

研究開発テーマ名

# 土工を革新する AI ロボットシステム

## 2022年度までの進捗状況

### 1. 概要

本プロジェクトの目標は、「協働 AI ロボットシステムによる多様な環境に適応したインフラ構築」の実現です。この目標を達成するには、(自然災害現場に代表される)刻一刻と変化する環境下でも動作するシステムが必要です。しかしながら、これまでの機械設計の思想は、使用環境を限定したものでした(図1左)。そこで本研究開発テーマ「土工を革新する AI ロボットシステム」では、このシステムを実現するために「開いた設計」(図1右)という設計法の体系化を進めながら、革新的な土工作业技術、革新的なロボット移動技術、ロボットプラットフォーム開発、河道閉塞対応技術の開発、月面着陸拠点構築技術というサブ課題を設定し、研究開発を進めています。以下では、令和4年度における本研究開発テーマの主要な成果について記します。

開発された技術は、地球上の自然災害等にも応用できます。



図1 閉じた設計と開いた設計

### 2. 2022年度までの成果

革新的な土工作业技術では、大阪大学のグループが河道閉塞などの災害時に排水ホースを遠隔設置可能な、排水ホース敷設ロボットの研究開発を進めました。河道閉塞とは、地震や豪雨によって土砂崩れが起こり、それが川の流れを堰き止めて天然のダムを

形成する現象です。川の水の供給継続により起こる天然ダムの崩壊に伴う土石流を防ぐためには、上流側の湛水を下流域に移動させる必要があります。現状、水路工事が完了するまでの間は、排水ホースが使用されていますが、その設置は非常に不安定で危険な環境下で人手によって行われています。この問題を解決するため、不安定な環境において、遠隔で排水ホースを設置できる「i-Centipod Hose」試作機を開発しました(図2)。



図2 排水ポンプ敷設ロボット i-CentiPot-Hose 試作機

このロボットは、クローラロボットを用いて排水ポンプとホースの運搬を行います。大きな特徴は、ホースを引きずる際に生ずる地面との摩擦を軽減するため、複数の小型ロボットが間に入ってホースを支えながら、環境との相互作用を利用しつつ、運搬を補助する点です。このロボットは、国際会議 IROS2022 の展示ブースでデモンストレーションも実施され、コンセプト実証が行われました。

また、月面着陸拠点構築用のロボットプラットフォームの改良も進めました。月面の低重力環境下では、地球上の転圧とは異なり、ローラの自重を用いた締固め効率が低下すると考えられます。そのため、図3に示すように、小型ロボットプラットフォームの直下に転圧ローラを搭載し、車両自体の重量も転圧に活用できる、転圧の力制御も可能な機構を開発しました。これにより、低重力環境でも、効果的な締固めが実現できると期待されます。

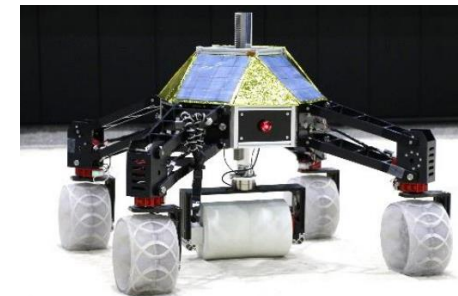


図3 転圧ローラ搭載型 月面着陸拠点構築用プラットフォーム

ここには、今年度の成果のごく一部しか掲載できませんでしたが、他にも、「クローラ形状を変更することが可能な柔軟双胴クローラの機能検証機」、「アーム先端の精密制御が可能な3tクラスの電動型ツール交換ロボット」、「水没対応も可能な排水ポンプ設置を行う3tクラスの小型油圧ショベル」ならびに、「地形計測および水文観測用の遠隔設置型センシング機器」の開発も行いました。

### 3. 今後の展開

本研究プロジェクトの2025年の目標は、複数台の小型ロボットを使用して、環境が時々刻々と変化する状況下でも目標とする土工作业を実現することです。そのため、2023年までに、「土工を革新する AI ロボットシステム」というテーマの中で考案した新しいロボットのアイデアに基づき、複数のプロトタイプロボットを製作し、模擬環境において性能評価試験を進めていく予定です。

