

旋回中の土砂のこぼれに着目した油圧ショベルの掘削動作の提案

○桂 知弘 (東京大学), 谷島 諒丞 (東京大学), 濱崎 峻資 (東京大学),
永谷 圭司 (東京大学), 山下 淳 (東京大学), 浅間 一 (東京大学)

Excavation Motion Proposal of Hydraulic Excavator Focusing on Spilling of Sand during Swing Motion

○Tomohiro KATSURA, Ryosuke YAJIMA, Shunsuke HAMASAKI, Keiji NAGATANI,
Atsushi YAMASHITA, and Hajime ASAMA (The University of Tokyo)

Abstract : In this study, an excavation motion of an excavator that reduces spillage of sand during the swing motion is proposed while maintaining excavation efficiency. It is realized by a quick shaking motion of the excavator's arm when the bucket's mouth is leveled in scooping. In simulation results, the proposed motion reduced the spillage during the swing motion of the excavator. Furthermore, it was confirmed that the proposed motion was effective even when the conditions of the soil and excavation trajectories were different.

1. 緒言

日本の建設機械の半数以上を占める油圧ショベル [1] の生産性を向上させる方法として、自動掘削が考えられる。自動掘削に関する先行研究として、自動掘削のシステムインテグレーションに関する研究 [2][3] や、追従精度の向上に関する研究 [4], エネルギー効率 [5] やトルクや時間 [6] に着目した最適な掘削軌道生成などが行われてきた。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。作業中に土砂のこぼれが生じると、放土量の減少につながる。また、都市土工の作業足場に土砂をこぼせないような現場では、土砂のこぼれが生じると、これを取り除く必要があり、これは生産性の低下を招きうる。一般に、油圧ショベルによる掘削作業では、掘削を行った後に旋回し、土砂を運搬するダンプトラックのベッセルの上などで放土を行う。この一連の動作の中で、土砂のこぼれは、主に掘削中と旋回中に発生する。この内、掘削中の土砂のこぼれに関しては、これまでに我々の研究グループで研究を進め、掘削軌道を工夫することによってこぼれを低減できることを明らかにした [7]。しかし旋回中の土砂のこぼれに関しては、これまで扱われたことがなかった。旋回中に土砂のこぼれが生じると、特に Fig. 1 のような現場では、清掃を行う必要が生じるために作業全体の効率が低下するだけでなく、植木の上に土砂がこぼれることで、植木の枯死を招く可能性も存在する。

そこで、本研究では、放土量を維持しつつ、旋回中の土砂のこぼれを減少させることを目標とする。第 2 章では、土砂のこぼれや油圧ショベルの前提条件を述べる。第 3 章では、旋回中の土砂のこぼれ量を減少させるための掘削動作を提案する。第 4 章では、提案掘削動作が放土量は維持しつつ、旋回中の土砂のこぼれを大きく減らしうることを



Fig. 1: Trench excavation in cities

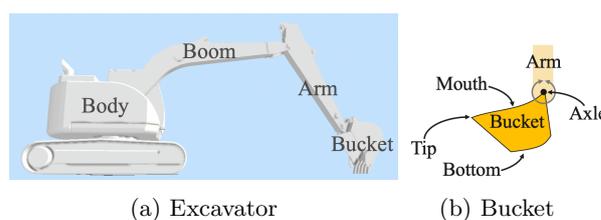


Fig. 2: Parts name

示したうえで、土砂の硬さや掘削軌道の影響を明らかにする。第 5 章では、結論と今後の展望を述べる。

2. 土砂のこぼれと油圧ショベルの前提条件

油圧ショベルの各部名称を Fig. 2 に示す。油圧ショベルの動作は、バケットが土砂に触れてから土砂を掘り、旋回する直前までの動作を「掘削」、旋回し始めてから、バケットから土砂を落とす直前までの動作を「旋回」、ダンプト

