

チーム編成アルゴリズムに基づいた群ロボットの分散協調による土砂運搬

東京大学 ○圓道 和奏, 筑紫 彰太,
名城大学 池本 有助,
東京大学 小松 廉, 永谷 圭司, 山下 淳, 浅間 一

1. 序論

昨今、ロボットの活躍は様々な場面で求められており、建設・施工現場においても、少子高齢化に伴う就業者の減少などに対処すべく、ロボット導入への期待が高まっている[1]. 特に土砂の運搬作業は、建設現場のみならず災害対応現場でも必要とされ、ロボットを導入して作業の自動化を行う意義は大きい. しかし、土砂運搬作業では複数のロボットが協調して作業することが求められており、さらに地盤変化や地中に障害物が埋まっていることなどによってロボット周囲の環境が動的に変化することも考えられるため、未だロボットの導入は実現されていない. したがって本研究では、建設機械の群ロボットが環境の動的変化に対して臨機応変に対応しながら土砂運搬を進められるような協調行動を生成することを目指としている.

群ロボット協調において本研究が注目する概念の1つに、自己組織化(Self-organization)がある. これは、「システムが、外部からの明示的な指令が無くてもその組織を変化させることができるメカニズム」として定義されており、システムが自己組織化されているために必要な特徴としては、分散制御の実現と動的な組織の変化が挙げられている[2]. こうした特徴は、まさに上で述べた環境変化に対してロバストな土砂運搬作業に必要なものであるため、分散制御によって動的なチーム編成を可能とするロボット制御手法の実現することが求められている.

自己組織化によって移動群ロボットの協調動作を実現している研究の例としては、Palmieri らがフィールド探索と危険物の除去を同時に進行する群ロボット協調問題に対して、フェロモンの概念を活用しながら確率的な状態遷移によって2つのタスクを選択するシステムを提案している. しかし、異なる環境ごとにタスク選択の重み付けを調整しなければならず、動的に変化する環境に対しては有効でない[3].

以上を踏まえ、本研究の目的は、自己組織化を実現するための自律分散協調アルゴリズムを提案することとする. 本報では、この目的を達成するための準備段階として、パフォーマンス予測に基づく動的チーム編成アルゴリズムを提案し、その有効性を検証する.

2. パフォーマンス予測モデルに基づく分散協調アルゴリズム

2.1. 課題設定

本研究が対象とする土砂運搬作業は、Coordinator と称する自動掘削・積込ロボットと、Cooperator と称する自動運搬・排土ロボットがチームを形成して自律分散的に行う. ロボットに与えられるタスクは、一定期限内にすべての土砂山から捨て場へ土砂を運搬し終えることである.

この時、図1の概念図に示すように、1台のCoordinatorと複数台のCooperator からなるチームが、後述のパフォーマンス予測モデルに従ってチーム間でCooperator の移動を行いながら、タスク達成に必要な台数のCooperator を確保できるようになることを目指している.

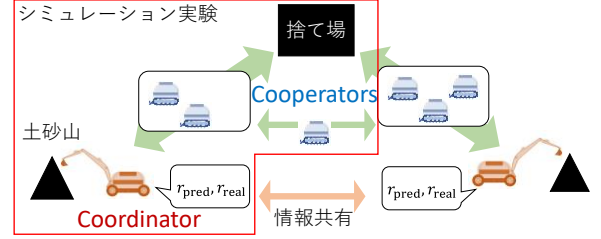


図1 提案手法の概念図

表1 変数一覧

変数	説明
n	Cooperator 台数
$S = 500 \text{ kg/min}$	Coordinator の土砂供給効率 [kg/min]
$D = 30000 \text{ m}$	山と捨て場の距離 [m]
$W = 2000 \text{ kg}$	最大積載量 [kg]
$V = 300 \text{ m/min}$	Cooperator 仕様走行速度 [m/min]
$T_{DL} = 900 \text{ min}$	作業終了期限 [min]
$v_{\text{real}} = 270 \text{ m/min}$	Cooperator 実走行速度 [m/min]
t	時間 [min]
ρ	Coordinator 稼働率
τ	r_{real} 更新間隔 [min]
$r_{\text{pred}}, r_{\text{real}}$	予測・実測パフォーマンス [kg/min]
$w_{\text{go}}^i(t), w_{\text{back}}^i(t)$	時刻 t に土砂山に到着した Cooperator i の出発時・到着時積載量 [kg]

