

# エネルギー効率向上のための目標掘削量を実現する 自律制御系の実験検証

○岡本 裕（東工大） 岡田 昌史（東工大）

油圧ショベルの無人化施工において自律掘削は重要であり、高エネルギー効率で適切な掘削量（高作業効率）による掘削が求められる。これの実現には、掘削のモデルによる掘削量の推定を行う必要があるが、従来手法では同定パラメータが多く実用が困難であった。そこで、我々はこれまでにバケットが土砂にはたらい仕事に基づいた掘削モデル及びそのモデルを用いた目標掘削量を達成する自律制御系を提案してきた。先行研究では、掘削1回目の平坦土砂に対して提案手法が有効であることを確認した。そこで、本研究では、掘削2回目の非平坦になった土砂に対しても提案手法が有効であることを油圧ショベルを模したロボットによる実験検証によって確認する。

## 1. はじめに

油圧ショベルの無人化施工においては、掘削の自律制御が重要である。掘削の自律制御において、高エネルギー効率で適切な掘削量（高作業効率）であることが求められるが、掘削量は掘削中に直接測定することが困難であるため、掘削モデルに基づいて掘削量の推定を行う必要がある。掘削モデルの従来研究として、力の静的なつりあいのモデル [1] や統計的モデル [2] を用いたものがあるが、モデル内のパラメータ同定に必要なデータ数が多く実用が困難であった。そこで、我々はバケットが土砂にはたらい仕事に着目し、少ないデータで設計可能な掘削モデルとそれを用いた目標掘削量を達成する自律制御系を提案してきた [3]。この自律制御は、目標掘削量から換算された目標仕事に現在の仕事から到達可能な掘削軌道へと基本軌道を変形する制御である。この先行研究では、掘削1回目の平坦土砂に対する掘削の実験検証を行い、目標掘削量を達成することを確認した。しかし、掘削作業は繰り返すものである。特に、掘削2回目では、人はバケットを満杯にするために油圧ショベルを広範囲に動かす傾向が強く、エネルギー効率の低下が予想される。そこで、我々が提案してきた手法を適用すれば、掘削2回目でも高い作業効率で適切な掘削量を達成できると期待される。本研究では、まず、非平坦土砂に対して掘削モデルが有効であることを実験検証をし、その後非平坦土砂に対して自律掘削による実験検証を行うことで、提案手法の有効性を確認する。

## 2. 掘削モデルについて

我々はバケットが土砂にはたらい仕事  $w$  に着目し、 $w$  から掘削量  $q$  を推定可能とする掘削モデルを提案してきた [3]。図1のような油圧ショベルのブーム関節を原点とした  $x-y$  座標系において、時刻  $t = k$  で表面高さ  $h_k$  の土砂に対してバケットが掘削するときを考える。バケットの状態を、バケット関節位置  $x_k, y_k$  と姿勢  $\theta_k$  を用いて  $\mathbf{x}_k = [x_k, y_k, \theta_k]^T$  とし、バケットが土砂にはたらく  $x$  軸方向の力  $f_{x,k}$  を用いて仕事率  $\dot{w}$  を、

$$\dot{w}_k = f_{x,k} \dot{x}_k \quad (1)$$

と定義する。このとき、バケット長に対する土砂への挿入率を  $\beta(\mathbf{x}_k, h_k)$ 、土砂に対するバケットの掃引体積

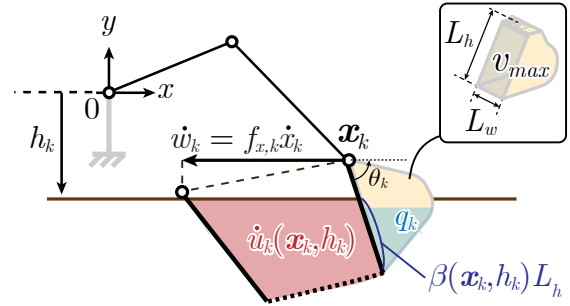


図1 掘削モデル

を  $u(\mathbf{x}_k, h_k)$  とすると、単位時間当たりの  $q_k$  と  $w_k$  は、

$$\begin{cases} \dot{q}_k = \rho \left(1 - \frac{q_k}{\rho v_{max}}\right) \beta(\mathbf{x}_k, h_k) \dot{u}_k(\mathbf{x}_k, h_k) \\ \dot{w}_k = \alpha \beta(\mathbf{x}_k, h_k) \dot{u}_k(\mathbf{x}_k, h_k) \end{cases} \quad (2)$$

