

油圧ショベルによるこぼれに着目した自動掘削軌道の生成

○桂知弘 谷島諒丞 濱崎峻資 永谷圭司 山下淳 浅間一（東京大学）

1. 緒言

1.1 背景

日本の建設業では、他産業と比較し高齢化が進み[1][2]、近い将来の労働者不足が懸念されている。この問題に対応するためには、建設の作業効率を上げる必要がある。

土木建設に利用される油圧ショベルは汎用性が高く、日本の建設機械の半数以上が油圧ショベルである[3]。油圧ショベルは2つのジョイスティックで4自由度を操作するため、操作難易度が高く、作業効率が落ちる原因となり得る。熟練捜査者が減少している現在、作業効率を上げるためには、油圧ショベルの自動掘削の実現が必要と考えられている。自動掘削の先行研究として、3次元情報を用いた自律掘削[4]や土質を考慮したエネルギー効率の良い自動掘削軌道の生成[5]、多様な掘削軌道を生成する手法[6]が研究されてきた。しかしこれらの先行研究では、作業中の土砂のこぼれについては考慮されていない。特に作業足場に土砂を落とせない現場条件では、掘削中に多量のこぼれが生じると、こぼれの清掃が必要になる。例えば、図1のような都市土工における溝掘削では、掘削領域の左右のアスファルト上に土砂がこぼれた場合、作業員が掃除をする必要が生じ、作業時間が増大し、全体の作業効率が低下する。

1.2 研究目的

本研究の目的は、掘削中のこぼれに着目した効率的な油圧ショベルの掘削軌道を生成することである。特に、こぼれに着目した効率的な掘削軌道生成手法の提案を第1の目的とし、掘削中のこぼれを減少させる軌道を生成することを第2の目的とする。

第2章では、こぼれと油圧ショベルの動作を定義する。第3章では、こぼれに着目した効率的な掘削軌道生成手法を提案し、結果を解析する。第4章では、掘削中の土砂のこぼれを減少させる軌道を提案し、こぼれが減少していることを確認する。

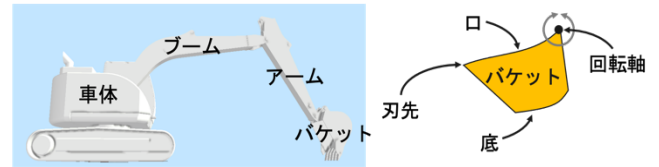
2. こぼれと油圧ショベルの動作の定義

油圧ショベルの各部位の名称を図2に示す。またバケットが地表に触れてから、旋回する直前までを掘削動作、旋回してから、バケットから土砂を落とすまでを放土と定義する。

「こぼれ」は、放土以外の任意の動作により、動作前と比較して地表面の高さが上昇した全ての領域と定義する。例えば、動作前の地表面を図3(a)とすると、図3(b)の斜線部がこぼれとなる。掘削中にこぼれを生む事例は、図4(a)のように、バケットからの土砂の落下だけでなく、図4(b)のように、バケットによって土砂が押し上げられることも含む。



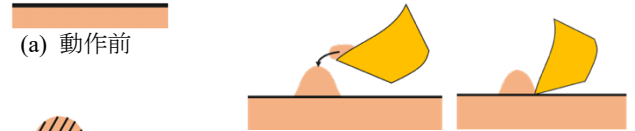
図1 都市での溝掘削



(a) 油圧ショベルの名称

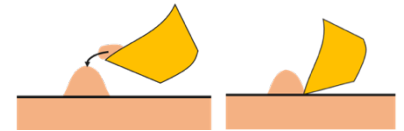
(b) バケットの名称

図2 油圧ショベルの名称



(b) 動作後

図3 こぼれ



(a) 落下

(b) 押し上げ

図4 こぼれを生む事例

3. こぼれを考慮した掘削軌道の生成

3.1 こぼれを考慮した掘削軌道の生成手法

3.1.1 こぼれ率

こぼれの体積 $S[m^3]$ と掘削体積 $V[m^3]$ を用いて、こぼれ率 R を以下のように定義する。こぼれ率が低いとき、こぼれが少ないことを表す。

$$R = \frac{S}{V} \quad (1)$$

ここで、こぼれの体積 S は、旋回直前の地表で、掘削前と比べて地表面が上昇した領域の体積とする。また掘削体積 V は、放土により地表面が上昇した領域の体積とする。一般に、掘削された土砂の体積は増加するが、本研究では増加した後の体積を測定する。

