研究開発項目

1. 土工を革新する AI ロボットシステム

2023年度までの進捗状況

1. 概要

本プロジェクトの大目標は、「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）。そこで本研究開発項目「土工を革新する AI ロボットシステム」では、変化する環境でも動作するシステムを実現するため「開いた設計」（図 1 右）という設計法の体系化を進めながら、革新的な土工作業技術、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、研究開発を進めてきました。以下では、令和 5 年度における本研究開発項目の主要な成果について記します。

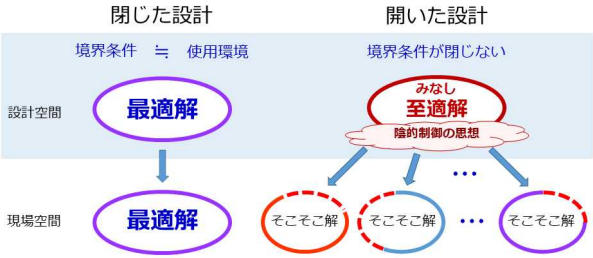

図 1 閉じた設計と開いた設計

2. これまでの主な成果

研究開発項目「革新的な土工作業技術」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発生する天然ダムの崩壊に伴う土石流災害を防ぐためには、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、排水ポンプ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、遠隔での排水ホース設置の実現を目指した「i-Centipot Ammonite」試作機を開発しました（図 2）。

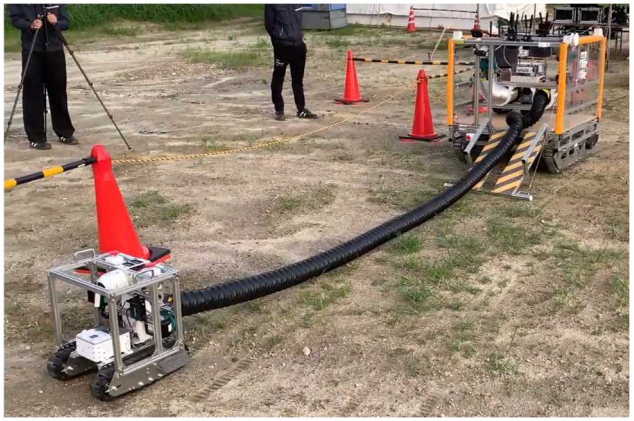

図 2 排水ホース敷設ロボット i-CentiPot-Ammonite 試作機

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、蛇腹のホースを空気圧で伸ばす機能を有する点です。このロボットは、九州大学フィールドにおける実証試験でデモンストレーションが実施され、コンセプト実証が行われました。

また、精密作業を実現するため、電動モータ駆動のアームを備えた建設ロボットを開発しました。このロボットは、掘削動作のみならず、アーム先端の力覚制御を行うことができるため、楊重アシストや U 字溝設置などを可能とします。さらに、パワーソフト技術を活用した、物体に絡みつくことで把持が可能なグリッパを、この建設ロボットの手先へ搭載しました。これにより、ロボットは、様々な形状の物体を把持することが可能となります。このロボットならびにパワーソフトグリッパの動作検証は、2023 年夏の九州大学フィールドにて実施しました（図 3）。この実験において、コンクリート柱や流木の把持を行い、このグリッパの有用性確認を行いました。

図 3 精密作業が可能な建設ロボットとパワーソフトグリッパ

以上が、今年度のハードウエアに関する成果の一部のご紹介ですが、この他にも、「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」や、「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」、「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」等の要素技術開発を行いました。

3. 今後の展開

本研究プロジェクトの 2030 年の目標は、複数台の小型ロボットを使用して、時々刻々と変化する状況下における災害応急復旧作業を実現することです。そのため、2025 年までに、これまでに開発した要素技術を統合したシステムを用いて、模擬環境における災害対応デモンストレーションを実現する予定です。

研究開発項目

2．複数台ロボットの動的協働システム

2023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、本研究開発項目「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」の体系化を進めました。まず、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」の実現を目指しました（図 1 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」の検証を行いました。

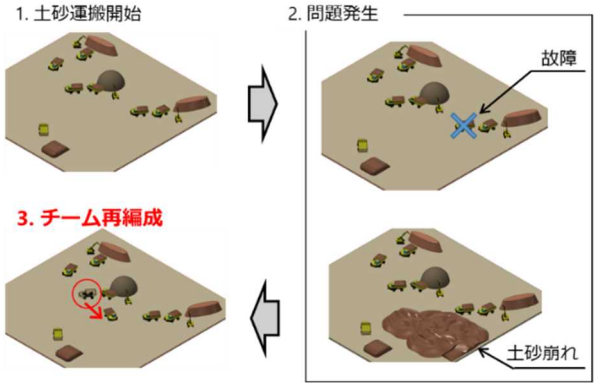

図 1　変化する環境下における動的なチーム編成

2. これまでの主な成果

研究開発項目「複数台ロボットの動的協働システム」では、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。対象とするタスクは、油圧ショベルとダンプトラックによる土砂運搬を対象としました。このタスクに対し、土砂量や、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。

このアルゴリズムの有用性を示すため、複数台の油圧ショベルならびにダンプトラックの動作をシミュレート可能な三次元土工シミュレータ（Vortex Studio ベース）を構築しました。このシミュレータ上で、提案アルゴリズムを基にした、油圧ショベル 4 台、ダンプトラック 16 台による土砂運搬タスクを実装しました。その結果、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提案アルゴリズムの有用性を確認しました。