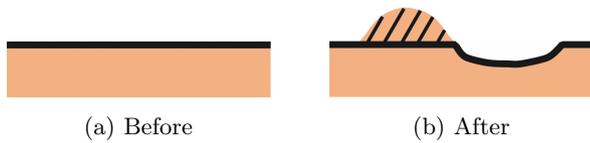


Fig. 3: Spillage

ラック上などに土砂を落とす動作を「放土」と定義する。

土砂の「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すべての領域と定義する。例えば、ある動作の前の地表面を Fig. 3(a)、ある動作の後の地表面を Fig. 3(b) とすると、斜線部がこぼれとなる。旋回中の土砂のこぼれは、掘削で一度バケットに入った土砂が、旋回によって滑落することによって生じる。

放土量は、放土された土砂の体積とする。一般に土砂は移動により体積が増加するが、本研究では、放土された後の膨らんだ土砂の体積を測定する。

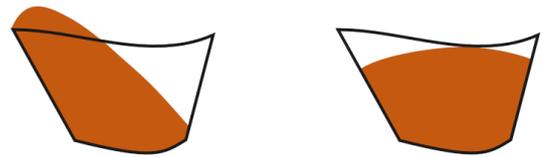
3. 掘削動作の提案

旋回中の土砂のこぼれ量は、バケットの口を水平に保ち、旋回中のバケットの加速度の絶対値を極めて小さくすれば、大きく低減されると考えられる。しかし、加速度の絶対値を小さくすると、旋回に時間がかかり、作業効率が落ちる。そこで、本研究では旋回中の油圧ショベルの旋回速度は変化させずに、旋回中のこぼれ量を減少させることを考える。

旋回中の土砂のこぼれ量を削減する方法として、以下の2つの方法が考えられる。

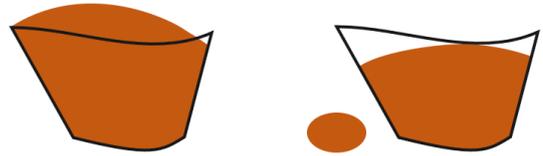
- 1) Fig. 4(a) に示すように、バケット内で旋回中に元々落下する位置に存在する土砂を、Fig. 4(b) のように落下しない位置に移動させる。
- 2) Fig. 5(a) のように旋回中にどのようにしても落下する土砂は、Fig. 5(b) のように予め取り除く。

そこで、熟練オペレータの動きを参考にして、掘削の後半でバケットの口が水平になった際、Fig. 6 に示すようにアームを素早く x [rad] 動かし、元の軌道に戻す動作を提案する。本稿では、このアームの動作を Soil manipulation と呼び、Soil manipulation を含む掘削全体を提案掘削動作と呼ぶ。Soil manipulation により、上述の 1)2) 両方を実現し、旋回中のこぼれ量を減少させる。ただし、放土量は維持しつつ、旋回中のこぼれ量を減少させられる x は不明であるため、次章の実験において検証する。 x の絶対値が小さい場合、上述の 1)2) は実現できず、 x の絶対値が大きい場合、バケットから土砂がはじき飛ばされ、放土量が減少する可能性があるため、最適な x が存在することが予想される。なお、熟練技能者は、 x が正、すなわち最初に油圧ショベル本体から見てアームを奥へ動かし、元の軌道に戻す動作を行う様子が見られた。



(a) Before soil manipulation (b) After soil manipulation

Fig. 4: Moving the sediment



(a) Before soil manipulation (b) After soil manipulation

Fig. 5: Dropping the sediment

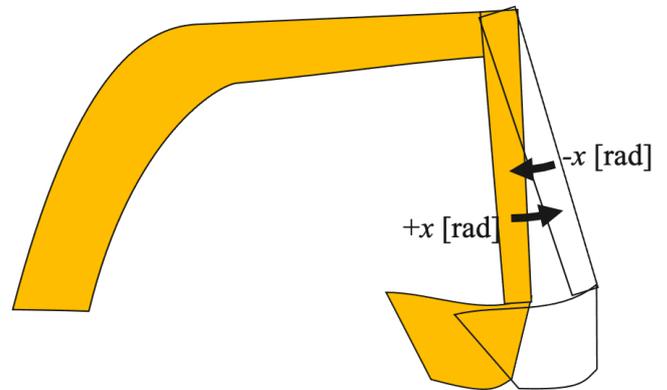


Fig. 6: Soil manipulation

4. 検証実験

4.1 実験概要

本実験の第1の目的は、提案掘削動作により放土量は維持したまま、旋回中の土砂のこぼれ量を低減させることを示すことである。第2の目的は、土砂の条件や掘削軌道条件を変えた場合、条件を満たす掘削の Soil manipulation は変化するのかを明らかにすることである。そこで、動力学シミュレータ上で実験を行い、Soil manipulation を変化させ、旋回中のこぼれ量と放土量を比較する。

