛性・グripper機能時の高グリップ摩擦・スコップ機能時の高密閉度・ドリル機能における高効率砂排出を同時に満たす必要があったが、爪部の形状やリンク長さを工夫することで解決した。

グリップ・スコップ・ドリル機能の性能を再現性高く定量評価するために、直動機械を別途作成した。同機械を用いた実験を通して、多機能エンドエフェクタモジュールは多様な物体を高確率で把持するグripper機能・粒度の低い砂をこぼすことなく大量に掬うスコップ機能・土を 30cm 以上の深さまで掘削するドリル機能を有することがわかった(図 2-8 右の 4 つの図)。なお、本成果は特許として出願済みである(発明の名称:エンドエフェクタ及びロボット、出願番号:特願 2023-180271、発明者:道川稜平、松野文俊、早川智洋、出願日:2023 年 10 月 19 日)

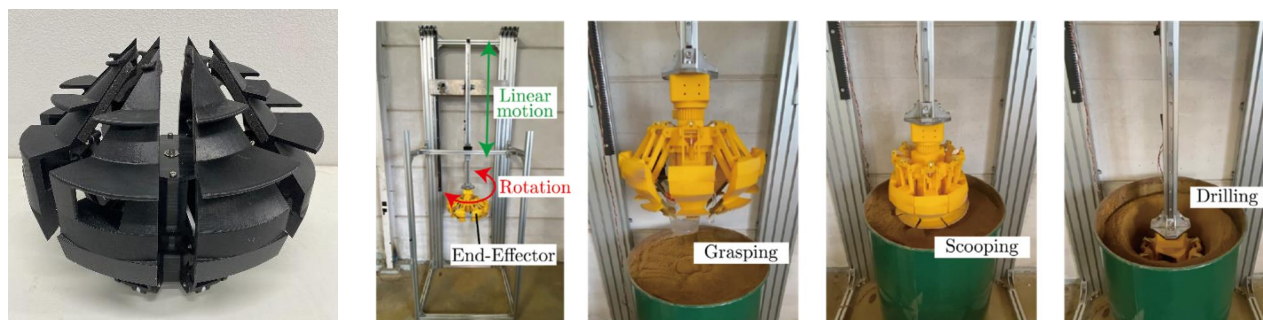


図 2-8 多機能エンドエフェクタモジュール

### (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(令和5年10月～令和7年11月)

#### 3-1 モジュール再構成アルゴリズムの開発とプロトタイプロボットへの実装

##### 研究計画

ロボットのモジュール構成のデータベースの任意の構造から別の任意の構造に遷移するためのモジュラーロボットの特徴を活かした数理モデルによる最適化、変形 AI を実現する。開発したアルゴリズムの有効性をシミュレーションおよびプロトタイプロボットを用いた実験により検証する。

##### 達成した成果

###### ・変形 AI

自律遷移においては、多数のモジュールの組み合わせに加え、環境や故障状態を考慮すると無限に近い状態爆発が考えられ、この対策として、ロボット構造を離散的なノードとした探索グラフの探索問題で効率的な遷移計画を立案した上で、逆動力学・物理シミュレーションによる連続的な遷移の可否を判定し、これらの結果を教師データとして Graph Neural Network (GNN) に基づく AI に良好な初期解を獲得させ、強化学習を行うスキームを開発した。具体的には、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、下記の手法が正しく機能していることを確認した。

###### (1) 離散的な遷移計画の立案と GNN の教師あり学習データの生成

効率的な自律遷移パスの実現のため、図 3-1-1 左に示すロボットの構造を完全な接続情報を保持する L1 レベルとモジュラーロボットの対称性やモジュールの可換性を使用した L2 レベル に抽象化し、総構造数を削減すると共に L2 レベルで同型な構造間の遷移が不要となることで遷移の手数を平均的に半減できることがわかった。また、ループを含むロボットの構造グラフを一意な文字列にエンコードする手法 Canonical Robot Adaptive Graph Encode (CRAGE) を開発した。図 2-9 右図に示すように、探索中の既知の構造との同型判定において構造グラフを 1 対 1 で線形探索する手法 (GRAPH) に比べ、CRAGE による文字列比較と二分探索が処理時間の大幅な削減を実現していることがわかる。これにより GNN に大量の教師データを学習させることが可能となった。(K. Satonaka et al., “CRAGE and GNN-Based AI Architecture for Autonomous Transitions in Modular Robots,” Artificial Life and Robotics 採録決定)

###### (2) ロボットの幾何的構造実現性と構造間の遷移の可否判定

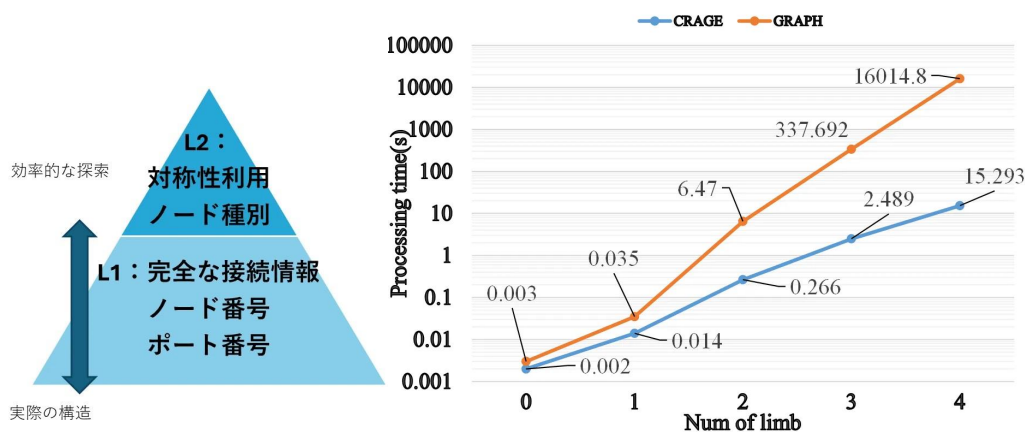


図 2-9 ロボット構造の抽象化 (左) 及び CRAGE による探索の有効性 (右)

ロボットの幾何的な構造実現性と構造間の連続的な遷移の可否判定のため、構造グラフを「(1) 構造と制御のリポジトリ」の項で開発した GGDL を用いて URDF に変換し、逆動力学ソフトウェア MoveIt 2 および物理シミュレーションソフトウェア NVIDIA Isaac Sim に導入するためのパッケージを開発した。それらのソフトウェアではループ構造を含む URDF を入力とできないため、ループを最小全域木アルゴリズムで分離して構造グラフを木に変

換し、どのモジュールのポートが根となってもよいようにモジュールのポート数分の GDDL 文法を用意することで、あらゆる構造の URDF 化が可能となった。さらに読み込み成功後さきほど分離したポートを本プロジェクトで開発した Mag Joint(楊光、王璽尋、原田航季、金城良太、奥宏史、有泉亮、松野文俊:”モジュラーロボットのモジュール間の自律結合に関する研究～Isaac Sim 環境における自律結合手法の開発と検証～”、日本ロボット学会誌:掲載決定)で再結合し、探索中に出てくるあらゆるロボット構造の幾何学的実現性やロボット構造間の物理的遷移の可否の判定を自動で行うことが可能となった。

### (3) GNN を用いた効率的な探索に向けた同形判定及び遷移可能性判定

同型判定 GNN 及び変形可否判定 GNN はそれぞれ 2 つのロボットの L1 構造グラフを受け取り、「L2 抽象化に基づき同型であるか」及び「構造間の変形が一手で可能か」を出力する GNN であり、CRAGE データを用いた教師あり学習により、それぞれ 99 %以上及び 97 %以上の高い正解率を実現した。また上の GNN の出力層以外の重みを固定した転移学習により下の GNN の学習が倍程度早く収束するという結果が得られている。これらの結果から GNN はロボットの L2 高次特徴量を算出可能であり、モジュラーロボットの対称性やモジュールの可換性を含む抽象的な構造把握能力を獲得できていると言える。

#### ・実機実験(多面体ボディ上でのリムモジュールの自律遷移)

リムモジュールを 2 本、ボディモジュール 1 台を用いて、多面体ボディ上での自律遷移の実機実験を行った。単体のリムモジュールが多面体ボディ上を自律遷移する様子を図 2-10 に示す。また、2 本のリムモジュールが結合して 7 自由度マニピュレーターを自律構成し、最後に 7 自由度マニピュレーターが 2 本のリムモジュールに分離する実験を行った。実験の様子を図 2-11 に示す。以上の実験により、ハードウェアとしてはリムモジュールとボディモジュールは自律遷移を実現できる十分な強度を持ち、結合機構が有効に機能することが確認できた。また、ソフトウェアとしては、自律遷移アルゴリズム(遷移計画、関節制御、結合機構制御、結合制御、構造認識など)の有効性を示すことができた。なお、開発した 2 本の 4 自由度リムモジュールが結合するための制御手法の内容を特許出願した。(発明の名称:ロボット装置、ロボット装置制御方法、および、ロボット装置制御 プログラム、出願番号:特願 2025-115530 発明者:松野文俊、楊光 出願日:2025 年 7 月 9 日)

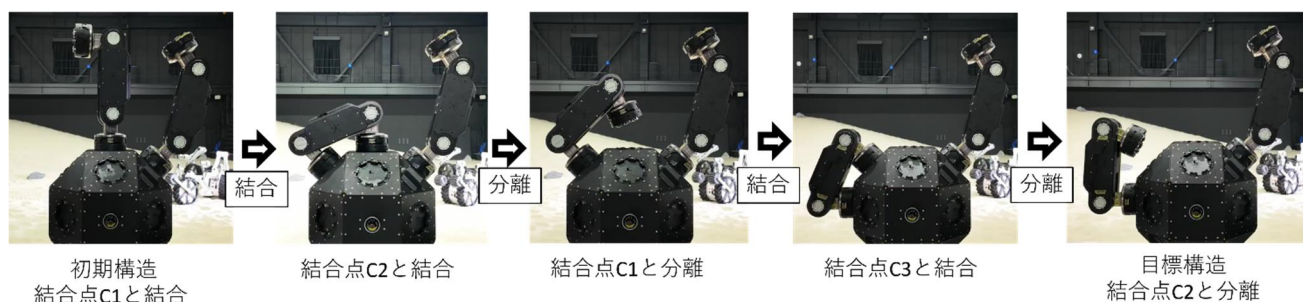


図 2-10 単体リムモジュール多面体ボディ上の自律移動

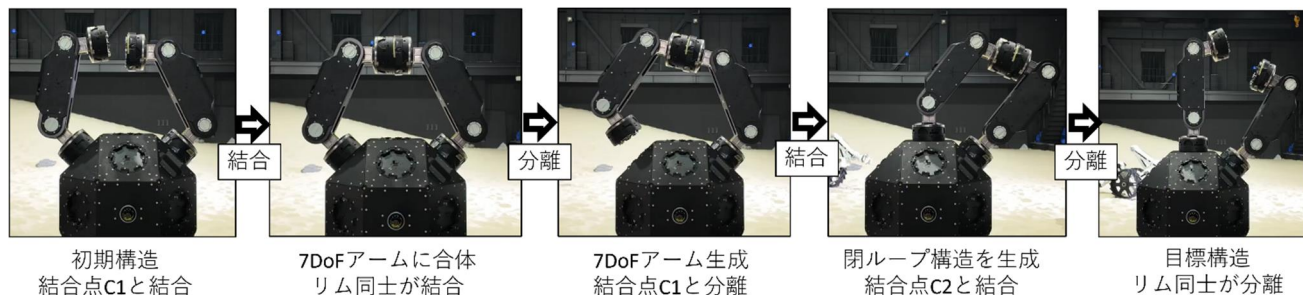


図 2-11 2 本のリムモジュールの結合による 7 自由度マニピュレーター形態を介した自律遷移

### 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

#### 研究計画

開発したアルゴリズムを、「(2) 組み換えを可能とするモジュールロボットの設計と地上実証用モデルの製作」で開発する地上実証用ロボットへ実装する。実証実験を通して、アルゴリズムのブラッシュアップを図る。

#### 達成した成果

##### ・二輪ローバー

##### (1) 5つの移動形態による実機実験

実験環境は JAXA 相模原キャンパス宇宙探査実験棟の砂地フィールドで、図 2-12 に示す車輪ピボットと屈伸動作を組み合わせた歩容により、リムモジュールの構造を生かした効率的な移動が実現できた。さらに、屈伸運動を実現するためには車輪の径を適切に設計することが必要であることも分かった。

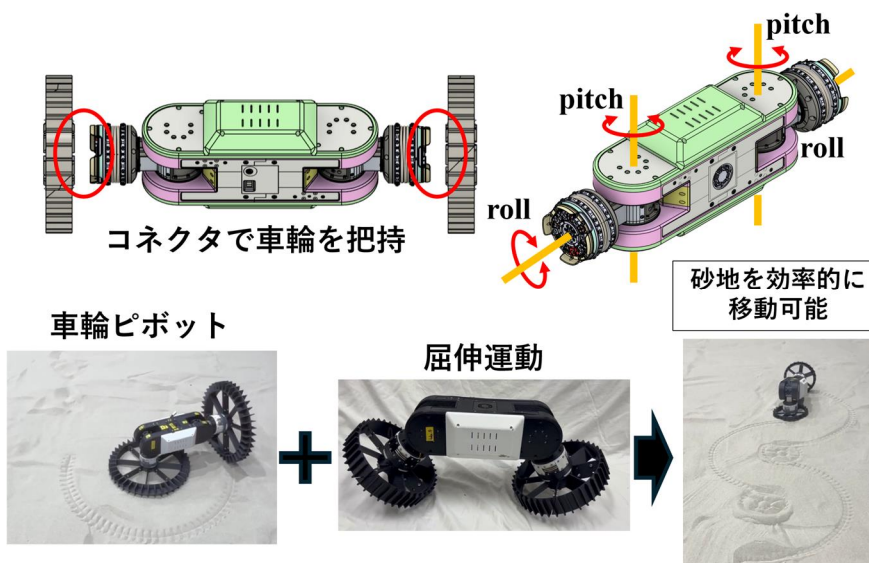


図 2-12 二輪ローバーの車輪ピボットと屈伸運動を組み合わせた移動形態)による移動

##### (2) 尻尾と車輪の設計

リムモジュールは 2 個のロール関節を有しているため、両端の結合機構に車輪をつけて回転させることで二輪ローバーとして走行することができる。ただし、両端の車輪が地面に着いた状態でロール関節を回転させると、両端の車輪ではなくリム本体が回転してしまう。そのため、図 2-13 に示すように本体の回転を阻害する尻尾を取り付けることで二輪ローバーとしての走行を可能にした。ローバーの走破性を高めるための車輪と尻尾をそれぞれ開発した。

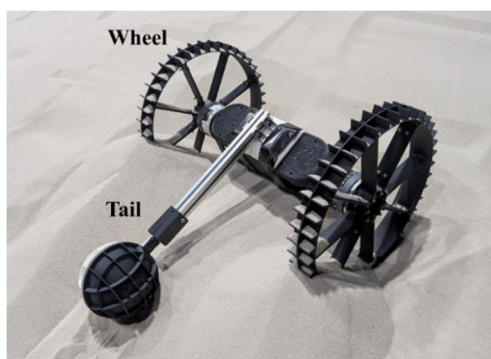


図 2-13 尻尾を搭載した2輪ローバー

## ・四輪ローバー

ボディモジュールにリムモジュールを 5 本、その先に多機能エンドエフェクタモジュールを 5 個結合させて一台のロボットを構成した。4 個の多機能エンドエフェクタモジュールを車輪形態として活用することでロボットの移動を実現し、残り 1 個の多機能エンドエフェクタモジュールをドリル形態として活用することでマニピュレーション(穴掘り)を実現した(図 2-14 参照)。

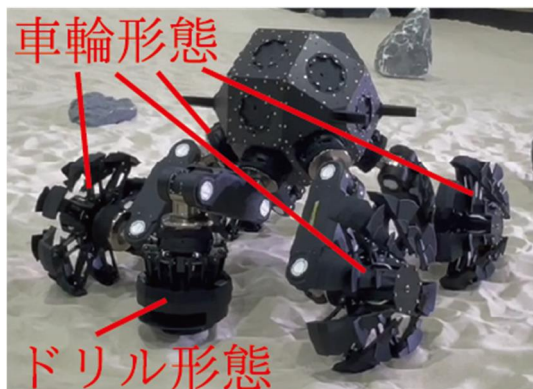


図 2-14 構成したモバイルマニピュレータ

## ・自己組み立て

### (1) アルゴリズム実装と要素動作の開発

AR マーカー識別を用いた自己位置・姿勢の推定に基づいた、高精度・柔軟的なモジュール自律結合手法を開発・実装した。自己組立に不可欠な要素動作として、リムモジュールによるモジュールのピックアップや他モジュールへの受け渡しといった基本動作の制御手法を開発し、その有効性を実機にて確認した。図 2-15 にリムモジュールによるリバーシブルグリッパーの受け渡しの様子を示す。

① : BがGをピックアップ      ② : GがBに装着      ③ : 受け渡し動作      ④ : GがAに装着

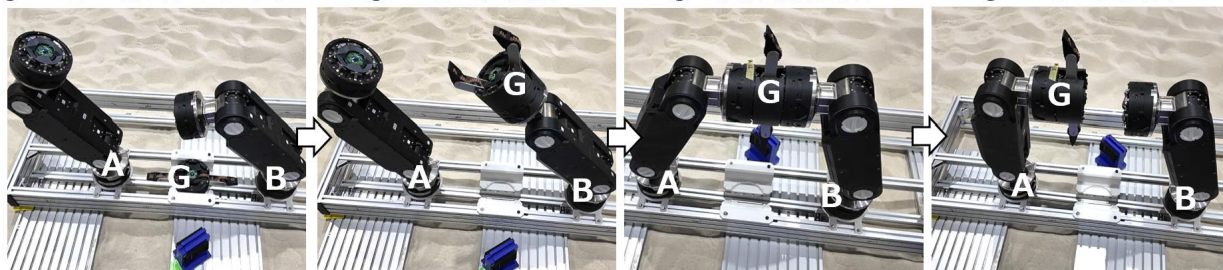


図 2-15 パレット上でのグリッパーGをリムモジュール B から A へ受け渡す実験

### (2) 自己組立タスクの実証

開発した要素動作を統合し、リムモジュール 1 本とホイールモジュール 2 つを結合させてパレットから降ろすことで、二輪ローバーを自律的に組立するタスクを実証した(図 2-16 参照)。その手順の概要は以下のとおりである。

