

多様なロボット建機の動作計画共通化インタフェースの開発

Development of Interface for Commonized Motion Planning of Various Robot Construction Machines

九州大学大学院工学研究院附属アジア防災研究センター 准教授 谷口 寿俊

（研究計画ないし研究手法の概略）

建設機械の分野では、災害復旧現場における安全性の向上や労働人口減少への対策として、建設機械のロボット化が進められてきた。今後、DX（デジタル・トランスフォーメーション）の推進に伴い、建設機械の自律化（無人化・遠隔化）が本格化するとともに、従来の建機の枠に囚われない革新的なロボット建機が登場し、多様化することが予想される。一方、ロボットの基本動作は、そのハードウェアの機構と性能に依存しており各ロボットによって異なることから、同様の土木作業を自律動作で実施する場合においても、ロボット毎に異なる動作計画を定義する必要がある。この場合、複数のハードウェア機構の異なるロボット建機を用いて単一の土木施工を協働的に実施させようとする、その動作系を定義することは極めて複雑になることが予想される。

そこで、本研究では、複数の異なるハードウェア機構を持ち自律動作するロボット建機に対して、そのハードウェア毎の差を吸収し、共通の計画で同様の土木作業の実行を可能とする動作定義インタフェースを開発した。また、開発したインタフェースを用いてレトロフィット機構により遠隔化した既存の建機群を操作し土砂運搬実験を行うことで、その有効性と性能を定量的に評価した。

（実験調査によって得られた新しい知見）

1. 行動要素によるタスク構築の定義

既往研究では、ある尺度で定めた行動を適切に組み合わせて実行することで、一連のタスクを定義し制御できることを示す検討が多数提案されている。実際、動作に該当する要素を順番に並べていくことで、シーケンス制御のような挙動を得ることができる。しかし、異なる仕様で開発された複数の建設機械の協働的な制御を考慮する場合、ハードウェアとソフトウェアの双方で行動を共通化することは、実装上困難である。また、行動や動作をどの程度の粒度で分割すれば良いかは、タスクの内容によって決まることが多い。そこで、本研究では、以下の3つの要素を定義し、その組み合わせによってタスクを構築するものとした。

① 構成要素：Component

実際のハードウェアや設計仕様、制御等の実装に関する要素であり、各建設重機で独立した設計を有することから、共通化することが難しい要素である。

② 行動要素：Action

Component 要素を最小の分解動作として捉え、複数の Component 要素を組み合わせることで行動を定義する要素である。どのように Component 要素を組み合わせるかはプロジェクトや設計者の裁量とする。また、行動や操作に対して、どの粒度までを

一文脈として解釈するかも設計者の裁量で決定するものとする。

③ 目標要素：Task

Action 要素を最小単位として設定された目標を達成するための手順を表す要素である。

このとき、行動要素の分け方は共通化できないが、行動要素を組み合わせることでタスクの構築は可能である。ここでは、最低限の入出力ルールを設け、タスクの組み合わせ方法を共通化する。図 1 にその概念図を示す。入出力ルールは次のとおりとした。まず、Action が実行されるために、特定の開始条件を全て満たす、または一部を満たす必要がある、それらはタスク計画時に指定される必要があることから、開始条件 (AND, OR) が揃ったときに Action を開始する。これにより、どのタイミングで Action を実行するか管理が可能となる。次に、Action 実行後に終了条件が満たされた場合、次に接続された Action に終了状態を伝達する。終了条件が満たされない場合は、Action は継続するものとする。

