

土工環境における複数異種の建設ロボット運用のための システムアーキテクチャの提案

System Architecture Proposal for Operation of Multiple Heterogeneous Construction Robots in an Earthwork Environment

○正 筑紫彰太 (近畿大/東京大) 正 末岡裕一郎 (大阪大) 谷島諒丞 (東京大)
小松 廉 (東京大) 池本有助 (名城大) 正 永谷圭司 (東京大)
正 山下 淳 (東京大) 正 浅間 一 (東京大)

Shota Chikushi, Kindai University / The University of Tokyo, chikushi@hiro.kindai.ac.jp

Yuichiro Sueoka, Osaka University

Ryosuke Yajima, Ren Komatsu, The University of Tokyo

Yusuke Ikemoto, Meijo University

Keiji Nagatani, Atsushi Yamashita, Hajime Asama, The University of Tokyo

The constructions in earthwork environments, such as lunar and disaster sites, often involve extensive and hazardous work with heavy equipment. In particular, to prevent secondary disasters and to adapt to changes in the environment, the multiple robotic operations are expected to be highly effective. Several systems have been developed to address this, while they still have not reached to real systems due to the complicated field properties and the issues of how multiple-heterogeneous robots effectively cooperate. In this study, we propose a design concept for a system architecture that can be efficiently researched and developed to use multiple heterogeneous construction robots in earthwork environments. Realistic simulation experiments with both earthwork properties and robotic characteristics have shown the applicability of the proposed system architecture.

Key Words: Construction, multiple-heterogeneous robots, simulations with real-time property

1 序論

月面や災害現場などの土工環境において、土砂を運搬する建設ロボットや土砂を掘削する建設ロボットなど複数異種の建設ロボットによる協働作業が期待されている [1]。月面や災害現場などの土工環境は、土砂の移動や地形変化が生じる難環境であり、開発から検証の全ての工程を複数異種の実スケール建設ロボットで行うことは不可能である。また、土工環境で取り扱う土砂は、土の流動性や固体的性質などのパラメータが変化することで、土砂特性が異なる。従って、建設ロボットでの掘削方法や複数異種の建設ロボットでの掘削、積載、及び運搬に対し、異なる方法論が必要となる。以上の観点から、土工環境における複数異種の建設ロボットの運用の実現のためには、実スケール建設ロボットに加えて、土砂特性を考慮した物理シミュレーション環境におけるシミュレーション建設ロボットを用いた研究開発が有効であると考えられる。さらに、シミュレーション建設ロボットから実スケール建設ロボットへの実装においては、実機でのアルゴリズム、協働作業の繰り返し検証が必須である。そのため、実スケール建設ロボットと比較して、効率的に繰り返し、アルゴリズム、協働作業の検証が可能なミニスケール建設ロボットを用いた研究開発が有効であると考えられる。

しかしながら、土砂特性を考慮した物理シミュレーションは、一般的に、シミュレーション環境内のみでの検証・運用を想定しており、剛体としての実機、及びその制御設計を導入することは、これまで十分に考慮されてこなかった。また、実機を制御するためのミドルウェアやアプリケーションでは、環境がリジッドな物理シミュレーションはあるものの、土砂などの細かい粒子表現を考慮した物理シミュレーションは無く、リアルタイム性の評価に課題がある。ここで、リアルタイム性とは、物理演算を行い、映像描画に必要なシミュレーションデータの生成に要する処理（物理演算に関する処理）のみならず、シミュレーションデータに基づき映像描画に要する処理（映像描画に関する処理）を制御周期内に処理できることを指し、実機実装の可能性に大きく関わる性質である。例えば、制御周期が 60 Hz の場合、1 フレームの処理

