

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

2023 年度までの進捗状況

1. 概要

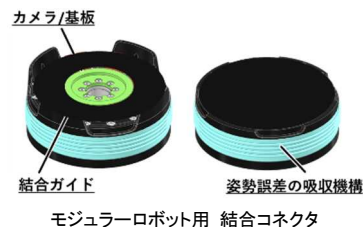
本研究開発項目において、適応的に形態を変えて「変幻自在」にタスクを行うことができるモジュラーロボットの設計、製作・機能解析を行い、本プロジェクトの中核をなすモジュラーロボットシステムの開発を進めました。ロボットモジュールの構成法、モジュールの組み合わせにより生み出されるロボットの形態、それぞれの形態(デザイン)におけるロボットの動作や機能(タスク)については、それぞれデータベース(レポジトリ)として蓄積し、研究開発項目2における階層型強化学習に基づく構造と制御器の同時最適化に活用します。

2. これまでの主な成果

令和5年度は、以下の3つの点について研究開発を進めました。

課題1: 自己再生型モジュラーロボットの設計・動作・機能解析

- モジュラーロボットの構造と制御のレポジトリの構築
不整地環境において、また耐故障性を考慮したロボットの構造と制御の同時最適化を実施しました。
- 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
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コネクタモジュールを設計・開発しました。また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しました。さらに、多肢型モジュラーロボットの検証モデル MoonBot 0 を開発し、結合状態の自動認識、自律的な運動生成等の基本的な機能を実装し、後述する動作試験により、その制御アルゴリズムを評価しました。



モジュラーロボット用 結合コネクタ

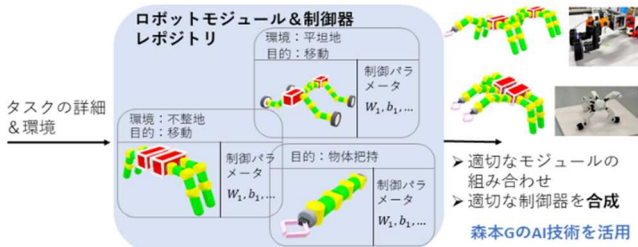


多肢型モジュラーロボットの検証モデル MoonBot 0

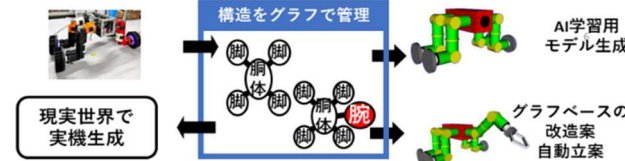
- モジュール再構成アルゴリズムの開発とプロトタイプロボットへの実装
ロボットのモジュール構成のデータベースの任意の構造から別の任意の構造に遷移するためのモジュール再構成アルゴリズムを開発しました。

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

これまでに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たりす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、以下の項目につ



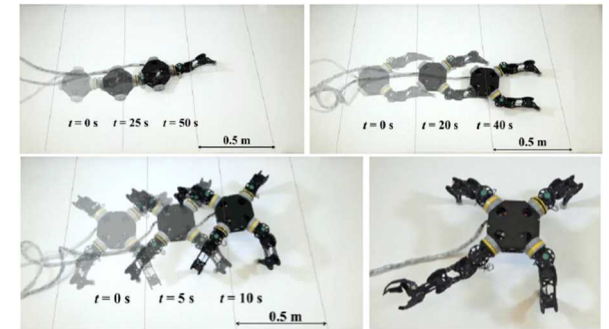
GGDLが目指す枠組み



グラフモデルを用いたモジュール構成アルゴリズム開発

いて検証を行いました。

- 多肢型モジュラーロボットの多数の異なる構造・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。
- 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10cm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。



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



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

3. 今後の展開

モジュラーロボットのハードウェア(1次試作モデル)を各種メーカーと共同して開発し、上記の制御ソフトウェアを実装することで以下の評価試験/デモを行います。

- モジュラーロボットのアーム部を用いて他のロボットを組み立てる。
- コンテナに搭載されたモジュールおよび構造部品を、砂上で搬送する。
- 伸展機構を用いた通信局・発電局のモックアップの設置と展開支援を行う。

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

月面探査／拠点構築のための自己再生型 AI ロボット

研究開発項目

2. 分散型・Plug and Play 可能な AI

2023 年度までの進捗状況

1. 概要

本研究開発項目では、「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、自己成長する AI システムの実現を目指します。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ますが、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す。組み換え可能な再構成型ロボット、および異種形態の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となります。この手法を活用する本研究開発課題においては、特に組立てタスクを用いて開発される AI 技術の評価します。

