

積込待機時間中の準備作業を考慮した 油圧ショベルの掘削動作計画

Digging Motion Planning for Excavators Considering Preparation Work during Loading Waiting Time

松田 恭岳¹ 谷島 諒丞¹ 王 永東¹ ルイ笠原 純ユネス¹
安 琪¹ 山下 淳¹ 永谷 圭司²

Yasutake Matsuta¹, Ryosuke Yajima¹, Yongdong Wang¹, Jun Younes Louhi Kasahara¹,
Qi An¹, Atsushi Yamashita¹, and Keiji Nagatani²

¹ 東京大学

¹The University of Tokyo

² 筑波大学

² University of Tsukuba

Abstract: Research on automation of the excavation and loading of soil using hydraulic excavators has been conducted to improve the productivity of the earthworks. Excavators cannot perform loading operations while a dump truck is not at the loading point. It is expected that the construction period will be shortened by utilizing this waiting time to carry out preparatory work. However, there has been no research into automating excavation work that takes preparatory work into account. An action planning method that considers moving the soil location and construction machinery location as preparatory work of excavators during the waiting time for loading is proposed. The locations for digging or dumping soil and the locations of construction machinery are selected based on an optimal solution of a scheduling problem for the soil placement problem. By using the proposed method, we achieved a reduction of the time required for excavation work.

1. 序論

建設業の生産性向上のため、建設機械（建機）の自動化の需要が高まっている。本研究では、油圧ショベル（ショベル）による掘削工事の自動化に着目する。工事現場では、コスト削減や人手不足解消のため、工事の所要時間短縮が求められている。掘削工事の所要時間に影響する要因として、土砂の運搬中など、ダンプトラック（ダンプ）が積込場所に不在時に発生する、ショベルでは土砂の積込ができない、積込待機時間の存在が考えられる。

これまでに、積込待機時間自体の短縮を図る研究は多くなされてきた[1][2]。一方で、積込待機時間にも、次回以降の積込作業のために、建機の立ち位置を変更する作業位置の移動や、土砂を移動させ積込みやすい場所に土砂を集めておく等の準備作業を行うことが可能であり、このような準備作業を行うことによる所要時間短縮の可能性が考えられる。作業位置の移動に関して、作業範囲を分割し経路探索を行うことで建機の総移動時間を最適化する研究は存在

するが[3]、この研究ではショベルの作業位置ごとに掘削を行う範囲が被らず、ある地点をどこから掘削すると良いかは分からない。一方で、準備作業として積込待機時間中に土砂の移動を行うことで、所要時間の短縮を図る研究はあるが[4]、この研究では土砂の移動方法をルールベースで探索しているため、工事手順は最適とはいえない。物体の移動という類似性では、待機時間における倉庫内の荷物の再配置問題が考えられる[5][6]。しかしながら、これらの研究は、1回の再配置のみに着目しており、作業全体での最適化は考えていない。また、コンテナの再配置問題の研究にも類似点が見られる[7]。この研究では再配置の回数で所要時間を計算しているが、土木工事では個々の準備作業の所要時間や積込待機時間の長さも所要時間に関係するため、準備作業の回数だけでは所要時間は求まらない。また、倉庫内の製品やコンテナの移動では搬出対象が受動的に指定されるが、掘削工事では、土砂の積込を行う積込作業時と、準備作業時は共に、どのように建機や土砂を移動させても良い。そのため、工事全体を通し、積込

作業と準備作業の内容やそのタイミングを考慮した計画が求められる。

そこで本研究は、掘削工事の所要時間を短縮するために、準備作業として土砂の移動とショベル作業位置の移動を考慮し、準備作業を含めた掘削工事全体の作業手順を最適化することを目的とする。本手法では、土木作業環境をグリッドセル化した環境で考え、掘削工事を、セル内の土砂ブロックを移動するブロックの配置問題とみなし、この配置問題をスケジューリング問題として解けるようにすることで、所要時間を最短にする土砂ブロックやショベル作業位置の移動順序を求める。

