



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

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、動作・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を開発する。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)として蓄積し、研究開発項目2における階層型強化学習に基づく構造と制御器の同時最適化に活用する。

令和 5 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プロトタイプの製作
3. 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
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: 異構造の複数ロボットによる探査・組立タスクの制御

当該年度実施内容:

「構造と制御に関するレポジトリ構築」においては研究開発項目 1・研究開発課題 1 の PI と、「Plug-and-Play 可能な AI 構築」においては研究開発項目 2・研究開発課題 1 の PI と密に連携を取りながら、動作検証用ロボットマニピュレータシステムをベースとして、各アームの能動自由度を制限したり、エンドエフェクタにバリエーションを持たせることにより複数の異構造ロボットが協調作業を行う場面を作り出し、動力学シミュレーションとハードウェア実験をシームレスに連動させる研究環境(Sim2Real)を構築し、以下の 3 項目について検証を行った。

- (1) 多肢型モジュラーロボットの検証モデルを構築し、5 種類以上の異なる構造・形態に対して、それぞれに対する制御モデルが構築できていること。
- (2) ある特定の構造・形態におけるロボットタスクのために構築した AI 制御システムにおいて、既にレポジトリに蓄積された学習成果を活用することにより、50% 少ない試行回数によって同じタスクの遂行が可能となることを検証すること。

- (3) ロボットアームを用いて、模擬砂礫地(粒径 1mm~50cm 程度の岩石がランダムに分布)において、表面および表面下 10 cm の範囲から、任意の砂礫サンプルを採集可能なことを実証すること。

研究開発項目 2: 分散型・Plug and Play 可能な AI システムの実現

研究開発課題 1: 階層型強化学習による分散型 AI の研究開発とロボットへの実装

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、および異種探査ロボット群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。

本年度は、前年度に整備した卓上マニピュレータのシミュレーション環境において階層型強化学習を実装し、目標とした学習性能を達成した。

研究開発項目 3: 自己修復・再生可能なロボットハードウェアの実現

研究開発課題 1: 粉末素材によるオンデマンド・ロボット造形法の開発

当該年度実施内容:

2050 年までに月面において十分な量が調達可能となると予想される素材を使用し、当該 PI の研究グループが所有する粉末積層造形技術および装置を用いて、各種素材による部品造形を行った。

月表面を覆うレゴリスの主成分として、 SiO_2 (二酸化ケイ素・シリカ)、 Al_2O_3 (酸化アルミニウム・アルミナ) などのセラミックスや、Fe, Ti, Mg などの金属元素が含まれていることが知られている。特に、2005 年に NASA によりチタン鉄鉱(イルメナイト) FeTiO_3 が豊富に存在することが確認されており、チタン鉄鉱を用いることによって鉄やチタン、酸素を製造することができるため、有益な資源として期待されている。将来的には、月面においてレゴリスを還元し酸素を生産する技術が開発されることが予想され、この際の残滓として Ti と Fe から構成される Ti-Fe 合金およびその粉末が月面において大量に生産される可能性が高い。

これらの事実を受け、本研究開発の第一歩として下記の素材候補に対し、月面においても金属積層造形技術として実現可能性の高いと思われる以下の3種類の最先端の造形方式を使用して、部品を試作し造形物評価を行い、生成された部品の強度、耐環境性および製造のために必要な電力や熱環境についても評価を行う。月面に存在する金属およびセラミック素材についてはデータが得られているものの、これらを混合した月模擬砂に対しては、データを集積中である。

(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。加えて、外部機関として JAXA において月ミッション

に関わる研究グループとの間で意見交換会を開催し、ま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。

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、動作・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

当初予定していた連続変数を最適化する枠組みでは現時点で実現可能なハードウェアでの実装が容易ではないと判断し、限定されたモジュール群を用いたロボットの構造と制御器の同時最適化法を新たに検討することとした。本年度はそのための構想を練り、実現に向けた準備を行った、検討中の手法においては、ロボット構造はグラフ文法と呼ばれる一定の規則に従って生成されるグラフと対応付けられる。そこで、新手法提案の第一歩としてグラフ文法記述用コンピュータ言語 **Graph Grammar Definition Language (GGDL)** の開発を行った。このコンピュータ言語は、ロボットのみならず創薬など幅広い範囲で利用されている既存の異なる複数の文法を統一的に表現できる高い拡張性を有しながら、比較的簡単に利用できるという特徴を持つ。

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

当該 PI のグループで 2022 年度までに提案していたロボットの構造と制御の同時最適化法を活用し、関節故障が発生しても制御器の切り替えを行うことなく移動が可能なロボットの設計を行った。今までに提案していた 2 つの構造最適化アルゴリズムを適切に組み合わせることにより、効率的に耐故障性の高いロボットの構造と制御器を得ることができることを示す結果を得た。項目 1-1 で説明したように、より本プロジェクトに適した新たな同時最適化手法を検討中であるが、本項目に関連して新たに提案した考え方は同時最適化手法が変更となっても変わらず適用可能であると考えている。

1-3 モジュラーロボットの設計指針の確定

項目 1-1 で説明したように、ロボットの構造と制御の同時最適化アルゴリズムを新たに提案し、本プロジェクトでの目的により適合したものに変更することを試みている。従って、実機製作に関して、直接的に同時最適化手法を用いているわけではないが、これまでのロボット製作の経験を活かして、スペックの検討を行った。