次に、このアルゴリズムの実機への実装を行う前に、模型ロボットを用いた屋内試験を実施しました。この試験では、1 台の油圧ショベルと 3 台のダンプトラックが 1 チームとなり、2 チームによる土砂運搬動作を行いました。この動作検証により、アルゴリズム検証のみならず、建設ロボットの実動作や無線通信の問題点などを確認することができました（図 2）。

図 2 複数模型建設ロボットによる土砂運搬作業の動作

さらに、このアルゴリズムを建設ロボットに実装しました。各ロボットは 3 トン未満の小型建設機械であり、遠隔操縦型の油圧ショベル 1 台と、自動ホイールローダ 1 台ならびに、自動クローラキャリアダンプトラック 4 台で構成されています。これらの建設ロボットが 2 チームを形成し、九州大学フィールドにて、土砂運搬作業を実現しました（図 3）。途中、機械の故障を模擬するため、1 台のキャリアダンプトラックを強制停止しましたが、残りの建設ロボットがチームを再編成することで作業を継続し、当初の目標作業を達成できたことを確認することができました。

図 3　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

本研究プロジェクトの 2030 年の目標は、複数台の小型ロボットを使用して、時々刻々と変化する状況下における災害応急復旧作業を実現することです。そこで本プロジェクトでは、2025 年までに、河道閉塞災害環境に対応可能なロボットシステムのプロトタイプのインテグレーションを進めると共に、様々な作業を実施することが可能な動的協働システムをシミュレーション上で実現する予定です。

研究開発項目

3. 現場を俯瞰するセンサポッドシステム

2023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。

そこで本研究開発項目「現場を俯瞰するセンサポッドシステム」では、土質情報を含む環境情報や各建設ロボットの作業情報を取得するための据置型センサシステム「センサポッド」を環境内に設置し、情報収集を行うことを目指します（図 1 参照）。さらに、得られた情報を集約し、各建設ロボットやオペレータ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。

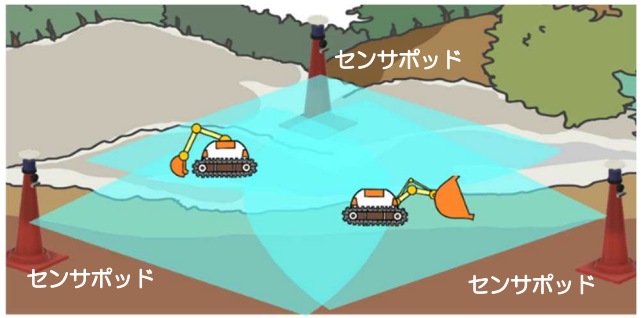

図 1 センサポッドによる環境情報ならびに建設ロボットの作業情報の取得イメージ

2. これまでの主な成果

2023 年度には、九州大学が開発した据置型センサシステム「センサポッド」を利用した Cyber-Physical システムを開発し、九州大学フィールドでセンサポッドを用いた情報提示試験を実施しました。建設機械の作業環境内に設置するセンサポッドは、視覚センサや GNSS、LiDAR を搭載しており、ここから電送される情報を用いて、環境情報や建設ロボットの状況（実画像ならびに CG 画像）を VR ゴーグルで確認できるようになりました（図 2）。このシステムにより、オペレータは、立入禁止現場に立ち入らずとも、環境情報を取得することが可能となりました。

図 2 センサポッドを用いた Cyber-Physical システム

さらに、環境に設置した複数の 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、この位置情報を用いた複数台建設機械の自動制御を実現しました。図 3 は、2 台の LiDAR を用いて 5 台の建設機械の位置をリアルタイムで取得している図です。このセンサポッドを用いた位置推定システムは、研究開発項目「複数台ロボットの動的協働システム」に適用し、6 台の建設機械を用いた動的協働作業のデモンストレーションを実現しました。

この他にも、センサポッドに搭載するサーマルカメラを用いた非接触で広範囲の地盤状態推定（含水率推定）や、センサポッドに搭載した振動センサを用いてロボットの走行振動を計測することで地盤強度を推定する手法などの要素技術研究を行いました。

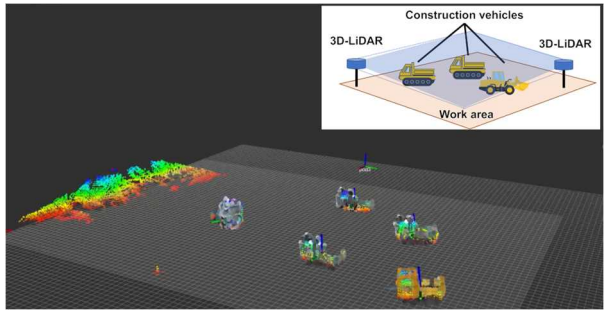

図 3 センサポッドを用いた複数建設ロボットの位置推定

3. 今後の展開

本研究プロジェクトの 2030 年の目標は、複数台の小型ロボットを使用して、時々刻々と変化する状況下における災害応急復旧作業を実現することです。そのため、本プロジェクトでは 2025 年までに、防水かつ長時間稼働が可能なセンサポッドの研究開発を進め、河道閉塞災害環境に対応可能なロボットシステムのプロトタイプのインテグレーションを進めます。これにより、遠隔操縦が可能な建設ロボットを利用した、センサポッドの模擬災害環境への遠隔設置システムを開発する予定です。

国立研究開発法人 科学技術振興機構 Japan Science and Technology Agency