2. これまでの主な成果

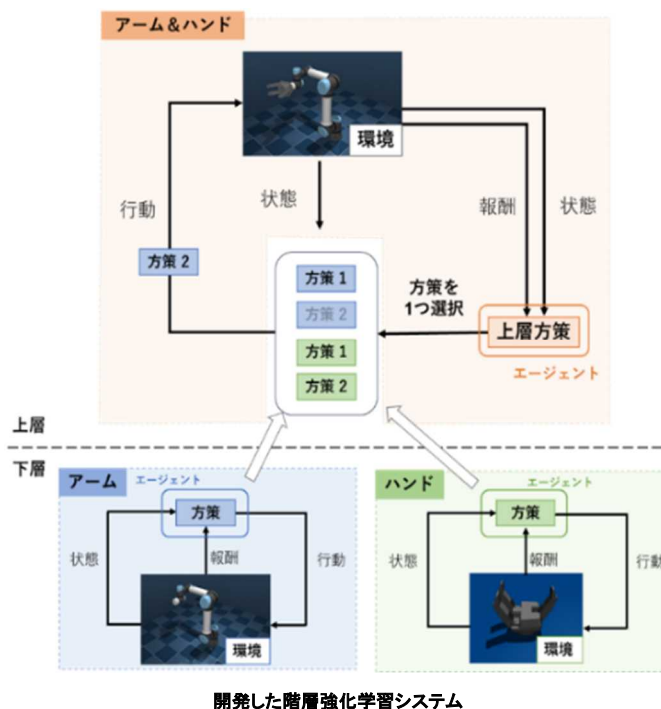
令和 5 年度は、前年度に整備した卓上マニピュレータのシミュレーション環境において階層型強化学習を実装し、目標とした学習性能を達成しました。

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

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ました。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いました。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ました。結果として、学習データを活用した方が大幅に少ない試行回数によって、マニピュレーション動作方針を獲得することを達成しました。

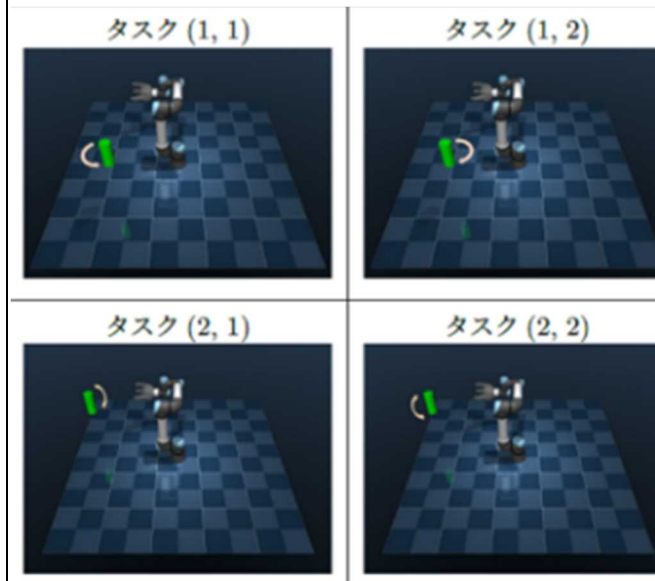
まず次の図に示すような階層的な強化学習システムを構築し、アームモジュール、ハンドモジュールそれぞれに対して下位方針を獲得しました。具体的には、ハンド下位方針は物体把持とバルブの回転操作を学習し、アームモジュールはバルブへのリーチング動作を獲得しました。

タスクとしては 4 種類のバルブ操作課題を考え、上位方針が下位方針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習性

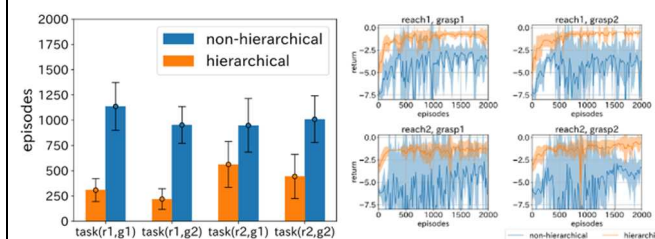


開発した階層強化学習システム

能を評価しました。評価方法としては、階層化によりリポジトリに下位方針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ところ、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ます。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大幅に少ない学習試行で方針が獲得可能となりました。加えて、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できました。



4つの異なるバルブ操作タスクによる学習性能評価



(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

3. 今後の展開

上記の課題を克服する要素技術を開発し、月面でのモジュラーロボットによる組立タスクを想定した各マイルストーンタスクにおいて本 AI 技術を応用した実証実験を行っていきます。