時間が 0.0167 s 未満であればリアルタイムで処理ができていると判断できる。加えて、実スケール建設ロボット、ミニスケール建設ロボット、シミュレーション建設ロボットのそれぞれで、個別にロボット制御のアルゴリズムを構築することは、研究開発におけるシステム統合、ならびに、シミュレーション建設ロボットからミニスケール建設ロボット、実スケール建設ロボットへの移行の点において効率的でない。従って、土工環境における複数異種の建設ロボットの運用を目指すためには、効率的な研究開発が可能な設計概念として、システムアーキテクチャの構築に焦点を当てる必要がある。

これまで、Azulay らは、ホイールローダでの土砂掘削を対象に、物理シミュレーション環境での強化学習による自動制御手法を提案した [3]。Azulay らの研究は、1 台の建設ロボットのみを対象としている。また、土砂は、簡素化したリジッドなモデルを使用しているため、実現象と差異がある。Kurinov らは、油圧ショベルでの土砂掘削、積載を対象に、物理シミュレーション環境での強化学習によって、周囲環境との衝突を回避して作業時間を最適化する土砂の掘削、積載手法を提案した [4]。しかし、Kurinov らの研究においても、1 台の建設ロボットのみを対象としている。Wu らは、4 台の異なる種類の移動ロボットでの物体搬送を対象に、物理シミュレーション環境での強化学習による協調搬送手法を提案 [5] されているが、リジッドなオブジェクトをベースとした環境モデルのシミュレーションである。これらの研究は、1 台の建設ロボットまたは、リジッドな環境、オブジェクトを対象にした研究であった。よって、物理特性を考慮した土工環境で、かつ複数異種の建設ロボットを対象とした本研究とは問題設定が異なる。さらに、土工環境における複数異種の建設ロボット運用のためのシステムアーキテクチャは、これまでに提案されていない。

本研究では、土工環境における複数異種の建設ロボット運用に向けて、効率的な研究開発が可能なシステムアーキテクチャを提案する。また、提案するシステムアーキテクチャを用いて、シミュレーション環境で複数異種の建設ロボットによる協働作業を行い、リアルタイム性を検証することで、提案手法の適用可能性

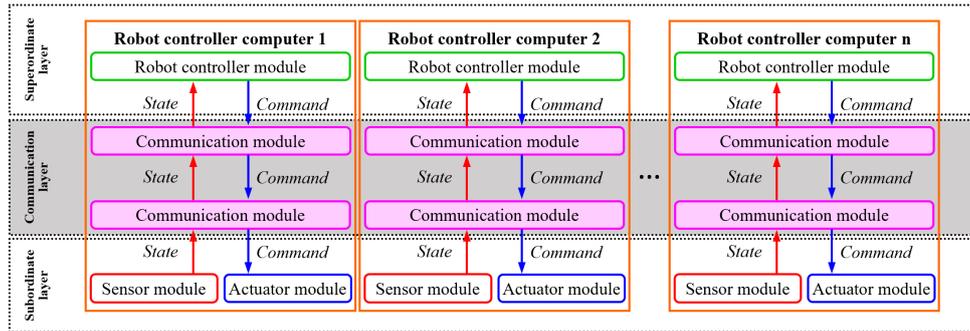


Fig.1 Overview of the proposed system architecture

を評価する。

2 提案手法

本章では、土工環境における複数異種の建設ロボット運用のためのシステムアーキテクチャについて説明をする。ロボット行動制御の構成要素は、様々な分類方法があるが、分類方法の1つに、行動決定部、制御部、駆動部、運動部、計測部の5つに分類する方法がある [2]。行動決定部と制御部は、ロボットが知的な行動を振る舞うためのロボットの高次制御に関わる論理的な処理を行う上位層に含まれる。制御部、駆動部、運動部、計測部は、ロボットが知的な行動を振る舞うためのロボット制御に必要となる機械工学的、電気・電子工学的な処理を行う下位層に含まれる。下位層では、機械工学的、電気・電子工学的な処理を担うため、使用するロボットやデバイス、環境に大きく依存する。例えば、センサやモータドライバ、アクチュエータの制御手法や制御ゲイン、通信プロトコル、計測値等は、ロボットやデバイス、環境に依存することが想定される。一方、上位層と下位層と要素分割することで、論理的な処理を行う上位層は、使用するロボットやデバイス、環境とは別の階層で動作させることが可能である。例えば、ロボットの経路計画や障害物回避、経路追従制御、姿勢制御、掘削、積載などのロボット制御のアルゴリズムは、入出力の物理量が同等であれば、ロボットやデバイス、環境に依存しにくい。