4.2 実験設定

本実験では、掘削対象を溝掘削とする。特に地面が水平な状態から1回だけ荒掘削する動作を想定する。

従来研究では、掘削動作は Fig. 7 に示すように掘削軌道は挿入、横引き、すくい の3段階に分割している [3][5]。

ここで挿入と横引きでは、刃先は直線運動を行う。すくいでは、ブームとアームは動かさず、バケットはバケット付け根の回転軸を中心にして、バケットの口が水平となるまで単純な円運動を行う。Soil manipulationを行う場合は、Fig. 7の色の異なるバケットのように、バケットの口が水平になった瞬間に、Soil manipulationを行いながらバケットを垂直に持ち上げる。Soil manipulationを行わない場合は、バケットの口が水平になると、そのままバケットを垂直に持ち上げる。本実験では、挿入距離 p は 0.7 m、挿入角度 φ は $\frac{\pi}{4}$ rad で固定し、掘削量が変わったときの変化を調べるため、横引き距離 d を 0.0, 1.0, 2.0 m の 3 種類で変化させた。ただし、掘削中のバケット刃先の速度は 0.6 m/s で一定とした。

旋回は、Soil manipulation を行うか否かにかかわらず同じとする。熟練技能者の動作を参考にして、掘削の後に 3 秒で $\frac{\pi}{2}$ rad だけ回転させる。ただし、回転速度は Fig. 8 に示すように最初の 1 秒は角加速度が $\frac{\pi}{4}$ rad/s² で加速し、次の 1 秒は角速度 $\frac{\pi}{4}$ rad/s で一定とし、最後の 1 秒は角加速度が $-\frac{\pi}{4}$ rad/s² で減速しながら回転させる。

4.3 実験環境

実験は、CM Labs Simulation 社のシミュレータ Vortex Studio を使用して行った。Vortex Studio は動力学シミュレーションが可能であり、土の種類や初期状態の土砂の相対充填率を変更することで、異なる土砂の条件に応じたシミュレーション実験をすることが可能である。油圧ショベルのモデルとしては日立建機製 ZAXIS120 を使用した。なお、シミュレータでのバケットの容積は 0.40 m³ である。

4.4 土砂の条件

本実験で使用する土砂は、柔らかいローム、中間のローム、硬いロームの 3 種類を想定し、Table 1 のように相対充填率を設定した。なお、相対充填率とは、土砂を最も充填させなかった時の充填率が 0 %、最も充填させた時の充填率が 100 % となるように充填率を変換したもので、相対充填率が高いほど硬い土砂となる。それぞれの土砂で 4.2 節で述べたように横引き距離 d を変えた 3 種類の掘削軌道の実験を行った。