- ① リムモジュール(R)は両端のコネクタを用いて、二つのホイールを順次接続する。
- ② ホイールを回転させながら、リムモジュールはレールに沿って前進し、尻尾モジュール(S)と結合して二輪ローバー(R+S)を形成する。
- ③ ローバーはさらにレール上を前進しながら、車輪の姿勢を水平から垂直に展開する。
- ④ スロープを滑り降り、砂地に着地して、自律的な移動を開始する。

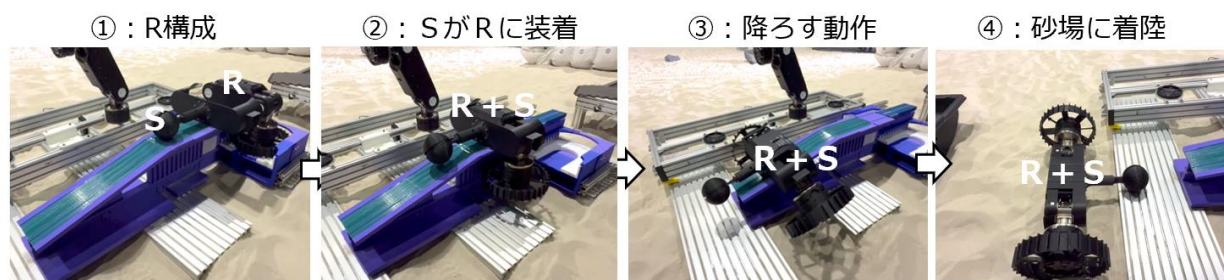


図 2-16 パレット上 2 輪ローバーの自己組立

#### (4) モジュールロボットの Plug and Play を柔軟に管理するシステムの開発 (令和 5 年 10 月～令和 7 年 11 月)

##### 4-1 モジュールの相互接続の管理システムの開発

###### 研究計画

レポジトリの柔軟な処理機能を実現するため、様々なタスクに応じたモジュールの結合形態と制御系を管理するためのサーバー機能を開発する。また、多数のモジュールが結合するモジュールロボットは、その場で合議し目的を達成するためのモジュール間の通信手段が必要となる。本プロジェクトでは無線通信と有線通信を併用するシステムを構築する。無線通信手段においてロボットの Plug and Play (PnP) を柔軟に実施するために、通信参加ノード数の動的な増減や選択可能な通信回線の大きな変化に対応し、これらを自律的に管理する方式とそれを実装するシステムを開発する。さらに、多数のモジュールロボットが複数の群を構成した場合を想定し、スケーラビリティを担保するための分散システムを構築する。

###### 達成した成果

モジュールの PnP を実現するための自律的管理方式を実装し、有線通信と無線通信を動的に切り替える機能を包含するネットワークシステムを実装した。これを用いてモジュールロボット群を作動させる分散システムの検証実験を実施した。また、ロボットモジュールの結合・離脱にあわせて、無線有線を自動的に切り替えてその時点で最速の通信を継続する機能を ROS2 の通信ミドルウェア FastDDS 上に実装した。その原理を図 2-17 に示す。モジュールロボットの各ネットワークインターフェースに割り当てる IP アドレスが重要なポイントになる。同図は 2 つのロボットモジュールの場合で説明している。各ロボットモジュールは、WiFi インターフェース wlan、物理イーサネットインターフェース Eth、USB イーサアダプタによる物理イーサネットインターフェース USB を持っている。このとき、ロボットモジュール同士が結合するとイーサネットの有線結合がなされ、そのことが検知されると、WiFi インターフェースをオフにするプログラムコードが実行され、無線通信から有線通信に切り替わる。一方、ロボットモジュールが分離すると有線通信が途絶え、物理イーサネットが機能しなくなったことがわかる。この場合には WiFi インターフェースをオンにするプログラムコードが実行され、有線通信から無線通信に切り替わる。この有線無線自動切り替え機能をロボットモジュールへ実装し、その有効性を実験により確認した。

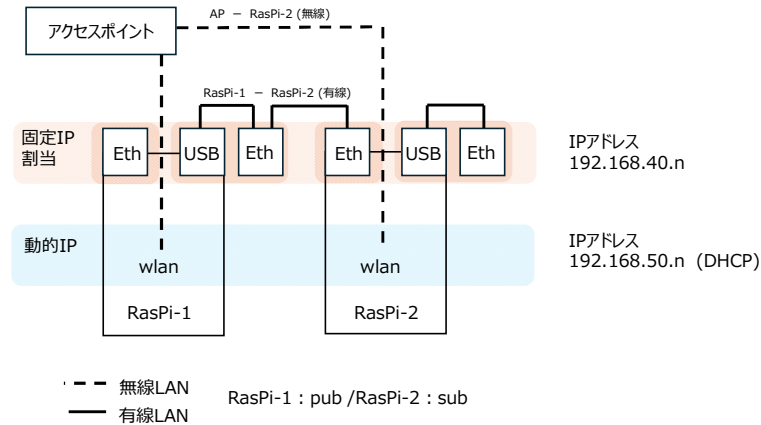


図 2-17 有線無線自動切り替えの原理図

## 4-2 モジュール Plug and Play システムの UI の開発

### 研究計画

モジュール単体だけでなく、モジュールが結合分離して再構成される状況を把握し、必要なモジュールと情報を共有することを可能とする分散システムを構築する。また、管理者がモジュラーロボット単体あるいはロボット群の状況を把握するために、管理者に適切な情報を提示できるユーザーインターフェース(UI)を開発する。また、何らかの原因で自律制御系が機能した場合を想定し、管理者がモジュール構成を指示することを可能とする UI を開発する。

### 達成した成果

モジュール単体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、モジュラーロボット群と UI 用 HTTP サーバー(PnP サーバー)間の通信プロトコルを新たに策定し実装した。これにより、インターネットを介した UI の 3 次元空間内に、多数の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し、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した。これと同時に、UI からロボット群への通信プロトコルも新たに策定・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を可能とした。図 2-19 に開発した UI のスクリーンショットを示す。本 UI はインターネットブラウザから起動でき、インターネットに接続できれば、どこからでも何人でもロボットの状況の閲覧と操作が可能である(ユーザ ID とパスワードによるセキュリティあり)。

UI の画面中央にモジュラーロボット群が 3 次元表示される。図 2-18 では、パレット上のモジュラーロボット 3 台(リム単体、1 つのボディに 1 つのリム、1 つのリムに 1 つグリッパー)が表示されている。各モジュラーロボットにおけるリーダーモジュールとフォロワーモジュールはそれぞれ赤と青で表示されており、関節角度と結合状態が表示されている。この画面は 1~2 秒間隔でリアルタイムに更新されるため、モジュールが結合分離して再構成される状況を管理者は一目瞭然で把握できる。また、3D-LiDAR で取得した点群を描画し、周囲の環境形状も把握できる。画面左側には、点群情報を操作するパネルがあり、点群の密度やノイズ除去フィルタの設定ができるようになっている。ここでの設定に基づいてロボット群(月面)から PnP サーバー(地球)に情報が送られる。点群情報を操作するパネルの下にはカメラ画像が表示されており、管理者が選択した、ロボット群中の 1 つのカメラの画像を表示できる。このように、開発した UI は管理者に適切な情報を提示できる。

また、画面左側下部にある指令送信モジュール選択パネルと画面右側にある指令値設定パネルを用いてロボットに指令を送ることも可能である。関節角度や関節速度をスライドバーで調整して送信ボタンを押すと操作

者がロボットの動作に介入できる。したがって、何らかの原因で自律制御系が機能しなかった場合でも、管理者がモジュールを操作できる。

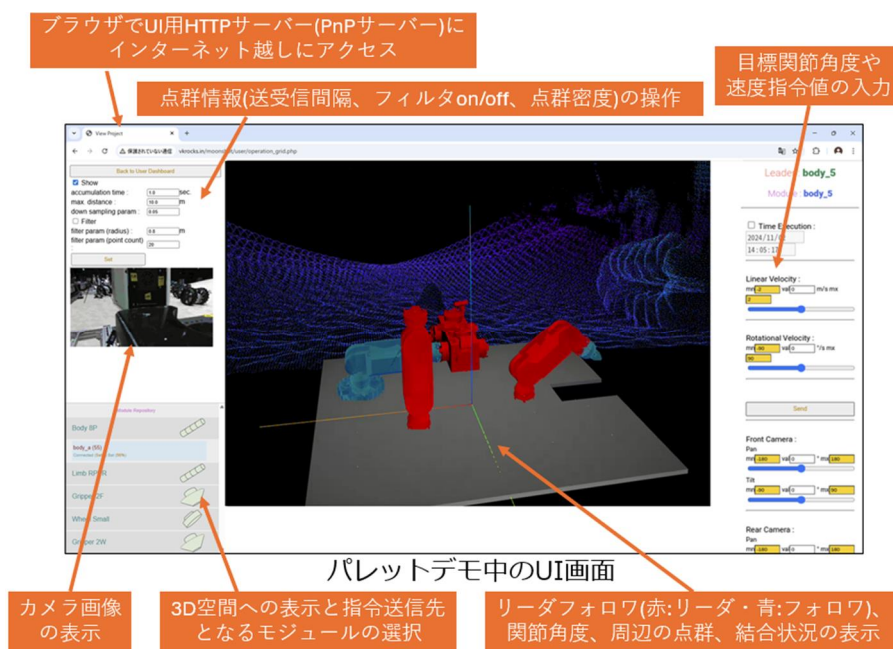


図 2-18 開発した状況把握と指令生成用のユーザインタフェース

## (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(令和5年10月～令和7年11月)

### 5-1 リーダーによるフォロワー群の誘導制御系の構築

#### 研究計画

太陽発電設備等の組立作業現場への異種モジュラーロボット群の不整地移動に関して、群れの規模に依存しない自律分散制御系を構築する。群れの規模が巨大になっても破綻しないスケーラビリティをシミュレーションにより検証し、提案制御系の有効性を実機により検証する。

#### 達成した成果

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れら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。また、群れのロボットの数を変化させてもリーダーがフォロワーを目標位置まで誘導できることを確認し、スケーラビリティを有する手法であることもシミュレーションにて確認した。図 2-19 にシミュレーション結果を示す。この図において、赤丸がリーダー、黒丸がフォロワー、緑丸がフォロワー群の重心、オレンジが障害物、×が目標位置を示している。

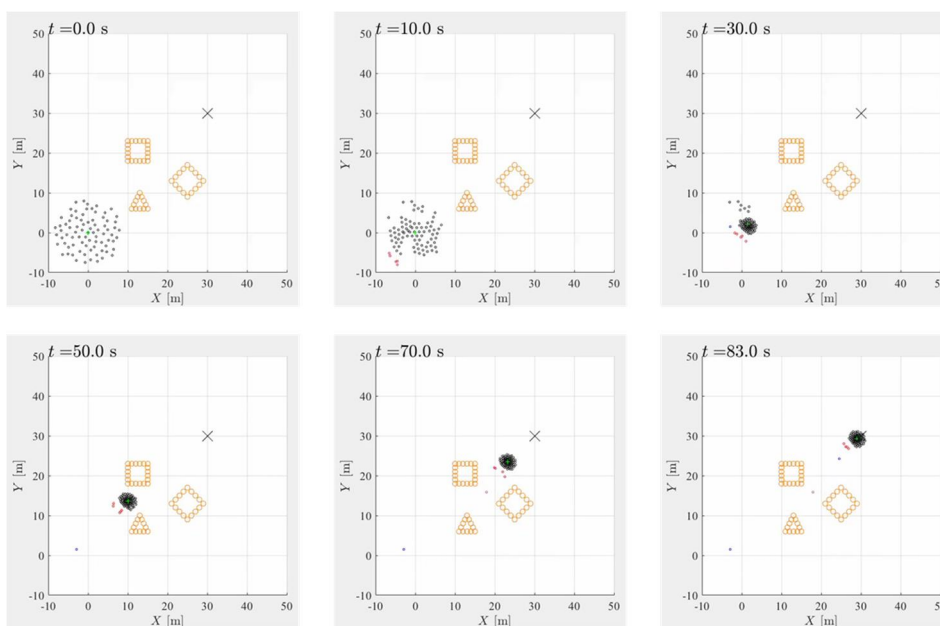


図 2-19 複数のリーダーによるフォロワーの誘導制御のシミュレーション結果

## 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

### 研究計画

障害物のある不整地環境において、異種モジュラーロボット群により、大型のカートに載せられた組み立て部品の作業現場までの運搬を可能とする分散協調運搬制御系を構築する。また、研究開発課題4の研究課題項目2「インフレータブル構造を用いた有人拠点構築」(木村 PI)で開発されたインフレータブル構造物の移動や展開のアシスト機能を実現する。

### 達成された成果

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(非ホロノミック拘束)を持つ大型の任意形状の物体(資材運搬用カートを想定)を目標の位置姿勢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。リーダーは目標位置などのグローバル情報を取得可能なのに対して、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、車輪を持つ物体を目標の位置姿勢まで運搬する制御入力を求める。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の位置姿勢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

### 研究計画

移動タスクおよびマニピュレーションタスクにおいてロボットに故障が生じた場合のリカバリー制御系を構築する。まず、正常性監視・異常検出システムを構築する。モジュールロボット群の故障時にタスクアロケーションを再度実施(タスクリアロケーション)する際に、重要となる各モジュールの異常状態の深刻度レベル判断法を開発する。検出された異常の深刻度レベルにより、自身のモジュールの再構成によるリカバリーが不可能と判断した場合には、自立での基地への帰還あるいは他のモジュールロボットとの合体等の行動を選択できるような分散協調制御系を構築する。

### 達成された成果

(1) ロボットモジュール間の結合を担う機械的結合機構の結合動作正常性の監視

機械的結合機構の試作1号機は、モーターが回転軸を回転させてかぎ爪を押し上げることにより結合を行う。実機の起動試験を通して、正常結合のロック時の軸角度は高い再現性を持つことがわかった。また、かぎ爪の不十分な噛み合いによる結合異常が生じる時のロック時の軸角度は、正常結合におけるロック時の軸角度との間に有意な差が生じることがわかった。このことを利用して、モーターの軸角度の計測データを用いた統計学的仮設検定に基づく異常結合検知アルゴリズムを開発した(図 2-20 参照)。

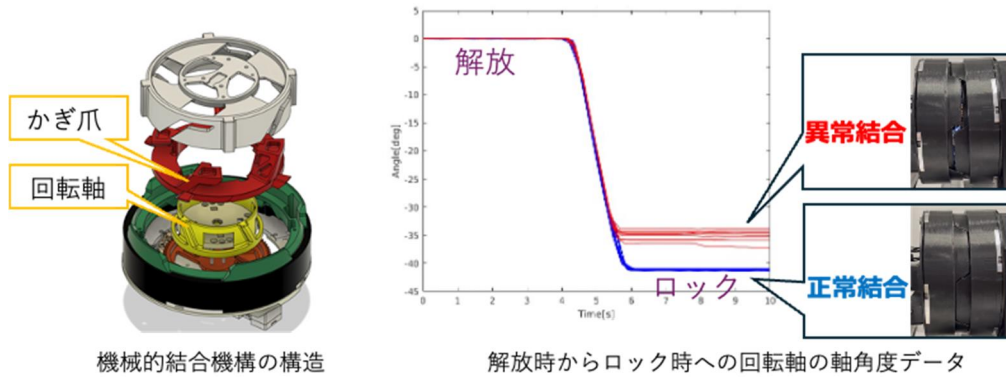


図 2-20 機械的結合機構(試作1号機)に対する異常結合検知

最初に、異常結合のロック時軸角度の代表値を事前に適切に決定し、Shewhart 管理図に基づくバッチデータ処理に基づく異常結合検知アルゴリズムを開発した。次に、幾何移動平均管理図の導入による決定関数の逐次更新を可能にすることにより、オンライン異常結合検知アルゴリズムを開発した。このオンライン異常検知アルゴリズムを ROS によりロボットモジュールに実装し実機による有効性を検証した。さらに、実用上の観点より異常結合のロック時軸角度は未知でばらつきがあることを考慮するために、一般化尤度比(GLR)アルゴリズムを導入した異常結合検知アルゴリズムを開発した。その有効性を、実機実験により検証した。

結合機構のハードウェア開発の進行により、ダイアフラム機構を搭載した第2世代機械的結合機構(試作2号機)が提案された。それに伴い、GLR アルゴリズムに基づく異常結合検知アルゴリズムを第2世代結合機構に実装し、提案アルゴリズムの有効性と汎用性を実証した。

## (2) リムモジュールの結合動作における正常性監視

ロボットモジュール間の結合動作中のそれぞれの手順の成否をすべて監視し、結合動作全体が正常に終了したことを確認できるスキームを開発することは必須である。ここでは、結合動作監視のシナリオとして、パレット上にあらかじめ配置されたリムモジュールとエンドエフェクター(EE) モジュールを結合するタスクを考える。結合動作の正常性監視スキームのミッションは、結合動作中に周囲環境から受ける予測不可能な作用により、計画された正常な結合動作手順が損なわれた際にアラームを発することである。本研究の成果は以下の通りである。まず、アクティブな(能動)結合機構をもつリムモジュールとパッシブな(受動)結合機構をもつ EE モジュール間の結合動作手順における正常性監視スキームを開発した(図 2-21 参照)。次に、複数の監視項目を抽出し、それぞれについて効果的な観測値の選択と適切な正常性監視手法を導入した。最後に、EE モジュール上の AR マーカーの正常検出と機械的結合機構の正常動作監視について、実験装置へのアルゴリズムの実装を行った。



図 2-21 能動結合機構と受動結合機構間の結合動作手順における正常性監視スキーム

#### 5-4 複数の群れのタスクアロケーションの実現

##### 研究計画

月面においてモジュラーロボット群の協調により効率的にタスクを遂行するために、限られた計算リソースでタスク実行のスケジューリングを効率的に行うアルゴリズムを開発する。また、予期せぬモジュールの故障やそれに伴うモジュラーロボットの組み換えタスクの出現などの不確かなシナリオに柔軟に対応するためのタスクスケジューリングを最適化問題として定式化するとともに、タスク完了効率と計画のロバスト性のトレードオフを考慮した多目的な計画・実行環境を構築する。これらのアルゴリズムを、太陽発電設備構築、無線中継局構築、インフレーター居住設備構築の3タスクに適用し、実ロボットによる検証実験を実施する。

##### 達成された成果

##### ・スケジューリング

過酷な環境下での自律作業に対応できるモジュラーロボットシステムを実現するためには、ロボット群の構成とタスクアロケーションを同時に考慮した最適化が必要である。本研究項目では、あらかじめ決められた複数のロボットタイプから構成されるロボット群が、互いに協調しながらタスクを遂行することを想定する。各ロボットタイプは得意とする作業と苦手とする作業が異なり、タスクは空間的に分散して配置されるため、ロボットには現場間の移動が要求される。また、疲労度(稼働時間)に比例して搭載モジュールが故障することを前提とする(図 2-22 参照)。このような条件の下で、i) モジュラーロボット群構成の多目的最適化、ii) 最適化で得られた構成に対するタスクアロケーション最適化、の二段階からなる最適化フレームワークを提案し、その有効性を検証した。