と表現できる。ただし、 $\rho$  は掘削対象の土砂の密度、 $\alpha$  は土砂とバケット間の掘削抵抗、 $v_{max}$  はバケットの最大掘削体積である。 $\rho, \alpha$  は土砂の種類に依存するパラメータであり、最低2回の掘削により同定可能である。式 (2) の解は、積分定数を1として、

$$q_k = \rho v_{max} \left(1 - e^{-\frac{w_k}{\alpha v_{max}}}\right) \quad (3)$$

で得られる。

## 3. 平坦と非平坦土砂の掘削における差異



図2 実験で使用した装置と土砂

非平坦土砂への掘削における仕事と掘削量の関係と高エネルギー効率な掘削を実現するために提案手法が有効かを確認するために、図2の油圧ショベルを模したロボットを用いた掘削による実験検証を行った。中粒の平坦土砂と非平坦土砂に対して掘削距離が異なる軌道を用いて掘削を行い、掘削終了時の仕事  $w^m$  や掘削量  $q^m$  を計測した。  $w^m$  は、図2のロボットのバケット関節に取り付けられた6軸の力/トルクセンサによる  $f_x$  と、各関節のモータのエンコーダによる  $x$  の計測値により計算し、  $q^m$  はバケットが掬い上げた土砂の質量を計測した。掘削軌道として図4の(i)から(iv)の時系列データを用意し、掘削距離が異なる軌道として(i)(ii)、非平坦土砂を形成する軌道として(iii)、バケット最大量を掘削する軌道として(iv)を用いた。実験手

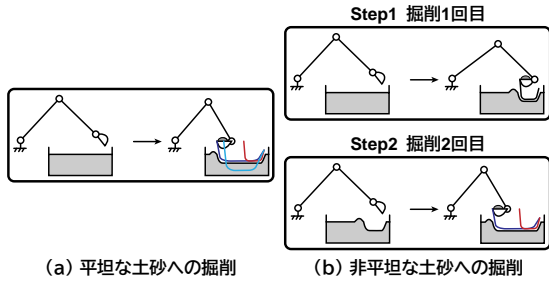


図3 平坦へと非平坦への掘削比較ための実験手順

順を説明する。平坦土砂への掘削においては、図3(a)のように平坦土砂に対して軌道(i)(ii)(iii)による掘削を行った。非平坦土砂への掘削においては、図3(b)のように、まず平坦土砂に対して軌道(iv)による掘削を行い非平坦土砂を形成した後に、図4における軌道(i)(ii)による掘削を行った。軌道(i)(ii)(iii)の  $w^m$  と  $q^m$  の実

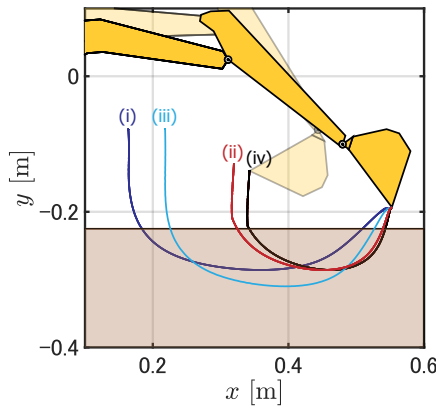


図4 実験で用いた掘削軌道

験結果を図5に示す。平坦土砂への掘削の結果を\*’、

表1 実験時に使用したパラメータ

パラメータ	値
$\rho$	$1.32 \times 10^3$ [kg/m <sup>3</sup> ]
$\alpha$	$4.69 \times 10^3$ [kg/s <sup>2</sup> /m]
$v_{max}$	$3.07 \times 10^{-4}$ [m <sup>3</sup> ]