(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プロトタイプ製作

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

金属の爪を出し入れすることで機械的な結合・分離を可能とする結合機構を設計・製作し、その性能評価(結合時の2つの結合機構の相対的な位置・姿勢誤差に対するロバスト性)を実施した。また、2つの結合機構間の RS485 とイーサネット通信の電氣的結合機構を設計・製作し、その性能評価(スループットやパケットロス)を実施した。ボディーモジュール、リムモジュール、エンドエフェクターモジュールを設

計・製作し、2輪モード、4輪モードなど様々な形態での動作実験を実施し、屋外での走行実験も行った。

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

アドホックなネットワーク構築を実現する初段階として、運用方法(人がロボットにデータを打ち込む際の協定)としてホスト名の命名規則の設計と周知徹底、自動化方法として、NAT、DHCP、Zeroconf を併用する設計を実施した。この設計に基づいて全体ネットワークシステムを構築し、実証試験(デモ)により有効性を検証した。

(3) 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

3-1 モジュール再構成アルゴリズムの開発

ロボットのモジュール構成を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に、モジュール再構成アルゴリズム・ソフトウェアの開発、およびロボットモジュール構成の一意的なエンコードアルゴリズム・ソフトウェアの開発に取り組んだ。ボディーモジュールの数が限定された条件下ではあるが、ソフトウェア上での再構成とエンコードに成功した。また、ロボット生成文法定義言語(GDDL)とロボット構造ファイル(URDF)生成ソフトウェアの開発、リム単体での移動の強化学習、Isaac Sim 上でのモジュールの結合・分離・再結合の実現といった、モジュール再構成に必要な要素技術の開発に取り組んだ。これらについてソフトウェア、シミュレーションが動作し、次年度に利用が行える状態まで進んだ。

(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

スケーラブルなロボットシステムと UI を実現した。ロボット群から UI を介したオペレータまでの接続構造は(1)複数のモジュールが結合したロボット内、(2)ロボットと PnP クラウドサーバ間、(3)PnP クラウドサーバとオペレータ間である。それぞれの通信プロトコル・表示方法を設計し、実装した。UI の内部構造としてロボットモジュールのデータベース構造を設計し、結合状態を自動的にデータベースに登録し、それに基づいて結合状態と関節角度をリアルタイムに可視化することを実現した。開発した実機モジュラーロボットシステムと UI を接続してシステムを構築し、その有効性が検証した。

4-2 モジュール Plug and Play システムの UI の開発

項目 4-1 のシステム構成の下、PnP クラウドサーバを WWW サーバーで実装し、それに接続した複数の WWW ブラウザに UI 画面を表示する仕様を設計し、その設計に基づいた実装を行い全体システムを試作した。試作システムにおいて実機モジュラーロボットシステムと UI を接続して全体システムを構築し運用した。ロボットモジュールの状態データベースに、実際の結合状態が自動的に反映され、それに基づいて結合状態と関節角度がリアルタイムに UI 画面に提示された。以上により、モジュラーロボットの状態を可視化することを確認し、仕様の有効性を検証することができた。

(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

障害物が存在する環境において、複数のリーダーロボットが多数のフォロワーロボットを追い立てることで誘導する **Shepherding** 型の自律分散制御系を構築した。異なる数のロボットを用いてシミュレーションを行い、構築した制御系のスケーラビリティを検証した。

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

リーダーとフォロワーで構成される異種ロボット群により、受動車輪を持つ任意形状の物体を目標の位置姿勢まで運搬可能な分散協調運搬制御系を構築した。動力学シミュレーションにて物体を目標の位置姿勢まで運搬可能なことを確認し、構築した制御系の有効性を検証した。

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について、結合動作時の回転軸の軸角度の観測信号を用いて統計学的仮説検定の一つである **Shewhart** 管理図を利用した一括処理型のモジュール間結合の結合正常性の判定方法を開発した。

5-4 複数の群れのタスクアロケーションの実現

モジュラーロボット群に対して効率的にタスク割り当てを行うための定式化に取り組み、与えられたモジュール内訳をもとに適切にクラスタを組み立てるための組合せ最適化問題と、組み立て後のクラスタ群にタスクを割り当てるスケジューリング最適化問題を定式化した。また、これら二つの最適化問題を連続的に探索するフレームワークを構築した。一方で、上述のスケジューリングアルゴリズムはモジュールの故障に対して再スケジューリングを行うのに膨大な時間を要する。そこで、局所的・自律分散的に故障対応をするためのアルゴリズムを構築する必要がある。2023 年度は、各クラスタが自身のバッテリー残量を考慮しながら複数のタスクを同時並行に遂行することが可能な状態遷移モデルを構築した。さらに、マルチエージェントシミュレーションによって、クラスタ群全体の巨視的な挙動のシミュレーションを実施した。

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

当該年度実施内容:

ロボットタスク遂行の評価を行う試験装置として、7 自由度のロボットアーム 2 台を導入し、運動学・動力学シミュレーションとハードウェア実験をシームレスに連動させる研究環境 (**Sim2Real**) を構築し、以下の項目について研究を実施した。

(1) 構造と制御に関するレポジトリ構築

Moonbot 0 と名付けた多肢型モジュラーロボットの検証モデル(図 2-1)を開発し、複数種の異なる構造・形態に対して、ロボットが自ら形態(モジュールの結合状態)を自動的に認識し、それに応じた制御系が発動することで自己形態に対して適応的に歩容・運動を変化させながら動作することを、実機実験を通して実証した(図 2-2)。



