

# 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

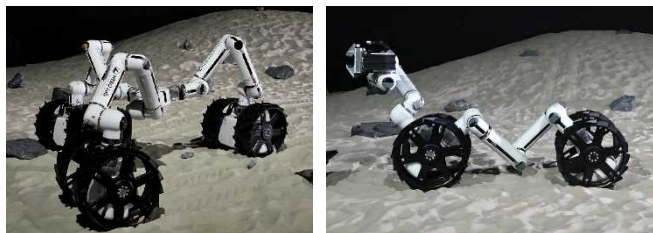
## 2024 年度までの進捗状況

### 1. 概要

宇宙空間への輸送機会や輸送可能な体積・質量には厳しい制約があるため、地球から持ち込むロボットシステムには、作業環境や目的の変化に応じて柔軟に形態を変えながら多様なタスクを遂行する「変幻自在な適応性」が求められます。さらに、異なる形態を持つ複数のロボットが協調して作業を進める能力も不可欠です。この課題に対する解決策として、本プロジェクトでは、真空・1/6 重力・レゴリスに覆われ岩石が点在するような未知の過酷環境下においてもタスクを遂行可能な、再構成可能なモジュラーロボットシステムを開発し、異種ロボット群による分散協調制御の実現を目指しています。

### 2. これまでの主な成果

令和6年度は、以下の2つの課題を中心に研究開発を推進しました。



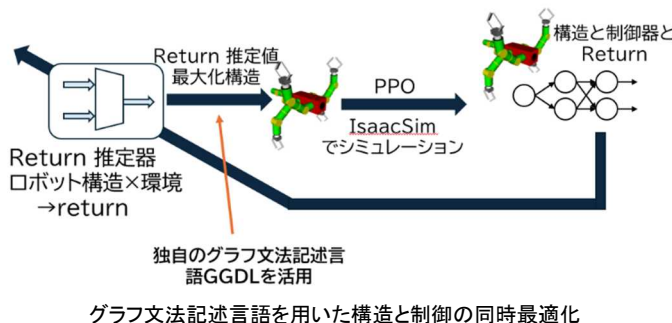
開発した月面モジュラーロボット MoonBot

#### 課題1: モジュラーロボットの設計、製作・機能解析

本プロジェクトの中核となる「変幻自在」にタスクを遂行可能なモジュラーロボットについて、その設計・試作・機能解析を行いました。段階的な地上実証モデルの開発を通じて、以下の成果を得ました。

- 構造と制御のレポジトリ構築:** 各モジュールの構成、形態、機能、および対応する制御手法をデータベース化し、再利用可能な知識基盤を整備。
- 結合機構の設計と製作:** モジュールを容易に組み替え可能とする結合インターフェースを設計し、地上実証モデルを製作。

- 再構成アルゴリズムの開発:** モジュールの組み替えに応じた構成認識とタスク割当を実現するアルゴリズムを開発し、ロボットモデルに実装。
- Plug and Play 機構の開発:** モジュールの接続・切断を動的に検知・管理する柔軟なシステムを構築。
- 自律分散協調制御系の構築:** 異種モジュラーロボット間で協調動作が可能となる制御系の設計と基礎実装を実施。

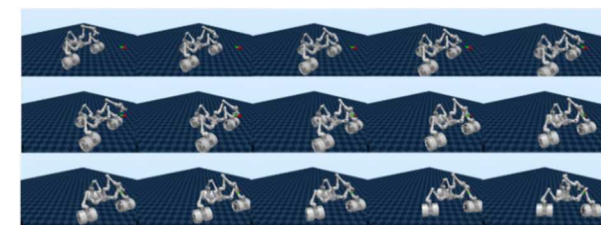
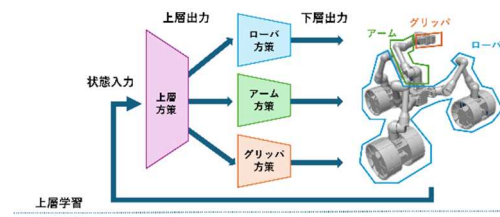


グラフ文法記述言語を用いた構造と制御の同時最適化

#### 課題2: 階層型強化学習による分散型 AI の研究開発

MoonBot のモデルファイルを基に、アーム・ハンド・移動モジュールを統合したロボットシステムのシミュレーション環境を構築し、月面でのロボットタスクを視野に入れた AI 制御手法の研究を行いました。具体的には、以下の要素を持つ階層型強化学習システムを新たに設計・導出し、マニピュレーション課題への適用を行いました。

- 下位モジュール(下層学習):**
  - アーム制御モジュール (arm): 手先を目標位置まで到達させるリーチ動作の学習。
  - グripper制御モジュール (gripper): 対象物を適切に把持する動作の学習。
  - 移動ロボット制御モジュール (rover): 所定位置への移動を行う動作の学習。
- 上位モジュール(上層学習):**
  - 上記の下位モジュールを活用し、作業位置までの移動、最適な角度への手先調整を含むタスク全体の統合的方策を学習。



統合ロボットシステムにおける移動・操作方策の獲得

この階層構造により、把持・移動・操作といった複合的な動作を効率的に習得することが可能となり、結果として所定位置への移動および与えられた操作タスクを成功裏に達成しました。一方、同様のタスクに対して階層構造を持たない従来の強化学習手法では、学習が進まずタスク達成に至らない結果となりました。

この成果により、提案するモジュラー構造と階層型強化学習を統合した AI システムが、移動・マニピュレーションを含む複雑なタスクに対して有効かつ効率的な方策学習を可能とすることが実証されました。