そこで、図1に示す上位層、通信層、下位層で構成されるシステムアーキテクチャを提案する。図1のオレンジ枠がメインコンピュータを表し、1台のロボットに相当する。緑枠が経路計画や障害物回避、掘削、積載などを行うロボット制御モジュール、ピンク枠が上位層と下位層で通信を行う通信モジュール、赤枠が計測を行うセンサモジュール、青枠がアクチュエータ制御を行うアクチュエータモジュールを表す。青矢印は、指令値の送信方向を表しており、制御モジュールから通信モジュールを介してアクチュエータモジュールに指令値が送られる。赤矢印は、計測値の送信方向を表しており、センサモジュールから通信モジュールを介してロボット制御モジュールに計測値が送られる。

上位層は、ロボットが知的な行動を振る舞うための論理的な処理を行う経路計画や障害物回避、掘削、積載などのロボット制御を行う層である。下位層は、ロボット制御に必要な機械工学的、電気・電子工学的な処理を行うセンサやモータドライバ、アクチュエータ等のデバイスの制御、計測データ取得を行う層である。通信層は、上位層と下位層の通信を行う層である。下位層のセンサやモータドライバ、アクチュエータ等のデバイスの制御、計測データの取得は、実スケール建設ロボット、ミニスケール建設ロボット、シミュレーション建設ロボットで使用するデバイス、方法が全く異なるため、それぞれ独自に開発する必要がある。一方、上位層のロボットの経路計画や障害物回避、掘削、積載などのロボット制御は、実スケール建設ロボット、ミニスケール建設ロボット、シミュレーション建設ロボットで共通のモジュールを用いることで効率的な研究開発が可能なシステムアーキテクチャとする。このとき、上位層と下位層の入出力は、下位層で使用するデバイスによって異なる可能性がある。そこで、下位層の最上部と上位層の最下部に、入出力の単位、スケールを管理して、上位層と下位層で明示的に通信を行う通信モジュールを有する通信層を配置することで、実スケール建設ロボット、ミニスケール建

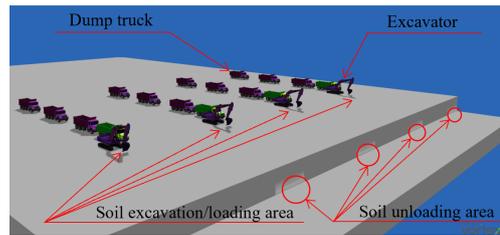


Fig.2 Simulation experiment environment

設ロボット、シミュレーション建設ロボットへの適用は、通信モジュールの変更のみで運用可能な構成を実現した。

具体的には、実環境で実スケール建設ロボット、ミニスケール建設ロボットを使用する場合、1台のロボットにつき、1台のメインコンピュータで構成する。シミュレーション環境でシミュレーション建設ロボットを使用する場合、1台のロボットにつき、1台のメインコンピュータとn台のロボットのメインコンピュータを接続する1台の物理シミュレーションコンピュータで構成する。そのため、図1に示すシステムアーキテクチャのオレンジ枠のうち、上位層のロボット制御モジュール、通信層最上部の通信モジュールを各ロボットのメインコンピュータに実装する。n台のロボットの通信層最下部の通信モジュール、下位層の計測モジュール、アクチュエータモジュールは、1台の物理シミュレーションコンピュータに実装する。