Table 1: Soil conditions

loam	Relative Density [%]
Soft loam	20
Medium loam	50
hard loam	70

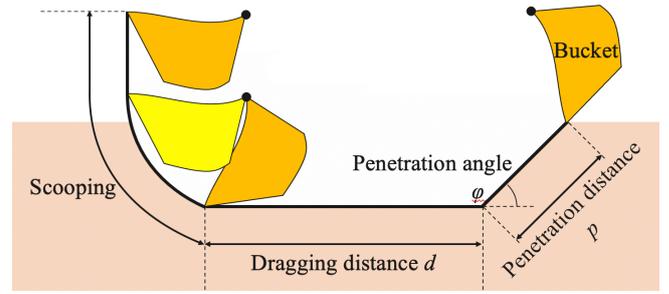


Fig. 7: Excavation trajectory

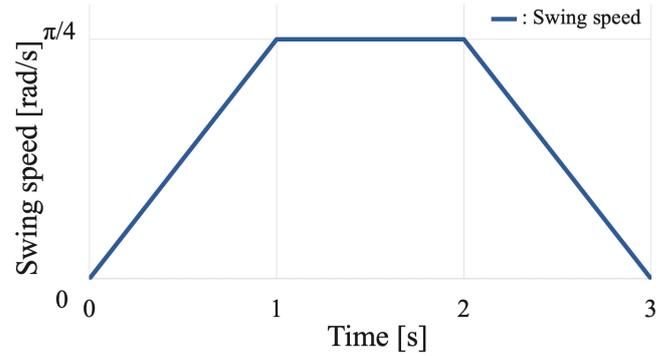


Fig. 8: Swing speed

4.5 実験手法

すくいバケットの口が水平になった際、 $\frac{1}{60}$ 秒でアームを動かし、次の $\frac{1}{60}$ 秒でアームを動かして従来の軌道の位置に戻すように指令を出す。このアームを動かす指令値を -0.50 rad から 0.50 rad まで 0.01 rad 刻みで全探索し、回転中のこぼれ量と放土量を測定することで、放土量を維持しつつ、回転中のこぼれ量を減少させられる Soil manipulation を探索する。指令値が 0 のときは、Soil manipulation をしないときに該当する。

また Vortex Studio で物体を動かすときは、バネマスダンパー系で近似されており、目標角度に到達しない場合も考えられる。そこで、 $\frac{1}{60}$ 秒で実際にアームが動いた符号付き角度 x [rad] も同時に測定した。

4.6 実験結果と考察

4.6.1 実験結果

土の硬さや掘削条件ごとの掘削量の結果は Fig. 9 の通りであった。また、柔らかいローム、中間のローム、硬いロームの横引き距離 d ごとのアームが動いた角度 x の結果は、それぞれ Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12 の通りであった。ただし、実際の油圧ショベルでは、様々な要因から追従誤差が生じる。そこで、5 つの x のこぼれ量と放土量のデータの移動平均をとった。本研究では、放土量が掘削

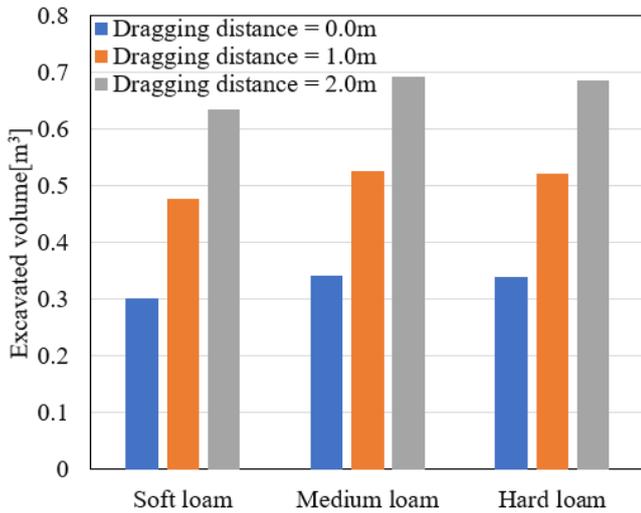


Fig. 9: Excavated volume

量の96%以上であれば、放土量は維持されていると見做した。また、旋回中のこぼれ量が、掘削量の2%以下であれば、こぼれ量は少ないと見做した。そして、放土量は維持しつつ、旋回中のこぼれ量は少ない場合、条件を満たす結果であるとした。なお、掘削量は、使用したシミュレータでは直接計測することができない。そこで、掘削時にバケットに入った土砂は、旋回中にこぼれるものと放土されるものの2つに分かれると仮定し、 $x = 0$ のときの旋回中のこぼれ量と放土量の合計から掘削量を算出した。