## 想定するモジュラーロボットとタスクの性質

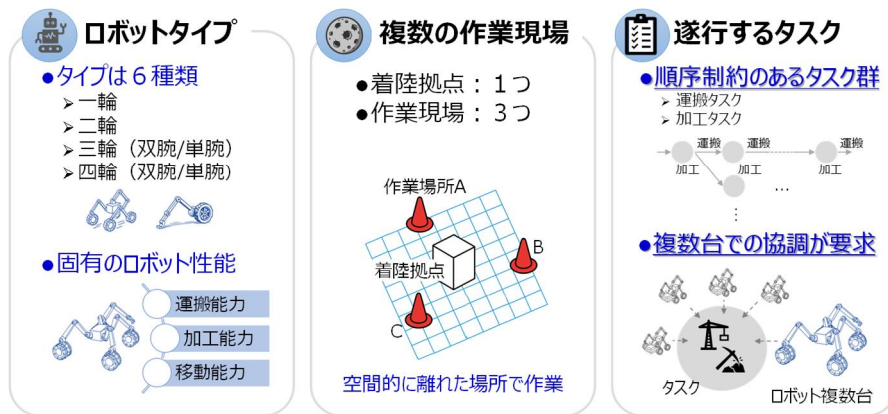


図 2-22 想定するモジュラーロボットとタスクの性質

### (1) ロボット群構成の最適化

与えられたモジュール集合からロボット群を構成する。本研究では、搭載モジュールの故障を考慮しつつ柔軟なロボット群構成を獲得するため、目的関数として「ロボット群の作業性能(運搬能力・加工能力・移動能力)の最大化」と「使用モジュールの総稼働時間および運搬距離の最小化」を設定した。また、各モジュールの個数上限を制約条件として課した。

これらの目的関数間におけるトレードオフの影響を明らかにするためには、複数の目的を同時に扱う多目的最適化が必要である。本研究では、モジュールの疲労による故障を考慮するため、すべてのモジュールを個別に管理した。すなわち、同じタイプのロボットであっても構成するモジュールが異なれば別個のロボットとして扱う。この結果、ロボット群構成の組合せ数は使用するモジュール数に比例して指数関数的に増加する。膨大な組合せから効率的に最適な構成を探索するため、ロボット構成をツリー構造型の遺伝子として表現し、交叉や突然変異を行う進化計算アルゴリズムを開発した。計算実験の結果、性能指標間に明確なトレードオフ関係が確認され、Dragon 型ロボットが多く採用されるなど、モジュール制約に応じた構成傾向が見られた。

### (2) タスクアロケーションの最適化

タスクアロケーションの最適化では、(1)にて獲得したロボット群の各ロボットに対し、空間的に分散した複数のタスクを効率的に割り当てることを目的とした。ロボット群は異なる現場間を移動しながら、ときには複数台のロボットが協力してタスクを実行する。搭載モジュールの故障リスクを考慮したうえで、このような複雑なロボットの行動結果を評価するために、二次元空間上でロボットを模した複数のエージェントを動かすマルチエージェントシミュレータを開発した。また、タスク設定は研究開発項目4の関連研究開発課題と連携し、太陽発電設備構築・無線中継局構築・インフレータブル居住設備構築といった、具体的なタスクを想定して構成した(図 2-23 参照)。

## 《2Dシミュレータのようす》

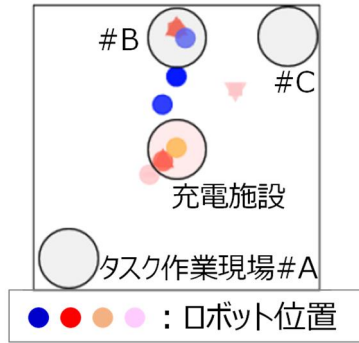


図 2-23 太陽発電設備構築・無線中継局構築・インフレータブル居住設備構築を想定したシミュレーション

タスクアロケーションでは、ロボットごとにタスクの優先順位を示す順列集合を設計変数とした進化計算による最適化を行った。目的関数には、(i) 残作業量と非稼働ロボットに対するペナルティの合計の最小化、(ii) 作業現場間の残作業量の差の最小化、(iii) 最大モジュール稼働時間の最小化を設定した。進化計算を用いた代表的な多目的最適化アルゴリズムである NSGA-II により、ロボット群の構成によって得られる目的関数値に明確な傾向差が見られることを確認した(図 2-24 参照)。

### 《最適化により作成した10種のロボット群に対してタスク割り当てを行った結果の比較》

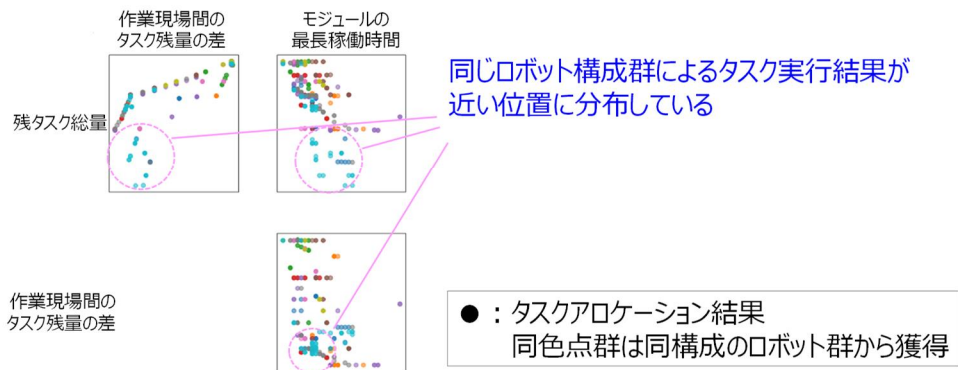


図 2-24 最適化された 10 種類のロボット群に対してタスク割り当てを行った結果の比較

## ・自律分散システム

### (1)「旨み」指標と動的役割分担アルゴリズム

月面におけるモジュラーロボット群の協調タスク遂行計画に対して、限られた計算資源下での効率的スケジューリングが重要である。提案した「旨み」指標と動的役割分担アルゴリズムは、各ロボットが局所情報のみで探索・収集・運搬の役割を自律的に切り替えることを可能にし、中央集権的計算や大規模通信を必要とせずにタスク割当を最適化する。提案アルゴリズムに基づく大規模かつ多数の異なる条件の仮想実験環境を構築し、ロボット数や環境サイズ、資源配置パターンを系統的に変化させながら性能を評価した。実験環境内には、無限の資源を有する領域 A と有限の資源が存在する領域 B が存在する(図 5-4-4 参照)。四角形の実験環境の左辺には灰色の資源集積領域があり、ロボットは資源集積領域に資源を集積する。領域 A と領域 B は、資源集積領域から異なる距離だけ離れている。この時、領域 A から資源を持ち帰ることが効率的である。ロボットは内部状

態として、1) Searcher (資源探索)、2) Picker (資源採掘)、3) Carrier (資源搬送) の 3 つの状態を有し、状況に応じて内部状態を遷移させる。このシミュレーションでは、通信遅延や局所情報制約といった月面運用を想定した条件を組み込み、スケジューリング効率やロバスト性の定量的評価を実施した。その結果、中央集権的制御を用いずに限られた計算資源でタスク割当を行う本手法の有効性とスケーラビリティを確認でき、ハードウェア試験に代わる有力な検証成果としてプロジェクト全体の目標達成に寄与した。計算機シミュレーション実験では、フィールドサイズ、ロボット台数をパラメータとし、複数の提案モデルを検証し、提案モデルが高付加価値の資源エリアを優先して採集タスクを進めていく行動が創発されることを確認した(図 2-25 a)～f)。

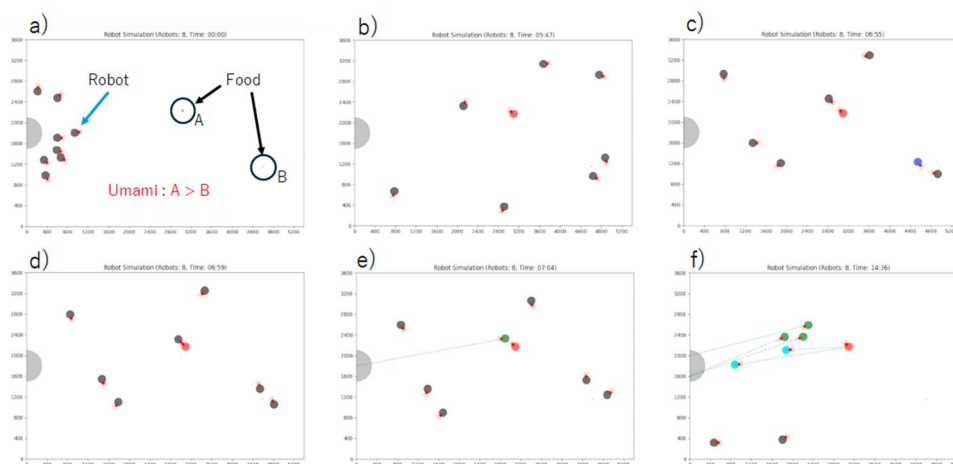


図 2-25 資源エリアが存在する環境下における複数ロボットのタスクアロケーション

## (2) 栄養交換および共食いによる戦略

モジュラーロボットシステムのスケーラビリティを担保するためには各モジュールが自律分散的に行動することが必要である。そこで、自律分散的に振る舞う自然界の生物の行動をロボットシステムに導入する。生物は活動可能な個体数を最大化するために、栄養交換や共食いを通して各個体の栄養状態を制御していることが知られている。一方でモジュラーロボット(モジュール集合体)はそれを構成しているモジュール数が減るとタスクが遂行できなくなるという点で、モジュラーロボットにおける構成モジュール数と生物個体における栄養状態は共通の性質がある。以上のことから、栄養交換や共食いの戦略をモジュラーロボット群に導入し、マルチエージェントシミュレーションによってその効果を調べた。結果として、栄養交換や共食いの行動は複数のタスクを迅速に完了させることに有効であることがわかった(図 2-26 参照)。

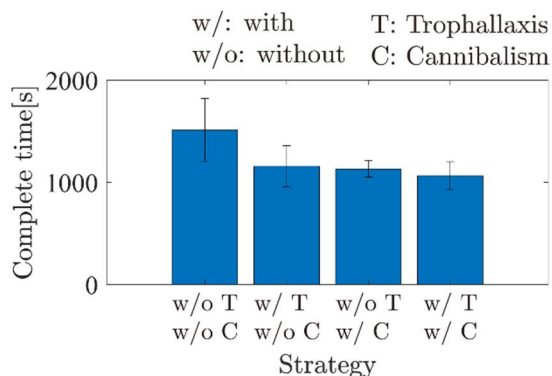


図 2-26 栄養交換・共食いの戦略の有無の違いによるタスク完了時間の違い

また、各モジュラーロボットは栄養交換と共食いの戦略に基づいて構成モジュールの受け渡しを行う。その結果として、あるタスクに従事するモジュラーロボットの群を構成する個体(モジュラーロボット)が故障した際に、空間的に近傍の 2 台のモジュラーロボット間の協調によって互いの余剰モジュール数を均等化させる。あるいは、2 台のモジュラーロボット間で合体することで 1 台となり、1 台のモジュラーロボットとしての余剰モジュール数を最大化する。このように、各モジュラーロボット間の協調を通して全ての群れが健全にタスク解決を継続するためのタスクリアロケーションを実現した。

## 【今後の展望】

### (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

アルゴリズム開発はほぼ完了しているが、計算の効率などはまだ改善の余地がある。今後、使用するツールの更新や計算方法の改善などにより、計算の効率化と計算精度の向上を図る。また、シミュレーションする環境やタスク、それらに対する評価関数の設定については考えられる組み合わせが非常に多く、時間的な制約からまだごく一部しか考えられていない。今後、様々な組み合わせに対して最適化を実行していく。

### (2) 組み換えを可能とするモジュールロボットの設計と地上実証用モデルの製作

#### ・機械的結合機構

今後は、試作第 2 号機と 3 号機のコンセプトを統合し、4 つの要件(オスメスの差異なし、片側動力による分離結合、位置決め誤差の許容、ガタの無い強固な結合)に加えて防塵性能を持った結合機構の開発を行う。これによりレゴリス環境での安定運用が可能になると考えられる。

#### ・電氣的結合機構

今後は、より安定して、かつより高速なイーサネット通信を可能とする電氣的結合の作製を引き続き行う。また、すでに開発した電氣的結合もイーサネット・RS485 通信路や電力受給路として十分な能力を有しているため、本プロジェクトの以外の様々なモジュールロボットへの応用が期待できる。

#### ・バッテリー

今回開発したバッテリーパックは高出力かつ高信頼性を有するが、宇宙空間での使用を前提とすると、さらなる性能向上と耐環境性の強化が必要となる。第一に、エネルギー密度向上のため、同一サイズでより高容量の宇宙認証セルや最新 21700 セルの採用を検討し、限られた搭載スペースで稼働時間を最大化する。第二に、無重力・真空環境における放熱特性を考慮し、高熱伝導材やヒートパイプを組み込んだ筐体構造とし、輻射冷却を主体とした熱制御を最適化する。第三に、充電方式を多様化し、地上での急速充電(10A クラス)や、宇宙船内の電源バスに適合する入力仕様(28V 系統など)を追加することで運用柔軟性を高める。また、BQ4025 による SMBus 通信に加え、冗長化された通信インターフェース(CAN、RS-422 など)を備え、地上局や母船からの遠隔状態監視を可能とする。さらに、セルの劣化診断・寿命予測アルゴリズムを搭載し、長期ミッション中の予防保全を支援する。最後に、放射線耐性部品の採用とシールド設計、防塵・防水相当の密閉構造を施すことで、宇宙放射線や微小デブリ、極端な温度変動下でも安定動作を確保できる。これにより、本バッテリーパックは長期間の宇宙ミッションにおいても信頼性の高い電源供給を実現できる。

#### ・ボディモジュール

宇宙空間での運用を想定した場合、本ボディモジュールには真空環境や極端な温度変化、放射線など地上とは異なる厳しい条件への適応が求められる。まず、外装材質は PPA-CF や CFRP に加えて、低温脆性や熱変形を抑制する宇宙用グレードの樹脂複合材や金属コーティングの採用が望ましい。また、熱膨張差による結合部の歪みを防ぐため、結合機構には耐熱・耐寒性の高い摺動部材と潤滑剤(固体潤滑膜やモリブデン系コーティング)を使用する。真空下では放熱が困難なため、内部電子機器の熱設計を強化し、放熱フィンやヒートパイ

ブを外装に組み込み、遮熱カバーや遮光版を用いて放射冷却を効率化する必要がある。さらに、放射線耐性を高めるため、制御用 PC やセンサーにはシールド構造や耐放射線部品を採用する。センサー系については、3D-LiDAR やカメラの光学系に低温対応ヒーターや防塵・防氷コーティングを施し、微小デブリや月・惑星塵の侵入を防ぐ多層フィルタ構造を導入する。加えて、宇宙での自己再構成を想定し、結合機構の冗長化と位置決め精度向上を図ることで、長期運用の信頼性を確保できる。

#### ・リムモジュールモジュール

各パーツの形状最適化による重量の削減と関節部の防塵機能の追加、また、電装部品の対放射線性能の向上を行うことにより、月面での実運用が可能なリムモジュールの設計を目指す。

#### ・リバーシブルハンドモジュール

ベルト駆動部をワイヤに変更することによる軽量化と、耐久度の向上を目指す。

#### ・多機能エンドエフェクタモジュール

多機能エンドエフェクタが有している移動機能と作業機能は、建造物構築タスクに限らず、未踏環境の探査タスクに対して汎用的な機能である。また、一般的に探査用ロボットは環境内を移動し、目標物体を発見・回収する上で、軽量かつ故障に対するロバスト性を有していることが望ましい。多機能エンドエフェクタは一つのエンドエフェクタさえ搭載すれば多様なタスクを遂行可能なため、ロボットの軽量化に有用である。また、一つが多機能エンドエフェクタが故障した際にも他のエンドエフェクタでタスクを代替できるため、故障へのロバスト性も有しているといえる。以上のことから、開発した多機能エンドエフェクタモジュールの今後の発展として、モジュラーロボットの枠組みを越えた多様な探査用ロボットへの応用が期待される。

### (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

ループを含むモジュラーロボットの抽象的かつ一意な文字列への変換とそれによる効率的な遷移グラフの作成手法(CRAGE)は、本事業のモジュラーロボット構造だけでなく、一般的なモジュラーロボット全般に適用可能である。また、ロボット構造のダイナミックな変更、特に中心となるボディから見た上下流の変更が生じる場合に、遷移を司る上位のプログラム、逆動力学ソフトウェア及び物理シミュレーションソフトウェアの間のロボット構造と制御器のコンシステントな受け渡しを実現するパッケージも、同様に他の研究開発プロジェクトに適用可能である。

モジュラーロボットの自律結合手法は、宇宙探査などの宇宙応用だけでなく、地上においても建設や災害救助分野において、環境条件に応じてモジュールを組み替える柔軟なシステムとして展開可能である。さらに、これらの成果を基盤として出願済みの特許(特願 2025-115530)を活用し、企業との共同研究や事業化に向けた展開を進めていく予定である。

### (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

モジュールの相互接続の管理システムに関しては、今後の発展として、モジュールロボットの枠組みを越えて、多数個体からなるロボット群の通信システムとしての応用も期待される。

開発した UI は、異種モジュール型ロボットシステムにおける自律的再構成と役割分担の可視化を実現した世界初の UI と位置付けられる。したがって、このような視点に立てば、開発した UI は当プロジェクトで対象とした月面で作業するモジュール型ロボット以外への展開が可能である。特に ROS/ROS2 で構築された自律ロボット群システムに対してインターネットを介して遠隔監視と遠隔介入が可能である点は、今後大規模化していく様々なロボットシステムに対して適用可能であると考えられる。ロボットシステムは個々に様態が異なり、機能や作業

目的も様々である。開発した UI とそのための通信システムを基盤プラットフォームとして既存のロボットシステムへ導入し、あるいは導入するロボットシステムに合わせて機能拡張し、その保守を行うことは一種の事業として成立すると考えられる。今後はこのような着想で事業化が可能かどうかを検証し、事業化が可能であれば事業者を選定していきたい。また、もし事業化が困難であれば、多くのロボット開発者に資するようにオープンソース化することも考えられる。

#### (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

群制御に関して、提案した誘導制御系は未知の障害物の回避を可能としているため、月面環境のみならず、未知の障害物が多数存在する災害現場のような複雑な環境への応用も期待できる。一方、月面での適用を考えた場合、不整地環境を考慮した制御系の構築が必要である。

