

土質に応じた動作生成が可能な自動掘削のための3次元計測情報を用いた土質推定

Soil Property Estimation Using 3-D Measurement Data for Autonomous Excavation in Consideration with Soil Properties

学○勝間慎弥 (東大) 谷島諒丞 (東大) 濱崎峻資 (東大) 全 邦釘 (東大) 正 永谷圭司 (東大)
山内元貴 (土研) 橋本 毅 (土研) 正 山下 淳 (東大) 正 浅間 一 (東大)
Shinya KATSUMA, The University of Tokyo, katsuma@robot.t.u-tokyo.ac.jp
Ryosuke YAJIMA, The University of Tokyo, yajima@i-con.t.u-tokyo.ac.jp
Shunsuke HAMASAKI, The University of Tokyo, hamasaki@i-con.t.u-tokyo.ac.jp
Pang-jo CHUN, The University of Tokyo, chun@i-con.t.u-tokyo.ac.jp
Keiji NAGATANI, The University of Tokyo, keiji@i-con.t.u-tokyo.ac.jp
Genki YAMAUCHI, Public Works Research Institute, yamauchi-g573bs@pwri.go.jp
Takeshi HASHIMOTO, Public Works Research Institute, t-hashimoto@pwri.go.jp
Atsushi YAMASHITA, The University of Tokyo, yamashita@robot.t.u-tokyo.ac.jp
Hajime ASAMA, The University of Tokyo, asama@robot.t.u-tokyo.ac.jp

This paper proposes a soil property estimation method for an autonomous excavation in consideration with soil properties. Previous autonomous excavation methods did not consider such properties of target soil, thus they could not increase excavation efficiency against unknown soil. In this research, one of the properties of target soil, the volume change rate, is calculated by the 3-D measurement data. Continuous estimation of the property during excavation makes it possible to generate an adaptive excavation motion of the excavator. An experimental result for the 3-D measurement of soil shape using a hydraulic excavator and RGB-D sensors confirmed the validity of the proposed method.

Key Words: Autonomous excavation, Soil property estimation, 3-D measurement

1 序論

近年建設現場において、高齢化による人材不足の解消や労働環境の改善を行うため、生産性向上への社会的要請が高まっている[1]。建設現場において主要な作業である掘削作業は、生産性向上の余地がある作業の1つである一方で、市街地での掘削作業では、地下埋設管の損傷を防ぐ必要もある。地下埋設管とは水道管やガス管、電線等の地中に存在する管のことで、現在多くの埋設管が複雑な位置関係で地中に存在している。これらを誤って損傷すると多大な経済的被害が発生するため、埋設管の損傷を防ぐことは非常に重要である。埋設管の損傷を防ぐため、現在建設現場では試掘と呼ばれる作業が行われている。この試掘とは、掘削によって埋設管の周囲の土砂を除去し、地中に存在する埋設管を露見させる作業であり、埋設管の位置を目視で確認することを目的とする。しかし、この作業では多くの人員を要するだけではなく、最終的には人がスコップを用いて埋設管の周囲を掘削する必要がある。生産性が非常に低くなるという問題がある。よって、市街地における掘削作業の生産性を向上させるためには、油圧ショベル自身が自動で掘削動作を行うことが望ましい。

油圧ショベルの自動掘削動作に関する先行研究として、山元らは3次元計測情報を用いて自動掘削を行う油圧ショベルのプロトタイプを開発した[2]。この手法では、対象とする地形の3次元計測情報に応じた自動掘削を行うことで、通常のオペレーターによる作業スピードと同等のスピードで10cm以内の精度の溝掘削を実行することが可能である。しかし、この手法では、土質の情報は既知であることを仮定しており、その情報に基づいて掘削軌道のパラメータを事前に指定する必要がある。したがって、土質が未知の場合には、事前に指定した掘削軌道が適切でない可能性があり、これにより、掘削動作の効率が大きく低下する恐れがある。