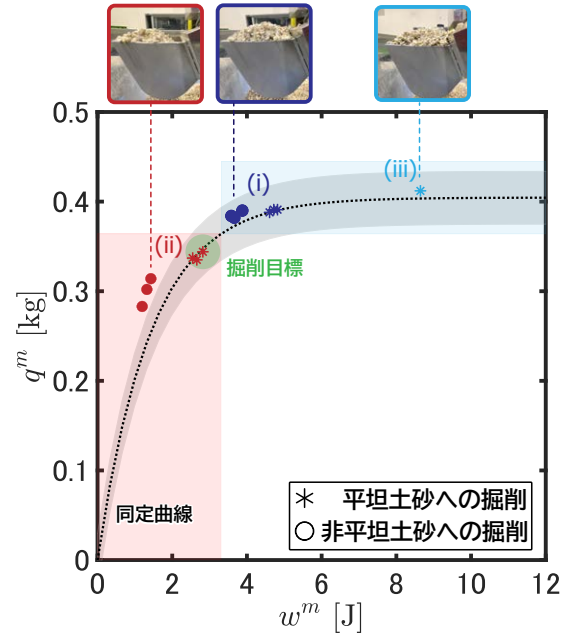


図5 平坦と非平坦土砂への掘削実験における仕事  $w^m$  と掘削量  $q^m$

非平坦土砂への掘削結果を’O’で表し、軌道の種類を図4における軌道の色で表す。また、表1の同定パラメータによる式(3)を黒色破線、その99%信頼区間を灰色領域で表し、軌道(i)(ii)(iii)でのバケット内土砂を写真で示す。軌道(i)(ii)において、非平坦土砂への掘削結果は、同軌道であっても掘削される土砂が少ないため平坦土砂への掘削よりも仕事及び掘削量が少なくなっているが、同定曲線付近に分布しており、非平坦土砂への掘削においても掘削モデルにより仕事と掘削量の関係を表現可能であるといえる。軌道(ii)の非平坦土砂への掘削結果が99%信頼区間外であるのは、図6のように掘削1回目の軌道(iv)で生じた盛り土を少ない  $x$  軸方向の仕事で掘ったためである。エネルギー

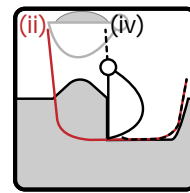


図6 軌道(ii)におけるバケットの掬い上げ

効率の観点において、青色領域内データの掘削は掘削量が軌道(iii)の写真のようにバケット最大量  $\rho v_{max}$  (掘削量の収束値) に近いためエネルギー効率が低く、逆に赤色領域内データの掘削はエネルギー効率が高いことを表している。掘削においては、図5の緑色領域のように高エネルギー効率かつ適切な量を掘削する、つまり高作業効率であることが求められる。非平坦への掘削において、図5の緑色領域のような掘削を実現するためには、掘削距離が軌道(i)と(ii)の間となる軌道で掘削する必要がある。以上より、高エネルギー効率且

つ高作業効率な掘削の実現には、土砂の状況に応じて適切な距離で掘削することが重要であり、我々の提案手法が活用できる。

#### 4. 自律制御アルゴリズムについて

目標掘削量  $q^{ref}$  を実現する掘削モデルを用いた掘削距離変化のアルゴリズムを説明する。このアルゴリズムにおいて、距離方向拡大係数  $r$  を用いた座標変換によって、掘削距離を変化させる。以下に自律制御アルゴリズムを示す。

**Step1**  $q^{ref}$  を設定し、式 (3) の逆関数から  $q^{ref}$  に対応する目標仕事  $w^{ref}$  を求める。

**Step2** バケツが土砂に接触した瞬間を  $t = 0$  として、計測された  $\dot{w}_k$  と  $\dot{x}_k$  を用いて、土砂表面高さ  $\hat{h}_k$  を式 (2) より推定する。

**Step3** 現時刻  $t = k$  の仕事  $w_k$  から  $w^{ref}$  までの残差の式はサンプリングタイム  $\Delta T$  と推定土砂高さ  $\hat{h}_k$  を用いて

$$w^{ref} - w_k^m = \sum_{i=k}^N \dot{w}(x_i, r_k, \hat{h}_k) \Delta T \quad (4)$$

である。式 (4) より拡大係数  $r_k$  を数値計算により求める。

**Step4**  $r_k$  を用いて、事前に用意した掘削の基本軌道  $\Xi = [\xi_0, \xi_1, \dots, \xi_N]$  に対して、 $\xi_0$  を中心とした座標変換を行い、バケツの目標値  $x^{ref}$  を求める。

**Step5** Step2-5 を online で繰り返し実行する。

#### 5. 実験検証

非平坦土砂に対して提案手法の有効性を検証するために、図2の装置と土砂を用いて実験検証を行った。図3(b)のように、まず非平坦土砂を形成するために固定軌道で掘削を行い、その後、目標掘削量  $q^{ref}$  を設定し、提案手法の自律制御系を用いて非平坦土砂への掘削を行い、掘削終了時のバケツが掬い上げた掘削量  $q^m$  を測定した。また、比較として図3(a)のように、同じ  $q^{ref}$  を設定し、提案手法の自律制御系を用いて平坦土砂への掘削を行い、 $q^m$  を測定した。 $q^{ref}$  は、図5の緑色領域となるように 325 – 365 g の 5 g 刻みの 9 種類とした。また、基本の掘削軌道の生成器として、基本掘削軌道をアトラクタとして埋め込んだベクトル場を用いた非線形力学系 [4] を用いた。実験時に設定したパラメータを表2に示す。ただし、 $\Delta T$  はサンプリングタイム、 $r_0$  は拡大係数の初期値である。