正常性監視・異常検出と故障時のリカバリー制御に関しては、モジュールロボットの関節機構不具合など既存のセンサーで直接計測できない複数種類の要因を持つ異常状態の検出が重要である。これには、対象の動的モデルをシステム同定し同定モデルを利用した状態推定を行い、異常状態を間接的に計測できるソフトセンサが有効である。ソフトセンサのための非線形システムのモデリングおよび異常検出法の開発を行う。さらに、モジュールロボット群のタスクアロケーションを実施する際に、各モジュールの異常状態の深刻度の情報は重要であるので、モジュールの動作異常診断による深刻度レベルの判断法を開発する。

複数の群れのタスクアロケーションにおけるスケジューリングアルゴリズムは、モジュール構成・ロボットタイプ・タスク内容を柔軟に変更可能な設計として開発しており、各制御系とタスクスケジューリングを実環境で統合する際や、異なる運用条件下でのモジュラーロボットのタスクアロケーションにも適用可能である。これにより、当該成果は他の研究開発プロジェクトや実証環境においても再利用性が高く、用途に応じた設定変更による迅速な適応が期待できる。また、故障発生時に柔軟な対応を行うため、集中型のタスクアロケーションと自律分散型システムを組み合わせたハイブリッド構成とすることで、より汎用性の高いシステム構築が可能となる。今後は、このハイブリッド型タスクアロケーションを実環境で評価し、他分野への展開や企業との共同研究・事業化に向けた技術的基盤の確立を目指す。

課題推進者:松野文俊 (大阪工業大学)

研究開発課題 2: 異構造の複数ロボットによる探査・組立タスクの制御 (R4~5)

→ 2024 年度より、研究開発項目 4: 研究開発課題 1 へ移動

研究開発課題3: 欠番

## 研究開発課題4:階層型強化学習による分散型 AI の研究開発

### 【研究計画】

「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を想定したタスクを用いて開発される AI 技術を評価する。

特に、ハンドモジュールとアームモジュールを有するロボットシステムをテストベッドとしてシミュレータ環境を構築し、ロボットが異なる形態に変化した際の階層型強化学習手法について検証をおこなう。ハンドロボットのみでの学習データ、アームロボットのみでの学習データのそれぞれを活用することにより、はじめからハンド・アームロボット一体のロボットで学習する場合と比べて階層型において学習が効率化されることを評価する。

さらに、吉田グループ(東北大)が開発する月面モジュールロボット(MoonBot)のモデルファイルに基づいて、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実施し、より多階層の構造を持つ学習システムの開発とより複雑な構造を持つ複数モジュールが結合したロボットシステムへの階層型強化学習の適用をおこなう。MoonBot では、上述のアーム・ハンドモジュールに加えて移動ロボットモジュールを有しており、これらのモジュールのデータ空間を利用するためのエンコーダ・デコーダ型の階層型強化学習システムを新たに導出する。また、これら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い、組立作業を想定したマニピュレーションタスクにおける学習効率を評価する。また、階層構造のない学習手法との比較を実施する。

具体的には、3体以上のロボットモジュールが組み合わされた状況で、ロボットの形態に合わせた制御系を生成する。また、モジュール型ロボットにおいて機能異常が生じた際に、リカバリ方策の生成を可能とすることを目指す。以下に、本研究でおこなう3つの研究開発項目について示す。

1. 3体以上のロボットモジュールが組み合わされた状況で、ロボットの身体構造に対して、与えられた組立て作業課題に対して適切な制御系を生成する。例えば、当該プロジェクトにおいて想定されているロボットモジュールとして、ボディ、リム、エンドエフェクタを接続したロボットシステムにおいて制御系を生成する。
2. 3体以上のロボットモジュールが結合された状態で、そのうち少なくとも1体のロボットモジュールを異なるロボットモジュールに交換された場合に、ロボットの身体構成(組み合わされるモジュール)が変わっても、組み換え前と同じタスクを遂行する。
3. 3体以上のロボットモジュールが結合された状態でそのうち一つのモジュールロボットの機能に少なくとも1カ所以上の機能劣化または異常が生じた場合、それを認識した上でリカバリ方策の生成を可能とし、異常度の大きさとタスク達成性能のトレードオフを検証する。

### 【達成した成果】

図 3-1 に示すように、ハンドモジュールとアームモジュールを有するロボットシステムをテストベッドとしてシミュレータ環境を構築し、階層強化学習手法を開発、図 3-2に示すようにロボットが異なる形態に変化した際の階層型強化学習手法について検証をおこなった。ハンドロボットのみでの学習データ、アームロボットのみでの学習

データのそれぞれを活用することにより、はじめからハンド・アームロボット一体のロボットで学習する場合と比べて階層型において学習が効率化されることを評価した。

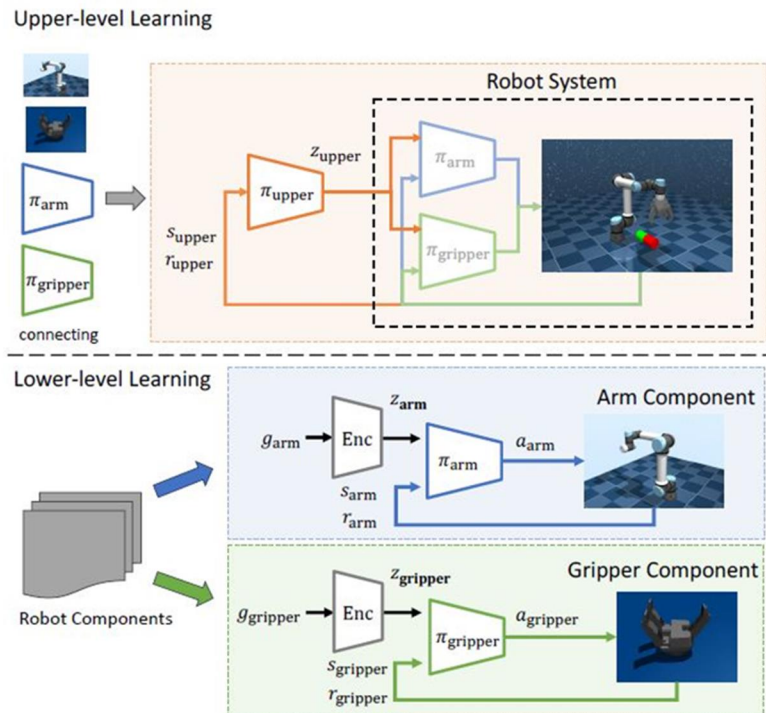


図 3-1: モジュールロボット制御用エンコーダ・デコーダ型階層強化学習手法

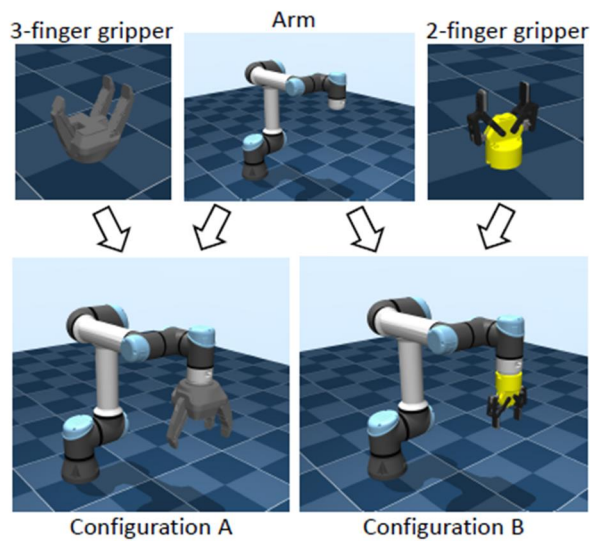


図 3-2: モジュールロボットのハンド部分が異なる形態に変化した場合への適応

評価の結果を図 3-3 に示した。マニピュレーションタスク達成に必要な学習試行回数が、階層構造を導入することにより大幅に減少することが確認された。また図 3-4 に獲得された階層方策によって生成されたマニピュレーション動作を示した。

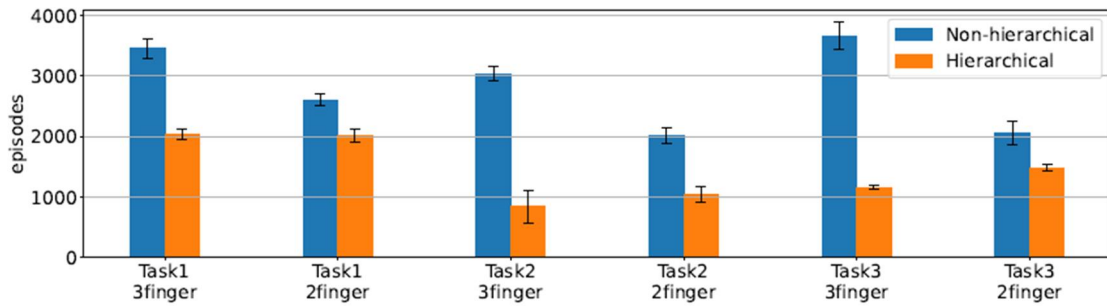


図 3-3: 階層強化学習のサンプル効率の検証

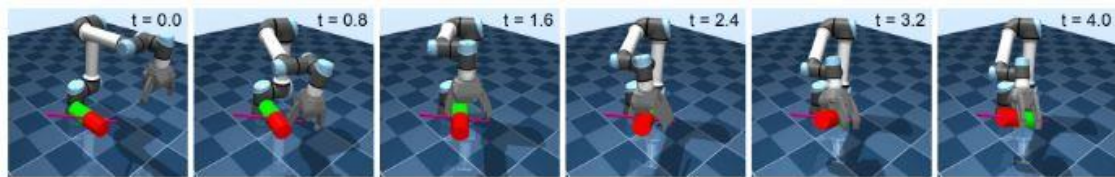


図 3-4: 階層強化学習により生成されたマニピュレーション動作

さらに MoonBot のモデルファイルに基づいて、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実施し、より複雑な構造を持つ学習システムの開発とより複雑な構造を持つ複数モジュールが結合したロボットシステムへの階層型強化学習の適用をおこなった。MoonBot では、図 5 にしめすように、上述のアーム・ハンドモジュールに加えて移動ロボットモジュールを有しており、これらのモジュールのデータ空間を利用するためのエンコーダ・デコーダ型の階層型強化学習システムを新たに導出した。また、これら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い学習効率を評価した。さらに、階層構造のない学習手法との比較を実施した。以下に、各研究開発項目に対応する成果をしめした。

1. 3体以上のロボットモジュールが組み合わされた状況で、図 3-5 に示すようなローバー、アーム、グリッパを接続したロボットシステムにおいて階層方策を生成した。生成されたリーチングおよびマニピュレーション動作を図 6 にしめした。

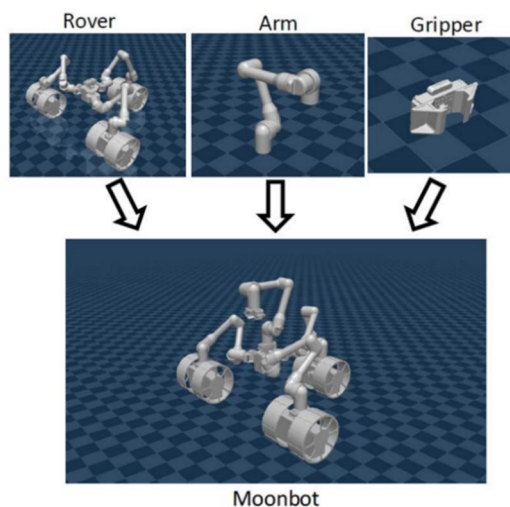


図 3-5: 3 体以上のロボットモジュールが組み合わされた MoonBot モデル

2. 開発した階層強化学習を用いることにより、図 3-6 に示すようにロボットモジュールがことなるロボットモジュールに交換された場合に、ロボットの身体構成(組み合わせられるモジュール)が変わっても、組み換え前と同じタスクを遂行できることを確認した。具体的には、まず図 3-7 に示すようにアームモジュールが姿勢生成方策を獲得し、その方策を下位モジュールとして、組み合わせることにより図 3-8 に示す3つのロボット形態(Minimal 形態、Dragon 形態、Tricycle 形態)において速度リーチング動作を達成した。その動作生成結果を図 3-9 に示した。また、速度リーチング課題において、Minimal 形態⇒Dragon 形態⇒Tricycle 形態と、ロボットの形状が複雑になるにつれて、階層化の効果が、タスク達成度合いに強く影響することが確認された(図 3-10 参照)。

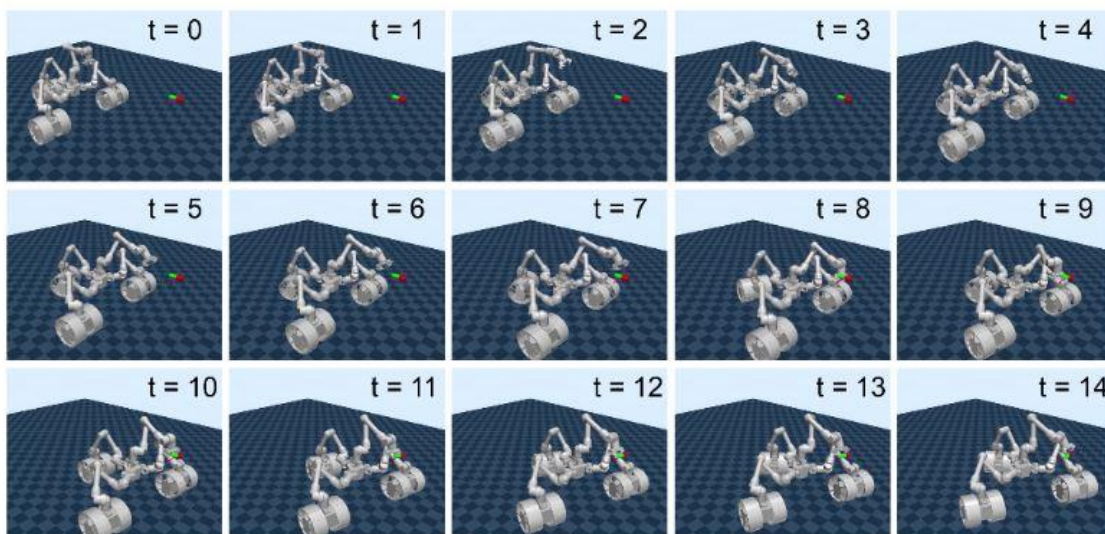


図 3-6: MoonBot モデルによるリーチングおよびマニピュレーション動作の生成

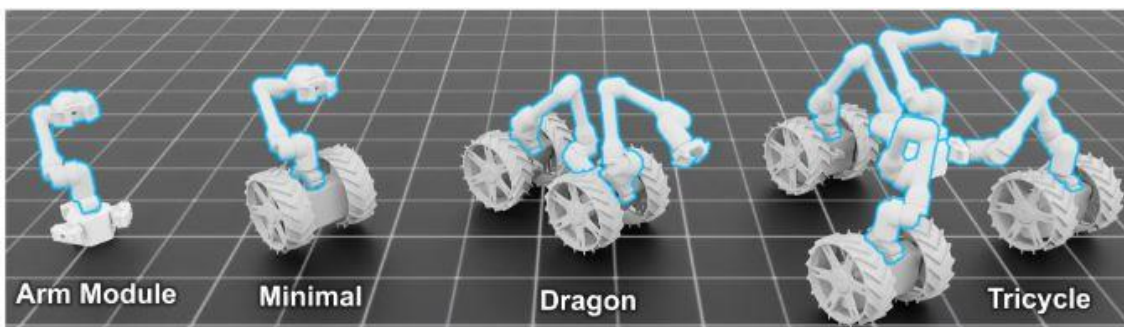


図 3-7: アームモジュールの組み合わせによる3つの異なるロボット形態。それぞれ、Minimal 形態、Dragon 形態、Tricycle 形態とよばれる。

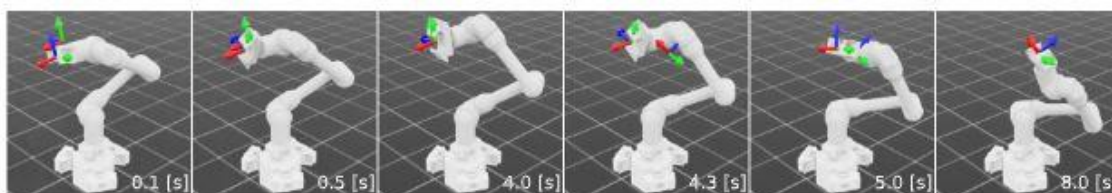


図 3-8: アームモジュールによる下位方策(姿勢生成方策)の獲得

3. 3体以上のロボットモジュールが結合された状態でそのうち一つのモジュールロボットの機能に少なくとも1カ所以上の機能劣化または異常が生じた場合、それを認識した上でリカバリ方策の生成を可能とし、異常度の大きさとタスク達成性能のトレードオフを検証した。具体的には、モジュラーロボットにおいて発生した異常に対して異常検知とリカバリ方策への切り替えを実施するロボットシステムの検証をおこなった。モジュラーロボットが持つ多数の関節による冗長性を活用し方策を切り替えることで、異常時の動作継続が期待できる。図 3-11 に異常発生時におけるリカバリ方策による動作を示す。この実験では、Dragon 形態のロボットが緑矢印で示す位置と向きに手先を到達させるリーチタスクを考えた。通常方策では、発生した Wheel free 異常による前輪駆動力の喪失に対処できず、タスク性能が低下している。一方で、リカバリ方策は、後輪を巧みに用いることで目標へ到達している。図 3-12 に、異常発生時における、通常方策とリカバリ方策のタスク性能と異常度を示した。ここでは、正常、Wheel free、Leg locked による関節固着異常について、それぞれ 10 回タスクを遂行させた際のスコアを図示した。リカバリ方策では、タスク達成度は安定した値を示し、異常発生の影響を受けにくく、頑健であることがわかる。