3.1.2 こぼれ率の低い軌道の探索

こぼれ率の低い軌道を遺伝的アルゴリズムで探索する。この際、適切な掘削軌道を得るため、以下

に示す制約条件を設ける．

1. 十分な掘削体積を確保するために，掘削体積に下限を設定する．
2. 油圧ショベルの転倒防止のため，すくい中，油圧ショベルが傾かない．
3. バケットの底の破損を防止するため，バケットの底はバケットの刃先の軌跡よりも常に上にある．

3.2 こぼれを考慮した最適化実験

3.2.1 実験概要

この実験の目的は，3.1節の提案手法により，こぼれの少ない掘削軌道を生成できることを確認することである．こぼれ率を用いて最適化した結果と最適化していない結果を比較し，最適化により，こぼれ率が減少することを確認する．

3.2.2 掘削軌道

従来研究では，図5のように，掘削軌道を挿入，横引き，すくいの3段階に分割している[4][5]．挿入と横引きでは，刃先は直線運動をする．一方すくいでは，バケットのみがバケットの口が水平になるまで回転軸を中心に単純な円運動を行い，その後に垂直に持ち上げられる．本節では，この掘削軌道をベースに最適化を行い，掘削軌道を得る．

3.2.3 実験環境

CM Labs Simulation 社のVortex Studioを使用して，シミュレーション実験を行う．Vortex Studioは動力学シミュレーションが可能であり，土壌の種類や，初期状態の土壌粒子の相対充填率を変更することで，異なる土壌でのシミュレーション実験が可能である．油圧ショベルのモデルとして，ZAXIS 120 を使用した．

3.2.4 使用する土壌

土壌として柔らかい砂，中間の砂，硬い砂の3種類を想定し，掘削前の土壌粒子の相対充填率を表1のように設定した．なお，相対充填率とは，それぞれの土壌において，最も充填させたときと比較し，どの程度充填しているかを表す．相対充填率が高いほど硬い土壌となる．

表1 土壌の相対充填率

条件	相対充填率(%)
柔らかい砂	20
中間の砂	50
硬い砂	70

表2 変数の範囲

条件	範囲
挿入距離 p	0.0m 以上 1.0m 以下
挿入角度 ϕ	$\pi/6$ 以上 $\pi/3$ 以下
横引き距離 h	0.0m 以上 2.5m 以下