以上の問題を解決するためには、土質に応じた動作生成が可能な自動掘削手法が必要である。これを実現するには、2つの要素技術を確認することが必要である。1つは掘削対象となる地形の土質推定手法の構築、もう1つは土質の情報を用いた油圧ショベルの掘削作業手法の構築である。本研究では、前者の掘削対象となる土質推定手法の提案を目的とする。本稿の構成は以下の通

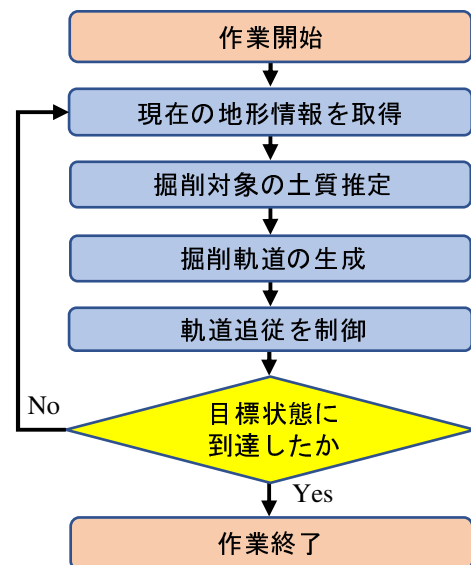


Fig. 1 Flowchart of excavation work

りである。初めに、最終的に実現を目指す自動掘削手法の枠組みを提示し、その枠組みにおける土質推定の必要性を述べた上で、3次元計測情報を用いた土質推定手法を提案する。続いて、油圧ショベルを用いた実機実験により、提案手法の有効性を検証し、最後に結論を述べる。

2 提案手法

2.1 掘削作業計画の概要

本研究が対象とする建設機械は油圧ショベルである。油圧ショベルによる掘削作業のフローチャートを図1に示す。はじめに、

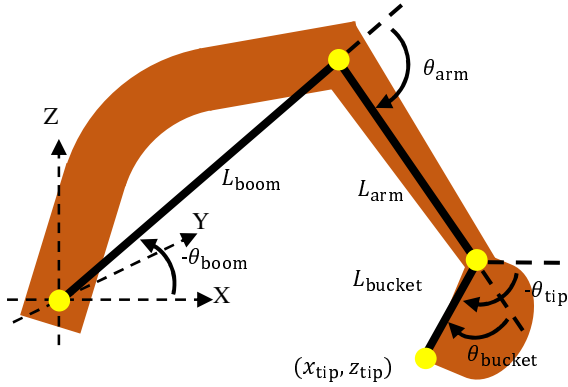


Fig. 2 Parameters for hydraulic shovel

油圧ショベルは、作業対象となる土壌の地形情報を取得する。これには RGB-D センサを用いることとし、この情報を用いて掘削対象の土質を推定する。次に、取得した情報をもとに掘削軌道を生じ、生成された掘削軌道を実機が追従する制御を実行する。このサイクルを目標状態に到達するまで繰り返す。ここで、目標状態は事前に指定した掘削形状として与えられる。

2.2 問題設定

本研究で用いる油圧ショベルのパラメータを図2に示す。油圧ショベルの作業機は操作部がある本体側から順にブーム、アーム、バケットと呼ばれ、それぞれの回転角は油圧アクチュエータを用いて制御することが可能である。ここで、油圧ショベル本体のz軸まわりの旋回は無いものと仮定し、掘削動作はxz平面上で考える。この仮定のもとで、本研究での掘削作業計画問題は、xz平面上で油圧ショベルが追従すべき角度列 $\Theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]$ を決定することと定義される。ここで、 $\theta_i = [\theta_{boom,i}, \theta_{arm,i}, \theta_{bucket,i}]$ であり、 n は各掘削動作におけるサンプル数である。その時点での計測情報に基づいて決定された Θ に従って掘削動作を実行することを目標状態に到達するまで繰り返す。