3 シミュレーション実験

3.1 シミュレーション実験の概要

本節では、シミュレーション実験の概要について説明をする。シミュレーション実験では、提案するシステムアーキテクチャを用いて、シミュレーション環境で複数異種の建設ロボットによる協働作業を行い、リアルタイム性の検証、ならびに、提案するシステムアーキテクチャの適用可能性を評価する。そこで、対象とする協働作業を掘削、積載エリアでの土砂の掘削、積載、放土エリアへの土砂の運搬、放土エリアでの放土のタスクとした。シミュレーション実験の環境を図2に示す。土砂の掘削、積載、運搬、放土のタスクにおいて、土砂を掘削、積載するショベルを1台、土砂を運搬、放土するダンプトラックを4台の計5台を1チームとして、合計4チーム、20台で検証した。

システムアーキテクチャは、図3に示す上位層、通信層、下位層の3層構造として、上位層では、ロボットミドルウェアのROS 2 (Robot Operating System 2) を用いる。このとき、上位層の制御コンピュータは、1台のコンピュータでCPU (Central Processing Unit)、メモリ、ネットワークの容量は十分であったため、1台のコンピュータで20台の建設ロボットを制御、下位層との通信をする。すなわち、1台のロボット制御コンピュータに、20台分の建設ロボットのソフトウェアを動作させ、20台分のロボット制御コンピュータを仮想的に再現した。下位層では、土砂特性を考慮した物理シミュレーションのCM Labs社製のVortex studioを用いてGPU (Graphics Processing Unit) 搭載の1台のコンピュータで20台の建設ロボットや土砂の物理演算

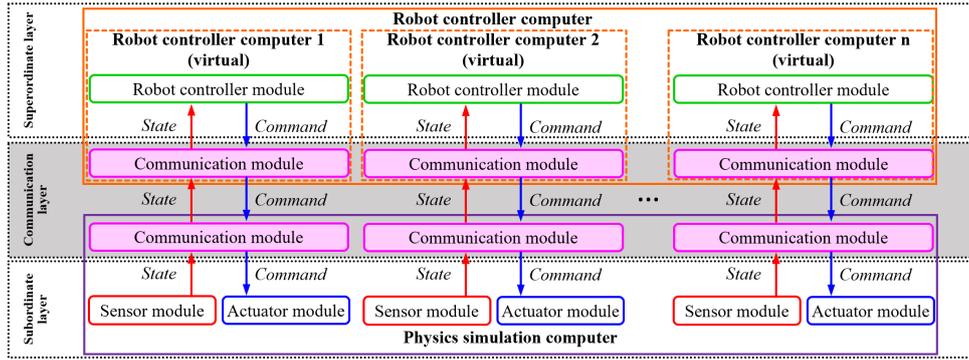


Fig.3 Overview of the system architecture of the simulation experiment

に関する処理, 映像描画に関する処理, 上位層との通信をする。上位層と下位層の制御周期は, 60 Hz とする。シミュレーション実験で使ったコンピュータの仕様を表 1 に示す。

通信層では, UDP (User Datagram Protocol) 通信を用いて上位層と下位層で通信をする。上位層から下位層への通信について, ショベルは, ボディ, ブーム, アーム, バケットの関節角速度の指令値を送信する。ダンプトラックは, ホイール, ステアリング, ベッセルの角速度の指令値を送信する。下位層から上位層への通信について, ショベルは, ボディ, ブーム, アーム, バケットの関節角度, バケットの土砂質量の状態値を送信する。ダンプトラックは, ホイール, ステアリング, ベッセルの角度, 本体の位置, 姿勢, ベッセルの土砂質量の状態値を送信する。