この問題設定においては、各ロボットが得られる情報は限られているものと仮定している. 具体的には、Cooperator は自機に搭載されたセンサ類で観測できる情報のみ、Coordinator は自らが属するチーム内のロボットが共有する情報を観測する. ただし、チーム間での協調を可能とするため、Coordinator 同士は、各チームのパフォーマンスのみを共有しているものとする.

2.2. パフォーマンス予測モデル

本研究におけるパフォーマンスとは、チームが単位時間当たり運搬できる土砂の質量を指す. 本研究では、上述の環境変化にロバストな協調行動を実現するため、予測パフォーマンスと実測パフォーマンスという2つの指標を用いて、タスク遂行に適切なCooperator 台数を算出する.

予測パフォーマンスとは、Coordinator の稼働率をもとに算出されるチームのパフォーマンスであり、以下の式で表される.

$$r_{\text{pred}} = \rho S, \quad (1)$$

ここで ρ は稼働率、すなわち Coordinator の全作業時間のうち、土砂の積み込みを行っている時間の割合であり、

$$\rho = \frac{\frac{W}{S} \cdot n}{\frac{W}{S} + \frac{2D}{V}} = \frac{nSVW}{W + 2DS}, \quad (2)$$

と表される. また、 S は Coordinator が単位時間あたりに積み込む土砂量である. なお式中の各変数の意味は表1に示した.

一方で、実測パフォーマンスとは、ロボットのセンサによって実測された土砂量を用いて算出されるパフォーマンスであり、以下の式で表される。

$$r_{\text{real}} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^n \sum_{t=t-\tau}^t (w_{go}^i t - w_{back}^i t). \quad 3$$

実測パフォーマンスは、環境下で一定時間作業した実績がないと計算できないため、作業開始時には予測パフォーマンスを用いた上で、後に実測パフォーマンスが求められるようになった際に予測パフォーマンスを修正することにより、ロバストにパフォーマンスを把握することが可能となる。

本研究では、これら2つのパフォーマンスと作業環境の状態に基づいて、期限までにタスクを遂行可能な Coordinator の台数をチームごとに算出した上で、チーム間で必要台数の Coordinator の移動を行う手法を提案する。

3. シミュレーション実験の方法

前節で提案した手法の有用性を検証するため、MATLAB によるシミュレーションを行った。ここでは問題を簡単にするため、図1の赤枠で示した部分のシミュレーションを行うこととし、Coordinator は1台のみでチームも1つのみとした。またチーム内の Coordinator の数は、作業前の予測パフォーマンスによってタスク遂行が可能とされる7台とし、これを最大20台までの範囲で変更できるものとした。これによりチーム間での Coordinator 移動を考慮せずとも、パフォーマンスに基づいたチーム編成のシミュレーションが可能となる。また、Coordinator が往復する距離は十分に長く、Coordinator が待機列を作ることはないものと仮定した。加えて、Coordinator は常に一定の効率 S で土砂を積み込むものと仮定した。また、予測パフォーマンスが把握できない環境状態を再現するため、Coordinator の実際の走行速度は仕様よりも遅く設定した。その他具体的なパラメータは表1に示した通りである。

シミュレーション条件は以下の2つとした

1. 実測パフォーマンスを用いて予測パフォーマンスを修正するが、Coordinator の台数は変更しない。
2. 実測パフォーマンスを用いて予測パフォーマンスを修正したうえで、タスクが $t = T_{DL}$ までに終了するように Coordinator の台数を随時変更。