図 2-1 多肢型モジュラーロボットの検証モデル MoonBot 0

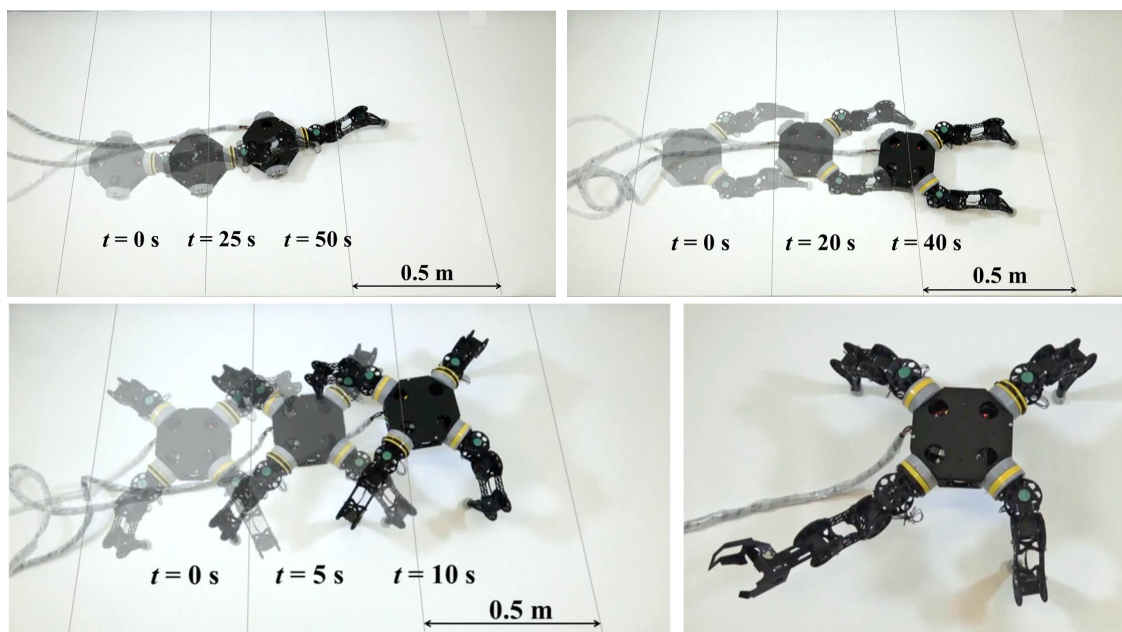


図 2-2 MoonBot 0 による自己形態認識にもとづく歩行・動作実験の様子

(2) Plug-and-Play 可能な AI 構築

模倣学習アルゴリズムの中でも特に有用な手法である、敵対的生成ネットワーク (Generative Adversarial Network: GAN) および GAN を組み合わせた Generative Adversarial Imitation Learning: GAIL と呼ばれる手法を活用して、様々なタスク条件における具体的な制御方策を生成し、学習に要する時間と、タスクの成功率を定量評価した。

研究開発項目 2・研究開発課題 1 の PI と連携しながら研究を進展させ、ある特定の構造・形態におけるロボットタスク(マニピュレーションあるいは移動)のために構築した AI 制御システムにおいて、ロボットが異なる構造・形態に変化した際に、既にリポジトリに蓄積された学習成果を活用することにより、(活用しない場合に比べて)50%少ない試行回数によって同じタスクの遂行が可能となることを検証した。

(3) ベンチマークタスク検証の実施

1. 崖降り探査・サンプル採集を想定した「サンプル採集探査」

「サンプル採集探査」の入り口となる基礎実験として、You Only Look Once と呼ばれる学習に基づいて画像より物体を検出し認識するソフトウェア (YOLO v8) を用いて、環境のなかから「岩石」というカテゴリーにマッチする対象物を認識し、それぞれの大きさを評価して、大きいものから順番に積み上げるデモ動作を行った。砂場環境に最大 10 個(大きさ 10cm~30cm)の岩石をランダムに配置して、認識・ピックアップ・積み上げ動作を実施し、月面を模した厳しい光学環境においても、100%に近いタスク達成率が実現できることを確認した(図 2-3)。また depth カメラを併用することにより対象環境の 3 次元データ取得・マッピング動作を追加することにより、タスクの成功率が向上することも確認した。