2. 提案手法

2.1 本研究のアプローチ

最適な土砂の移動順序やショベルの作業位置の移動順序を最適化するために、掘削工事をブロック配置問題のスケジューリング問題として解けるようにし、混合整数線形計画問題として定式化することを考える。ここでは、掘削工事をスケジューリング問題として取り扱うにあたり、倉庫の配置問題のような先行研究で扱う問題と、本研究で扱う問題の相違点と、それに対する本研究のアプローチを3点説明する。

1つ目は、準備作業の回数についてである。コンテナの再配置問題のような先行研究では、準備作業の回数を求めることが可能である[7]。一方で、ショベルで行う積込作業以外の準備作業は、本来どのタイミングでも、何度でも行うことが可能なため、準備作業の回数が定まらず、作業順序の探索数が膨大になる。そこで本手法では、ショベルが準備作業や積込作業をそれぞれ何回行うか作業の上限回数を設定し、作業のサイクルを設定することで効率的な探索を図る。

2つ目は、作業可能な時間についてである。倉庫内の再配置問題のような先行研究では、搬出など、ある作業が可能な時間帯は既知とされることが多い[5][6]。一方で掘削工事では、次に積込可能な時間は前回の運搬開始のタイミングにより決まり、事前には未知である。そのため、本手法では、ダンプが運搬開始後は次の積込が必ずダンプ到着後に開始されることを制約条件で表現することで、ある時刻に積込作業が可能かどうかを判定する。

3つ目は、作業位置と作業対象の対応についてである。建機の移動経路を探索する先行研究やコンテナの再配置問題のような先行研究では、保管場所など

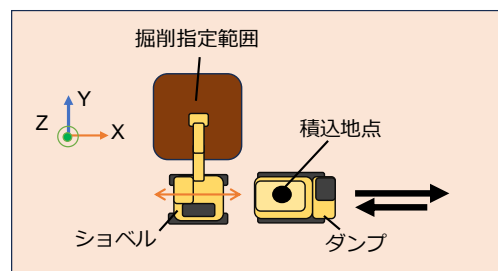


図1 掘削工事現場のイメージ

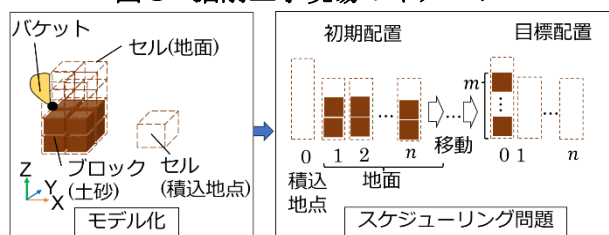


図2 提案手法のイメージ

の作業対象に対する、搬出機などの作業位置は基本的に1つである[3] [7]。一方で掘削工事では、ある掘削・放土地点に対し作業位置が複数考えられ、逆にある作業位置からは複数の地点を掘削・放土できることから、作業対象と作業位置が重複する状況が考えられる。そこで本研究では、ショベルの作業位置を導入し、各作業位置で掘削可能な範囲を考えることで、どのような作業位置で、どの作業を行えばよいかを考える。

2.2 問題設定

図1に示すように、1組のショベルとダンプで指定した範囲（掘削指定範囲）の掘削工事を行う場面を考える。地面に平行な平面を XY 平面とし、鉛直上向きに Z 軸を設定する。ショベルは、 X 軸方向の直線軌道上の作業位置の移動を行うこと、もしくは、現在の作業位置から動かずに、土砂の掘削や放土・積込を行うことが可能である。また、ショベルに対して指定した位置に到着するダンプに土砂の積込を行う。ダンプへの土砂積込量が一定量に達するたびに運搬が行われ、土砂の積込ができない、一定時間の積込待機時間が発生する。掘削工事の開始から完了までの時間を全体所要時間とする。