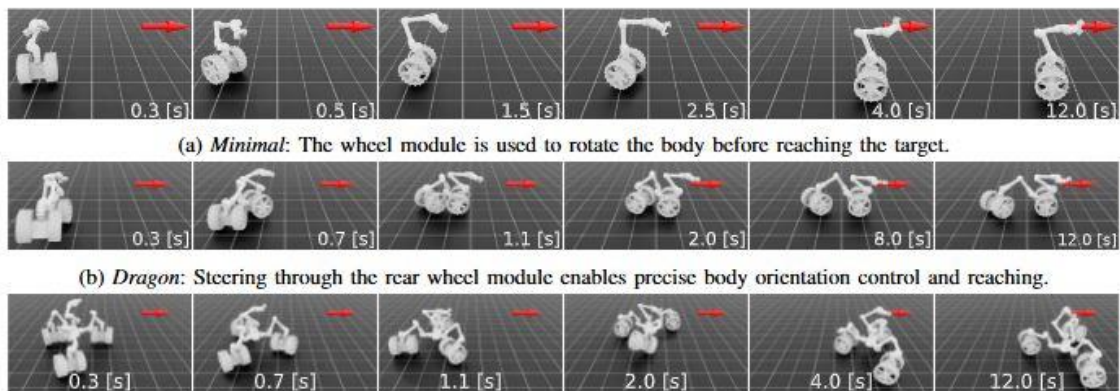


図 3-9: アームモジュールによる下位方策の獲得

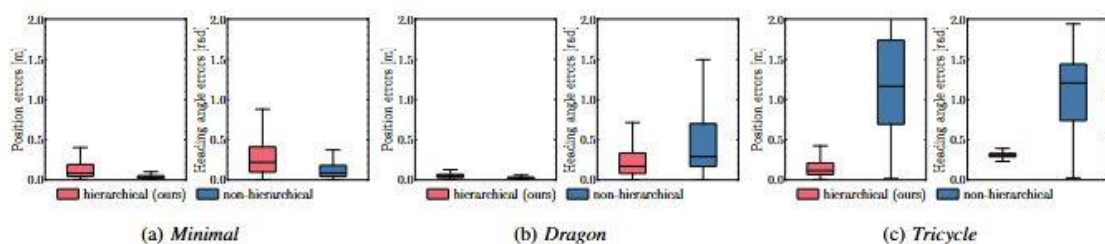


図 3-10: 3つの異なるロボット形態におけるタスク達成度と階層方策の有用性の検証

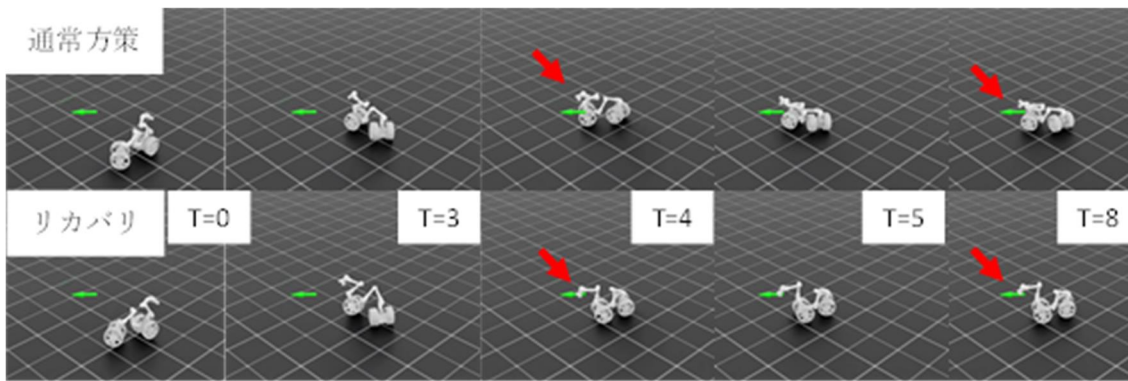


図 3-11: リカバリ方策の活用による異常状態への対応。通常方策との追従性能の差が赤矢印部分において顕著にあらわれている。

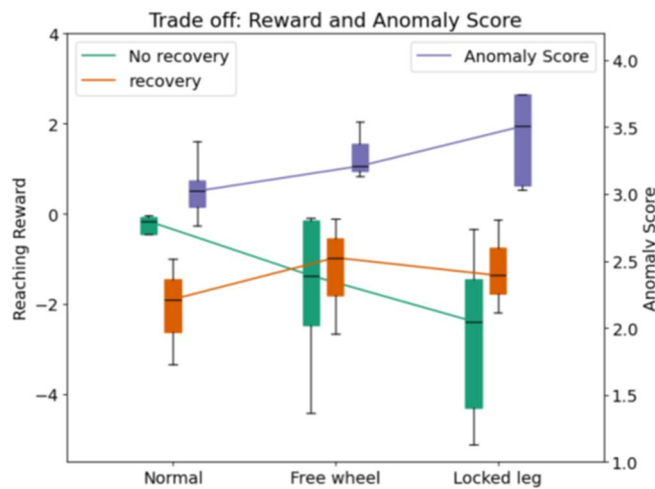


図 3-12 :リカバリ方策を用いることのトレードオフ。正常時は通常方策の追従性能が良いが、異常度が大きくなると、リカバリ方策のタスク達成度がより高くなる。

さらに、当初計画を超える成果として、図 3-13 に示した実多自由度ロボットシステムを設計・製作した。これは、階層学習手法の実環境への適用性、および実時間性を評価するための実験システムとして MoonBot の設計を参考に開発した。結果として、シミュレーションにおいて獲得された階層方策を実環境において評価することが可能となった。加えて、Sim-to-Real ギャップへの対応のため、シミュレータ環境の大規模並列化を実施、図 3-14 に示すように数千体のロボットモデルによる同時学習をおこなうことで方策を効率的に生成する環境の構築を達成した。

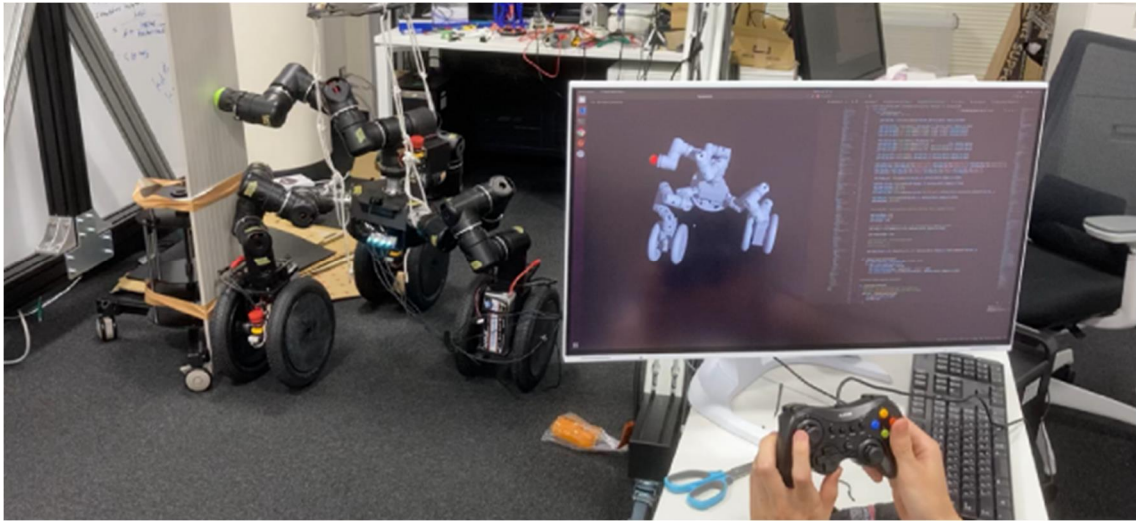


図 3-13: 階層強化学習手法の実環境検証のための実モジュラーシステム

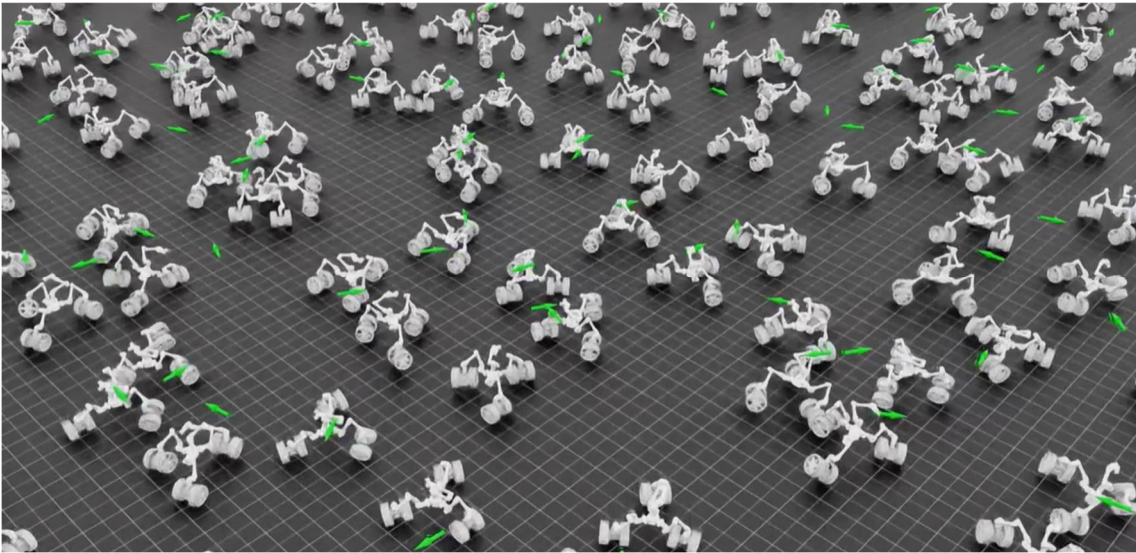


図 3-14: Sim-to-real gap に対応するための大規模シミュレーション環境

#### 【将来に向けての展望】

本研究では、宇宙で活躍するロボットが、モジュール構造を活用し、タスク目的に合わせて形態を変化させたときに、異なる形態間での経験を効率的に共有するための方法論を目指した。各ロボットモジュールにおいて、手先リーチングなどの下位方策を獲得しておくことで、その下位方策を、上位階層の方策により調整し組み合わせることで、より複雑な形態のロボットを用いた場合においても限られた追加の経験からタスク達成が可能となることを様々なシミュレーション実験により示した。また、当初計画を超えて、検証用実ロボットシステム開発し、実環境においても階層強化学習により獲得された方策が動作することを確認した。将来的には、複数モジュールの組み換えにより、複数のタスクを適応的に達成することを可能にすることで、宇宙空間における不測の事態にも柔軟に対応可能となるようなロボット学習システムの実現が可能となることが期待される。

課題推進者：森本淳（京都大学）

(2) 研究開発項目3:分散型・Plug and Play 可能な AI システムの実現 (R4～R5)

研究開発課題1:階層型強化学習による分散型 AI の研究開発

→ 2024 年度より、研究開発研究開発項目1 研究開発課題 4 へ移動

(3) 研究開発項目 3:自己修復・再生可能なハードウェアの実現 (R4～R5)

研究開発課題1:粉末素材によるオンデマンド・ロボット造形法

→ 2023 年度にて終了

(4) 研究開発項目 4: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

【研究計画】

本研究課題では、森本 PI が開発する階層型のモジュラー学習制御アーキテクチャを基盤とし、より上位の階層へと統合可能な統合制御の仕組みを開発し、モジュール→ロボット→複数ロボット→複数ロボット+能動構造物へと、より広範囲で大規模なシステムにおいて、全体のミッション目的に沿った統合制御の実現を目指すことを最終的なゴールとする。

具体的な月面ロボットのミッションとして、以下の3つのベンチマークタスクを設け、それぞれに、達成すべきマイルストーン目標を設定した。

(1) ベンチマークタスク 1 : ロボット自身の自己組み立て

- ・ 初期状態としてランダムに配置された質量 **2 kg** 以下のロボットモジュールを画像認識し、マニピュレータアームを用いて組立（結合・着脱・交換）作業を行うこと。
- ・ 質量 **2 kg** 以上 **5 kg** 以下のモジュールに対して、**2 本**のマニピュレータアームを用いてハンドリングし、組立（結合・着脱・交換）作業を行うこと。

(2) 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

- ・ **2 本**以上のマニピュレータアームを用いて、太陽電池を模したパネル型構造物や、展開型のタワー型構造物モデルの組立作業を、事前学習に基づいて自律的に実行すること。
- ・ 能動性を持つ伸展機構を併用することにより、高さ（長さ）**1 m** 以上の構造物を組み立てること。

(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・ユニットの展開支援

- ・ インフレータブル・ユニット (**HIDAS** 地上実証モデル)の能動性と協調して、**2 つ**の **HIDAS** 間の位置決め作業、結合作業ができること

【達成した成果】

2022～2024 年度には、松野 PI とともに、リム（アーム）、エンドエフェクタ（グリッパー）、ホイール、ボディなどの要素で構成されるモジュラー型月面ロボットのプロトタイプシステム **MoonBot** を開発し、マニピュレータアームにより基本的なモジュール組立ができること、またモジュールの組み合わせを変えることにより様々な形態のロボットに変形できることを確認し、テレオペレーションによりベンチマーク・タスクを実施可能であることを実証した。(図 4-1, 図

#### 4-2 参照)

2024 年度後半以降には、マイルストーンに掲げた 3 種類のベンチマーク・タスクについて、遠隔制御および自律制御に遂行することを目指して研究開発を推進した。

#### (1) ベンチマークタスク 1 の達成状況

ベンチマークタスク 1 については、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）作業のデモを行った。画像認識を用いた自律制御は、限定的に導入できたが、2024 年 11 月に実施したロボット実演では、それらのほとんどが遠隔制御（テレオペレーション）によるものであった（図 4-3、図 4-4）。

上記を踏まえ、2024 年 3 月および 2024 年 7 月に実施したフィールド実験では、画像センサによる対象物との相対位置・姿勢計測に基づくセンサフィードバックに、機械学習に基づく画像認識を重畳することにより、モジュール間の結合および分離動作の自律化の度合いを向上させた。

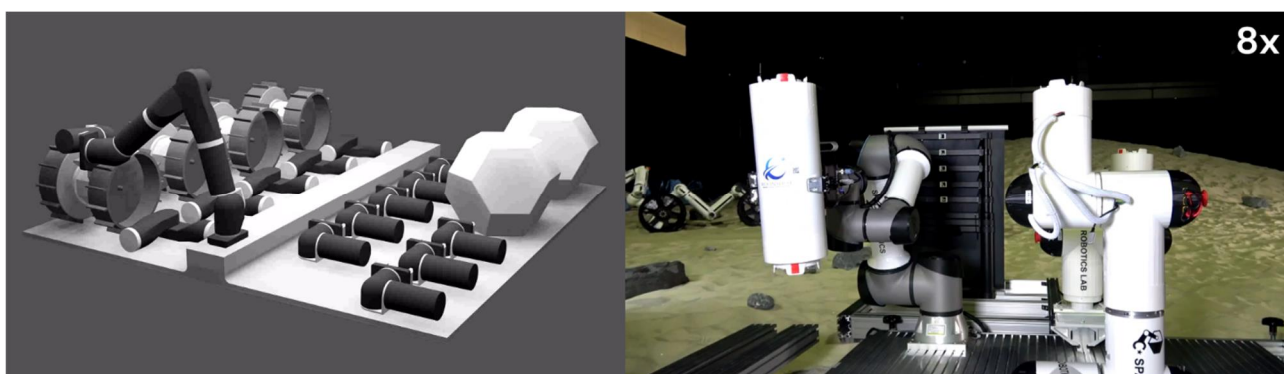


図 4-1 : MoonBot モジュール組立 (左 ; シミュレーション、右 : 実験風景)

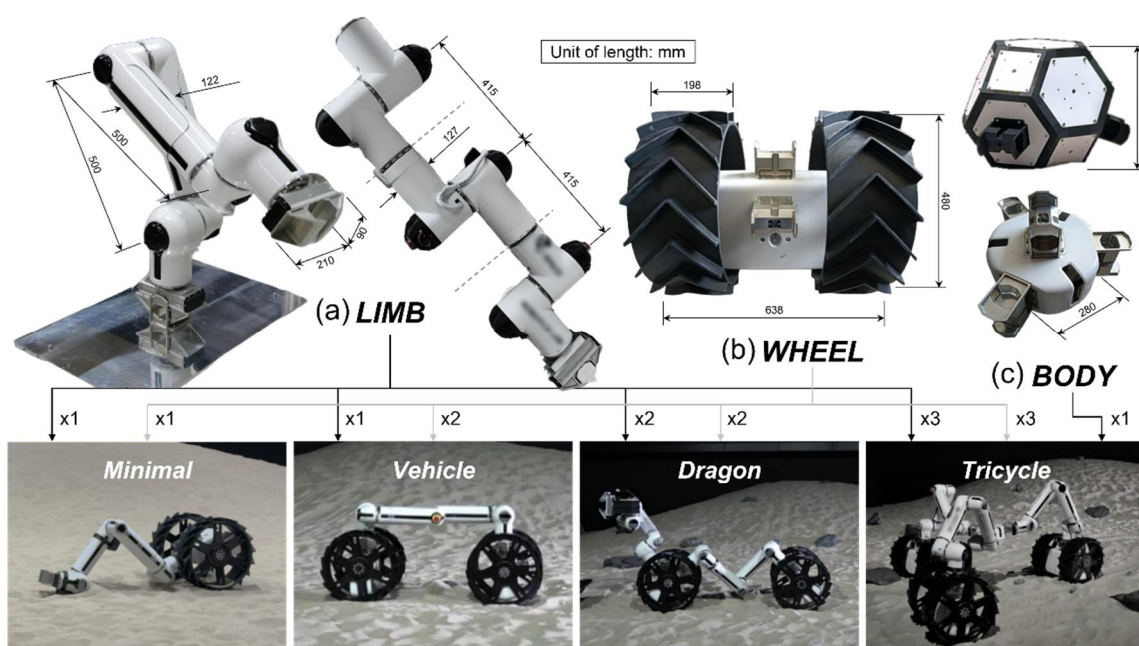


図 4-2 ホイールとアーム（リム+グリッパー）の組み合わせによる MoonBot の複数形態

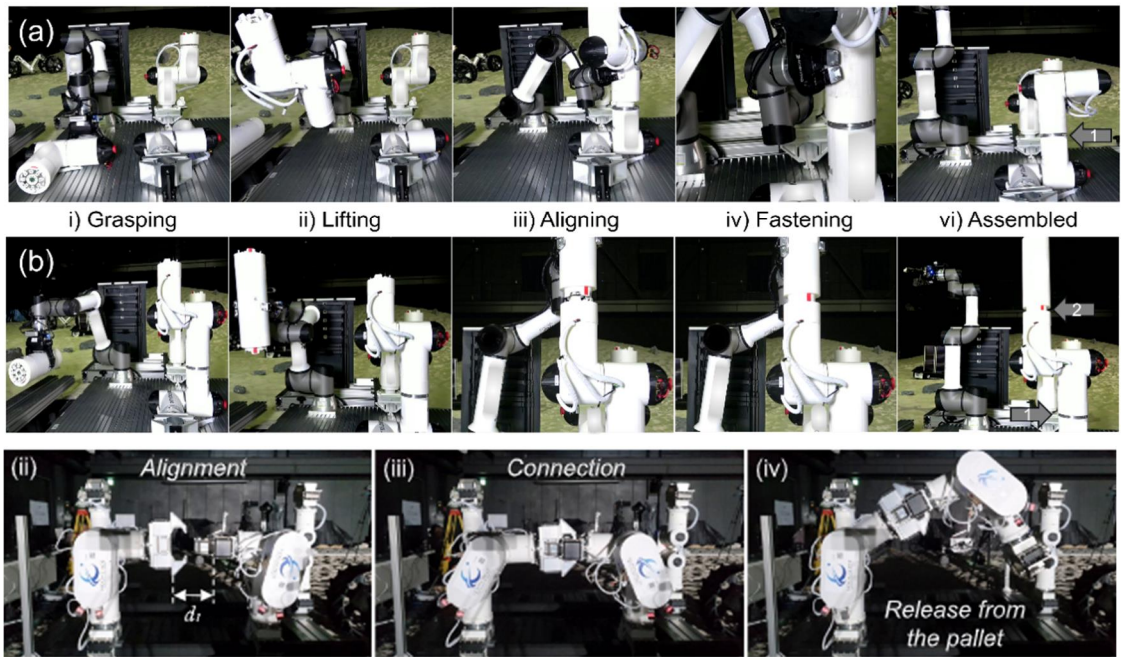


図 4-3 MoonBot のパレット上アームモジュール自己組立

(上段および中段：別のロボットアームによる Pick-and-Place 方式，下段：相互結合可能なエンドエフェクタによる Mutual Connection 方式)