表3 遺伝的アルゴリズムのパラメータ

パラメータ	値
1世代の個体数	50 個体
トーナメントサイズ	3 つ
交叉率	0.77
突然変異率	0.19
エリート個体	2 個体
世代数	10 世代

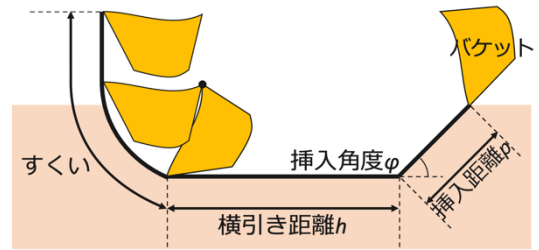


図5 掘削軌道

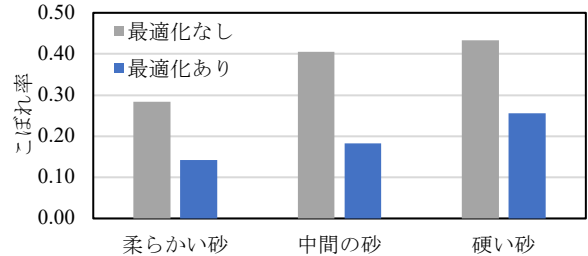


図6 最適化によるこぼれ率の比較

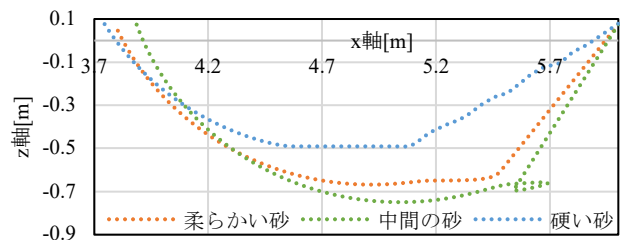


図7 最適化した掘削軌道

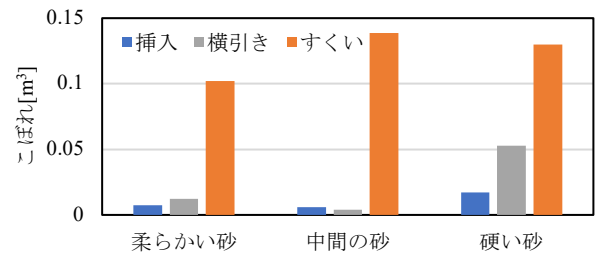


図8 挿入，横引き，すくいでのこぼれの体積比較

3.2.5 実験設定

本実験では，特にこぼれが問題となる溝掘削を掘削対象として，地表面が水平な状態から油圧ショベルで1回だけ荒掘削を行うことを想定した．すくいでは，バケットの刃先が地表面から1.5mになるまで垂直に持ち上げ，90度旋回して放土することとした．

探索は，挿入距離 p ，挿入角度 ϕ ，横引き距離 h の3つを変数とし，遺伝的アルゴリズムで行うこととした．3つの変数の範囲は表2の通りである．また，遺伝的アルゴリズムのパラメータは，表3の通りである．

制約条件として，掘削体積が 0.55m^3 以上となるようにした．ただし，使用したシミュレータ上での油圧ショベルのバケットの容積は， 0.40m^3 である．また地中にバケットがあるときの刃先の速度は 0.6m/s で固定した．

挿入距離 p ，挿入角度 ϕ ，横引き距離 h の3つの変数を表2の範囲でランダムに設定し，3.1.2項で設けた制約条件を満たす10個の軌道のこぼれ率の平均値を，最適化なしのこぼれ率として比較対象とした．

3.2.6 実験結果と考察

最適化した軌道と最適化しない軌道のこぼれ率の違いは図6の通りであった。この結果より、最適化によりこぼれ率が減少することが確かめられた。

なお、このときの生成した最適掘削の刃先の軌道は、図7の通りであった。地面の硬さが硬い場合は、挿入軌道が直線とはならず、掘削軌道も浅くなった。挿入軌道が直線でない理由は、挿入する際の反力が大きく、油圧ショベルが若干浮き上がるためである。また、深く掘ろうとすると反力が大きくなり、すくいで車体が浮き上がり、3.1.2項で設けた制限にかかった可能性がある。

挿入、横引き、すくいのそれぞれの動作のこぼれの体積は図8の通りであった。硬い砂では横引きのこぼれが多い。これは、硬い砂では掘削軌道が浅く、十分な掘削体積を確保するために、他の軌道と比べて横引きが長くなるためであると考えられる。

また砂の硬さによらず、挿入や横引きと比較し、すくいで生じるこぼれが多い。これはすくいで土砂を掘削領域外へかき出してしまうことが原因である。そこで、第4章ではすくいを変化させることで、こぼれ率がより低くなる掘削軌道を提案する。

4. すくいに直線軌道を挿入した軌道

4.1 提案軌道

4.1.1 直線軌道のあるすくいの提案

掘削軌道のすくいを変え、こぼれ率がより少ない掘削軌道を提案する。第3章では、すくいで土砂を掘削領域外にかき出すため、こぼれを増加させる結果となった。すくいの途中でバケットを油圧ショベルから見て前方へ移動させれば、かき出しは防止できる。そこで、図9のように、すくいに直線軌道を挿入した軌道を提案する。

直線軌道のあるすくいについて詳細を述べる。直線軌道のあるすくいでは、バケットの口が水平になるまでに3段階を有する。第1段階では、第3章の軌道と同様に回転軸を中心として一定速度でバケットを回転させる。第2段階では、回転軸を中心として第1段階と同じ速度でバケットを回転させつつ、同時にバケットの刃先が直線運動をするように運動させる。ただし、第2段階が始まる時、バケットの刃先は掘削前の地表面の高さよりも低くなるように制限する。第3段階では、第1段階と同様にバケットは回転軸を中心として、一定速度でバケットの口が水平になるまで回転させる。なお、全ての段階で、バケットの刃先の速度ならびに、バケットの回転速度は一定とする。

表4 変数の範囲

変数	範囲
直線軌道を始めるタイミング τ	0.0 以上 1.0 以下
直線軌道の距離 l	0.0m 以上 2.5m 以下
直線軌道の角度 θ	$-\pi$ 以上 π 以下

