



## 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

## 2022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



## 研究開発プロジェクト概要

月面において未到探査および拠点構築を行う担い手として、再構成が可能な AI ロボットシステムを提案し、その実現に向けた研究開発を行います。月面に持ち込んだ資材を有効活用し、状況に応じてモジュールの組み換えや、月面で得られる資源を用いてパーツの修復を行うことができる自己再生型 AI ロボットの技術を確立します。それにより、2050 年には月面での探査と資源活用が促進され、持続的な有人活動拠点の実現を目指します。

[https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal3/3B\\_yoshida.html](https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal3/3B_yoshida.html)

## 課題推進者一覧

課題推進者	所属	役職
松野 文俊	京都大学 大学院工学研究科	教授
吉田 和哉	東北大学 大学院工学研究科	教授
森本 淳	京都大学 大学院情報学研究科	教授

## 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。

令和4年度においては、その第一歩として研究開発項目1～3について、それぞれ下記に示す内容の研究を実施する。

### (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、動作・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4年度は、以下の2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

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

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

#### (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

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:

本研究開発プロジェクトで開発する様々な形態変形可能なモジュラー型ロボット群が、未知の過酷環境(レゴリス等で覆われ岩石や瓦礫が散在する不整地環境、1/6 の低重力)において、2025 年マイルストーンに掲げる探査活動や組立作業のタスクを遂行することを目指して、タスクオリエンティッドな制御系の研究開発を進める。

モジュラーロボットのハードウェア構成、Plug-and-Play 型のアーキテクチャや、基本的な制御アルゴリズムについては、研究開発項目1の研究開発課題1「モジュラーロボットの設

計、動作・機能解析」の研究成果に基づき、同課題の PI と密接な連携を図りながら、本研究課題ではタスク遂行を目的とした制御プログラムの開発、シミュレーション検証とロボットの実装との連携 (Sim2Real) の構築、ベンチマークテストによる性能評価を中心に研究開発を進める。

タスク達成のベンチマークとして、(1) 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」、および (2) 崖降り探査・サンプル採集を想定した「サンプル採集探査」を設定し、それぞれについてタスクの達成度を評価しながら開発を進める。

令和4年度においては、研究開発のプラットフォームとして、マニピュレータ・システム 2 台を導入して Sim2Real 環境を構築し、ロボットアームによる各種制御法の基礎実験を実施した。

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 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、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。

この階層型強化学習の開発に卓上マニピュレータを用いることとする。そこで、本年度は卓上マニピュレータのシミュレーション環境および実ロボットの実験環境の整備を行った。ハンドモジュールとアームモジュールを準備し、それぞれにシミュレーション環境と実ロボット環境を構築した。

### (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、月1回のペースにて全体会議を開催することとし、初回として 2022 年 3 月 16、17 日の 2 日間に、京都大学にて初回の会議を実施した。

## 2. 当該年度の研究開発プロジェクトの実施内容

### (1) 研究開発項目1: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

提案したロボットの構造と制御の同時最適化アルゴリズムおよび提案アルゴリズムを移動タスクとマニピュレーションタスクに適用したシミュレーション結果をまとめて、論文 Simultaneous Optimization of Discrete and Continuous Parameters Defining a Robot Morphology and Controller, by R. Koike, R. Ariizumi, F. Matsuno として IEEE Trans. on Neural Networks and Learning Systems に投稿した。

##### 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

固い平面環境を想定して、ロボットの関節故障(関節ロック・関節フリー)をランダムに発生させ、故障が生じた場合にも最低限の移動機能を損なわないロボットの構造と制御の同時最適化アルゴリズムを開発した。具体的には、単調減少法 (MDM: Monotonic Decrease method)と同型分類法 (ICM: Isomorphic Classification Method)を融合するアルゴリズムを提案し、その有効性をシミュレーションにより明らかにした。

#### (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

従来のモジュラーロボットの機械的・電氣的結合機構を調査し、直接結合を実現する Hook型を採用することを決定した。また、太陽光発電施設の構築、崖の昇り降り、サンプル回収のミッションを遂行するために、共通化を意識したモジュール構成として、ボディモジュール・3自由度 LIMB モジュール・EE モジュールの設計を検討した。クローラモジュールを多連結したヘビ型ロボットを開発し、運動学に基づいた制御系を開発した。

##### 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

モジュールロボットシステムの通信プロトコルに関して、従来宇宙分野で用いられてきた SpaceWire および SPA (Space Plug-and-Play Architecture)と提案する Plug-and-Play(PnP)プロトコルを、モジュールの独立性、モジュールの自動認識(グローバル ID)、結合分離の容易性、モジュール結合状態の可視性、管理インタフェースの実時間性、新規モジュールの拡張性の観点で比較し、提案する Plug-and-Play(PnP)プロトコルの優位性を確認した。

課題推進者:松野 文俊 (京都大学)

### 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、uFactory 社の xARM(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 2 点について基礎実験を行った。

(1) 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」

組立マニピュレーション検証のための環境構築として、グラフィカルなシミュレーション環境を構築し、位置制御・軌道制御のための運動学・動力学シミュレーションが自在に行えることを確認した。ロボットアームの先端には RGB-D カメラを搭載し、カメラで認識した動作環境をシミュレーター上で再現するキャリブレーション環境を整えた。

さらに搭載カメラ画像に認識系 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。

### (2) 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、YOLO による画像認識を用いて環境のなかから「岩石」というカテゴリ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 5 個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、ライティング環境が良好である場合は、ほぼ 100%のタスク達成率が実現できることを確認した。

なお、次年度以降の研究展開の基礎として depth カメラを用いて対象環境の 3 次元データ取得・マッピング動作の確認も実施した。

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

当該年度実施内容:

自己再生型 AI のテストベッドとして、卓上マニピュレータによる実験環境とシミュレーション環境の整備を行った。具体的には、図1に示すような環境を作成した。シミュレーション環境としては、機械学習研究のテストベッド環境を構築するために広く用いられている動力学シミュレーションエンジンである Mujoco[1]を活用し、卓上マニピュレータと把持動作を生成するハンドロボットのシミュレーションモデルを構築、階層強化学習アルゴリズムの実装に向け、状態変数、行動変数、報酬関数の設定を可能とするインタフェースを実装した。実ロボット環境においては、卓上マニピュレータに3指ハンドロボットモジュールを接続、開発した動力学シミュレーション環境とのシームレスな連携を可能とするロボット制御システムを作成した。

また、今後フレーム組立てタスクにおいて階層強化学習を評価することを想定し、フレームを模したバーハンドルを操作する動作課題設定に向けた環境構築を追加的に行った。各ロボットモジュールにあらかじめ設計した動作指令を送ることにより、動作生成が可能であることを確認した。図2にその動作事例を示した。

以上のように、階層強化学習実装に向けたシミュレーションおよび実環境の整備を行うことを目標とした当該年度のマイルストーンを達成した。

[1] <https://mujoco.org/>

課題推進者: 森本 淳 (京都大学)

### 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

代表機関の PM 支援体制チーム構築の一環として、本プロジェクトの会計・経理を専門的に担当する事務補佐員(派遣)1名の雇用を開始した。

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、月1回のペースにて全体会議を開催することとし、初回として2022年3月16、17日の2日間に、京都大学にて初回の会議を実施した。

##### 研究開発プロジェクトの展開

研究開始直後のため、令和4年度中の研究開発プロジェクトの展開活動は未実施。

#### (2) 研究成果の展開

研究開始直後のため、令和4年度中の研究成果の展開活動は未実施。

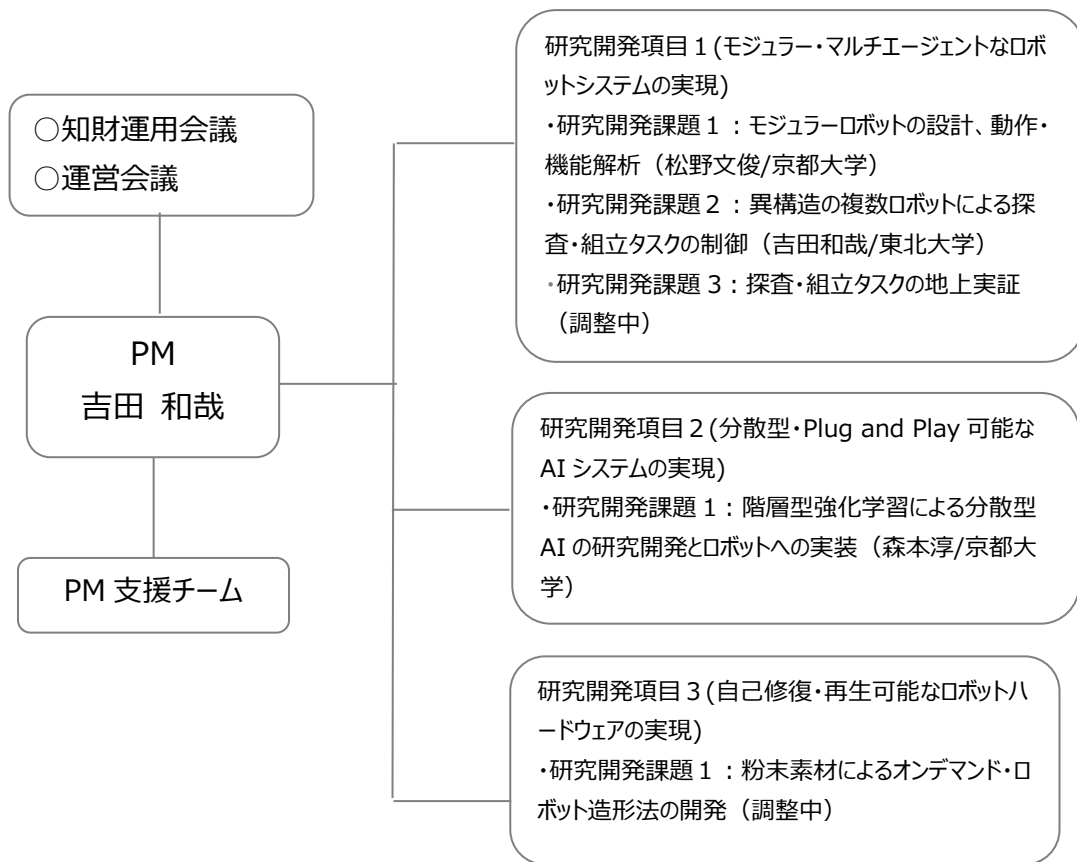
#### (3) 広報、アウトリーチ

PM が所属する東北大学の広報パンフレットにプロジェクト概要を記載するため、プロフェッショナル・ライター、カメラマンによるインタビューを実施。同パンフレットは令和5年に印刷・配布される予定である。

#### (4) データマネジメントに関する取り組み

研究開始直後のため、令和4年度中のデータマネジメントに関する取り組み活動は未実施。

#### 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

研究開始直後のため、令和 4 年度中は未実施。

➤ 運営会議

研究開始直後のため、令和 4 年度中は未実施。



## 5. 当該年度の成果データ集計

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

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	0	0	0
口頭発表	0	0	0
ポスター発表	0	0	0
合計	0	0	0

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

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

受賞件数		
国内	国際	総数
0	0	0

プレスリリース件数
0

報道件数
0

ワークショップ等、アウトリーチ件数
0