本手法では、掘削工事環境に対して、図2左のように指定したサイズでグリッドセル化し、土砂をセルが保有するブロックとして表現した環境を使用する。掘削指定範囲を基に地面のセルを設定し、積込地点は1つのセルとして扱う。土砂の掘削は対象とするセルからのブロックの削除、放土・積込はセルへのブロックの追加と表現する。また、ショベルの作業位置の候補を、地面のグリッドセル幅と同じ間隔で離散的に設定する。

2.3 作業順序の探索

2.3.1 概要

2.1節で述べたように、掘削工事をブロック配置問題のスケジューリング問題として取り扱う。ここでは、土砂ブロックの配置を入力として、全体所要時間が最短となる時の土砂ブロックの移動順序やショベルの作業位置の移動順序を出力として得る。

2.3.2 対象とするスケジューリング問題

本手法中では、積込地点のセル1個、地面のセル n 個に対し、セル番号 i, j を設定する。ここで、セル0を積込地点とする。ショベルが移動可能な作業位置の集合を $\mathbf{K}$ とする。積込地点のセルは積込のみが可能なセルとし、この集合を $\mathbf{D}$ とする。ショベル座標系上での、地面として掘削可能な位置のセルの集合を $\mathbf{I}$ とする。地面のセルと積込地点のセルを合わせた集合を、放土・積込可能な位置のセルの集合として $\mathbf{J}(\mathbf{J}=\mathbf{I} \cup \mathbf{D})$ と表す。

掘削工事では、図2右のように、初期配置で掘削指定範囲内にある m 個のブロックを、積込地点のセルに全て移動する。ここで、積込作業を地面のセルから積込地点のセルへのブロックの移動、準備作業を地面のセル間のブロックの移動、建機移動をショベルの作業位置の移動と定義する。掘削工事は、図3に示すように、 t_{load} 回の建機移動と積込作業、 t_{prep} 回の建機移動と準備作業を繰り返す、合計で t_{last} 回の作業が行われるとし、作業の順番を t とする。ここでは、アプローチの1つ目に関して、積込待機時間中に行う作業の最大回数を事前に設定することで、探索の効率化を図っている。また、アプローチの2つ目に関して、 t_{load} 回目の積込作業が完了後は、ダンプが運搬に出発し、積込待機時間 T_{interval} [s]間は積込不可な状況を設定する。ただし、作業位置の移動や土砂の掘削などは可能とし、待機状態も可能とする。

2.3.3 作業時間の予測

1回の積込作業・準備作業にかかる時間を、掘削や放土が行われる、ショベルのバケット位置の移動にかかる時間と、対象地点での掘削・放土・積込動作にかかる時間の和として計算する。バケットの移動時間は、バケットの移動量を平均移動速度で除した値を使用し、掘削・放土・積込動作にかかる時間は一定とする。同様に、1回の建機移動にかかる時間を、ショベルの移動量を平均移動速度で除した値を基に計算する。これらの予測時間は、ショベルの各作業位置、各セルの全ての組み合わせに対して事

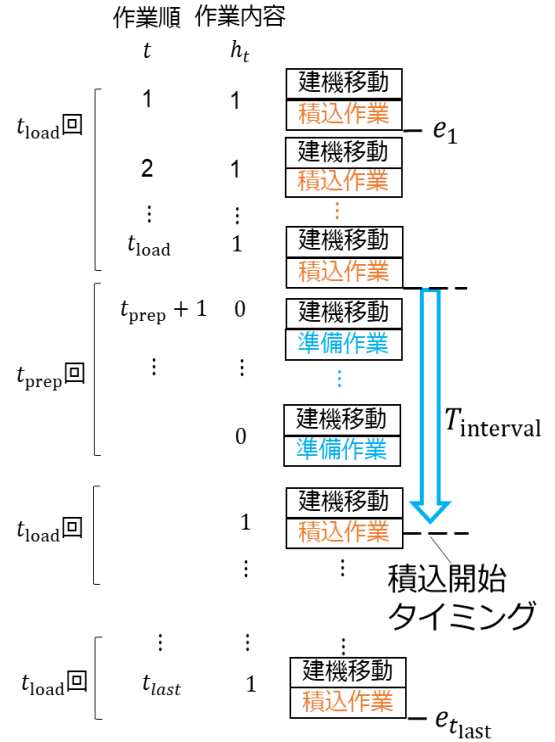


図3 掘削工事の作業順

前に計算する。なお、ここでは、同じ地点に土砂や作業位置を移動する場合も考慮し、作業にかかる時間を0sに設定する。このような場合は、実際には土砂の移動や作業位置の移動を行わず、すぐ次の作業に移る場合や待機状態をとる場合に相当する。