2.3 掘削軌道モデル

2.2節で述べたように、目標状態に到達するために掘削動作は繰り返し実行される。提案手法では、毎回の掘削動作を $x_{penetrate}, z_{penetrate}, \theta_{penetrate}, l_{penetrate}, l_{drag}$ の5つのパラメータによってモデル化する。なお、自動掘削動作は、オペレータによる掘削動作を参考にする。一般にオペレータによる掘削動作は3段階からなり、バケット先端を土壌に挿す penetrate、横に引いて土砂をバケット内部に取り込む drag、バケットの回転によって土砂を持ち上げる scoop からなる [3]。これを参考に、上述した5つのパラメータを用いて掘削軌道を表現する。提案手法で用いるパラメータを図3に示す。 $(x_{penetrate}, z_{penetrate})$ は掘削開始時にバケット先端を土壌に挿す位置の (x, z) 座標を表し、 $\theta_{penetrate}$ はその時のバケットと水平面のなす角を表す。また、 $l_{penetrate}$ は penetrate を継続する距離を、 l_{drag} は drag を継続する距離を表す。scoop においては、アームの先端位置を固定し、バケット角のみ 90° 回転させる動作を実行するものとする。これらのパラメータを決定すると、各掘削動作におけるバケット先端の位置と姿勢を決定することができる。このバケット先端の位置と姿勢から、逆運動学計算を行うことで、 θ_i を決定する。

2.4 3次元計測情報を用いた土質推定

2.3節で述べたように、掘削動作を決定するためには掘削軌道モデルのパラメータを決定する必要があるが、効率の良い掘削を実現するためには、土質の情報を考慮することが望ましい。例えば、対象とする土砂が崩れやすい場合、掘削によって土砂がこぼれ落ちる量を抑制するために、 $l_{penetrate}$ や l_{drag} の値は小さく設定する必要がある。このように、土質に適した掘削動作を生成するためには、対象とする土壌の土質情報が有用である。

本研究では土質情報のうち、特に土砂の間隙比 e に着目することとした。間隙比 e は、式 (1) によって定義される [4]。

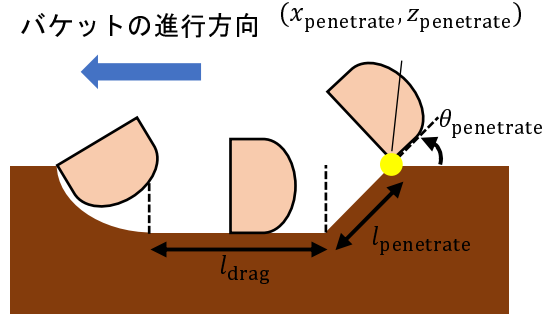


Fig. 3 Parameters for excavation path

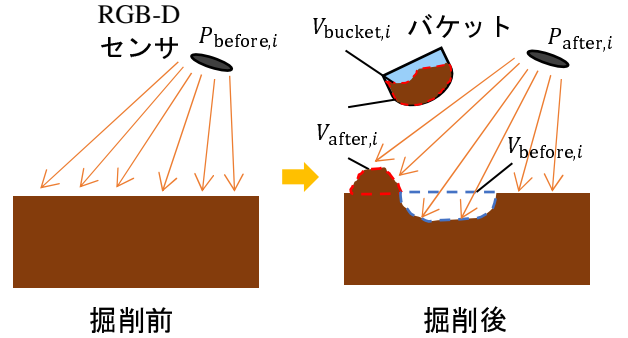


Fig. 4 Volume calculation method

$$e = \frac{V_v}{V_s}, \quad (1)$$

ここで、 V_s は土粒子の体積を、 V_v は間隙の体積を示す。この間隙比は、外力が加えられた場合の土砂の体積変化に影響を与えることが知られている [5]。よって、掘削対象の土砂の間隙比を知ることができれば、土砂の体積が掘削によってどれほど変化するかを予測することが可能となる。しかし、この間隙比を直接測定することはできない。そこで、本研究では、掘削動作を行いながら逐次的に土砂の体積変化を測定することで、掘削対象の土砂の体積変化率を直接推定する。本研究では、掘削による土砂の体積変化を3次元点群データを用いて算出し、その平均をとることで掘削対象の土砂の体積変化率の推定を行う。具体的には、式 (2) で定義される体積変化率 β_k を用いる。

$$\beta_k = \frac{1}{n} \sum_{i=k-n+1}^k \frac{V_{after,i}}{V_{before,i}}, \quad (2)$$