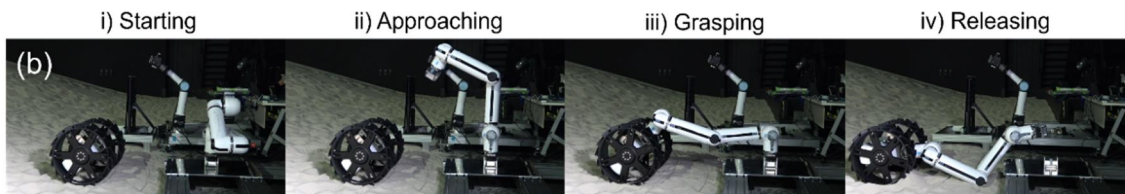


図 4-4 MoonBot のパレット上でのアームモジュール+車輪モジュールの自己組立

さらに、砂上で作業中のロボットが、必要に応じてその場で形態変形させる機能実証を完遂させるべく、森本 P I と連携を強めながら、制御ソフトウェアの実装および一連の実証試験に取り組んだ。

これらによって、各ベンチマークタスクの自律化およびそれに伴う動作シーケンスの高速化・高効率化が実現しつつあり、フィールド試験において、これらのパフォーマンス（位置決め精度、ミッション遂行時間、成功率）を計測し、定量分析を進めている（図 4-5）。

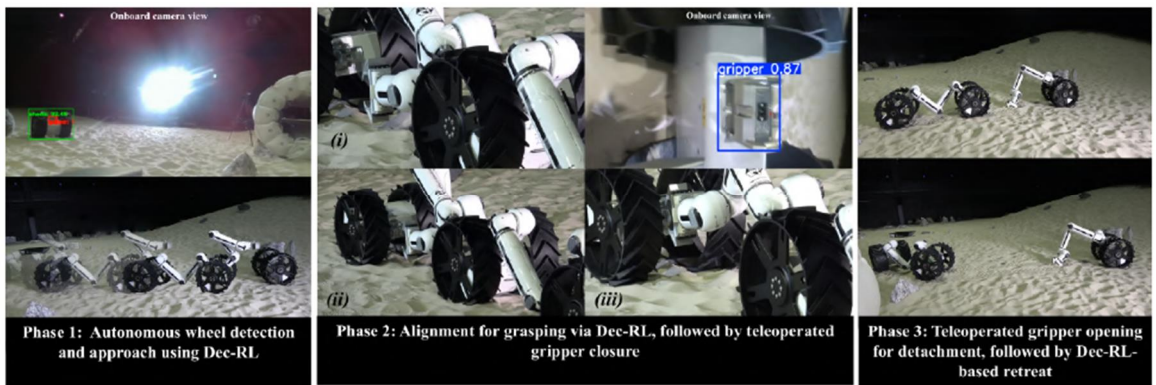


図 4-5 MoonBot による機械学習を用いた砂上での相手モジュールの認識、位置合わせ、結合、形態変形の流れ

## (2) ベンチマークタスク 2 の達成状況

ベンチマークタスク 2 について、2 本のアーム（双腕）による組立動作については、胴体が固定された双腕ロボットによるパネル構造物の組立作業の実証実験を 2023 年度に達成した。次いで 2024 年度には、複数ロボットによる協調動作の例を示すことに成功した。腕を有する移動ロボット（モバイルマニピュレータ）を複数用いた複数アームによる構造物組立・物資運搬の制御については、2025 年度に達成することができた。

次に、伸展機構を持つ高さ 1m 以上の模擬太陽発電タワーの展開を想定した実験を実施した。ケースとして、1) 能動伸展可能なマスト型、2) ロボットによる受動伸展可能なはしご型、3) ロボットにより立てられるパネル型、の 3 種類の実証を試み、それらすべてについて成功した（図 4-6）。

ここで、はしご型の展開実験においては画像認識を用いた自律制御の完遂に至り、マスト型とパネル型については、遠隔操縦によって展開式構造物の運搬移動も含めた一連の敷設作業の実証実験を成功させることができた（図 4-7）。これら成果を踏まえ、開発したモジュラーロボット MoonBot が、このベンチマークタスクを遂行するハードウェアとしての十分な性能を有していることが確認された。

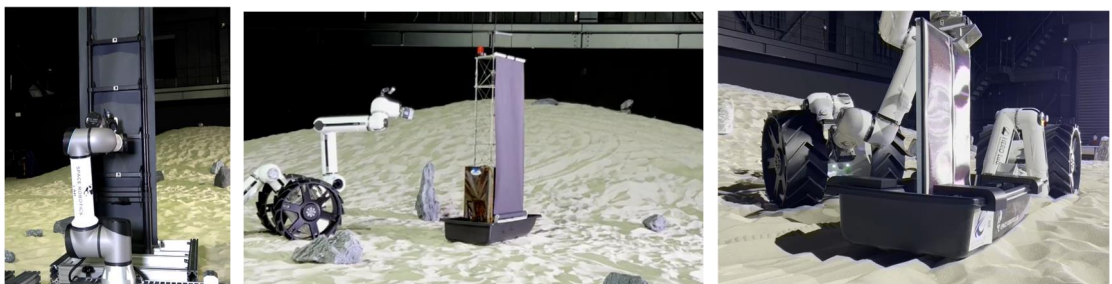


図 4-6 3 タイプの展開式構造物（左：はしご型、中央：マスト型、パネル型）

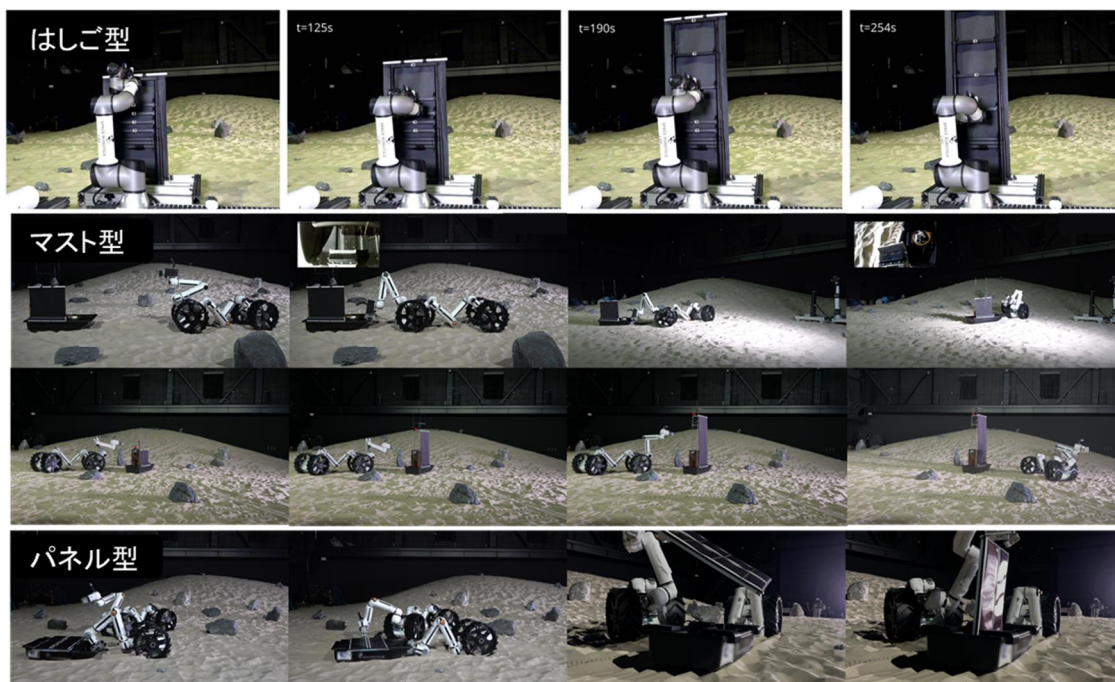


図 4-7 MoonBot による展開式構造物の展開・組立実験の様子  
(上段：はしご型、中段：マスト型、下段：パネル型)

### (3) ベンチマークタスク 3 の達成状況

ベンチマークタスク 3 について、2024 年度は、インフレータブルモジュール HIDAS 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）について実演する実験を成功させることができた（図 4-8）。後者の安定化については、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。2025 年度には、木村 PI との連携により、2 基の HIDAS の結合のための位置決め（アライメント）作業実験として、1 基の HIDAS を固定し、もう 1 基の HIDAS を 2 台の MoonBot-Minimal によって、回転方向および軸方向に押す操作を行うことにより、実用的な位置決め（アライメント）作業を行うことができた。

この成果は、能力の高い移動マニピュレータ型ロボットの有用性を証明するものであり、今後の月面開発の方針を検討とする上で、重要なアイデアおよびデータを提供するものと位置づけられる。



図 4-8 MoonBot によるインフレータブルモジュール HIDAS の展開支援作業の様子  
(上段：膨張状態のモニタリング、下段：輪留めの設置)

本研究で開発したロボットの統合制御系の全体像を図 4-9 に示す。

統合制御系のトップダウンの流れとして、松野 PI グループが開発する「タスクアロケーション最適化アルゴリズム」によるタスク計画、およびその達成のためのロボット動作の自動生成が最上位に位置づけられる。また、これに代わる手段として、研究開発における初期実験およびデバッグ動作としてジョイスティック等の入力デバイスによるテレオペレーションモードが並列する。

いずれかの方法により、ロボットの動作計画および動作軌道が与えられると、中間のレイヤーでは階層型強化学習によりロボットの各自由度のモーションコマンドが生成され、ハードウェアレベルではローカルなセンサフィードバック系が形成される。ローカルな実装においては ROS2 をすべてのモジュールに共通なミドルウェアとしている。

加えて、最上位レベルにおいて、人間のオペレータが自然言語で指示を与えることができるインターフェースの開発・実装も行った。これは、実際の宇宙ミッションを想定した「Supervised Autonomy」の概念を実現するものである。地上局にいるオペレータは、自然言語を用いた High-Level な命令を与えることが可能であり、これを AI が翻訳した機械言語入力と、認識系フィードバック、および Robot Repository によるモジュールごとの機能が総合的に判断され、ロボットの上位動作（ここでは例として、Manipulation や Navigation 等の動作軌道）が決定される。次に、この上位動作が階層型強化学習のフレームワークに入力され、上位から下位へ制御方策の獲得がなされることで、最終的に各関節軌道として、理想軌道が生成される。

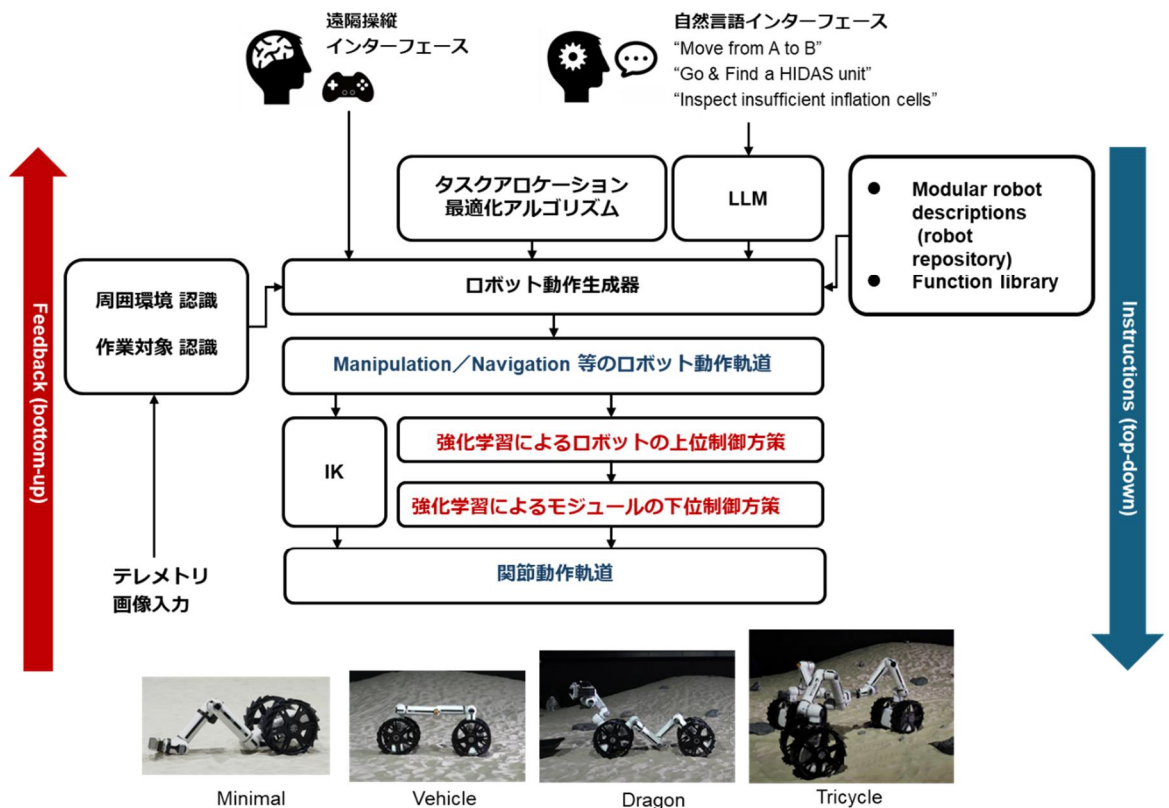


図 4-9 本研究開発において構築した階層型統合制御系

以上のように構築した統合制御系は、2025年7月時点では部分的な使用にとどまっていたが、2025年11月に実施するフィールド実験において、より本格的に使用することで、その有効性を検証することができた。

さらに、より実際の月面に近い環境での実証実験として、2025年6月には欧州宇宙機構 (ESA) / ドイツ航空宇宙センター (DLR) の LUNA アナログ施設 (ドイツ・ケルン) にて約1週間 (2025年6月) の屋内フィールド実験を実施し、MoonBot が、実際の月の砂 (レゴリス) に近い軟弱地盤上で最大傾斜 20° を有するクレーター地形を登攀するなど、優れた走破性を有することを確認することができた (図 4-10)。



図 4-10 ESA/DLR Luna Analog Facility での実験で MoonBot が斜面登攀する様子 (傾斜 20°)

#### 【将来に向けての展望】

本課題では、AI ロボットによる月面拠点構築の可能性を検証するため、変形・再構成可能なロボット「MoonBot」を用いて、異なる形態の複数ロボットが協調してタスクを遂行する統合制御システムの開発を行った。特に、ロボットモジュールの組立、資材の運搬、構造物の展開といった月面拠点構築に不可欠な作業を想定した3つのベンチマークタスクに対して、模擬月面環境におけるフィールド実験を実施し、階層構造型の統合制御アーキテクチャが有効に機能することを実証した。

今後は、これらの地上研究で得られた成果を、実際のフライトミッションへと段階的に展開することが重要である。具体的には、打上げ・運用条件に適応したロボットシステムの信頼性向上、長期自律運用を支える AI 制御アーキテクチャの強化、ならびに地球一月間の通信遅延を考慮した運用シナリオの構築などが求められる。また、将来的には月面現地資源を活用したロボットの自己修復・自己増殖といったビジョンも視野に入れ、AI ロボティクス of 新たな進化を牽引していくことが期待される。

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

### 【研究計画】

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。

HIDASとは、「セル」と呼ばれる小さなインフレータブルユニットを、複数組み合わせる事で、内部に居住可能な空間を実現するインフレータブル構造物であり、目的や外界条件に応じて、セルの膨張・収縮の状態を自律分散的に制御することによって、ロボットとの協調動作のもと、展開状態の制御や、部分的な損傷に対する自律的な適応、不整地など環境条件への適応、さらには、形状の変形や、移動などを実現する。居住構造物であると同時にロボットとしての性質を併せ持つ、いわば、能動的建築物である。各「セル」には、自らの内圧や姿勢など様々な情報を収集し、吸気、排気を制御する、「小型自律分散制御ユニット」が配置されており、無線ネットワークにより相互で通信することで、HIDASの形状を状況に応じた制御を実現する。

本研究では、直径1.4m、長さ2m程度のHIDAS地上実証モデルを2式以上開発し、(1)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、(2)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、(3)複数のHIDAS相互の相対位置を計測する事による接近等の協調動作、(4)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実現することによって、月面での有人拠点の自律的な構築技術に対する重要な技術要素について実証し、月面での有人拠点構築への方向性を示す。

具体的には、次の4つの項目について研究を行った。

#### (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する。

#### (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する。

#### (3)複数のHIDAS相互の相対位置を計測する事による接近等の協調動作の実現

搭載された超小型カメラ等を搭載したHIDASを複数開発し、センサ情報を統合することで、相互の位置関係を自律的に推定し、(2)の移動機能を活用することによって、別途開発される結合機構によって結合可能な位置に移動する機能を実現する。

#### (4)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の実現

相互に結合機構の結合可能位置まで接近した複数のHIDASが、結合機構とロボットとの相互協調動作によ

り結合し、居住空間を段階的に拡張する機能を実現する。

以上により次のマイルストーンの達成を目指す。

直径1.4 m、長さ2 m程度の HIDAS 地上実証モデルを2式以上開発し、2 m 以上離して、3種類以上の初期位置・姿勢で配置し、相互の位置を画像処理等によって、精度10 cm 以上の精度で計測した上で、接近動作実現、ロボットとの協調動作によって、相互に結合できることを示す。

#### 【達成した成果】

##### (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1.4 m、長さ2 m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、砂地に複数の岩をも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。また、部分的な損傷に対して、極めてロバストであることを、合わせて実証した。(図 5-1、図 5-2 参照)