### 3. 今後の展開

月面上で AI ロボット群を用いて有人拠点などのインフラを自律的に構築するというムーンショット目標の達成に向けて、今後は、タスクに応じて柔軟に変化するロボット構成法、各ロボットへの最適なタスクアロケーション手法、さらに階層型学習に基づく動作スキルの獲得・蓄積・活用の方法について、引き続き研究を深化させていく予定です。

## 2. AI ロボットによる月面拠点の実現

### 2024 年度までの進捗状況

#### 1. 概要

月面に運び込まれたモジュラー型ロボットの自己組立を出発点とし、月面拠点構築の代表的なインフラとして、太陽発電タワー、無線中継局、有人居住ユニットの3種類の構造物を対象に、AIロボットによる展開・組立・設置技術の研究開発を進めます。

ロボット自身、および太陽発電タワー・無線中継局といった構造物は、運搬の制約から分割または折りたたまれた「受動的」な要素として持ち込まれることを前提として、これらを、同一構造あるいは異なる構造を持つ複数のロボットが協調しながら展開・組立する工程を考えます。

有人居住ユニットのような大型構造物については、インフレータブル構造などを想定し、「能動的」に展開・変形する構成要素を利用した構築方法を検討します。

#### 2. これまでの主な成果

開発した月面モジュラーロボットの地上実証機「MoonBot」を用い、JAXA 宇宙探査実験棟内に設置された宇宙探査実験フィールドにおいて、月面拠点構築に必要な各種ベンチマークタスクに対応した実証実験を実施しました。実験では、以下の3つのベンチマークタスクに取り組みました。

##### 1. ベンチマーク・タスク 1: モジュールの着脱・交換

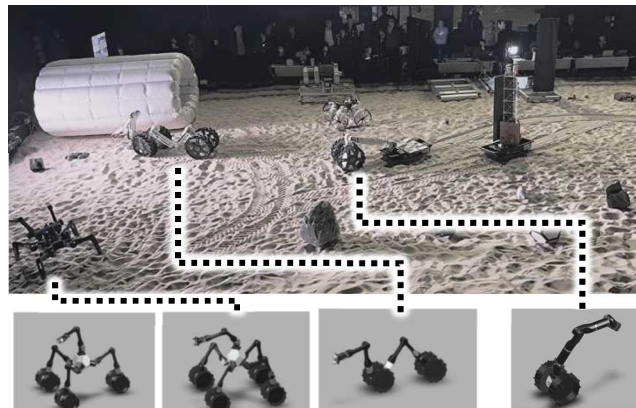
ロボットが、自身の構成モジュール、あるいは他のロボットのモジュールを認識し、それらを着脱・交換する動作を自律的に実行。形態変更による機能適応の可能性を評価しました。

##### 2. ベンチマーク・タスク 2: 構造物の組立作業

太陽発電設備や無線通信局の構築を想定し、挿入・ラッチングといった組立作業を実現。テレオペレーション(遠隔制御)を出発点とし、組立手順および動作方策の学習に基づいた自律化に取り組みました。

##### 3. ベンチマーク・タスク 3: インフレータブル居住ユニットの展開支援

有人モジュールの構築として HIDAS 地上実証モデル(インフレータブル構造)の能動展開を検証。ユニット同士の位置決めおよび結合作業によって、ロボットと能動構造物の協働作業の実現可能性・有用性を確認しました。



宇宙探査実験フィールドでの月面拠点構築のシナリオ検証デモ

#### 課題1: 複数ロボットによる拠点構築の統合制御

拠点構築作業における複数ロボットの統合制御技術について、研究および実装を進めました。ロボット制御は、まず人による遠隔操作(テレオペレーション)を起点とし、最終的には自律的な作業遂行を目指しています。

その実現のために、シミュレーション環境を用いた作業計画の立案、個別ロボットに最適な制御方策を導出するためのデジタルツインの構築、強化学習を用いた自律制御方策の獲得、仮想環境で学習した方策を実ロボットに適用する Sim2Real 技術の開発を行いました。これらを通じて、拠点構築に必要な複数ロボットの協調作業を実現するための基盤技術の整備を進めました。

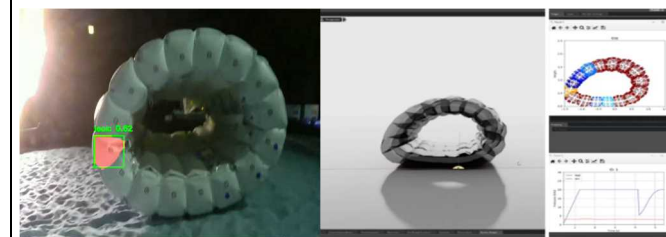
#### 課題2: インフレータブル構造を用いた有人拠点構築

2050 年に月面に文明的な都市を築くためには、人類が居住可能な拠点の構築が不可欠です。本研究では、そのような月面での有人活動拠点の実現に向けて、ロボットとの協調によって自律的に構築されるインフレータブル構造物である HIDAS (Homeostatic Inflatable Decentralized Autonomous Structure) の開発を目指しています。

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ました。



MoonBot による HIDAS (インフレータブル構造物) の展開支援



画像認識による不具合セルの検出 HIDAS 回転動作シミュレーション

#### 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

本課題では、HIDAS のシミュレーション基盤および制御学習手法の開発に取り組んでいます。2024 年度は、実機の計測データに基づいてモデルパラメータを調整可能なデータ同化機能を備えたシミュレーション基盤を構築し、HIDAS の実際の挙動に近い動作再現を実現しました。また、各インフレータブルユニットにおける膨張・収縮動作を利用した回転移動の実現可能性について検証を行い、圧力制御により回転移動が達成可能であることを示しました。

#### 3. 今後の展開

AI ロボットによる月面拠点の実現を目指した自律性の高いロボットシステムの開発を、継続的に推進していきます。