4. シミュレーション結果

前章の条件でのシミュレーション結果を図2、図3に示す。

図2を見ると、 $t = 200$ 付近で青点線が出現しており、ここで実測パフォーマンスを求めるために必要な作業実績が得られたことがわかる。その直後に、青実線で示されている予測パフォーマンスが、実測パフォーマンスに近づいて修正された。しかし、Coordinator 台数が初期状態の4台のままで、タスク終了に約1600 min かかっており、期限を満たせていない。

一方図3では、 $t=0$ の時点で図2の場合よりも予測パフォーマンスが大きいことがわかる。これは、作業開始直後に、予測パフォーマンスに従って Coordinator の台数が増えたことを意味する。加えて、 $t = 400$ 付近でも予測パフォーマンスが増加しており、ここでも Coordinator の台数が増えている。これらのチーム編成変更により、作業時間がおおよそ700 min となり、期限内に収めることができた。

5. 結論

本報では、環境が変化しうる中での自動土砂運搬作業を実現するため、予測・実測パフォーマンスを用いてロボットチームの編成を変化させるアルゴリズムを提案した。シミュレーション実験により、提案した2種類のパフォーマンスによるチーム台数の変更手法は、期限までにタスクを終了させるために有効であることができた。

今後の展望としては、チーム数を複数にした場合での Coordinator 移動手法を検証した上で、再度シミュレーションによる有効性検証を行うほか、パフォーマンス予測モデルの制度向上、Coordinator がチーム内に複数台いる場合のアルゴリズム検討等に取り組む予定である。

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】の支援を受けたものです。

参考文献

- [1] 国土交通省: “建設施工・建設機械: 建設ロボット技術に関する懇談会”, https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_tk_000027.html, 2012, 閲覧日: 2021年7月6日.
- [2] G. D. M. Serugendo, M. P. Gleizes, and A. Karageorgos: “Self-Organization in Multi-Agent Systems”, The Knowledge Engineering Review, Vol. 20, No. 2, pp. 165–189, 2005.
- [3] N. Palmieri, X. Yang, F. D. Rango, and A. F. Santamaria: “Self-Adaptive Decision-Making Mechanisms to Balance the Execution of Multiple Tasks for a Multi-Robots Team”, Neurocomputing, Vol. 306, pp. 17–36, 2018.

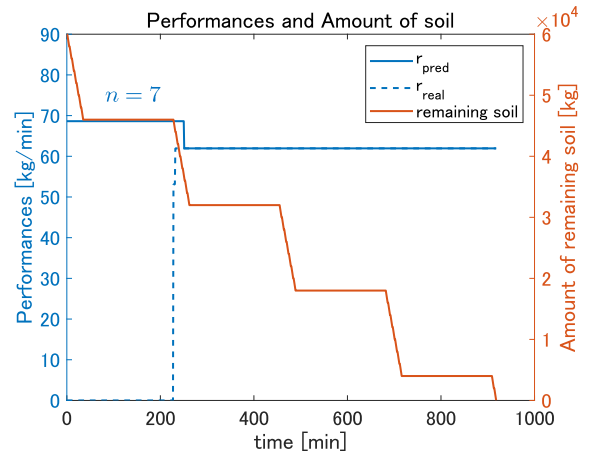


図2 条件1でのシミュレーション結果

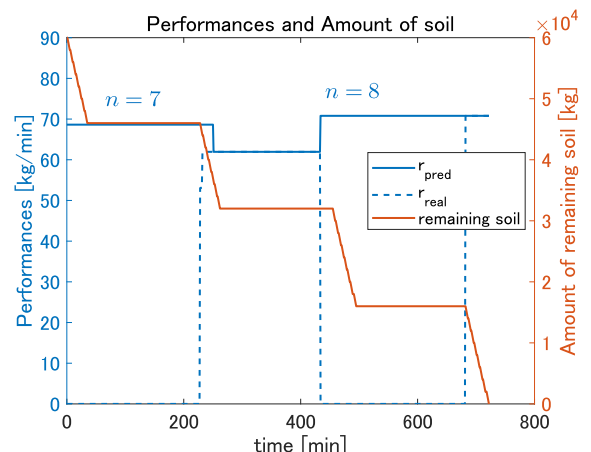


図3 条件2でのシミュレーション結果