掘削1回目後の非平坦土砂が一様に形成されているかを確認するために LiDAR を用いて容器の上から土砂表面の計測を行った。各  $q^{ref}$  の実験における形成された平均土砂表面を図7に黒色実線で示す。各  $q^{ref}$  における平均土砂表面は、高さ方向にばらつきはあるが同様な非平坦形状であるといえる。この非平坦土砂に対して、 $q^{ref}$  を設定して自律掘削を行ったときの  $r$  の時間変化を図8に  $q^{ref}$  ごとに色を分けた線で示し、バケツ手先軌道を図9に図8の  $q^{ref}$  に対応した色の線

表2 提案手法検証実験時に使用したパラメータ

パラメータ	値
$\rho$	$1.35 \times 10^3$ [kg/m <sup>3</sup> ]
$\alpha$	$4.65 \times 10^3$ [kg/s <sup>2</sup> /m]
$v_{max}$	$3.07 \times 10^{-4}$ [m <sup>3</sup> ]
$\Delta T$	$5.00 \times 10^{-3}$ [s]
$r_0$	$3.00 \times 10^{-1}$ [–]

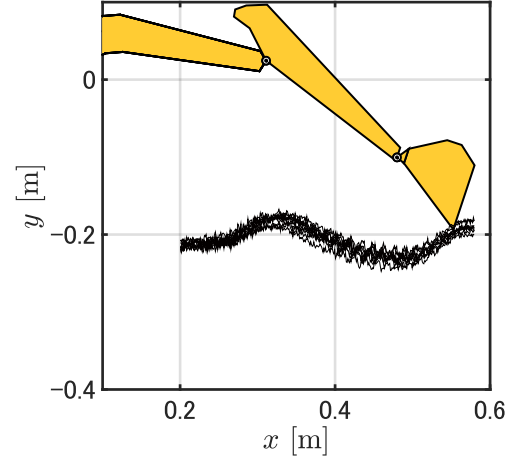


図7 各  $q^{ref}$  における平均土砂表面形状

で示す。各線における実線部は自律制御が機能していることを表し、破線部はバケツが掬い上げの動作に入り自律制御が機能していないことを表している。図

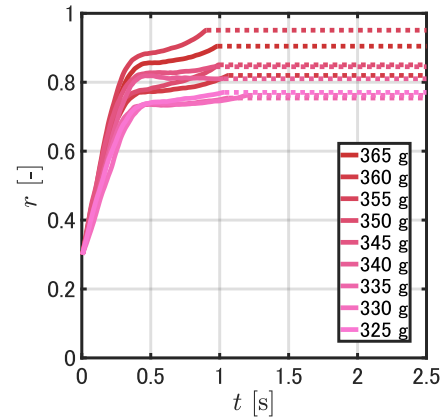


図8 各  $q^{ref}$  の拡大係数  $r$  時間変化

8と図9より、 $q^{ref}$  が大きくなればなるほど、掘削中に拡大係数が上昇し、掘削距離が長くなっていることが確認でき、提案手法によって目標掘削量に応じて掘削距離が変化していることが分かる。 $w^{ref}$  に対する  $w^m$  の時間変化を図10に図8の  $q^{ref}$  に対応した色の線で、 $w^{ref}$  を青色の破線で示す。加えて、図11に平坦土砂に対して同じ  $q^{ref}$  を設定して自律掘削を行ったときの結果を灰色の線で示す。図8より、各  $q^{ref}$  において非平坦土砂や平坦土砂に関わらず最終的に  $w^m$  が  $w^{ref}$  に収束しており、提案手法により  $q^{ref}$  に対応した  $w^{ref}$  へ