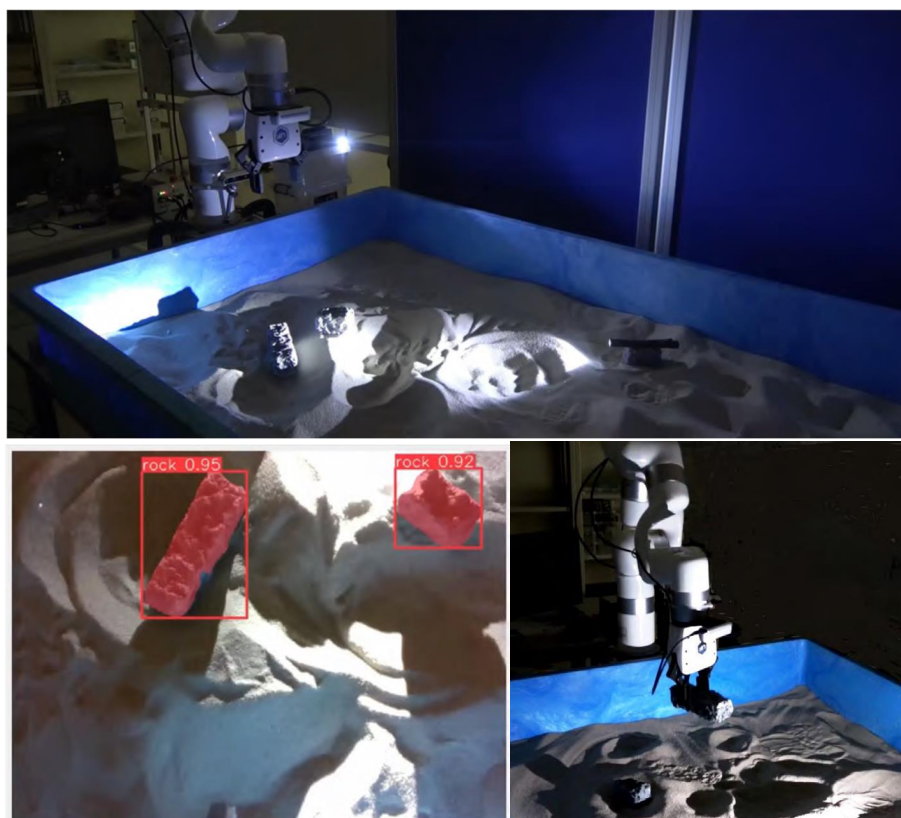


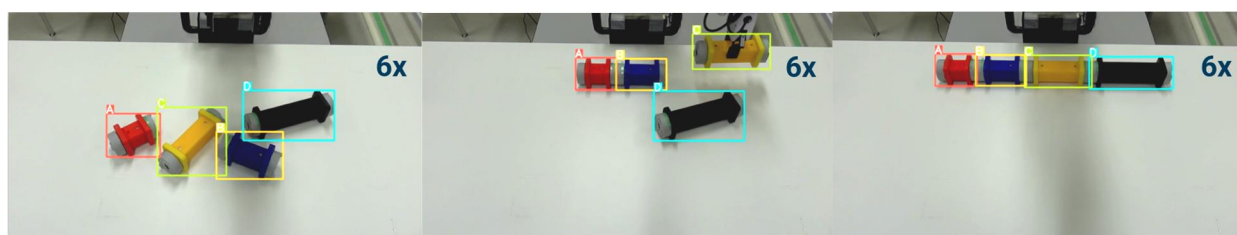
図 2-3 月面を模した光学環境下における岩石サンプルの認識・ピックアップ・積上実験

さらに、本年度マイルストーンとして挙げた砂礫サンプルの採集のほか、下記の組立作業に関するデモンストレーションもおこなった。

2. ロボット自身の分解・組立や、太陽発電等の設備モジュールの組立作業を想定した「組立マニピュレーション」

研究開発項目 1・研究開発課題 1 の PI の研究開発成果に基づき、モジュラー型ロボットの検証モデル MoonBot 0 を組立てるマニピュレーション作業の検証としてロボットアームによる組立実験を行った。ロボットアームの先端に RGB-D カメラを搭載し、カメラで認識した作業対象物を認識させるため、画像認識系 AI である YOLO v8 を適用し、ロボット部品などの人工物、および岩石などの自然物を識別する能力を持たせ、机上にランダムに置かれた様々な対象物から、ロボット部品を抽出してピックアップ動作を行うこと、および一部の部品についてはプリミティブな組立動作が実施可能なことを確認した。これらの実験結果は松野 PI が進める構造と制御に関するレポジトリ構築に役立つデータである。

以上の成果を発展させ、ロボットアームを用いて Moonbot 0 の組立作業を行うデモンストレーションを実施した。



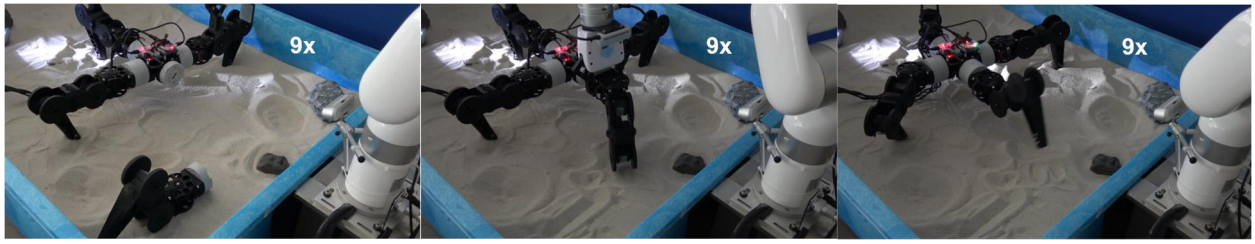


図 2-4 ロボットモジュールを模したコネクタブロックおよびモジュラーロボット MoonBot 0 の自律組立実験

さらに、モジュラーロボットによる太陽光パネルの組立作業をベンチマークタスクとしてとりあげ、月面で想定される実用的なタスクとしての実証実験をおこなった(図 2-5)。