3.2 土砂の掘削, 積載, 運搬のアルゴリズム

本節では, シミュレーション実験で使用する土砂運搬アルゴリズムについて説明する。ショベル, ダンプトラックの役割について, チーム内での役割は, 基本的に, ショベル, ダンプトラックは, 自身の状態以外は未知で, 各ロボット間で通信しない自律分散モードに設定した。ただし, 土砂の掘削, 積載の協調作業が必要な場合のみ中央集権モードに切り替わる構成とした。土砂の掘削, 積載時の中央集権モードでは, チームを管理する役割をショベル, ショベルに従う役割をダンプトラックとする。ダンプトラックは, 基本的に自律分散モードで位置に基づいた移動, 停止, 放土のみを行うが, ショベルから掘削エリアと呼ばれ, かつ, ショベルに最も近いダンプトラックのみが, ショベルに従う中央集権モードに切り替わる。ショベルが土砂を規定回数積載した場合, ショベルからダンプトラックに積載完了の指令が送られ, ダンプトラックは再び自律分散モードに切り替わり, 移動, 停止, 放土を繰り返し行う。

ショベルでの土砂の掘削, 積載については, 土砂を自動で掘削, ダンプトラックに積載するため, 状態遷移によるアルゴリズムを用いる。土砂掘削積載アルゴリズムは, 初期姿勢, 掘削動作, 旋回動作, 積載動作の 4 つの状態構成とした。初期姿勢は, 土砂掘削前と土砂積載後の基準となる姿勢である。掘削動作は, 初期姿勢から土にバケットを挿入する動作, 土砂に挿入したバケットをショベルの奥側から手前側に引き寄せる動作, 土砂をバケットですくい持ち上げる動作である。旋回動作は, ショベルのボディを旋回させ, ダンプトラック荷台の上部にバケットを移動させる動作である。積載動作は, バケットを動作させ, ダンプトラック荷台に土砂を積載する動作である。これら 4 つの状態を順番に遷移して, ダンプトラックへの積載動作が終了した場合, 初期姿勢に遷移することで, 繰り返し, 土砂の掘削積載作業を想定したシミュレーションを行った。また, 各状態では, ボディ, ブーム, アーム, バケットの関節角度を基準に, 目標角度と現在角度を比較して, 各関節を制御する。

3.3 結果・考察

実験結果を図 4 に示す。図 4 (a) のグラフは, シミュレーション開始から各チーム 4 台目のダンプトラックに土砂を積載完了するまでの大域的な区間の物理演算に関する処理の 1 フレームあたりの処理時間を表す。図 4 (b) のグラフは, 大域的な区間の映像描画に関する処理の 1 フレームあたりの処理時間を表す。全てのグラフの横軸は時間, 縦軸は 1 フレームあたりの処理時間を表

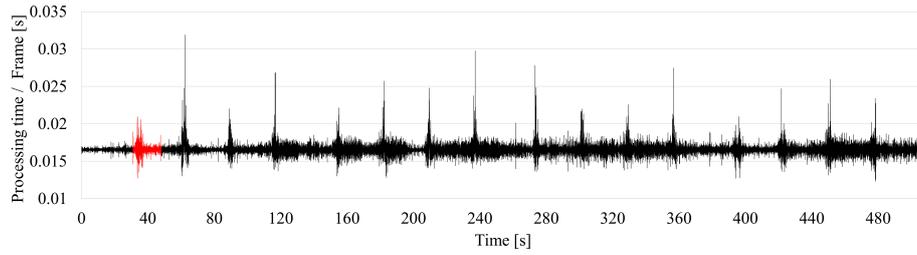
Table 1 Computer Specifications

Robot control computer	
OS	Ubuntu 20.04
CPU	Intel Core i7-1185G7
GPU	Intel Iris Xe Graphics
Memory	16 GB (16GB × 1)
Application/Middleware	ROS 2 Foxy
Physics simulation computer	
OS	Windows 11
CPU	Intel Core i9-11900K
GPU	NVIDIA GeForce RTX 3080
Memory	64 GB (16GB × 4)
Physics simulation	Vortex studio 2022.10