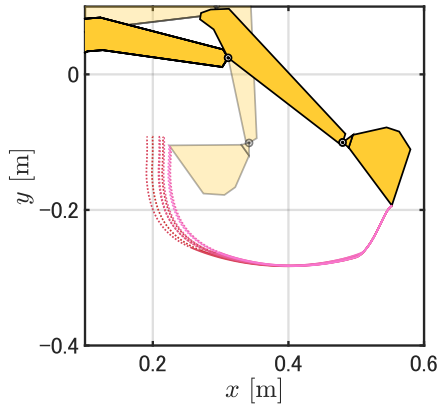


図9 各  $q^{ref}$  のバケット手先軌道

の制御が実現できている.  $q^{ref}$  に対する  $q^m$  を図 11

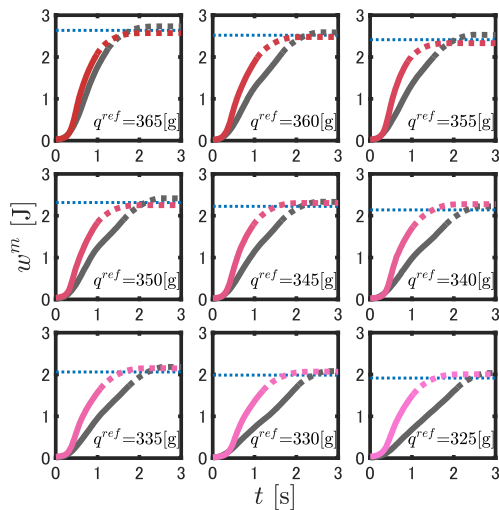


図 10 目標仕事  $w^{ref}$  に対する測定仕事  $w^m$  の時間変化

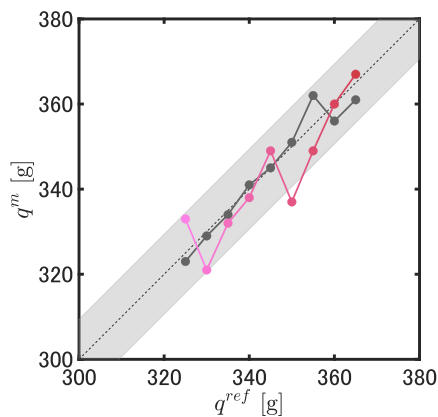


図 11 目標掘削量  $q^{ref}$  に対する測定掘削量  $q^m$

に図 7 に対応した色の '○' で示す. 加えて, 図 11 に平坦土砂に対して同じ  $q^{ref}$  を設定して自律掘削を行ったときの結果を灰色の '○' で示し, 平坦及び非平坦土砂への自律掘削の  $q^{ref}$  に対する二乗平均誤差平方根  $\sigma$  を表 3 に, 平坦自律掘削の 99% 信頼区間を図 11 に灰色

表 3  $q^{ref}$  に対する二乗平均誤差平方根  $\sigma$

	平坦	非平坦
$\sigma$ [g]	3.14	6.52

領域で示す. 図 11 における非平坦土砂のデータ分布から,  $q^m$  は  $q^{ref}$  に対して近い値であり, 提案手法により目標掘削量を実現できている. ただし, 表 3 より平坦土砂の場合と比べて非平坦の場合の方が  $\sigma$  が約 2 倍大きくなっている. これは, 図 9 での破線曲線部の自律制御が機能しない掘削で掬い取られる土砂の表面において図 7 のように高さ方向にばらつきがあり, そのばらつきが  $q^m$  に影響したためだと考えられる. これらの結果から,

- (1) 提案手法により, 掘削 2 回目の非平坦土砂の場合も適切な距離で掘削を行い, 高エネルギー効率で適切な量を掘削可能である.
- (2) 提案手法において, 非平坦土砂の掘削は, バケツが掬い上げる際の盛り土砂により目標掘削量に対する二乗平均誤差平方根が平坦土砂の掘削よりも大きくなる.

がわかる.

## 6. おわりに

本研究では, 連続した掘削作業において高エネルギー効率かつ高作業効率な掘削を実現するために, 非平坦土砂に対して提案手法の掘削モデルによる自律掘削を行い, 提案手法の有効性を検証した.

- 2 回目の掘削として, 非平坦土砂に対して時系列データによる掘削を行い, 非平坦への掘削においても提案手法のモデルが有効であることを確認した. 加えて, 高エネルギー効率かつ高作業効率な掘削を実現するためには, 土砂の状況に応じて適切な距離で掘削することが重要であり, 我々の提案手法が活用できることを確認した.
- 提案手法で設計した自律系を用いて非平坦土砂に対して掘削を行い, 提案手法が土砂の形状に応じて掘削軌道を変化させ, 高エネルギー効率で目標掘削量を実現可能であることを確認した.

## 参考文献

- [1] A. R. Reece: "Paper 2: The fundamental equation of earth-moving mechanics", Proc. Inst. Mech. Eng., vol. 179, no. 6, pp. 16-22, 1964.
- [2] R. J. Sandzimir and H. H. Asada: "A Data-Driven Approach to Prediction and Optimal Bucket-Filling Control for Autonomous Excavators", in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 5, no. 2, pp. 2682-2689, April 2020
- [3] 岡本裕, 岡田昌史: "目標掘削量実現のための土砂掘削モデルに基づいた自律制御系設計", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 4H3-03, 2022
- [4] 岡田昌史, 中村仁彦: "脳型情報処理を行う力学系の多項式設計法とそのヒューマノイドの全身運動生成への応用", 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 8, pp.1050-1060, 2004