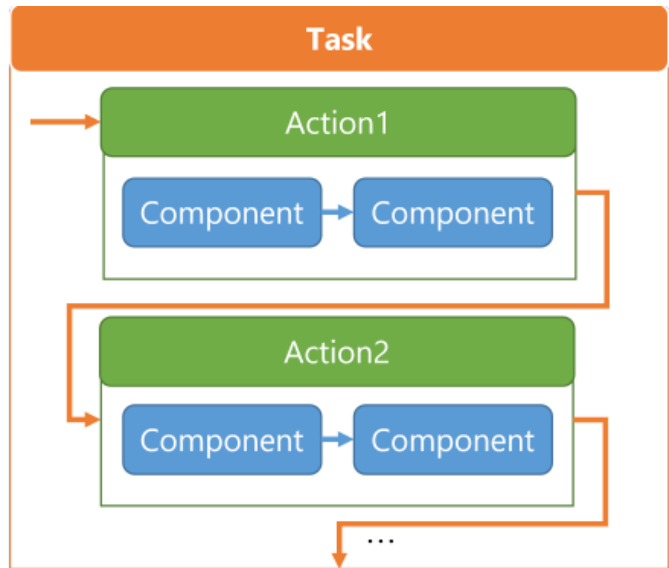


図 1：タスク構築の概念図

2. 共通インタフェース「Task Planner」の開発

入出力関係を明確に定義することで、システム設計や機能拡張が容易になる他、タスク実行時に現在実行されている Action がどの Action と接続されているか明確となり、保守作業にかかる時間を短縮できる。この構築関係を分かりやすくするために、Web ベースで動作する Task Planner を開発した。Action は図 2 に示すノードとして表し、それぞれの接続方法によって、入出力ルールが表現される。

Task Planner によって作成したタスク計画例を図 3 に示す。ノードの左側は開始条件を表し、5つの入力端子を持つ。ノードの右側は終了条件を表し、終了状態に応じた端子から出力される。同じ入力端子に出力端子が複数接続されている場合は、OR 条件となり、異なる入力端子にそれぞれ出力端子が接続されている場合は、AND 条件となる。出力端子から実際に出されるかは、Action の実行後の結果によって振り分けられる。デフォルト設定では、正常終了は OK、異常終了は NG と定義する。ノードには、

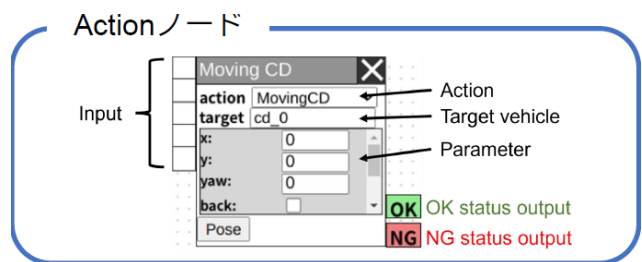


図 2：Task Planner の Action ノード

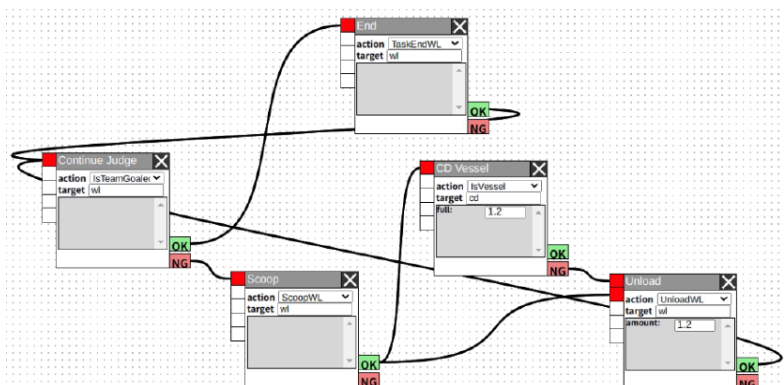


図 3：Task Planner によるタスク計画

Action の名前, 実行される建機名と Action を実行するときの設定パラメータをそれぞれ入力する事ができ, 微調整することができる. 本システムは, ROS (Robot Operating System) を用いて実装を行った. ROS では, 1つのプロセスを ROS Node として, ノード間のデータのやり取りを Topic として取り扱う. 実装上では, Action は ROS Node に, Component はプロセス内の処理に該当する. そのため, Action の内容は自由であり, Task Planner で設定したノード間のやり取り以外である ROS Node 同士の通信も許容することができる. そのため, 建設機械の制御だけではなく, 動的協働等のより上位のアルゴリズムを同時に実行することが可能である.