研究開発テーマ名

# 複数台ロボットの動的協働システム

## 2022年度までの進捗状況

### 1. 概要

「複数台の建設ロボットによる多様な環境に適応したインフラ構築の実現」のためには、変化する環境に臨機応変に対応する必要があります。この実現には、各ロボットのパフォーマンスを自己分析しながら、想定外の事象に対応するために、動的にチーム編成を変更しつつ目標タスクを達成する、複数台建設ロボットによる協働作業が有効と考えられます。しかしながら、このようなロボットのアーキテクチャやアルゴリズムは、これまで存在しませんでした。そこで、本研究開発「複数台ロボットの動的協働システム」では、チームの再編成を実現する「動的協働AI」の体系化を進めます。まずは、河道閉塞災害に応用可能な土砂運搬タスクの実現を対象とし、変化する環境下で動的にチーム編成が可能な「動的協働AI」の実現を目指します(図4を参照)。また、複数台の3tクラスの建設ロボットを使用して、「動的協働AI」の検証を行います。

開発された技術は、地球上の自然災害等にも応用できます。

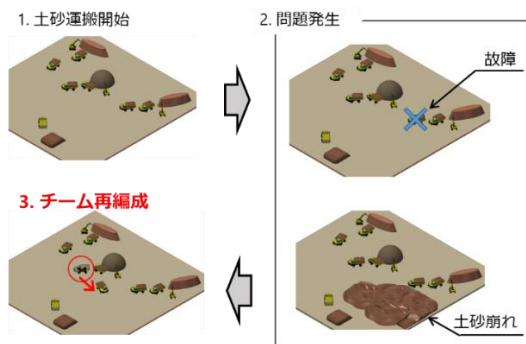


図4 変化する環境下における動的なチーム編成

### 2. 2022年度までの成果

これまでに、現場の状況に応じて臨機応変なチーム編成を行う「オープン自己組織化」アルゴリズムを構築しました。具体的なタスクとしては、前述の通り、ショベルとダンプによる土砂運搬を対象とし、土砂量、土砂山・土捨場の位置、ロボットの性能、納期などをパラメータとして、運搬可能な土砂量(予測パフォーマンス)と実際に運搬した土砂量(実パフォーマンス)に基づいてチームを再編成するアルゴリズムを構築しました。

上述のアルゴリズムの検証には、土砂特性を考慮した三次元の土シミュレーションが必要です。そのため、複数台建設ロボットの三次元土シミュレータ(Vortex Studioベース)を構築しました。このシミュレータ上で、オープン自己組織化アルゴリズムを基にした、ショベルによる土砂の掘削・積載、ダンプトラックによる運搬・放土を実現するアルゴリズムを構築し、複数台のロボット群による土砂運搬タスクを実装しました(図5を参照)。その結果、このアルゴリズムが適切に動作し、ダンプトラックが故障した場合でも、現場の状況に応じてチームの再編成を行うアルゴリズムが正常に機能することを確認しました。

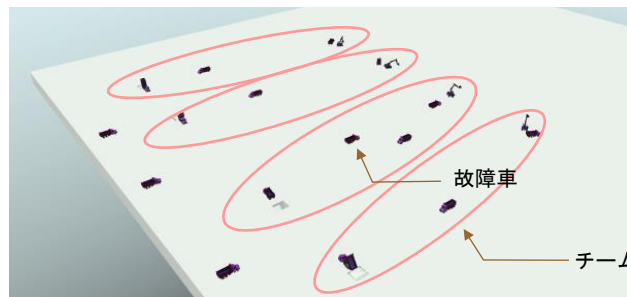


図5 土砂運搬シミュレーション(4チームによる動作の実現。故障車のあるチームは、応援のトラックが合流している。)

また、このアルゴリズムの実機検証を目指し、複数個のセンサポッドを使用した複数建設ロボットの同時位置姿勢推定技術の開発を行いました。この建設ロボットの位置推定技術は、GNSSが捕捉不可能な環境でも利用することができるだけでなく、対象環境の状況をリアルタイムに把握することができるという利点があります。また、この位置推定技術を使用して、複数の建設ロボットによる土砂運搬作業の動作を実現しました。(図6参照)。



図6 複数建設ロボットによる土砂運搬作業の動作

### 3. 今後の展開

本研究開発の2025年の目標は、複数台の建設ロボットが状況の変化に対応しながらチームを再編成し、土砂運搬タスクを含む目標タスクを実施することです。この目標を達成するために、2023年までに「オープン自己組織化」アルゴリズムに関する研究開発を更に進めると共に、2023年の夏には「オープン自己組織化」アルゴリズムを搭載した実建設ロボット6台による土砂運搬作業のデモンストレーションの実現を目指します。