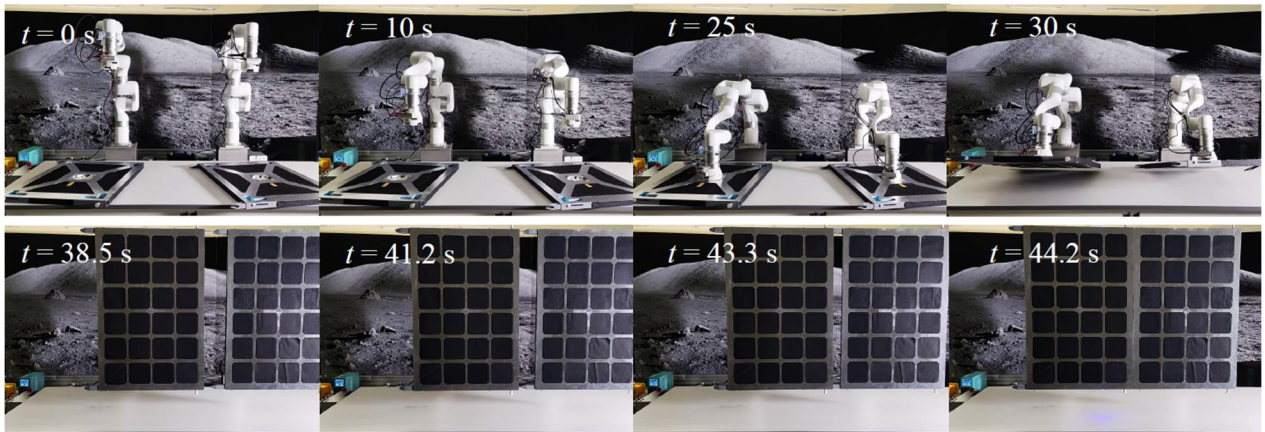


図 2-5 双腕マニピュレータによる太陽光発電パネルの認識・把持・組立実験

課題推進者: 吉田 和哉(東北大学)

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

研究開発課題1:階層型強化学習による分散型 AI の研究開発とロボットへの実装

当該年度実施内容:

本年度の成果として、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対象とした。ハンドロボットとアームロボットが結合し異なるロボットの形態に変化した際の学習性能についての検証をおこなった。つまり、一つのハンド・アームロボットにおいて、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較した。結果として、学習データを活用した方が 50%以上少ない試行回数によって、マニピュレーション動作方策を獲得することを達成した。

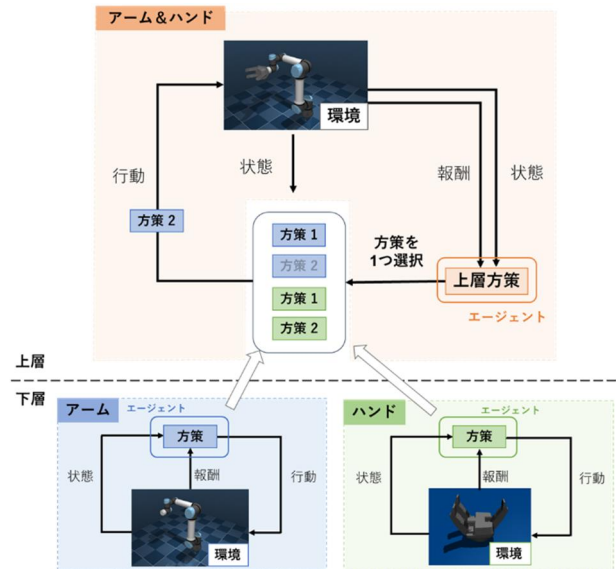


図 3-1 : 開発した階層強化学習システム

まず図 3-1 に示すような階層的な強化学習システムを構築。アームモジュール、ハンドモジュールそれぞれに対して下位方策を獲得した。具体的には、ハンド下位方策は物体把持とバルブの回転操作を学習し、アームモジュールはバルブへのリーチング動作を獲得した。タスクとしては図 3-2 に示したような 4 種類のバルブ操作課題を考え、上位方策が下位方策モジュールの切り替えを学習することにより階層強化学習の学

目標角度	$\phi_{\text{ref}} = \pi$	$\phi_{\text{ref}} = -\pi$
バルブ位置 [m]	タスク (1, 1)	タスク (1, 2)
$p_{\text{valve}} = (-0.5, -0.4, 0.5)$		
$p_{\text{valve}} = (-0.8, 0.2, 0.5)$	タスク (2, 1)	タスク (2, 2)

図 3-2 : 4 つの異なるバルブ操作タスクによる学習性能評価

習性能を評価した。評価方法としては、階層化によりリポジトリに下位方策として蓄積された学習成果を活用することによる学習結果と、活用しない場合とを比較した。その結果を図 3-3 (左図)に示した。青色のバーで示された、リポジトリの蓄積を用いない場合に要した学習試行回数に比べて、それぞれのタスクについていずれも階層強化学習手法を用いた場合(オレンジ色のバーで表示)のほうが少ない学習回数によってバルブ操作課題が達成されている。4 つのタスクを平均して、階層強化学習を用いた場合は、リポジトリの蓄積を用いない場合に比べて 46%の学習回数で方策が獲得可能となり、マイルストーンが達成された。加えて図 3(右図)に示したように、階層強化学習によりリポジトリに蓄積された学習成果を活用した方(オレンジ線)が、活用しない場合(青線)に比べ、学習曲線の立ち上がり早く、かつ異なるサンプルデータ系列を用いた場合においても安定して学習が行えていることも確認された。