3. Task Planner を用いた複数建設機械群の自動制御による土砂運搬実験

開発した共通インターフェースの有効性を確認するために, 既存の建設機械にレトロフィット機構を搭載し, それらの機構を Task Planner で同時に遠隔制御することで, 複数台レトロフィット建機による土砂運搬実験を行った. 実験は, 九州大学伊都キャンパスに屋外実験フィールドを構築して実施した. 実験に使用した自動化建機群と作成した土砂運搬タスク計画を **図 4** に示す. 建設機械には, ホイールローダ (KOMATSU WA30), バックホウ (HITACHI ZX30U) とクローラダンプ (IHI IC35, Yammer C30R) を使用した. ホイールローダとクローラダンプにはレトロフィット機構を搭載し, バックホウは ICT 建機用の専用コントローラを用いて無線による遠隔操作を行った. また, 3D LIDAR を使用し, 点群データから自動施工に必要な各建機の位置推定情報と障害物マップを生成することで, 自動化建機がこれらの情報のもとに経路生成および経路追従できるよう別途アルゴリズムを実装した. 土砂運搬では, ある土砂山に対して掘削を行って土砂を積み込み, 土捨場まで運搬して排土するという一連の作業を実施した.

掘削と積込は, ホイールローダとバックホウがそれぞれ担当し, 一つの土砂山に対してそれぞれ決められた場所から掘削と積込を自動で行う. 複数台のクローラダンプは, 掘削とタイミングを合わせながら衝突しないよう接近し, 土砂の積込を受けて土