研究開発テーマ名

# 現場を俯瞰するセンサポッドシステム

## 2022年度までの進捗状況

### 1. 概要

「協働 AI ロボットシステムによる多様な環境に適応したインフラ構築の実現」のためには、時々刻々と変化する環境情報を正確に取得し、その情報に基づいて環境の評価や予測を行う必要があります。特に、土砂災害現場では土質情報が非常に重要です。このような状況下での遠隔からの土質情報取得技術や、時々刻々と変動する環境情報の収集技術、また、そこから将来の環境推移を予測する技術は、これまでに実現されていませんでした。

そこで本研究開発テーマでは、まず、土質情報を含む環境情報や各建設ロボットの状況を取得するための要素技術を開発し、据置型センサシステム「センサポッド」を環境内に設置することを目指します(図7参照)。さらに、得られた情報を集約し、各建設ロボットに提供するシステムを構築します。また、この情報を解析して河道閉塞環境や土砂崩れ環境における地盤変動の未来予測を行う「環境評価 AI」も構築します。

開発された技術は、地球上の自然災害等にも応用できます。



図 7 センサポッドによる環境情報ならびに建設ロボットの作業情報の取得イメージ

### 2. 2022年度までの成果

2022年度には、九州大学によって、据置型センサシステム「センサポッド」の要素技術開発の一環として、2021年度に開発された振動波形の乱れを用いた地盤強度の推定手法の検証のためのフィールド実験が実施されました。この実験の結果、提案手法は、振動ローラーに取り付けた振動センサを使用する従来手法と比較し、地盤の固さの増加に従って収束する指標が顕著に計測できることがわかりました。また、複数の LiDAR 搭載センサポッドを使用して、複数の建設ロボットの位置をリアルタイムで推定する技術の開発を行い、その推定に使用するアルゴリズムの動作確認実験を行いました。実験の結果、建設ロボットに見立てた複数の建設機械の位置をリアルタイムで追跡できることを確認しました。(図8を参照)



図 8 複数のセンサポッドによる複数建設機械の位置推定

一方、奈良先端科学技術大学では、土壌表面の温度変化を利用して土壌内部の含水状態を推定する技術の開発に取り組み、曇天時などの日照が不安定な場合にも対応できる含水状態推定技術を開発しました。さらに今年度は、上述の技術を含む複数センシング機能を搭載したセンサポッド初号機の改良を行いました。これにより、ネットワークの通信障害に対する信頼性と動作安定性の向上を実現しました。

また、「センサポッド」から得られた環境データを利用した環境評価を行う技術の研究開発にも取り組んでいます。その一つ目は、河道閉塞が生じた際、配備した「センサポッド」が取得した地表面の変位データを使用し、堤体内部の状態を推定する技術です。2022年度には、これまでに構築した有限差分法による河道閉塞の「仮

想現場モデル」を使用し、地下水位変動による変形解析と崩壊危険度解析の順解析 PINN (Physics Informed Neural Network) および連続体弾性解析の PINN を構築し、その動作を確認しました。これにより、将来的には堤体の安定度を評価することが期待されます。二つ目は、災害環境の画像データからその災害の評価を行う AI の研究開発です。本研究では、画像記述において比喩表現を利用することが可能な V&L (Vision and Language) モデルと、その性能評価の方法を開発しました。現在、この AI フレームワークの妥当性を検証するために、過去の災害に対してこのフレームワークを適用し、斜面崩壊現場における画像-言語データセットの構築を進めています。さらに、Large Language Model (LLM) との連携を見据えて、ルールベースでの言語化を進めています。

### 3. 今後の展開

本研究開発の 2025 年の目標は、空中から配置された「センサポッドシステム」を使用して災害環境の情報を収集し、環境評価を行いつつ、「協働 AI ロボット群」への情報提供を実現することです。そのため、2023 年までには、これまでに研究開発を進めてきた様々なセンシング技術を「センサポッド」上に統合して、情報の集約と配信を行うシステムを構築します。また、環境評価や未来予測を行うための環境評価 AI のプロトタイプも実現します。