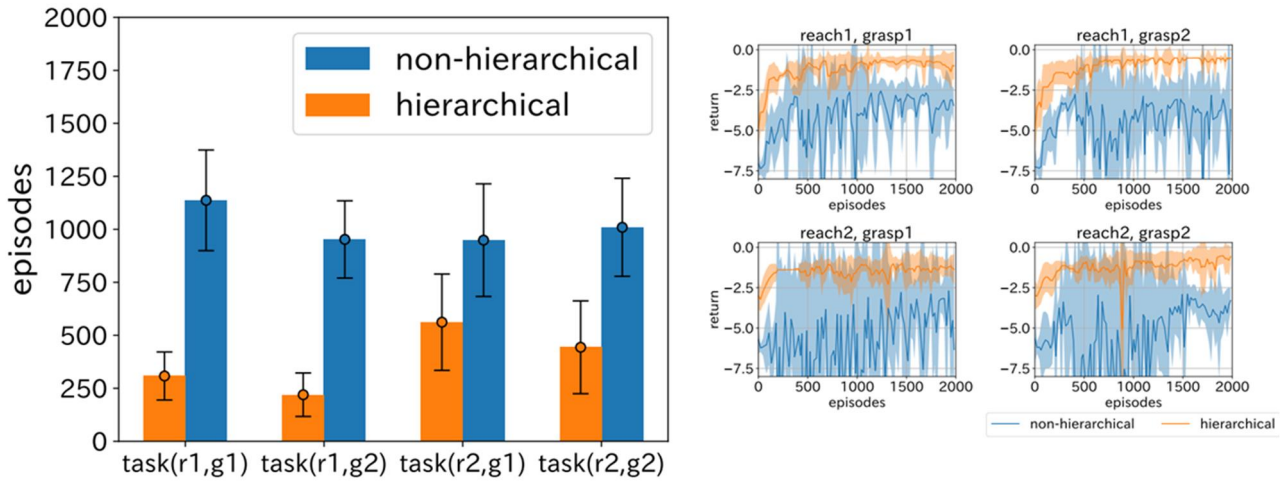


図 3-3 : (左) 各タスク達成に要した学習試行回数。(右) 各タスク学習時の学習曲線

課題推進者: 森本 淳 (京都大学)

(3) 研究開発項目 3: 自己修復・再生可能なロボットハードウェアの実現
 研究開発課題1: 粉末素材によるオンデマンド・ロボット造形法の開発

当該年度実施内容:

(1) 既存技術を用いた部品造形

1-1 粉末床溶融結合方式の電子ビーム積層造形装置 (PBF-EBM 装置) による部品造形

図 4-1(a) に原理を示す PBF-EBM 装置(既設の ArcamA2X 装置)を用いて、造形材料として純銅および TiAl 合金を用いて、単純構造物(角棒)を造形し、異なる造形条件における造形材の組織及び機械的性質を関連づけるデータを得た。

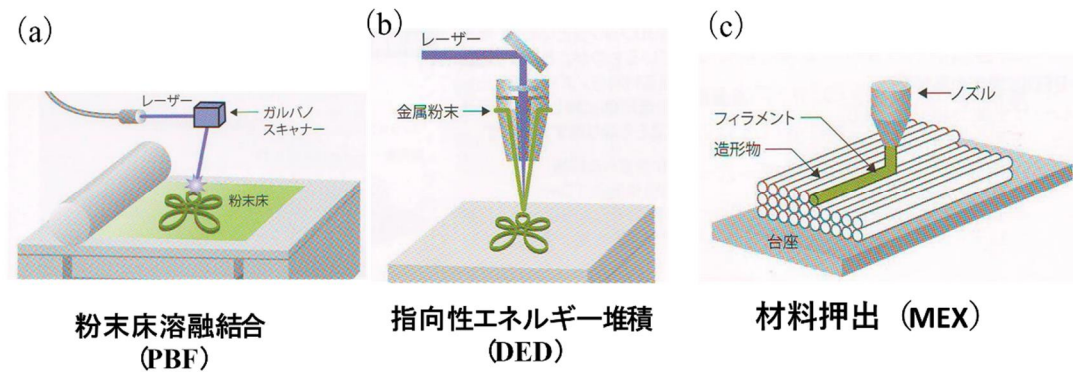


図 4-1 粉末素材による3種類の部品造形法

1-2 レーザー熱源指向性エネルギー堆積法 (DED 装置) による部品造形

図 4-1(b) に原理を示す DED 装置 (RAMDA100 装置) を用いて、造形材料として Ti6Al4V 合金を用いて、ラインスキャンによる造形を行い、異なる造形条件における造形材の組織及び機械的性質を関連づけるデータを得た。

1-3 材料押し出し法 (MEX 装置) (図 1(c)) による部品造形

図 4-1(c) に原理を示す FDM 装置を用いて、造形材料としてステンレス粉末 (フィラメント) およびアルミナを用いて、単純構造物 (棒状、板状、丸棒のテストピース) および複雑構造物 (ギア、アーム、筐体等) 造形し、同形物の密度測定を行った。図 4-2 に示すように焼結前 (グリーン体) の空隙率、及び脱脂焼結体の密度の測定データを得ることができた。