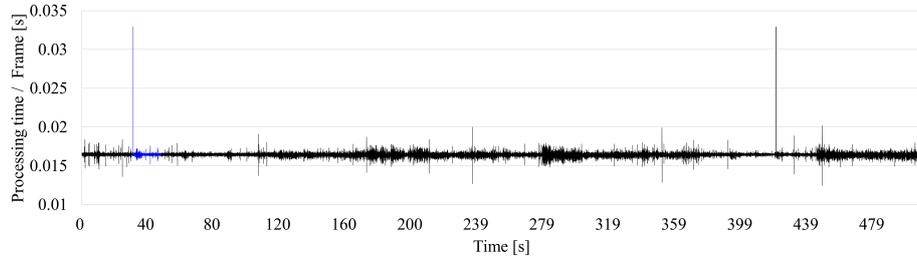
す。図 4 (a), (b) の赤線, 青線部分は, ショベルによる 1 回目土砂掘削, 旋回, ダンプトラックへの土砂積載をしているときの極所的な区間の 1 フレームの処理時間を表している。図 4 (c), (d) は, 図 4 (a), (b) の赤線, 青線部分の横軸, 縦軸のスケールを変更し, 拡大したグラフを表している。図 4 (c), (d) のグラフの緑ハイライト, グレーハイライト, 青ハイライトの区間は, それぞれ, 土砂掘削, 旋回, 土砂積載をしているときの区間を表している。

これらの実験結果から, 図 4 (a) の大域的な区間の物理演算に関する処理の 1 フレームあたりの平均処理時間は, 0.0166 s, 図 4 (c) の赤線の土砂掘削, 旋回, 土砂積載の極所的な区間の 1 フレームあたりの平均処理時間は, 0.0166 s, 緑ハイライト区間の土砂掘削の 1 フレームあたりの平均処理時間は, 0.0166 s, グレーハイライト区間の旋回の 1 フレームあたりの平均処理時間は, 0.0165 s, 青ハイライト区間の土砂積載の 1 フレームあたりの平均処理時間は, 0.0165 s となった。また, 図 4 (b) の大域的な区間の映像描画に関する処理の 1 フレームあたりの平均処理時間は, 0.0164 s, 図 4 (d) の青線の土砂掘削, 旋回, 土砂積載の極所的な区間の 1 フレームあたりの平均処理時間は, 0.0165 s, 緑ハイライト区間の土砂掘削の 1 フレームあたりの平均処理時間は, 0.0165 s, グレーハイライト区間の旋回の 1 フレームあたりの平均処理時間は, 0.0165 s, 青ハイライト区間の土砂積載の 1 フレームあたりの平均処理時間は, 0.0165 s となった。

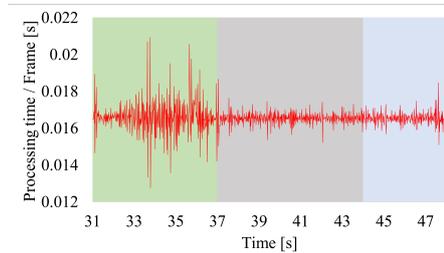
実験の考察について, 図 4 (c) の緑ハイライト区間の土砂掘削時に, リアルタイムよりも遅い処理が生じたフレームを確認した。その結果, 物理演算を行い, 映像描画に必要なシミュレーションデータの生成に要する処理の中で, 物理演算の処理時間が増加していることが確認された。具体的には, リアルタイムよりも遅い処理が生じたフレームとその前後 5 フレームを比較したところ, 物理演算の処理時間が 25 % 増加していた。これは, 掘削時に土中でバケットと土砂が定期的に接触し, 計算コストが増加したためであると考えられる。また, リアルタイムよりも遅い処理が生



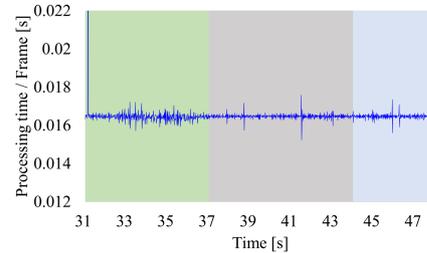
(a) Processing time related to physical calculation