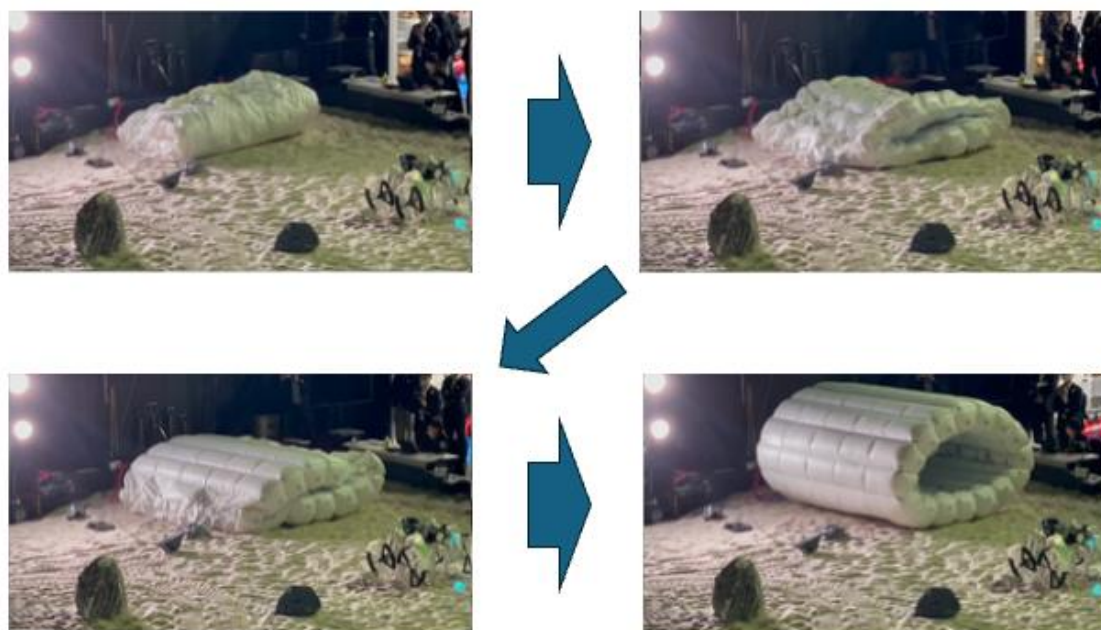


図 5-1 HIDAS の展開過程 (JAXA 宇宙探査実験棟にて)

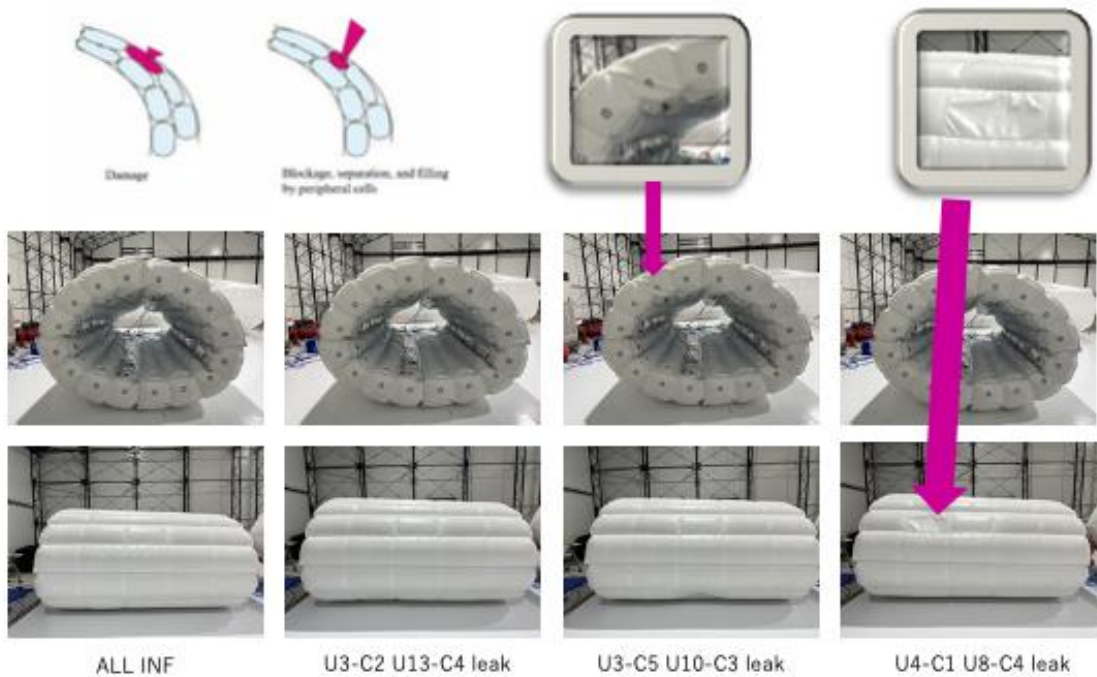


図 5-2 HIDAS 展開時における膨張不十分なセルの例

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 (図 5-3 参照)。

ステップ	1: ②⑬を3.0kPaまで加圧	4: ③⑥を3.0kPaまで加圧	7: ⑤⑭を3.0kPaまで加圧	9: 全セルを3.5kPaまで加圧
気圧値				
外カメラ ①				
外カメラ ④				
内カメラ ④				

図 5-3 HIDAS 加圧にともなう形状変化監視の例

## (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 (図 5-4 参照)。

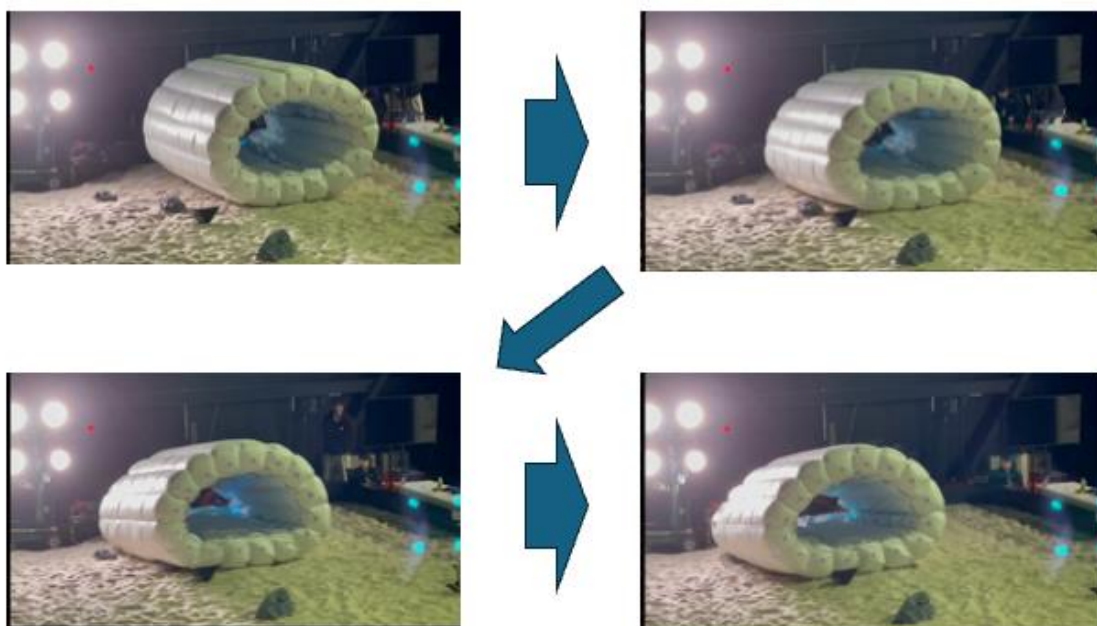


図 5-4 セルの膨張・収縮の時空間パターンを活用することによる回転移動の例

## (3) 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の実現

HIDAS と同じくインフレータブル機構を活用した、ドッキング機構のミニチュアスケールモデル(図 5-5)を開発し、複数の HIDAS の端部を、自律的にドッキング機構によって結合することで居住空間の段階的な拡張を可能にするための、機能実証を行い、相互の位置ずれに対して極めてロバストな結合が可能であることを示した。

インフレータブル構造物の柔らかさは、構造的な精度を確保することは難しいが、環境要因からの影響に対して頑健で、非常に手荒に扱っても動作が安定しているため、宇宙のような環境要因の予測が難しい環境での利用に効果的であることが確認できた。

また、自由度が極めて高いために、精密な数値シミュレーション等の演繹的なアプローチが難しい半面、むしろ大まかな形状シーケンスをイメージして、動作を構築するという、機能的アプローチが効果的であり、この点において、AI を活用した機能的なアプローチが効果的であることが実験的にも確認できた。

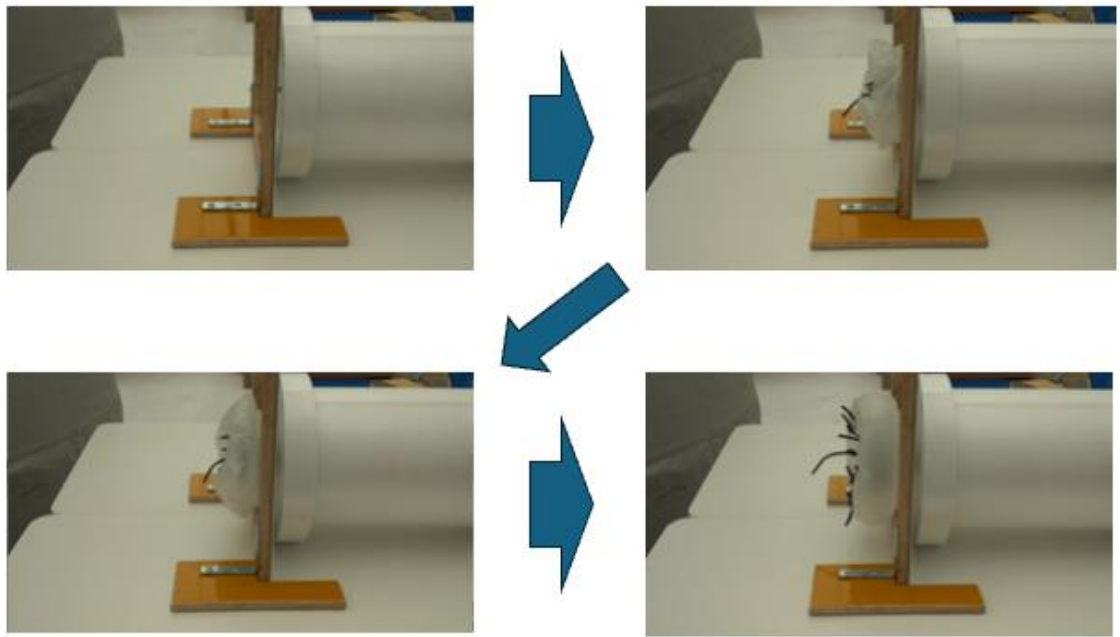


図 5-5 インフレータブル機構を活用したドッキング機構のミニチュアスケールモデル

#### 【将来に向けての展望】

本研究では、宇宙での居住空間構築について、自律分散的高機能インフレータブル構造体 HIDAS を実現し、圧倒的な圧縮性・軽量性と共に、損傷適応の能力や、形状を能動的に変形させる事による運動機能など、従来想定されてこなかった極めてユニークな機能を実現する事に成功した。この研究成果は、月面を含めた宇宙環境において、効果的に居住空間を構築することを可能にし、人類の活動圏の拡大を大きく推進することが期待できる。さらに、大型構造物が状況に応じて自律分散的に形状を柔軟に制御する機能は居住空間構築のみならず、アンテナなど宇宙での様々な大型構造物への応用も期待され、高機能な宇宙大型構造物構築への活用も期待される。

さらには、HIDAS の状況に応じた自律的な展開・形状維持、移動機能といった機能は、地上においても高機能でメンテナンスフリーの居住空間構築として、災害時の居住空間構築などへの応用も期待される。

課題推進者：木村真一（東京理科大学）

### 研究開発課題 3: インフレーター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

#### 【研究計画】

本課題では、有人活動拠点の実現を目指して開発されるインフレーターブル居住構造物 **Homeostatic Inflatable Decentralized Autonomous Structure (HIDAS : ハイダス)** が、月面という未知・極限環境において自律的に展開・移動・結合を行うためのシミュレーション基盤の開発と制御学習に取り組む。

**HIDAS** は「セル」と呼ばれる複数のインフレーターブルユニットを組み合わせ、各セルの膨張・収縮を自律制御することで、折り畳み状態からの展開、不整地への適応、移動を実現する能動的建築物である。多数のセルの組み合わせにより、複雑な駆動挙動と冗長性による高い頑健性を備える一方、流体駆動かつ多数モジュール連動による強い非線形性を持つため、制御の最適化は困難である。

本研究では、モデル化が困難な大規模非線形システムである **HIDAS** のシミュレーション開発と制御学習を行い、**HIDAS** の自律的な展開・移動・結合を実現する。シミュレーションには、センサ情報に基づき形状推定精度を改善するデータ同化機能を組み込み、簡易モデルとデータ同化により現実的なシミュレーションを構築する。さらに、シミュレーション改善と制御学習を組み合わせることで、複雑な動作制御を可能にする。

#### マイルストーン:

**HIDAS** のデータ同化シミュレーションを実現し、五個程度の岩石障害物がある状況における三種類以上の初期位置・姿勢からの自律的な展開や、**1m** 以上の移動のシミュレーションを行い、実物との比較による推定精度や計算速度の改善を行う。また **HIDAS** 結合のための移動計画と他ロボットとの協調作業計画を行ない、**2m** 以上離れた状態から結合できる範囲内への接近動作を実現する。

#### 【達成した成果】

##### (1) **HIDAS** のシミュレーション基盤構築

膨張・収縮する複数のセルからなる **HIDAS** のモデル化は粒子法を用いて行い、形状等の推定精度をセンサ情報に基づいて自律的に改善するデータ同化により、現実的かつ適切なシミュレーションモデルを構築した。一般的に変形部品のシミュレーションには有限要素法 (FEM) が用いられるが、ソフトロボットのような複数変形部品を組み合わせた駆動体では、FEM による計算量が膨大となり、ダイナミクス計算との統合も困難である。このため、本研究では簡易モデルとデータ同化によるパラメータ調整という手法を選択した。

シミュレーション基盤は、微分可能シミュレーションフレームワークである **NVIDIA WARP** を用いて構築し、シミュレーションとニューラルネットワークを直接つないだ学習・最適化ループを実現した。粒子間の結合強度 (引張や曲げ) パラメータを適切に設定することで、構造物の材料特性を表現可能としている。**HIDAS** 外側生地 の材料特性から、せん断弾性係数とラメ定数を定め (図 5-1)、**HIDAS** 重量からメッシュサイズや計算時間を調整することで、実機に近い比較的硬めの外殻を持つ挙動を再現した。さらに、**HIDAS** 実機の自律展開や回転移動の結果との比較・検証を通じて、せん断弾性係数とラメ定数の比率を保ちながらデータ同化を進め、シミュレーション精度を向上させた (図 5-2)。

また、**HIDAS** 実機上に設置されたマーカーによる形状計測手法を開発し、圧力計測データの取得機能と合わせて、実機データの可視化とシミュレーション結果との比較を行う **CPS** (サイバーフィジカルシ

システム)としての機能(図 6-3)、ならびに逐次的なデータ同化を可能とする枠組みを構築した(図 6-4)。ロボットシミュレーション環境である Isaac Sim の連携により、岩石障害物などの外部環境や他ロボットとのインタラクションを含む複数 HIDAS・複数ロボット間のシミュレーションを確認した。

加えて、月面上での HIDAS 展開・移動を踏まえ、周辺環境の一つである砂の流れのシミュレーションについても取り組んだ。流体の計算手法に粒子法の構成式を導入する手法を構築し、砂が滑り出さない限界角度である安息角を安定的に計算できることを確認した(図 6-5)。粒子径や時間刻みに対する依存性が小さいことを示し、シミュレーションのスケールアップが容易である可能性を明らかにした。

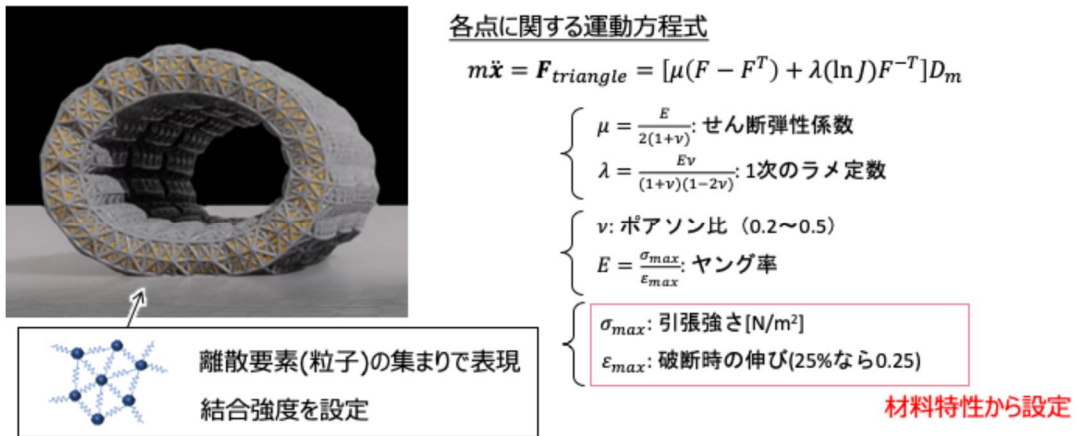


図 6-1 : 粒子法に基づく HIDAS シミュレーションモデルと材料パラメータの調整例

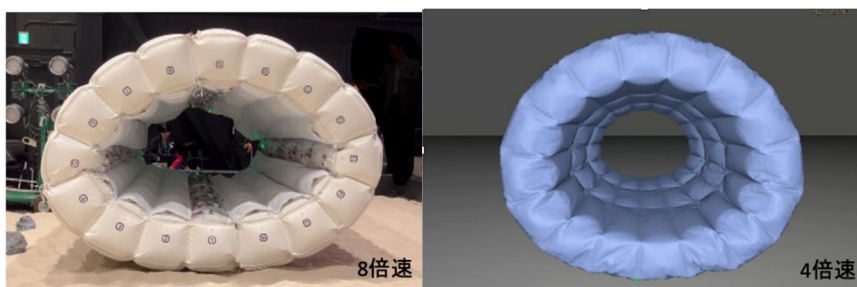


図 6-2 : HIDAS 実機とシミュレーションの比較 (減圧→加圧挙動の一部)