4.6.2 掘削量と提案掘削動作の関係

掘削量とアームが動いた符号付き角度 x の全体としての傾向について考察する。掘削量が増加するに従って、旋回中のこぼれは生じやすくなる。旋回中のこぼれ量は、掘削量が極めて少ないときは x が正でも負でも減少するが、ある程度の掘削量があるときは x が正のときに特に顕著に減少することがわかる。これは、掘削量が少ないときはバケットをどのように動かしても、旋回中にこぼれる土砂をバケット内に収めることができるが、掘削量が増加した場合、 x が正の方向に動かさなければ、旋回中にこぼれる土砂をバケット内に収めることができなくなるためである。ただし、掘削量が多くなりすぎると、バケットの容積と比べて掘削量が多くなりすぎ、旋回中のこぼれ量を減少させることが難しくなると考えられる。

一方、放土量については、掘削量が少ないときは、 x の絶対値が小さいと減少せず、 x が大きくなりすぎると、放土量は急峻に減少し始める。これは、アームを動かす際の加速度が大きくなりすぎ、バケット内の土砂をはじき飛ばしてしまうためである。また掘削量が多いときは、 x が負の場合と比べ、正の場合は放土量が比較的維持できること

がわかる。これは、 x が正の場合の方がバケット内の土砂をはじき飛ばしにくいと考えられる。

また、条件を満たす x が存在する場合は、柔らかいロームと中間のロームでは、掘削量が増えるにつれて、条件を満たす x の値は徐々に大きくなる。硬いロームでは、横引き距離 d が 1.0 m のとき (Fig. 12(b)) に x が負でも条件を満たす場合がある。ただし、 x が正の範囲に限定して考えると、横引き距離 d が 0.0 m のとき (Fig. 12(a)) の条件を満たす x と比較して、横引き距離 d が 1.0 m のとき (Fig. 12(b)) の条件を満たす x は大きくなる。以上より、掘削量と条件を満たす x は正の相関があると考えられる。

4.6.3 結果の分類

結果を詳細に分析する。旋回中のこぼれ量や放土量と符号付き角度 x の関係は 3 つのパターンに分類できる。パターン 1 は、掘削量は維持しつつこぼれ量が少なくなるような、符号付き角度 x が正と負の両方の領域にある場合である。柔らかいロームで横引き距離 d が 0.0 m (Fig. 10(a))、中間のロームで横引き距離 d が 0.0 m (Fig. 11(a))、硬いロームで横引き距離 d が 1.0 m (Fig. 12(b)) の場合が該当する。これは、比較的掘削量が少ない場合である。シミュレータ内でのバケットの容積が 0.40 m^3 であり、掘削によって土量が増加することを考慮しても、バケットの容積と比較して掘削量が少ない。条件を満たす x が正と負の両方に存在するのは、アームを正負のどちらの方向に動かしたとしても、旋回中にこぼれる土砂がバケットの中に収まったためである。特に、最も掘削量の少ない柔らかいロームの横引き距離 d が 0.0 m (Fig. 10(a)) のときは、正負のどちらに動かしても、こぼれ量を大きく低減できることがわかる。また x が正の方向に動かすと、バケット内に土砂をより納め、特にこぼれ量を減少させられる。硬いロームで横引き距離 d が 1.0 m (Fig. 12(b)) のときもパターン 1 に分類されているが、 x が負で条件を満たす場合は非常に少なく、後述するパターン 2 に極めて近いと考えられる。

パターン 2 は、掘削量は維持しつつこぼれ量が少なくなるような、符号付き角度 x が正のみの領域にある場合である。柔らかいロームで横引き距離 d が 1.0 m (Fig. 10(b))、2.0 m (Fig. 10(c))、中間のロームで横引き距離 d が 1.0 m (Fig. 11(b))、硬いロームで横引き距離 d が 0.0 m (Fig. 12(a)) のときが該当する。これらは、掘削量がバケットの容積と同程度のときに起きる。 x が正の方向に比較的小さく動かすと、掘削量は維持したまま、旋回中のこぼれ量を大きく減少させられることがわかる。これは、パターン 1 と同様、旋回中にこぼれうる土砂をバケット内に収めることができたためであると考えられる。