2.3.4 問題の数式的表現

ここで、 t 回目の作業内容に関するショベルの動きを、ショベルの作業位置の移動、作業位置の移動後から掘削セルへのバケットの移動、掘削セルへのバケット移動後から放土・積込セルに土砂ブロックを移動完了するまでのブロック移動の3つに分けて表現する。

$x_{t,k,i,j}$ をブロック移動 $\mathbf{x}_t(x_{t,k,i,j} \in \mathbf{x}_t)$ として、ショベルが位置 $k(k \in \mathbf{K})$ で、ブロックをセル i からセル j に移動する場合で1、それ以外で0をとる0-1変数として設定する。なお、 $i=j$ の場合は、実際にはブロックの位置は移動しないことに注意する。ここでは、積込作業と準備作業が共にあるセルからセルへブロックを移動することから、1つの表現にまとめて扱えるようにした。またアプローチの3つ目に関して、作業位置の情報 k を使用しどの作業位置で作業を行うのが良いかを考慮する。 $y_{t,j,i}$ を、ブロック移動 $\mathbf{x}_t$ で掘削するセルにバケットを動かすバケット移動 $\mathbf{y}_t(y_{t,j,i} \in \mathbf{y}_t)$ とし

て、バケットをセル j からセル i に移動する場合1、それ以外で0をとる0-1変数とする。 $w_{t,k,l}$ を、建機移動 $w_t(w_{t,k,l} \in w_t)$ として、ショベルが位置 k から位置 l に移動する場合1、それ以外で0をとる0-1変数とする。 e_t , s_t は、それぞれ t 番目の作業の開始時刻、完了時刻を表す変数とする。

掘削工事を表現するスケジューリング問題の制約条件および目的関数に関して、式(1)から式(6)に示すような混合整数線形計画問題に定式化する。

minimize $e_{t_{\text{last}}}$, (1)
subject to

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{t,k,i,j} = 1 \quad (\forall t \in \{1, 2, \dots, t_{\text{last}}\}), (2)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} x_{t,k,i,0} = h_t \quad (\forall t \in \{1, 2, \dots, t_{\text{last}}\}), (3)$$

$$e_t = s_t + \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} p_{k,i,j} x_{t,k,i,j} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} q_{j,i} y_{t,j,i} + \sum_{k \in K} \sum_{l \in K} r_{k,l} w_{t,k,l} \quad (\forall t \in \{1, 2, \dots, t_{\text{last}}\}), (4)$$

$$e_t \leq s_{t+1} \quad (\forall t \in \{1, 2, \dots, t_{\text{last}} - 1\}), (5)$$

$$e_t + (h_t - h_{t+1}) \times T_{\text{interval}} \leq e_{t+t_{\text{prep}}+1} - T_{\text{load}} \quad (\forall t \in \{1, 2, \dots, t_{\text{last}} - t_{\text{prep}} - 1\}). (6)$$

ここで、 h_t は、ブロック移動 x_t が積込作業の場合1、準備作業の場合0をとる既知の定数である。 $p_{k,i,j}$ はショベルが位置 k で、ショベル座標系上のセル i で土砂ブロックを掘削し、セル j に放土するのにかかる時間、 $q_{j,i}$ はショベルに対してセル j からセル i へバケットを移動させるのにかかる時間、 $r_{k,l}$ は地面に対して位置 k から位置 l へショベルが移動するのにかかる時間、 T_{interval} は積込待機時間の長さ、 T_{load} は積込動作にかかる時間である。なお、 $i=j$ や $k=l$ の場合は、所要時間 $p_{k,i,j}$ や $r_{k,l}$ は0 sに設定し実際には動かない状況を考える。また、掘削・放土先が掘削指定範囲外の場合は $p_{k,i,j}$ を無限大に設定することで、最適化時に選択されないようにする。