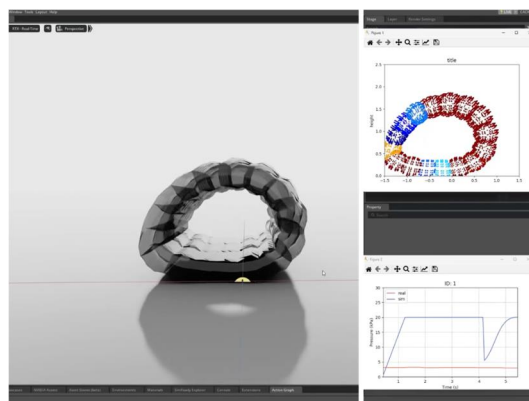


図 6-3 : HIDAS シミュレーション環境 (実機データの可視化と比較)

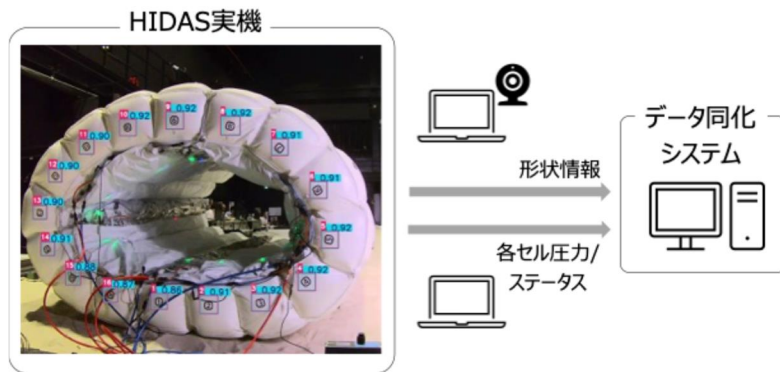


図 6-4: YOLO によるマーカー検出に基づく形状計測およびデータ同化との連携

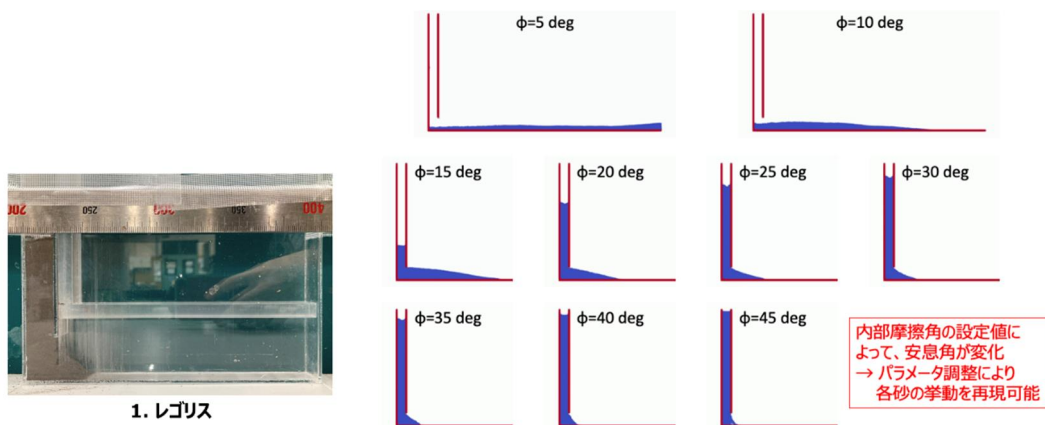


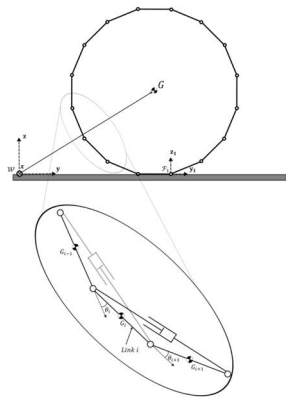
図 6-5 砂流シミュレーション

## (2) シミュレーションを活用した HIDAS の制御学習

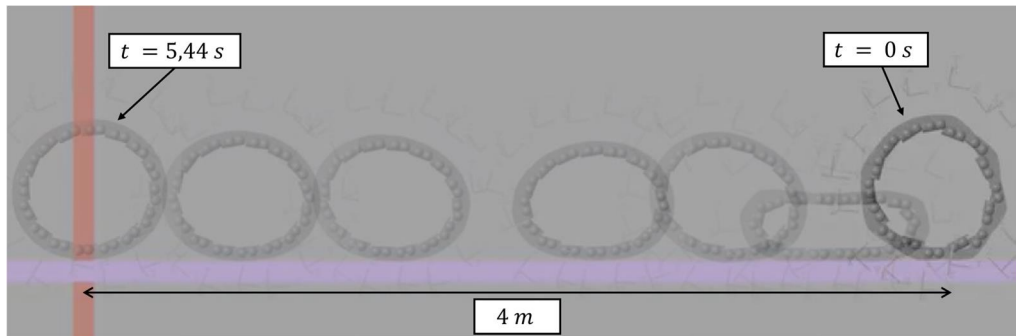
HIDAS の移動を実現するために、本研究では二つの制御モデルを構築した。

一つ目は、重心 Jacobian に基づく移動制御モデルである。HIDAS の隣接する二つのインフレーターセルの挙動をエアシリンダで模擬し、複数のエアシリンダを環状に配置する形でモデル化を行った (図 6-6-a)。このモデルに基づいて重心 Jacobian を構築し、隣接セルが形成する角度制御をもとに各セルへの入力圧力を決定した。その結果、人手で設計した制御シーケンスと比較して、より効率的な回転移動を実現できることを模擬モデルで確認した (図 6-6-b)。得られた制御則は、強化学習の初期値としても活用可能である。

二つ目は、強化学習 (PPO: Proximal Policy Optimization) を用いた制御学習モデルである。目標移動速度への追従と HIDAS の形状保持のための圧力維持を報酬とし、各セルへの圧力制御コマンドを出力する方式を選択した。HIDAS のセルは均質であるため、常に最下部のセルを基準として学習を行うことで学習効率を向上させた。さらに、一つのセルを仮想的に二分割して次元を拡張し、各セルへの入力圧力は HIDAS 中心と基準セル中心とのずれを重みとして線形結合することで滑らかな挙動を実現した。これにより、1m 以上の回転移動を達成 (図 6-7-a) するとともに、蛇行移動を実現する奥行き方向の形状変形 (図 6-7-b) も確認した。

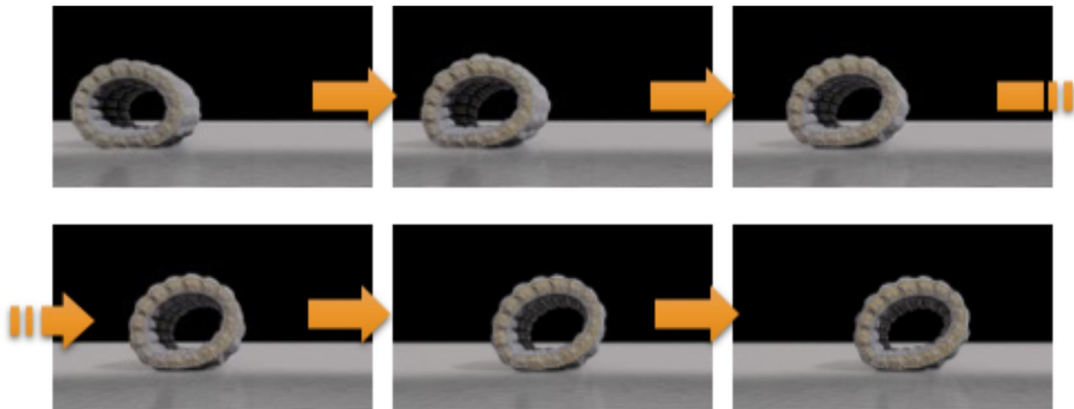


(a) 重心ヤコビアン構築のための模擬モデル



(b) 模擬モデルによる検証

図 6-6 : 重心ヤコビアンに基づく回転移動制御



(a) 回転移動



(b) 蛇行移動のための奥行き方向の形状変形

図 6-7 : 強化学習による移動動作の獲得

## 【将来に向けての展望】

本研究課題で取り組んだデータ同化を用いたシミュレーションモデル構築と制御学習の枠組みについては、HIDASのようにモデル化が困難であり、実機での繰り返し学習が制約される対象に対して有効な手段と考える。今後のHIDAS開発を見込みつつ、ソフトロボットなど柔軟構造を有するシステムの制御や未知環境へのシステム適用など、新たなアプリケーション開拓を目指す。

課題推進者： 山野辺夏樹（産業技術総合研究所）

## 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

#### ① 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、年度毎にキックオフ会議、ロボットデモンストレーションを伴う全体会議、サイトビジット等を計画的に実施した。特に、2024年度、2025年度には JAXA 相模原キャンパス・宇宙探査実験棟、ESA/DLR・LUNA アナログ試験施設等を積極的に活用し、フィールド実験を充実させた。

また、PM、PI および各 PI 周辺の研究参画者、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(2)AI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。

#### ② 代表機関のマネジメント体制整備状況

本プロジェクトを円滑に推進するために、東北大学工学研究科の宇野 健太郎 助教を PM 補佐としてアサインし、研究開発の技術的な推進業務、知財戦略、および参加メンバー間のコミュニケーションを促進する業務を担当いただいた。

また、各種マネジメントの補佐として、4名の技術補佐員を雇用し PM 支援チームとして活動いただいた。4名の職務担当は以下の通り。

- (1) ドキュメント管理、スケジュール管理
- (2) 研究資材管理
- (3) アウトリーチ担当
- (4) 万博展示担当

#### ③ 各種マネジメントに係る会議開催等

各年度において運営会議、サイトビジット、課題推進者会議等を適切に実施した。2023年度には大阪工業大学・松野 PI のもとへサイトビジットを行い、2024年度には京都大学・森本 PI のもとへサイトビジットを行った。2025年11月には、東京理科大学・木村 PI を訪ね、MoonBot と HIDAS を協働させる実験を実施した。

研究開発の遂行過程で、JAXA 宇宙探査実験棟内の実験フィールドにて計5回(2024年11月、2025年3月、2025年6月、2025年11月)の合計約12週間にわたる屋内フィールド実験を実施した。これらのうち4回は全 PI の研究グループが参加する共同研究活動の場として実施され

た。

#### ④ 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、延べ 30 名以上の外国人研究員、博士課程学生、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。

2024 年 6 月にルクセンブルクで開催された **International Conference on Space Robotics (iSpaRo) 2024 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実施した。この他にも、**ICRA2023, ICRA2024, SII2025, ICRA2025, RSS2025** などの国際会議ワークショップを活用した情報交換およびプレゼンス向上を積極的に実施した。なお、**iSpaRo2025 国際会議**を仙台にて開催する誘致活動に成功し、2025 年 12 月 1 日～4 日に実施するはこびとなった。

また、これまでに構築してきた国際的なネットワークを活用し、2025 年 6 月には欧州宇宙機構(ESA)／ドイツ航空宇宙センター(DLR)が所有・管理する LUNA アナログ施設（ドイツ・ケルン、広さ 20m×35m, 平均深さ約 1m）を使用して、DLR との共同フィールド実験を実施した。JAXA 相模原キャンパスの宇宙探査実験棟のフィールドでは珪砂(Silica Sand) が使用されているが、ESA/DLR の施設ではより月面に近い月模擬砂（Lunar Regolith Simulant）を用いた屋内試験フィールド実験が可能であり、より粒子の細かい Lunar Regolith Simulant がロボットに与える影響や、レゴリスの踏みしめによる走行性能評価などの質の高いデータを取得するとともに、国際的な月面探査・開発コミュニティへのプレゼンスを示すことができた。

今後の月面探査および月面資源の利活用を進めていくためには、国際的な合意に基づくルールのもとで、活動を推進していくことが重要であるとの観点から、国井プロジェクトとともに、目標3アドバイザーの友枝 敏雄 先生のリードのもと、宇宙法について学ぶ機会を設け、特に 2024 年 9 月 3 日に日本ロボット学会学術講演会(大阪)の付帯行事として一般市民向けのオープンフォーラムの中で、宇宙法に関する講演および討論の機会を催した。

#### (2) 研究成果の展開

本研究は、2050 年代における持続可能な月面拠点の構築を見据え、AI ロボティクス技術の基盤構築を目的として実施された。変形・再構成可能なモジュール型ロボット「MoonBot」を中核に据え、複数ロボットによる拠点構築に必要な統合制御と協調作業の実現に取り組み、模擬環境における実証を通じて重要な成果を収めた。これらの成果は、月面でのインフラ構築に向けたロボティクス設計の新たな指針を提示するものであり、学术界および産業界に対して大きな波及効果をもたらす。

研究成果の一部は、既に国際会議や学術誌で発表されており、知的成果としての学術的意義も高い。今後は、こうした成果をさらに体系化・発展させて学術論文として継続的に発信するとともに、展示や映像などを通じて社会一般との知見の共有も進めていく必要がある。

将来的には、これまで地上で蓄積してきた研究成果を、実際のフライトミッションへと段階的に展開することが重要である。特に、宇宙環境に適応可能なロボットシステムの信頼性向上、長期的かつ自律的

な運用を可能とする AI 制御アーキテクチャの確立、さらには通信遅延を前提とした運用シナリオの構築が求められる。

また、本研究で開発した「環境適応型モジュールロボット」および「階層型プラグアンドプレイ AI」は、月面探査や拠点構築に限らず、災害対応、建設現場、インフラ保守など、地上の極限環境下における多用途な応用が期待される。これらの技術は、宇宙開発にとどまらず、次世代の社会課題に応えるロボティクス技術として、今後さらに発展させるべき重要な基盤技術である。

### (3) 広報、アウトリーチ

本プロジェクトの研究開発活動については、専用 Web サイト

<https://srl-moonshot.mech.tohoku.ac.jp/>

にて、積極的な情報発信を行った。マスコミからの取材依頼も多く、積極的に対応した。

2025 年 3 月 12 日にはプレス公開デモを行い、2025 年 7 月には、万博に展示するロボットモデルの愛称募集キャンペーンも行った。

日本ロボット学会学術講演会のオープンフォーラム(2023, 2024, 2025 年)、日本科学未来研での目標3公開シンポジウム(2025 年 3 月)など、広報・アウトリーチ活動(国民との科学・技術対話に関する取組み)に積極的に取り組んだ。特に、大阪・関西万博で実施されたの「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～11 日に「ロボットがつくる月面世界で、何がしたい？」の期間展示を実施し、6 日間で計 180 回の映像上映+ロボットデモを行い、計 4,500 人以上の来場者にアウトリーチすることができ、親子連れから年配者まで、好評を博すことができた。

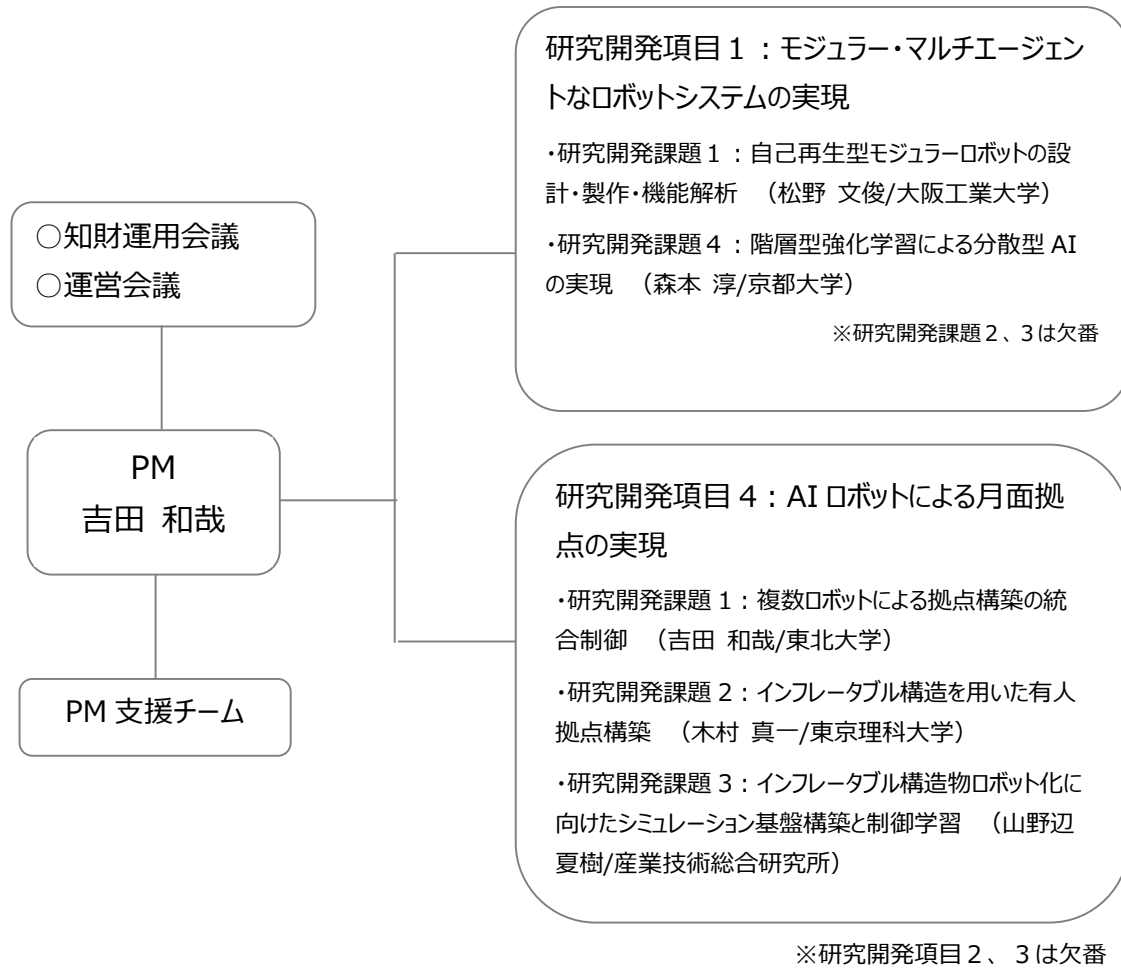
また、2025 年 10 月 18～19 日には、宮城県多賀城市文化センターにて、「夢・希望・未来」～歴史ある多賀城市から未来に向けて～ と題した、親子連れや若い世代を対象としたアウトリーチイベントを実施した。

### (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。研究成果は知財として新規性の高い要素も含んでいるので、生データの公開は行っていない。

#### 4. 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. 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	3	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	3	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	11	11	22
口頭発表	60	88	148
ポスター発表	8	7	15
合計	79	106	185

原著論文数(※proceedingsを含む)			
	国内	国際	総数
件数	3	47	50
(うち、査読有)	3	47	50

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	0	0	0
合計	1	0	1

受賞件数		
国内	国際	総数
24	6	30

プレスリリース件数
5

報道件数
22

ワークショップ等、アウトリーチ件数
29