パターン 3 は、掘削量は維持しつつこぼれ量が少なくな

る符号付き角度 x が存在しない場合である。中間のロームで横引き距離 d が 2.0 m (Fig. 11(c))，硬いロームで横引き距離 d が 2.0 m (Fig. 12(c)) が該当する。バケットの容積と比較し，掘削量が非常に大きいときに生じる。掘削でバケットに山盛りに土砂がのり，どのようにしても旋回中の土砂のこぼれが生じ，条件を満たす x が存在しなかったと考えられる。ただし，設定した条件は満たさないが， x が正の方向にアームを動かすことで掘削量は大きく減らず，こぼれ量は若干減少することがあることも見て取れる。

なお， x が負のときのみ条件を満たすような場合は存在せず，また x が負の方向に動かすと地表とバケットが衝突しうることを踏まえると， x が正の方向に動かす方が適切であると考えられる。これは熟練技能者に見られたアームを動かす方向と同じであり，熟練技能者の動作の合理性を確かめることができた。

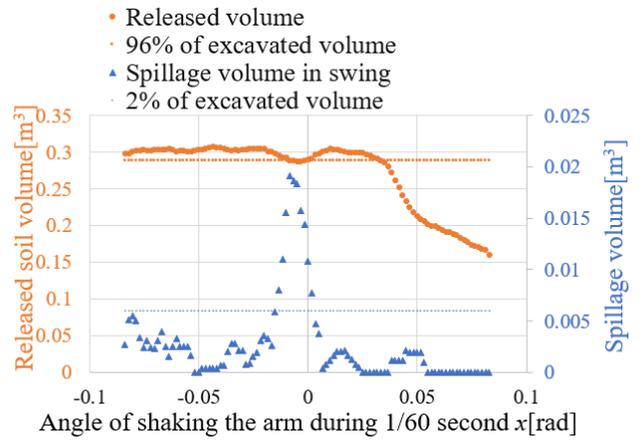
4.6.4 掘削量と硬さの関係

最後に，掘削量と硬さの関係について考察する。Fig. 9 より，横引き距離 d が同じとき，柔らかいロームは他の土砂と比べて，放土量と旋回中のこぼれ量の合計である掘削量が若干少ない。この原因は，土砂は掘削や放土により体積が増加するが，柔らかいロームの土砂の増加率は他の 2 つの土砂よりも小さい。柔らかいロームは土砂の体積増加が小さく，放土量が比較的小さくなったためと考えられる。

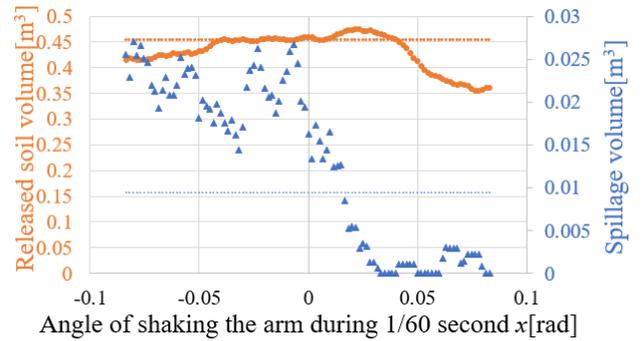
5. 結言

本研究では，旋回中の土砂のこぼれに着目した油圧ショベルの掘削動作を提案し，その評価を行った。以下に成果を示す。

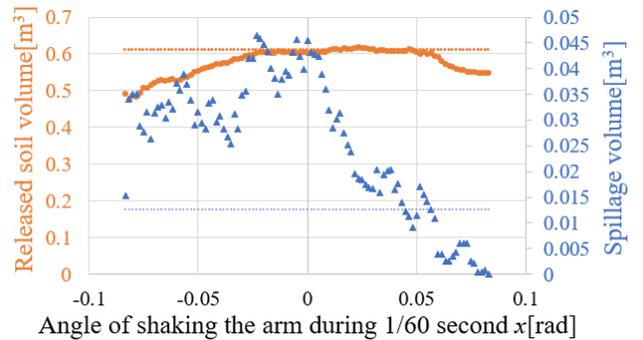
- 1) 放土量は維持しつつ，油圧ショベルの旋回中の土砂のこぼれ量を減少させるため，すくいバケットが水平になった瞬間にアームを前後に素早く動かす掘削動作 (Soil manipulation) を提案した。
- 2) 提案掘削動作により，放土量は維持したまま，旋回中の土砂のこぼれ量を大幅に低減できうることを明らかにした。
- 3) 土砂の条件や掘削軌道条件を変えた場合，条件を満たす Soil manipulation は一定ではないことを明らかにした。
- 4) 放土量は維持しつつ，旋回中の土砂のこぼれ量を減少させられる Soil manipulation の方向は，熟練技能者の動かす方向と同じことから，熟練技能者の動作の合理性を確認した。