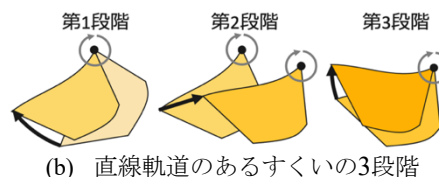
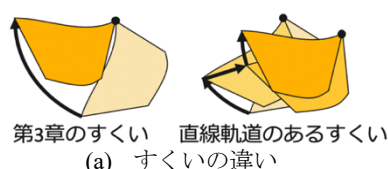


図9 直線軌道のあるすくい

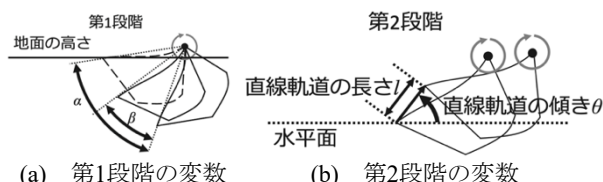


図10 直線軌道のあるすくいの変数

4.1.2 直線軌道のあるすくいの変数

直線軌道のあるすくいの変数を図10に示す。直線軌道のあるすくいでは、表2の3変数に加えて、変数 τ, l, θ を以下に示すようにおいた。

第3章の軌道のように単純な円運動ですくった場合、横引きの終了直後からバケットの刃先が地面の高さとなるまでにバケットが回転する角度を α とする。すくいの第1段階中にバケットが回転する角度を β とする。変数 τ を式(2)のように設定する。変数 τ を0から1の間で変化させることで、第1段階から第2段階に移るタイミングを調整する。

$$\tau = \frac{\beta}{\alpha} \quad (2)$$

第2段階での直線軌道の長さ l と直線軌道が水平面となす角 θ を変数として設定した。

4.2 提案軌道のこぼれの比較実験

4.2.1 実験概要

この実験の目的は、提案した軌道のこぼれが少ないことを確認することである。そのため、最適化した提案軌道と第3章の結果を比較する。

4.2.2 こぼれ率の低い提案軌道の生成

挿入距離 p 、挿入角度 φ 、横引き距離 h 、直線軌道を始めるタイミング τ 、直線軌道の長さ l 、直線軌道の角度 θ の6変数を遺伝的アルゴリズムで探索し、3.1節で定義したこぼれ率を最適化する。3.1節と同様に、掘削体積や、すくいでの車体の傾き、バケットの底の位置を制限する。

4.2.3 実験設定

土壌として第3章と同じ砂を使用した。また掘削前の土壌の相対充填率を表1のように設定した。

挿入距離 p 、挿入角度 φ 、横引き距離 h の3つの変数の範囲は表2の通りである。直線軌道を始めるタイミング τ 、直線軌道の長さ l 、直線軌道の角度 θ の範囲を表4に示す。この条件下で、こぼれ率が最小になるように遺伝的アルゴリズムを用いて最適化した。な

お、遺伝的アルゴリズムのパラメータは表3の値を使用した。得られた結果を第3章の結果と比較する。

4.2.4 実験結果と考察

それぞれの硬さの砂における比較結果は図11の通りである。砂の硬さによらず、直線軌道がある最適化した軌道は、こぼれ率を大幅に削減できることが確かめられた。なお、砂が硬くなるにつれて、こぼれ率は増加する。この理由としては、硬い砂は安息角が大きく、こぼれた土砂が移動しにくいためである可能性がある。一般に、掘削領域にこぼれた土砂が流れ込めば、こぼれは減少するが、硬い砂はこぼれた土砂がその場にとどまり、こぼれが相対的に増加したと考えられる。

次に、直線軌道のある最適化した軌道と直線軌道のない最適化した軌道のバケット刃先の軌道を図12に示す。ただし、油圧ショベルから見て前方がx軸の正の向き、上方がz軸の正の向きである。直線軌道がある場合は、どの軌道も最後にバケットの刃先を前方へ移動させることがわかる。

ここで、それぞれの砂において、直線軌道の効果を考察する。最適化したすくい直線軌道のある掘削軌道と、挿入距離、挿入角度、横引き距離は同じで直線軌道のみをなくした軌道を比較する。結果は図13の通りとなった。どの条件においても、直線軌道により、こぼれ率が減少することが確かめられた。

第3章の軌道では、すくい土砂をかき出し、多量のこぼれが生じる。これに対し、直線軌道がある場合は、すくい中にバケットを前方へ動かすことで、かき出す土砂の量が減り、こぼれが減少した。

また、直線軌道のある軌道は、第3章で得られた軌道と比較し、深く掘る。これは、すくいの直線軌道でバケットを少し戻すことで、すくいでの掘削体積が減少するが、この減少分を補うため、深く掘る軌道が生成されたと考えられる。