3. 自己修復・再生可能なロボットのためのハードウェア

2023 年度までの進捗状況

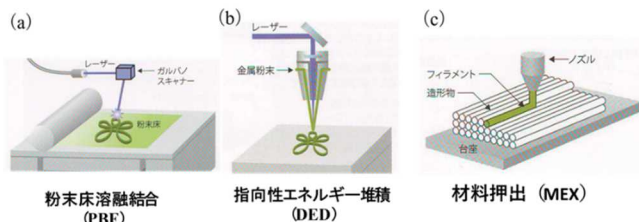
1. 概要

本研究開発項目では、月面を含む様々な現場でロボットが持続的な活動を行うことを可能とするために、現場での作業ニーズに応じたロボットの部品を、現場で調達される資源・素材を用いて製造できる On-demand Robot Design, On-site Fabrication の技術を明らかにし、その場でロボットがロボット自身を修理・製造するための積層製造法 (Additive Manufacturing) を実現することを目標としています。加えて、月面での応用を見据え、製造技術の小型軽量化・省電力化についても詳細に検討します。素材として粉末状の素材(金属、セラミック、月模擬砂等)を用い、レーザービームあるいは電子ビームによる3次元焼結・溶融工程(3D プリント技術)を進展させ、素材、製造法および製造された部品の強度との関係性を明らかにしたうえで、実用的な製造法の確立を目指します。

2. これまでの主な成果

本研究テーマでは、下記のとおり研究開発を実施しました。

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



(1) 既存技術を用いた部品造形

a) 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)(上図(a))による部品造形を行いました。

造形材料: 純銅、TiAl 合金
造形物形状: 単純構造物(角棒)

b) レーザー熱源指向性エネルギー堆積法(DED 装置)(図 1(b))による部品造形を行いました。

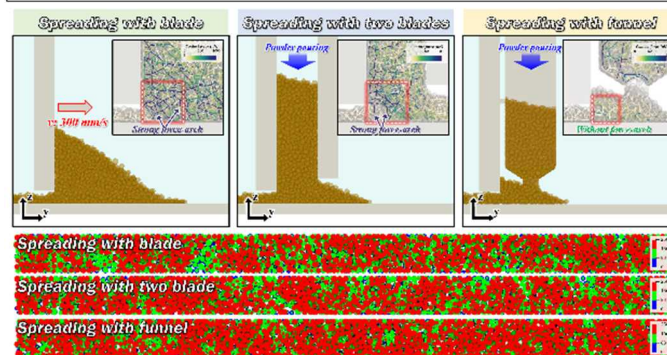
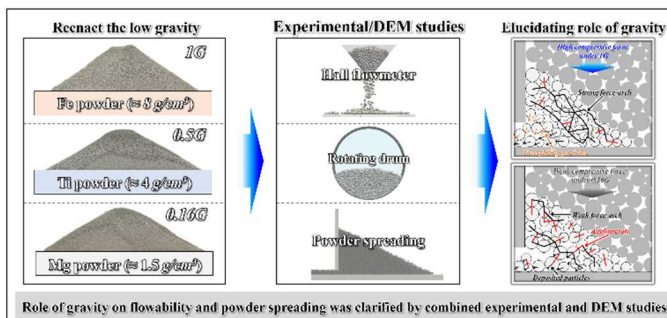
造形材料: Ti6Al4V 合金

造形物形状: ラインスキャン、壁

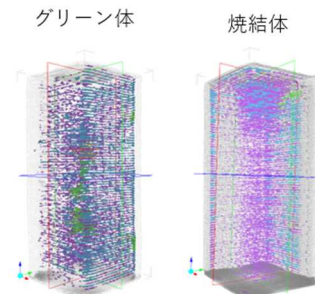
c) 材料押し出し法(MEX 装置)(図 1(c))による部品造形
造形材料: ステンレス粉末(フィラメント)およびアルミナ
造形物形状: 単純構造物(棒状、板状、丸棒のテストピース)および複雑構造物(ギア、アーム、筐体)

(2) 月面環境を考慮した PBF-EBM プロセスの最適化検討

純銅および Ti-6Al-4V 粉末の挙動を調べるための装置を新たに製作しました。新しい粉末広がり装置は、高速度カメラを用いた粒子画像流速測定法(PIV)を行うために開発しました。これを通じて純銅及び 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、製作された粉末広がり装置を利用して多様な粉末の動的安息角および広がり性を分析しました。



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



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

また、各粉末による静的/動的粉末流動性評価のためにホールフロメータ/回転ドラム試験装置を開発しました。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ました。また、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ました。これを通じて粉末の流動性および粉末広がり挙動に及ぼす低重力の影響を、現場観察結果を基盤に明らかにしました。粉末広がり、低重力環境で粉末層特性を決定する主要要因を調査するために DEM シミュレーションモデルを開発しました。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ました。また、開発された DEM モデルを基盤に低重力のための代案的な粉末広がり技術を開発しました。

(3) 月面環境を考慮した DED プロセスの最適化検討

DED(指向性エネルギー堆積法)プロセスにおける粉末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、ホールフロー式粉末供給システムの開発を行いました。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ました。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ました。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ました。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ました。DEM シミュレーションモデルは、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開発されました。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ました。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ました。