(a) Dragging distance d : 0.0m



(b) Dragging distance d : 1.0m



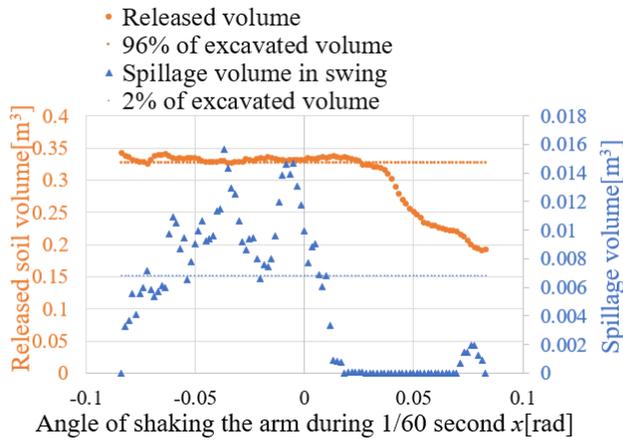
(c) Dragging distance d : 2.0m

Fig. 10: Soft loam

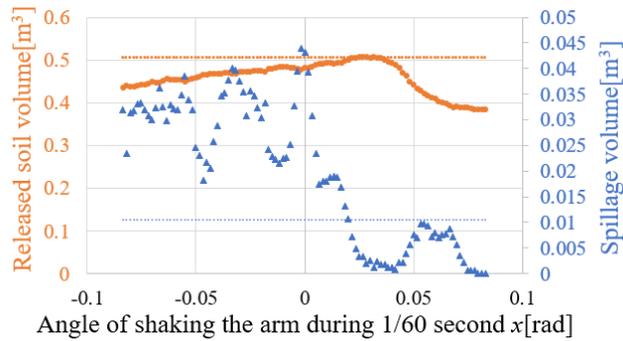
今後は，異なる種類の土で検証を行い，提案掘削動作の有効性を確認するとともに，実際の油圧ショベルを用いて実験を行い，実機での提案掘削動作の有効性を確認する。

Soil manipulation は，比較的単純な動作であり，様々な場所に適用可能である。たとえ旋回中の土砂のこぼれが問題にならないような環境でも，Soil manipulation により放土量が増加しうることは有意義であるため，Soil manipulation の応用先は幅広いと考えられる。

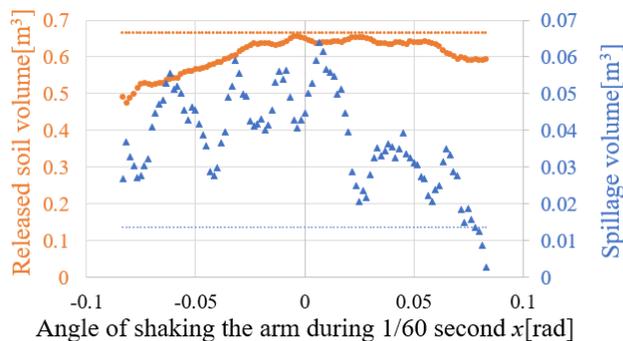
謝辞: 本研究は，JSPS 科研費 JP20H02109 ならびに，JST【ムーンショット型研究開発事業】グランド番号【JP-MJMS2032】の支援を受けたものです。また，筆頭著者