硬い砂では、すくいに直線軌道のある軌道によるこぼれ率の減少割合が少ない。これは、直線軌道はすくいでは生じるこぼれを減少させるだけであり、挿入や横引きでのこぼれは減少しないためである。

5. 結言

本研究では、こぼれに着目して自動掘削のための掘削軌道の提案と評価を行なった。以下に成果を示す。

1. こぼれに着目した効率的な掘削軌道の生成手法を提案した。
2. 掘削におけるこぼれについて解析し、こぼれの大半はすくいでは生じることを解明した。
3. 掘削軌道のすくいの途中で、バケットの刃先の直線運動を挿入することで、掘削中のこぼれを大幅に減少させることに成功した。

今後は、異なる種類の土壌で検証を行い、本提案の有用性を確認するとともに、すくいに直線軌道を挿入した掘削軌道を実際の油圧ショベルで実行し、こぼれの増減を検証する。

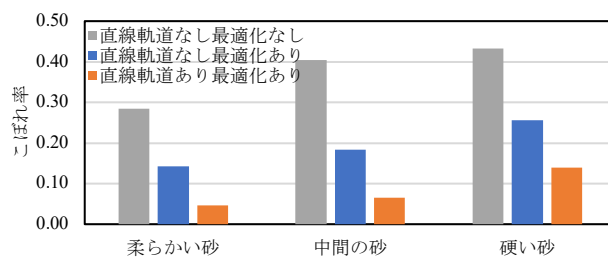


図11 こぼれ率の比較

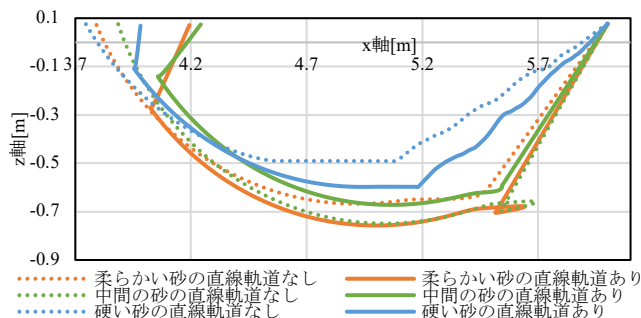


図12 最適化した掘削軌道の比較

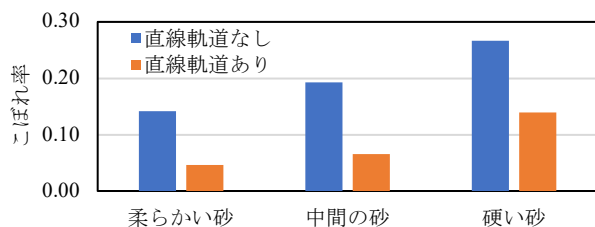


図13 直線軌道の効果

謝辞: 本研究は、JSPS 科研費 JP20H02109 ならびに、JST【ムーンショット型研究開発事業】 Grant 番号【JPMJMS2032】の支援を受けたものです。

参考文献

- [1] “建設業ハンドブック-日本建設業連合会”, <https://www.nikkenren.com/publication/handbook.html> (最終閲覧日: 2021 年 7 月 5 日)
- [2] “統計局ホームページ/労働力調査-総務省統計局”, <https://www.stat.go.jp/data/roudou/index.html> (最終閲覧日: 2021 年 7 月 5 日)
- [3] “調査の結果 | 建設機械動向調査 | 経済産業省”, <https://www.meti.go.jp/statistics/sei/kensetu/result-2.html> (最終閲覧日: 2021 年 7 月 5 日)
- [4] 山元, 茂木, 大槻, 柳沢, 野末, 山口, 油田: “動作計画と制御に 3 次元情報を用いた自律油圧ショベルプロトタイプの開発”, 計測自動制御学会論文集, vol. 48, no. 8, pp. 488-497, 2012.
- [5] S. Katsuma, R. Yajima, S. Hamasaki, P. Chun, K. Nagatani, G. Yamauchi, T. Hashimoto, A. Yamashita and H. Asama: "Excavation Path Generation for Autonomous Excavator Considering Bulking Factor of Soil", *Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC2020)*, pp. 578-583, 2020.
- [6] Y. Yang, P. Long, X. Song, J. Pan and L. Zhang, "Optimization-Based Framework for Excavation Trajectory Generation," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 1479-1486, 2021.