(b) Processing time related to image rendering



(c) Processing time related to physical calculation during the first excavation, turning, and loading



(d) Processing time related to image rendering during the first excavation, turning, and loading

Fig.4 Processing time in the simulation experiment

じたフレームの1つ次のフレームを確認した。その結果、リアルタイムよりも遅い処理が生じたフレームの処理時間が0.0207 sに対して、1つ次のフレームの処理時間が0.0133 sであることが確認された。一方、物理演算の処理時間は、リアルタイムよりも遅い処理が生じたフレームと1つ次のフレームを比較したところ18%減少しているものの、リアルタイムよりも遅い処理が生じたフレームの前後5フレームとは有意な差が見られなかった。これは、リアルタイムよりも遅い処理が生じたフレームの1つ次のフレームでは、物理演算以外のところで最適化が行われ、映像描画に必要なシミュレーションデータの生成に要する処理全体でリアルタイム性を補償しているものと考えられる。

これらの実験結果、考察から、リアルタイムよりも遅い処理が瞬間的に生じるものの、シミュレーション開始から各チーム4台目のダンプトラックに土砂を積載完了するまでの大域的な区間、土砂掘削、旋回、積載の極所的な区間のどちらの場合でも平均処理時間は、リアルタイム性を満たしていることを確認した。したがって、20台のシミュレーション建設ロボットで、4箇所の土砂掘削、積載、土砂放土が行われる土工環境においては、提案するシステムアーキテクチャが適用可能であることを確認した。

4 結論

本研究では、土工環境における複数異種の建設ロボット運用のためのシステムアーキテクチャを提案した。提案したシステムアーキテクチャは、ロボットの構成要素に基づいた上位層、通信層、下位層の3層構造からなり、シミュレーション環境において適用可能性を有する。さらに、提案するアーキテクチャを実世界により近いシミュレーション環境で評価した。その結果、20台のシミュレーション建設ロボット、4箇所の土砂掘削、積載、土砂放土が行われる土工環境において、リアルタイム性を満たし、

提案するシステムアーキテクチャが適用可能であることを確認した。今後の展望として、シミュレーション建設ロボットの台数、土砂掘削、積載、土砂放土のエリア数を増加させ、適用範囲を明らかにして、ミニスケール建設ロボット、実スケール建設ロボットへの展開を行う。

謝辞

本研究は、JST【ムーンショット型研究開発事業】グラント番号【JPMJMS2032】、JSPS 科研費 20K14801 の支援を受けた。

参考文献

- [1] Keiji Nagatani, Masato Abe, Koichi Osuka, Pang-jo Chun, Takayuki Okatani, Mayuko Nishio, Shota Chikushi, Takamitsu Matsubara, Yusuke Ikemoto and Hajime Asama. "Innovative technologies for infrastructure construction and maintenance through collaborative robots based on an open design approach," *Advanced Robotics*, vol. 35, no. 11, pp. 715-722, 2021.
- [2] 日本機械学会, ロボティクス. pp. 7-10, 丸善出版, 2011.
- [3] Osher Azulay and Amir Shapiro, "Wheel Loader Scooping Controller Using Deep Reinforcement Learning," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 24145-24154, 2021.
- [4] Ilya Kurinov, Grzegorz Orzechowski, Perttu Hämäläinen and Aki Mikkola, "Automated Excavator Based on Reinforcement Learning and Multibody System Dynamics," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 213998-214006, 2020.
- [5] Jimmy Wu, Xingyuan Sun, Andy Zeng, Shuran Song, Szymon Rusinkiewicz and Thomas Funkhouser, "Spatial Intention Maps for Multi-Agent Mobile Manipulation," *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 8749-8756, 2021.