本研究でのスケジューリング問題の目的は、式(1)で表されるように、最後の作業の完了時刻を最小化することである。

続いて制約条件を説明する。式(2)は、1回のブロック移動 x_t で移動するブロックは1つであることを表す。式(3)は、ブロックの移動先が、積込作業の場合は積込地点のセル、準備作業の場合は地面のセルであることを表す。

式(4)は、作業の開始時刻と完了時刻の関係を表す。ここでは、作業時間を、バケットを動かす時間と、作業位置を移動する時間の和として計算する。また、式(5)は、必ず t 回目の作業完了後以降に $t+1$ 回目の作業が開始されることを表す。式(6)は、積込待機時間中は、ショベルが土砂の積込動作を行えないことを

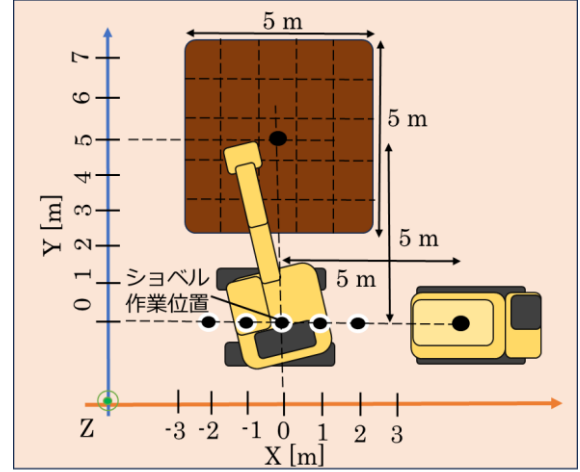


図4 実験設定における建機の配置

表す。作業が積込作業から準備作業に変わる場合、すなわち、ダンプが運搬に出発する場合に、左辺で $h_t - h_{t+1} = 1$ となることから、ダンプが運搬出発後は、ダンプが到着する T_{interval} [s] 経過後以降に積込動作が開始されるように、次の積込作業を開始することを表す。

以上の制約条件に加え、ショベルや土砂ブロックなどの初期条件や、バケットの位置の連続性、各セルの土砂ブロック量などを制約として設定する。

2.3.5 掘削動作計画の獲得

2.3.4項で述べた定式化に従い、全ての制約条件を満たすようにして、最後の作業完了時刻 $e_{t_{\text{last}}}$ を最小化する。このときのブロック移動 x_t が、求める最適な土砂ブロックの移動順序であり、建機移動 w_t が、最適なショベルの移動順序である。そのため、 x_t の要素が1となるセル i からセル j に土砂ブロックを移動し、 w_t の要素が1となるセル k からセル l にショベルを移動するように制御することによって、準備作業を考慮し、かつ短い全体所要時間で、掘削工事を進めることが可能であると考えられる。

3. 実験

3.1 実験内容

提案手法の有効性を検証するために、準備作業の有無による全体所要時間の比較を行った。

実験設定として、図4に示すように、ショベルで $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 2\text{ m}$ の範囲 ($-2.5 \leq X \leq 2.5, 2.5 \leq Y \leq 7.5, -2 \leq Z \leq 0$) の掘削工事を設定した。1回の運搬あたりの積込待機時間の長さ T_{interval} を180 s、積込作業回数 T_{load} を5回、準備作業回数 t_{prep} を3回とした。ショ

ベルの作業位置候補は、 $(-2,0,0)$ から $(2,0,0)$ まで1 m 間隔で設定し、初期位置を原点とした。

プログラムは Python3.11を使用し実装し、最適化には厳密解法である COIN-OR Branch-and-Cut (CBC) アルゴリズムを使用した[8]。