ここで、 k はその時点までの掘削回数を示す。 n は平均計算に用いるサンプル数であり、実行済みの掘削動作のうち直前何回分までの計測データを用いるかを示す。また、 $V_{before,i}$ は3次元点群データによって得られた i 回目の掘削動作実行前の土砂の体積を、 $V_{after,i}$ は i 回目の掘削動作実行後の土砂の体積を示す。 $V_{before,i}$ 及び $V_{after,i}$ の算出方法を図4に示す。図4において、 $P_{before,i}$ は i 回目の掘削動作実行前に計測した地形の3次元点群データを、 $P_{after,i}$ は i 回目の掘削動作実行後に計測した地形の3次元点群データを示す。また、 $V_{bucket,i}$ は i 回目の掘削動作実行後におけるバケット内部の土砂の体積である。 $P_{before,i}$ と $P_{after,i}$ の差分を取ることで、新たに土砂が堆積した領域の体積及び土砂が消失した領域の体積を算出できる。よって、 $V_{before,i}$ は土砂が消失した領域の体積 (図4青線部) で、 $V_{after,i}$ は新たに土砂が堆積した領域の体積と $V_{bucket,i}$ の和 (図4赤線部) で算出できる。このような手法で算出される β_k を用いることで、掘削対象の土砂の体積が掘削された後どれほど変化するかを予測することができる。

2.5 土質情報を用いた掘削軌道生成手法

2.4節で、掘削対象とする土砂の体積が掘削によってどれだけ増加するか予測可能であると述べた。本研究では、その土質情報を用いて掘削軌道のパラメータを決定する。具体的には、掘削さ

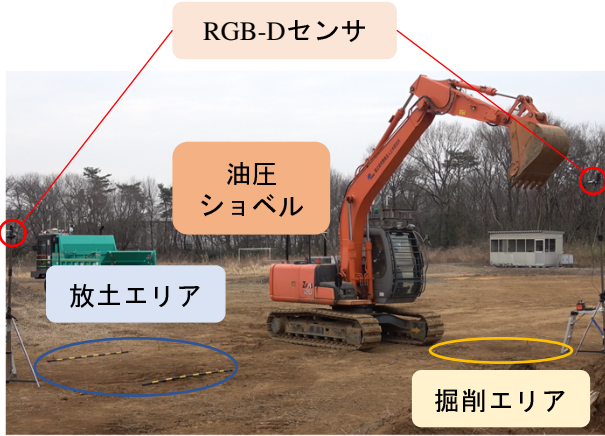


Fig. 5 Experimental site

れた後の土砂の体積を油圧ショベルのバケット容量以下に制限した掘削軌道を生成する。そうすることで土砂のこぼれを防ぎ、効率的な掘削動作の生成を行う。制約条件を式 (3) に示す。

$$\beta_k V_e \leq L, \quad (3)$$

ここで、 V_e は掘削軌道モデルのパラメータから幾何的に計算される掘削予定の土砂の体積を示し、 L は油圧ショベルのバケット容量を示す。 $\beta_k V_e$ は幾何的に計算される掘削予定の体積に、計測によって得られる体積変化率をかけたものであるため、掘削された後の土砂の体積を事前に予測したものとなっている。したがって、式 (3) の制約条件を用いることで、掘削対象となる土砂の体積変化も考慮した上で、土砂のこぼれを防ぐことが可能である。式 (3) のもとで、掘削動作の効率を最大化するため、式 (4) によって、掘削軌道のパラメータを決定する。

$$\beta_k V_e = L, \quad (4)$$

ここで、 V_e は掘削軌道モデルの 5 つのパラメータの関数であるが、そのうち $x_{\text{penetrate}}$, $z_{\text{penetrate}}$, $\theta_{\text{penetrate}}$ は、目標状態の掘削形状とその時点までの掘削動作から計算可能である。よって、 V_e は $l_{\text{penetrate}}$, l_{drag} の関数となる。ここで、 $l_{\text{penetrate}}$ と l_{drag} の間に、式 (5) の条件式を設定する。