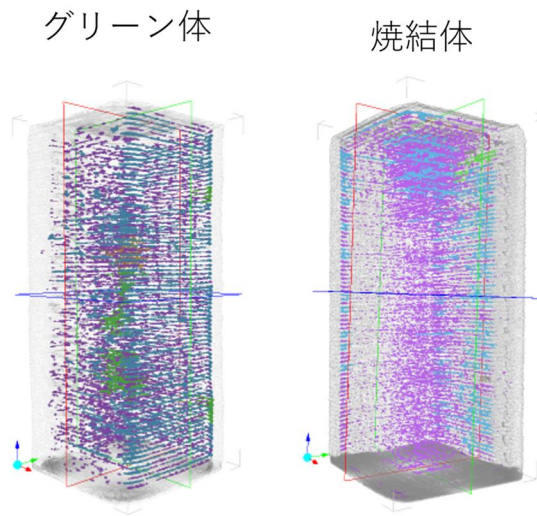


図 4-2 ステンレス粉末を用いた造形体の焼結前 (グリーン体) および焼結後 (焼結体) の空隙を示した図

(2) 月面環境を考慮した PBF-EBM プロセスの最適化検討

純銅粉および Ti-6Al-4V 粉末の挙動を調べるために複数の新しい装置を開発した。①粉末広がり装置は、高速度カメラを用いて粒子画像流速測定法 (PIV) を行うものである (図 4-3)。これを用いて純銅及び Ti-6Al-4V 合金の個別粒子の速度及び変位を計測することで粉末広がりメカニズムを明らかにし、また、多様な粉末の動的安息角および広がり性を分析した。

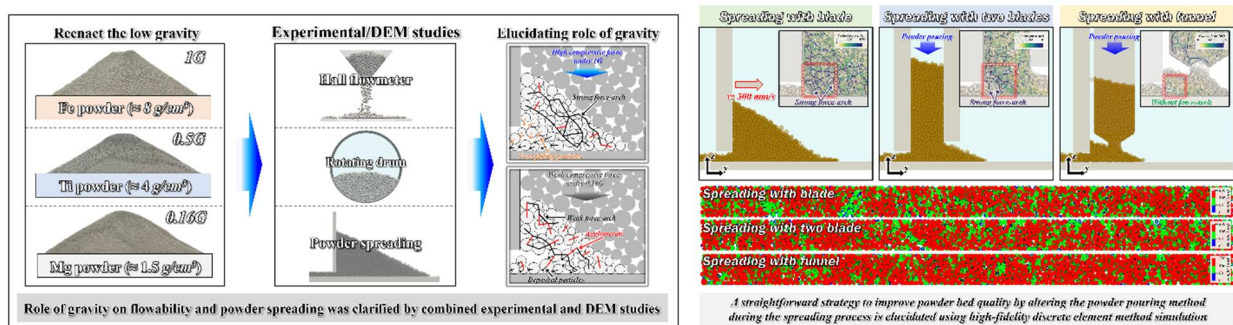


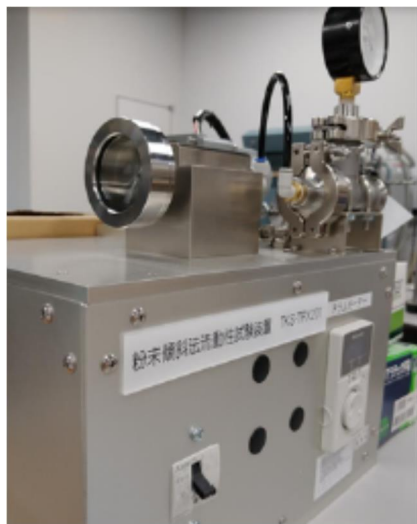
図 4-3 低重力が粉末拡散に及ぼす影響及び代替粉末広がり戦略開発のための DEM モデル研究模式図

また、各粉末による静的/動的粉体流動性評価のために、②ホールフロメータ/回転ドラム試験装置を開発した。月面で想定される低重力環境の低い圧縮条件を模写するために多様な比重の粉末を利用して粉末の流動性および広がり挙動を調査した。各粉末の電気的特性を直流および交流インピーダンス実験を通じて調査し、静電気が粉末の流動性および広がり挙動に及ぼす影響を明らかにした。あわせて、粉末広がり現象において、低重力環境で粉末層特性を決定する主要要因を調べるために DEM シミュレーションモデルを開発した。これにより、粉末の凝集力は低重力下で広がる挙動及び粉末層の特性を決定する主要因子であることを明らかにした。

(3) 月面環境を考慮した DED プロセスの最適化検討

DED プロセスにおける粉体の自由落下による粉末原料供給の有効性を検討するため、図 4-4 に示すホールフロー式粉末供給システムの開発を行った。SUS304 粉末の流量は、ホールフロメータの振動数によって大きく影響を受けることを確認した。高い振動数の場合、粒子の摩擦帯電による静電気力増加で凝集体を形成する傾向を見せることを明らかにした。したがって、粉末の比重が減少することによって凝集体形成は増加する可能性があることを明らかにした。また、振動数による流量を調査してホールフロー式粉末供給のための最適振動数を明らかにした。ホールフロー式粉末供給装置の振動数による個別粒子の挙動を調査するために、DEM シミュレーションモデルを開発した。低い振動数で粉末粒子の移動は活性化された粒子 **Jamming** によって抑制されることを確認した。反面、増加した振動数で一時空隙形成の増加は粒子流量を増加させることができることを明らかにした。