評価としては、1 m角の立方体のセルでモデル化した環境で動くシミュレータを使用して、全体所要時間を計算した。提案手法の場合は、最適化より得られた x_i や w_i に従い、掘削・放土地点やショベルの位置を決定した。比較する条件は、(a)提案手法を用い、土砂ブロック移動のみを行う場合、(b)提案手法を用い、土砂ブロック移動と建機移動両方を行う場合、(c)準備作業なしの場合を設定した。(c)準備作業なしの場合は、積込にかかる時間が最も短いブロックを掘削・積込し、積込待機時間中はダンプの到着まで積込動作直前で待機する場合と設定した。

3.2 実験結果と考察

全体所要時間は、提案手法を用い、(a)土砂ブロック移動のみを行う場合が3308 s、(b)土砂ブロック移動と建機移動両方を行った場合が3276 s、(c)準備作業なしの場合が3508 sであった。提案手法を使用して準備作業を行った場合は、準備作業なしの場合と比較して、約6%全体所要時間が短縮された。

準備作業として(a)土砂ブロック移動のみを行った場合の、掘削・放土を行ったセルを図5に示す。図の横軸は作業順序、縦軸は地面のセル番号である。なお、地面のセル番号は、積込地点からのバケットの移動にかかる時間が短い順番、すなわち、積込地点に近い順番に設定した。また、図中の橙色が積込作業時、青色が準備作業時を示し、丸印が掘削を行ったセル、バツ印が放土・積込を行ったセルである。すなわち、積込作業では橙色丸印のセルのブロックを橙色バツ印のセルに、準備作業では青色丸印のセルのブロックを青色バツ印のセルに移動した。

図5からは、橙色丸印が示す積込作業の掘削セルと、青色バツ印が示す準備作業の放土セルは、セル番号が小さいセル、すなわち、積込地点に近い場所が選択されていることが分かる。一方で、橙色丸印が示す準備作業の掘削セルは、セル番号が大きいセル、すなわち、積込地点から遠い場所が選択されている。このことから、準備作業として、積込に時間のかかる位置の土砂は、あらかじめ時間のかからない位置に移動させる動きが適切であることが分かる。

また、準備作業後最初に行われる積込作業の掘削セルは、積込作業の中では比較的積込に時間のかかるセルが選択されている。これは、積込待機時間中に積込のための掘削動作が開始され、ダンプの到着前に積込動作直前の状態に達する場合は、積込地点