$$l_{\text{drag}} = 2l_{\text{penetrate}}, \quad (5)$$

式 (5) は、熟練オペレータの掘削動作を参考に設計した。熟練オペレータは、深さは浅く、横引きの距離は長い掘削を行うことが知られている [6]。よって、深さに対して横引きの距離が長くなるよう、式 (5) を設計した。式 (5) を用いることで、 V_e は実質的に $l_{\text{penetrate}}$ もしくは l_{drag} のみの関数として考えることができる。以下、 V_e は l_{drag} の関数 $V_e(l_{\text{drag}})$ として考えることとする。このとき、 l_{drag} は式 (6) によって求められる。

$$l_{\text{drag}} = V_e^{-1}\left(\frac{L}{\beta_k}\right), \quad (6)$$

以上の計算によって、毎回の掘削軌道生成時に 5 つのパラメータを決定し、土質情報を用いた掘削軌道を生成する。

3 実験

3.1 実験設定

実験環境において、本研究で提案した土質推定手法を適用することが可能であるかどうかを検証するため、油圧ショベルを用いた実機実験を行った。本実験では、油圧ショベルとして日立建機 ZAXIS120 を、RGB-D センサとして Intel 社の IntelRealSenseDepthCameraD435i を使用した。実験系の様子を図 5 に示す。本実験では提案手法で述べた方法を用いて、対象とする土壌の体積変化率を推定する。具体的には、掘削前の掘削エリアの 3 次元点群データ ($= P_{\text{before},i}$) と掘削後の掘削エリアの 3 次元点群データ ($= P_{\text{after},i}$) を測定し、その差分を用いて新たに土砂が

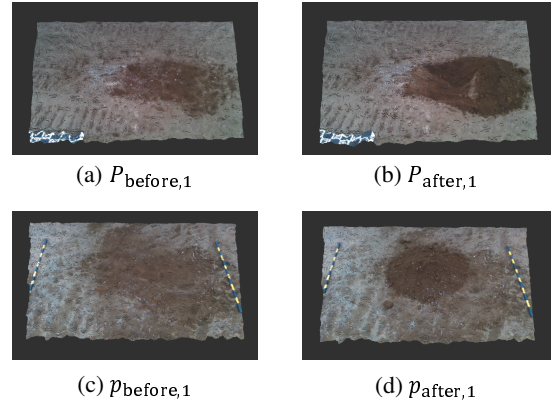


Fig. 6 3-D pointcloud data (1st time)

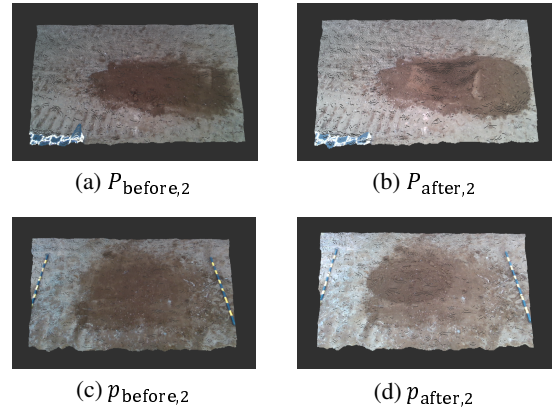


Fig. 7 3-D pointcloud data (2nd time)

堆積した領域の体積、及び土砂が消失した領域の体積を算出する。また、放土前の放土エリアの 3 次元点群データ ($= p_{\text{before},i}$) と放土後の放土エリアの 3 次元点群データ ($= p_{\text{after},i}$) を測定し、その差分からバケット内部の土砂の体積 ($= V_{\text{bucket},i}$) を測定する。これらのデータをもとに対象とする土壌の体積変化率を推定する。3 次元点群データから体積を算出するには、3 次元点群の処理に適したソフトウェアである CloudCompare を用いた [7]。なお、本実験では、一連の測定を 2 回実行することとした。1 回目の測定では、事前にある程度圧縮されている土壌を対象とする。2 回目の測定では、1 度掘削した土砂を元の場所に埋め戻し、その領域に対して再度掘削を実行する。1 度掘削した土砂は圧縮が緩和されるため、このような手順で掘削することで、土砂の間隙比の違いによる体積変化率の変化が検証可能であると期待できる。