(a) Dragging distance d : 0.0m

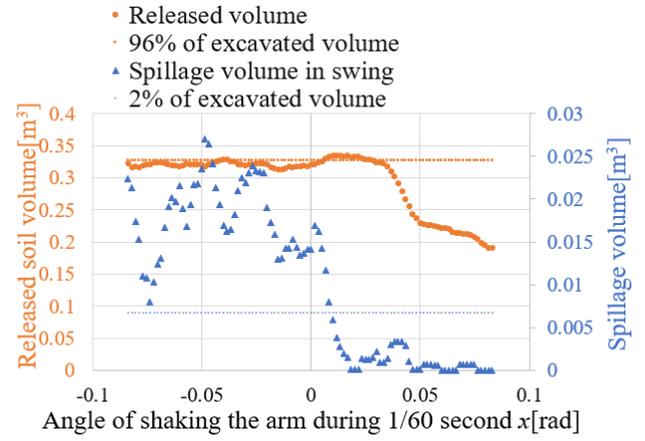


(b) Dragging distance d : 1.0m

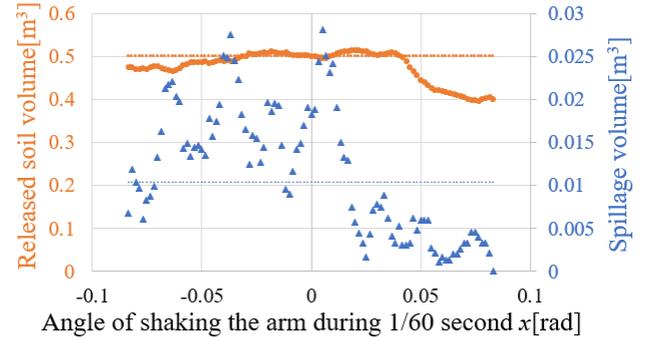


(c) Dragging distance d : 2.0m

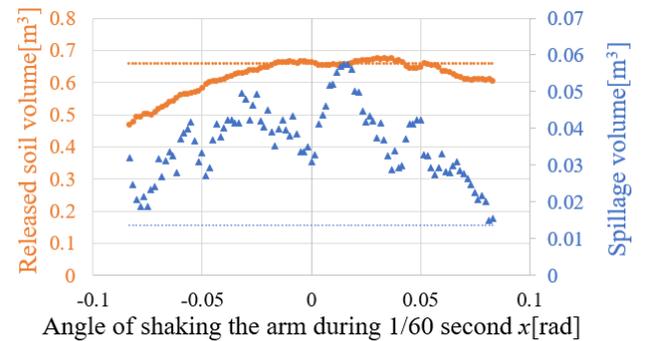
Fig. 11: Medium loam



(a) Dragging distance d : 0.0m



(b) Dragging distance d : 1.0m



(c) Dragging distance d : 2.0m

Fig. 12: Hard loam

は公益財団法人里見奨学会から支援を受けています。

参考文献

- [1] “建設機械動向調査 - 経済産業省”, <https://www.meti.go.jp/statistics/sei/kensetu/index.html>, (最終閲覧日: 2021年10月11日)
- [2] Stentz, A., Bares, J., Singh, S., Rowe, P.: “A robotic excavator for autonomous truck loading”, *Autonomous Robots*, 7(2), 175-186(1999)
- [3] 山元弘, 茂木正晴, 大槻崇, 柳沢雄二, 野末晃, 山口崇, 油田信一: “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, 48(8), 488-497(2012)
- [4] Tomatsu, T., Nonaka, K., Sekiguchi, K., Suzuki, K.: “Model predictive trajectory tracking control for hydraulic excavator on digging operation”, *Proceedings of the 2015 IEEE Conference on Control Applications (CCA2015)*, pp. 1136-1141(2015)
- [5] Katsuma, S., Yajima, R., Hamasaki, S., Chun, P., Nagatani, K., Yamauchi, G., Hashimoto, T., Yamashita, A. Asama, H.: “Excavation path generation for autonomous excavator considering bulking factor of soil”, *Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC2020)*, 578-583(2020)
- [6] Kim, Y. B., Ha, J., Kang, H., Kim, P. Y., Park, J., Park, F. C.: “Dynamically optimal trajectories for earthmoving excavators”, *Automation in Construction*, 35, 568-578.(2013)
- [7] 桂知弘, 谷島諒丞, 濱崎峻資, 永谷圭司, 山下淳, 浅間一: “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”, 第39回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (RSJ2021), RSJ2021AC2G4-06, 1-4(2021)