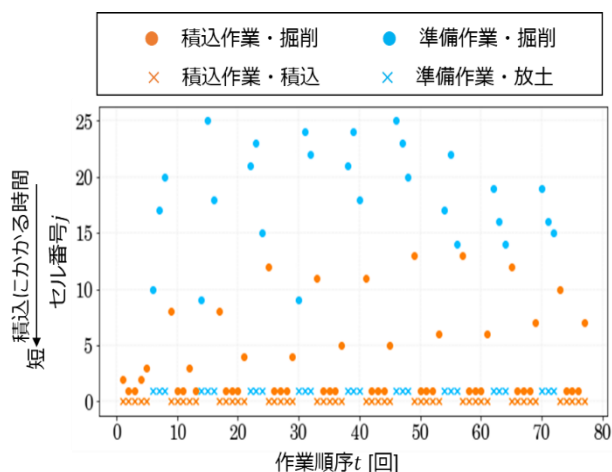


図5 (a)提案手法（土砂ブロック移動のみ）使用時の選択セル

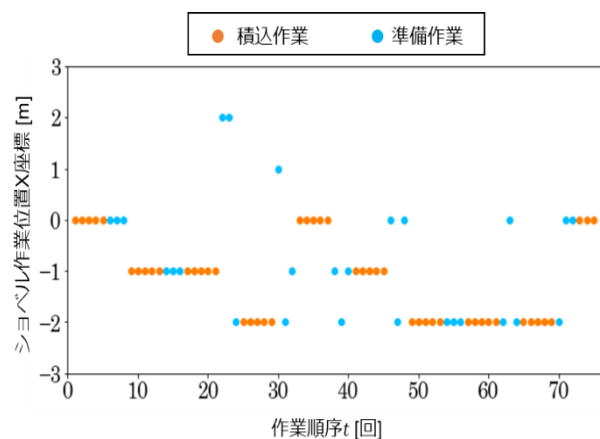


図6 (b)提案手法（土砂ブロック移動+建機移動）使用時のショベル作業位置 X 座標と作業内容

へのバケットの移動時間は全体所要時間には影響しないため、本来時間のかかるセルが選択されたと考えられる。

続いて、(b)準備作業として土砂ブロック移動と建機移動の両方を行った場合の、ショベル作業位置の X 座標と作業内容を図6に示す。図中の橙色が積込作業時、青色が準備作業時を示す。

図6からは、ショベルは一定の場所にとどまり続けるのではなく、移動しながら作業を進めていることが分かる。これは、作業位置を適切に移動することで、より積込地点に近い位置の土砂量が多い場所で土砂の積込作業を行うことができるため、作業位置を変えない場合よりも全体所要時間が短縮されたと考えられる。一方で、橙色の積込作業時に着目すると、ショベルは移動していないことから、ダンプが到着後は移動するのではなく、その場で積込作業のみを行うことが適切であることが分かる。

本実験設定では、全体所要時間の短縮割合は6%程度であったが、今後建機の2次元移動を考慮するような、より広い範囲の掘削工事も対象となるように手法を拡張することで、準備作業の幅が増え、短縮割合が増加することが見込まれる。また、大規模な道路工事などでは、数パーセントの短縮も数日から数週間程度の工期の短縮につながるため、準備作業を行うことは有効であると考えられる。

4. 結論

本研究では、土木工事をモデル化し、土木工事をブロック配置問題のスケジューリング問題として解けるようにすることで、積込待機時間中の準備作業を考慮して、ショベルの作業手順を最適化する掘削動作計画手法を提案した。提案手法を用いることで、準備作業として土砂の移動や建機の作業位置の移動を考慮して掘削工事の作業手順を最適化することができ、実験では掘削工事の全体所要時間を短縮できることを確認した。

今後の展望として、2次元の作業位置の移動を伴うような、より広範囲の掘削工事に適用可能な手法への拡張が考えられる。ここでは、最適化の処理時間が増大すると考えられるため、処理時間の短い定式化方法や最適化アルゴリズムを検討する必要性が考えられる。また、物理演算を行うシミュレータを用いて、実際の環境での性能検証や、進捗に応じて計画を修正するような手法への改良が考えられる。

参考文献

- [1] 畠昭治郎, 井克彦: “土工機械の待合せに関する基礎的考察”. 土木学会論文報告集 1971(194), pp. 127-140, (1971).
- [2] E. Kozan and S. Q. Liu: “An open-pit multi-stage mine production scheduling model for drilling, blasting and excavating operations”. *Advances in applied strategic mine planning*, pp. 655-668, (2018).
- [3] J. Kim and S. Chi: “Multi-camera vision-based productivity monitoring of earthmoving operations”. *Automation in Construction*, 112, p. 103121, (2020).
- [4] 松田 恭岳, 谷島 諒丞, 王 永東, ルイ笠原 純ユネス, 永谷 圭司, 安 琪, 山下 淳: “積込待機時間を考慮した油圧ショベルの掘削動作計画”; 第 25 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講演論文集 (SI2024) , pp. 3553-3558, (2024).
- [5] H. J. Carlo and G. E. Giraldo: “Toward perpetually organized unit-load warehouses”. *Computers & Industrial Engineering*, 63(4), pp. 1003-1012, (2012).
- [6] J. A. Pazour and H. J. Carlo: “Warehouse reshuffling: Insights and optimization”. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 73, pp. 207-226, (2015).
- [7] D. Ku and T. S. Arthanari: “Container relocation problem with time windows for container departure,” *European Journal of Operational Research*, 252(3), pp. 1031-1039, (2016).
- [8] M. J. Saltzman: “COIN-OR: an open-source library for optimization.” *Programming Languages and Systems in Computational Economics and Finance*, pp. 3-32, (2002).