3.2 実験結果

本実験で得られた 3 次元点群データを図 6 と図 7 に示す。図 6 は 1 回目の計測時のデータ、図 7 は 2 回目の計測時のデータであり、それぞれの図において (a) は掘削前の掘削エリアを、(b) は掘削後の掘削エリアを、(c) は放土前の放土エリアを、(d) は放土後の放土エリアを示している。また、この 3 次元点群データに基づいて算出された掘削動作実行前の土砂の体積 $V_{\text{before},i}$ 、掘削動作実行後の土砂の体積 $V_{\text{after},i}$ 、及び体積変化率 β_k を表 1 に示す。ここで、本実験では式 (2) における $n = 1$ とした。表 1 より、1 回目の掘削に比べて、2 回目の掘削における体積変化率の値は小さくなっていることが見てとれる。これは、1 度掘削することによって圧縮が緩和された土砂を掘削する場合、掘削動作実行前後で土砂の体積がそれほど変化しなかったためであると考えられる。つまり、間隙比の違いが体積変化率に反映されていると言える。このことから、提案手法の体積変化率を用いることで、対象とする土砂の間隙比の推定が可能であることが示された。これにより、掘削軌道を生成する際に土砂の体積変化を考慮することが可能となり、土砂のこぼれを抑えた上での効率的な掘削動作の実現が期待される。

Table 1 Volume change rate for each measurement

	$V_{\text{before},i}$	$V_{\text{after},i}$	β_k
1 回目	0.4552	0.6619	1.4540
2 回目	0.5081	0.5926	1.1663

4 結論

本研究では、土質に応じた動作生成が可能な油圧ショベルの自動掘削手法を実現するため、掘削対象となる土質推定手法を提案した。提案手法は、土砂の間隙比の違いが掘削前後の土砂の体積変化に現れることに注目し、3次元計測情報を用いた逐次的な土質推定を行うものである。さらに、油圧ショベルを用いた実機実験により、提案手法による土質推定の適用可能性を検証し、掘削対象の土砂の体積変化が推定可能であることを確認した。

今後は、掘削軌道生成まで含めたシステム全体を油圧ショベルの実機に搭載し、実機実験を行うことで、掘削対象の土質に応じた効率的な動作生成が可能な自動掘削を実現する。

謝辞

本研究の一部は、平成31年度国土交通省建設技術開発費補助金の支援を受けた。

参考文献

- [1] 国土交通省: "i-Construction ～建設現場の生産性革命～", <http://www.mlit.go.jp/common/001127288.pdf>, 2016, (閲覧日 2020.2.28)
- [2] 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, vol. 48, no. 8, pp. 488-497, 2012.
- [3] Filippos E. Sotiropoulos and H. Harry Asada: "A Model-Free Extremum-Seeking Approach to Autonomous Excavator Control Based on Output Power Maximization", IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 4, no. 2, pp. 1005-1012, 2019.
- [4] 安田 進, 山田 恭央, 片田 敏行: "土質力学", オーム社, 1998.
- [5] 笹原 克夫, 酒井 直樹, 栗原 淳一: "初期間隙比を変えた不飽和砂質土の破壊時及び限界状態付近のせん断強度と間隙比", 土木学会論文集 C, vol. 64, no. 2, pp. 197-208, 2008.
- [6] 境田 右軌, 中後 大輔, 川端 邦明, 嘉悦 早人, 浅間 一: "熟練オペレータによる油圧ショベルの掘削作業解析", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2006 講演概要集 2A1 B01, 2006.
- [7] "Cloud Compare", <http://www.danielgm.net/cc/> (閲覧日 2020.2.25)