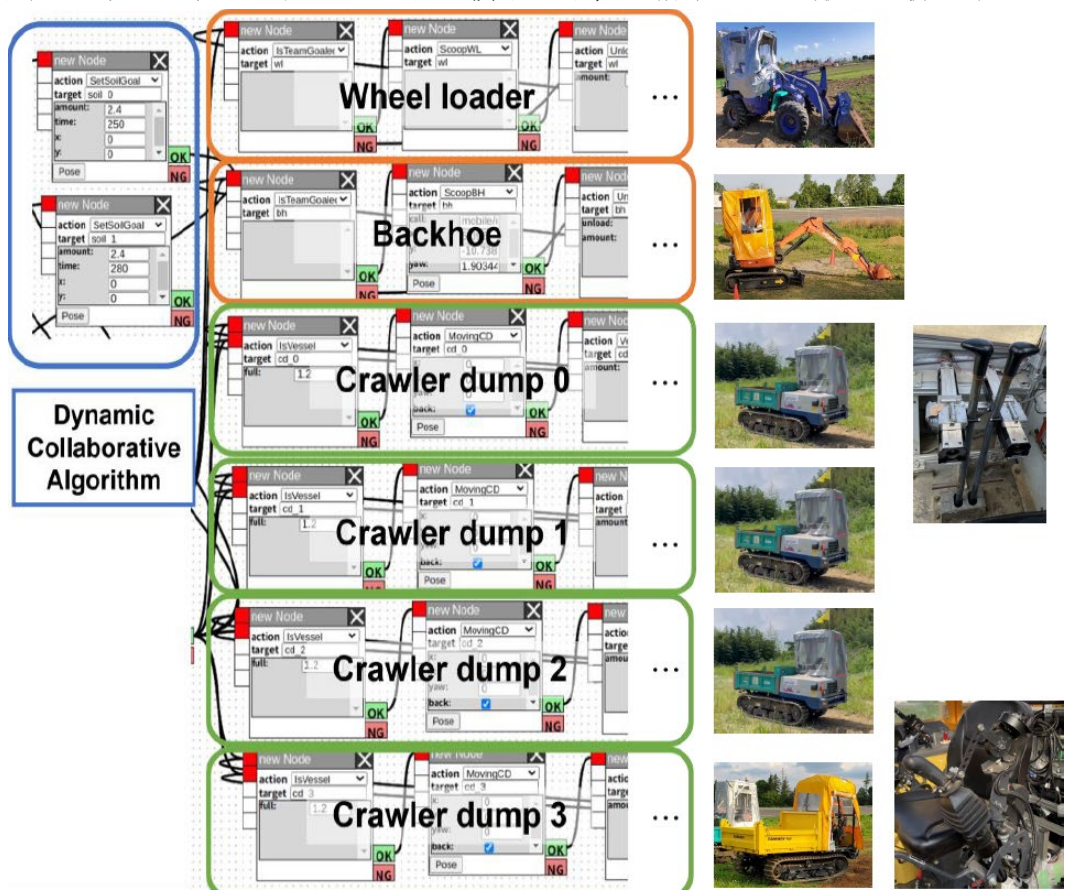


図 4 : 実験に使用した自動化建機群と土砂運搬タスク計画

捨て場への運搬、排土までを自動で行う。土砂運搬実験の様子を図5に示す。

実験では、土砂運搬の性能を確認するために、各Actionのサイクルタイムを計測して単位時間

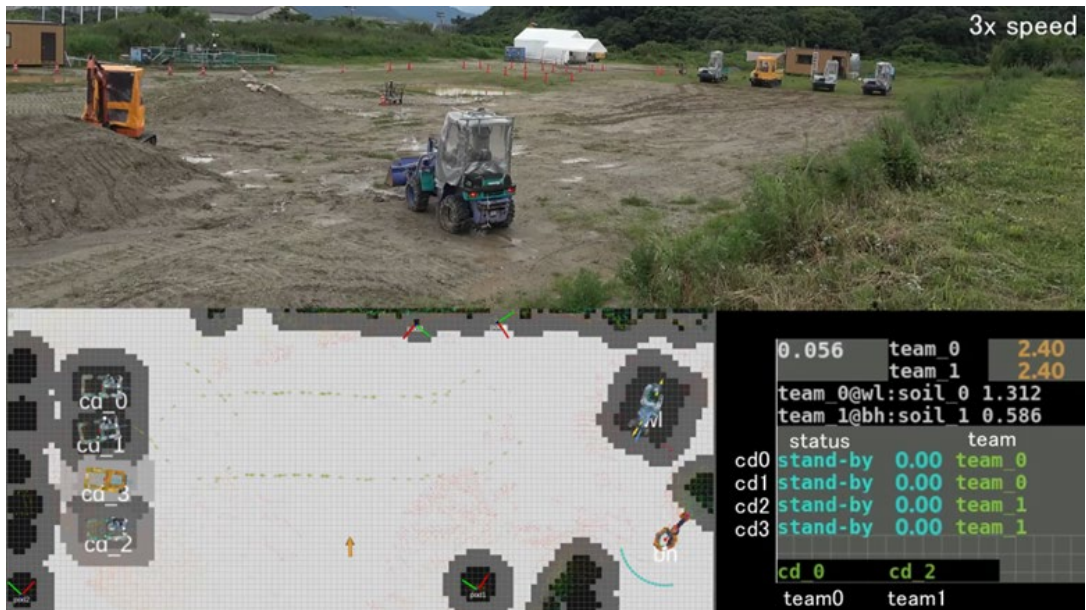


図5：実験に使用した自動化建機群と土砂運搬タスク計画

あたりの期待歩掛（処理土砂量）を算出した上で式(1)を用いて効率の指標化を行った。

$$Q_w = \frac{3600}{C_m \cdot W} \cdot q \cdot f \quad (1)$$

ここで、 C_m はActionのサイクルタイム（sec）、 W は建設機械の自重（ton）、 q はバケット容量（ m^3 ）、 f は土量換算係数、 Q_w は単位重量当たりの単位時間歩掛量を表す。本指標を用いて、人材オペレータ（初心者）による同様の土砂運搬作業と、共通インタフェースによる遠隔自動施工による土砂運搬との効率を比較した。結果として、人材オペレータの指標が2.2程度に対して、自動施工による指標は1.1~1.3程度と約50~60%の性能であることを確認できた。

結果として、施工効率は人材オペレータに及ばなかった一方、施工を無人かつ自動化することによって所謂「24時間365日」の稼働も実現不可能ではないことから、将来的には建設業界における喫緊の課題である労働力不足に資する成果を得られたと考える。特に、単一の汎用的なインタフェースを用いて機構の異なる実際の建設機械を同時に制御し、一連の施工を自動化できたことは自動化施工の実現と現場実装の促進に繋がる大きな成果であると考えられる。さらに、ROSをベースに開発した共通インタフェースを屋外で運用するにあたって、無線通信環境の構築が大きなボトルネックになる等の実装面の課題点も多数確認できた。

（発表論文）

稲川正浩，川辺知人，竹岡年延，末岡裕一郎，遠藤大輔，浅間一，永谷圭司，谷口寿俊，三谷泰浩：複数台レトロフィット建機を用いた土砂運搬デモンストレーション—動的協働アルゴリズムの適用—，第24回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会，2023.12.