真空中回転ドラム式粉体流動性試験装置



真空中粉末供給実験装置



図 4-4 開発したホールフロー式粉末供給システム

課題推進者: 千葉晶彦 (東北大学)

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、2023 年 5 月にキックオフ会議、2023 年 10 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。

PM、PI および JST 関係者からなるプロジェクト運営会議については、2023 年 12 月および 2024 年 1 月に開催し、それぞれ、プロジェクト参加者間の規約改正、およびプロジェクトメンバーの変更について審議を行った。

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的设计・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する体制を構築した。

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、計 10 名以上の博士課程学生、修士課程学生、および海外からの交換入学生が本プロジェクトに参加した。

また、海外研究者との連携の可能性を模索するため、2024 年 1 月 18 日～20 日に開催された Moonshot Goal 3: The 2nd Japanese-European Joint Workshop (JST 主催)に積極的に参加し、欧州の研究者とのネットワーキング活動を行った。その結果として、2024 年 6 月にルクセンブルクで開催される国際会議 iSpaRo2024 にて、関連ワークショップを開催することとした。

(2) 研究成果の展開

研究成果を、国内外の学術講演会、論文誌、国際ワークショップ等において積極的に発表した。

(5. 当該年度の成果データ集計参照)

(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、2023 年 5 月にロンドンで開催された IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) における複数の Workshop において、プロジェクトの概要を紹介した。

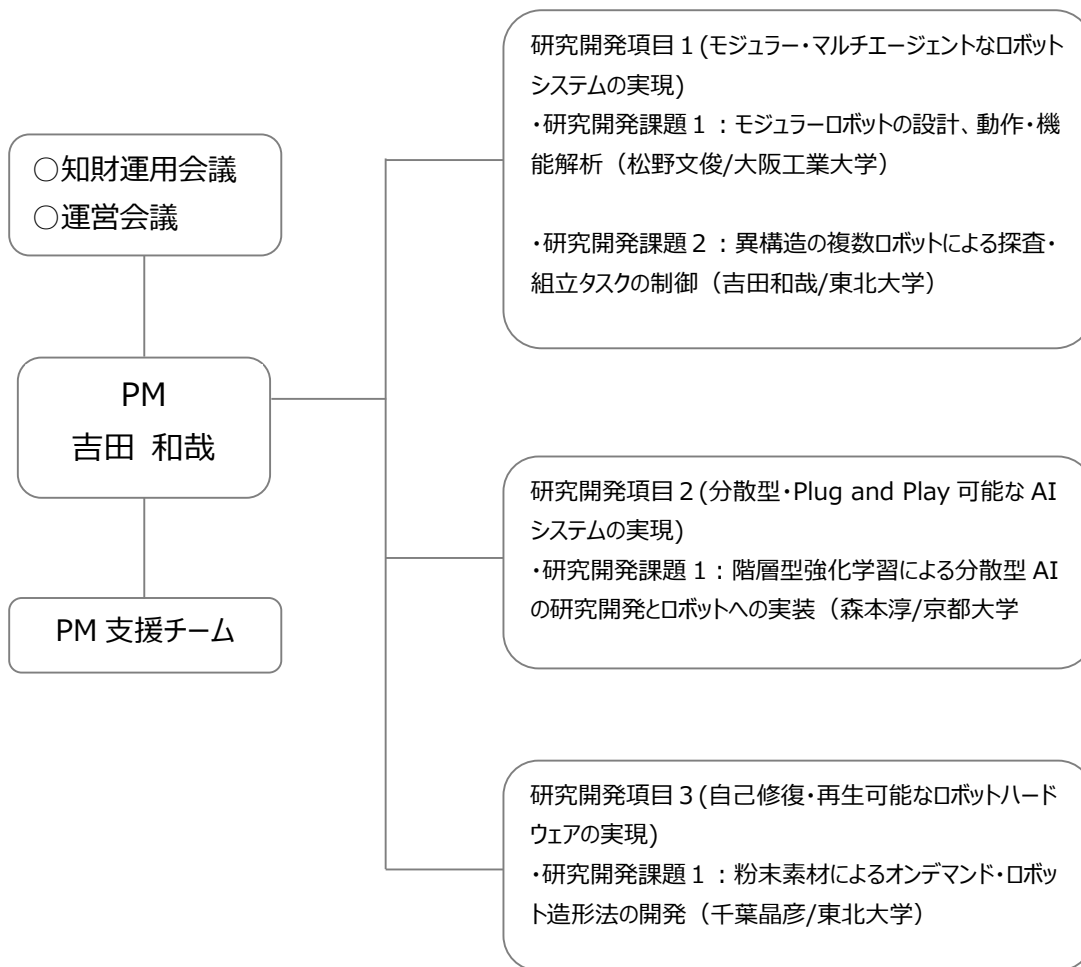
2023 年 9 月 11 日に日本ロボット学会学術講演会(仙台)の付帯行事として一般市民向けのオープンフォーラムを開催し、アウトリーチ活動を実施した。

(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。

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	1	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	1	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	1	4	5
口頭発表	6	15	21
ポスター発表	4	0	4
合計	11	19	30

原著論文数(※proceedingsを含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	4	4
(うち、査読有)	0	4	4

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
2	1	3

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
6