

土量変化率を考慮した油圧ショベルによる自動掘削と建設機械の標準プラットフォームの開発

永谷圭司¹・勝間慎弥¹・濱崎峻資¹・谷島諒丞¹・全 邦釘¹・山下 淳¹・
小澤一雅¹・山内元貴²・橋本 毅²

¹東京大学 大学院 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)
E-mail: keiji@i-con.t.u-tokyo.ac.jp

²国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6号)
E-mail: yamauchi-g573bs@pwri.go.jp

筆頭筆者が所属する i-Construction システム学寄付講座は、社会基盤学専攻と精密工学専攻との共同運営体制であり、土木と機械の両側面から、i-Construction に関連した研究開発が進められている。本稿では、この中でも特に、油圧ショベルによる自動掘削に関する研究の進捗について紹介すると共に、土木研究所と進めている、標準プラットフォームによる油圧ショベルの自動化に関する研究開発の現状について紹介する。自動掘削については、RGB-D センサを用いて掘削前と掘削後の地盤の形状変動を計測し、その計測結果に基づいて土量変化率を推定し、掘削動作計画を行う手法を提案している。一方、標準プラットフォームについては、建設機械施工をする上で必要となる基礎的なルールやデータ構造および、データの交換手法を定義することでハードウェアの抽象化を図り、ソフトウェアの再利用性、連携性の向上を目的とした、建設機械向け標準プラットフォームの提案を行っている。本稿では、i-Construction システム学寄付講座で進めているこの二つの研究開発に関する現状について報告する。

Key Words : *Construction Machine, Excavator, Autonomous construction, Standard Platform*

1. はじめに

インフラ建設における計画・調査から施工・検査、さらに維持管理までのプロセスにおいて、IoT や空間情報処理技術、ロボット化技術等を活用することで建設生産システムに変革を促す i-Construction は、2025 年度までに 2 割の生産性向上を目指している。このような技術を活用して現場の生産性向上を図るシステムの研究開発ならびに、このシステムを実践する人材を育成することを目的とし、2018 年 10 月、東京大学 大学院 工学系研究科に i-Construction システム学寄付講座が設立された。本講座の特徴は、同研究科の社会基盤学専攻と精密工学専攻との共同運営体制であるという点であり、土木工学と機械工学の両側面から、i-Construction システムに関する研究開発が進められている。

本講座が取り組んでいる課題のひとつに、「地中レーダーによる地下埋設物データベースの構築と油圧ショベルによる掘削時の埋設物損傷回避動作の実現」がある。この課題では、埋設物の試掘において、地中レーダーを用いて地下埋設物の位置を精度良く認識する技術、この情報をデータベースに登録する技術、さらに、油圧ショベルによる試掘作業時に、ヒューマンエラーによる埋設物損傷を回避する技術の研究開発が進められている。特に、試掘時の埋設物損傷回避動作においては、地中の埋設物を回避しつつ、効率よく掘削を行うことが求められ

る。そこで、本講座では、試掘作業において、部分的な自動掘削機能を付加することを提案し、現在、油圧ショベルの自動掘削に関する研究開発を進めている。さらに、この研究に関連し、油圧ショベルを自動化するための標準プラットフォームに関する研究開発を、土木研究所と共に進めている。

本稿では、i-Construction システム学寄付講座において進めている、油圧ショベルによる自動掘削に関する研究の進捗ならびに、土木研究所と進めている、標準プラットフォームによる油圧ショベルの自動化に関する研究開発の現状について紹介する。

2. 油圧ショベルによる自動掘削の試み

(1) 自動掘削に関する従来研究

油圧ショベルの自動掘削に関する研究開発は、国内外で様々な研究が行われてきた。その中でもセンサから取得した地形情報に応じて掘削を行う土木研究所の「掘削作業の自動制御技術に関する研究」は、本研究分野のマイルストーン的研究である¹⁾。この研究では、指示された設計形状で掘削するための動作を計画し、レーザ距離センサから得た地形情報を元に掘削動作を行うものであり、仕上げにおける計画軌跡と追従軌跡の差並びに追従軌跡の変動差を 10cm 以内に収めることに成功した。近年は、ゼネコン各社が建設機械メーカーと共同で、自動

バケットの進行方向 $(x_{penetrate}, z_{penetrate})$

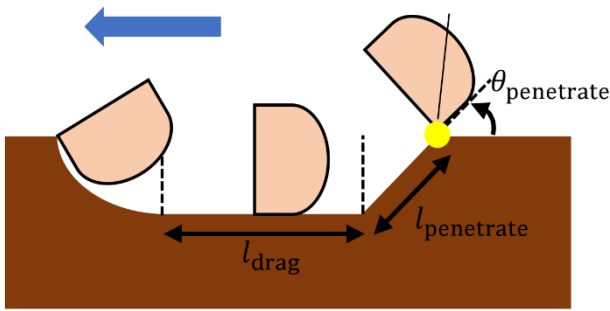


図1バケットの動作パラメータ



図2 シミュレータによる埋設管回避動作の確認

掘削に関するシステムの開発を進めている²³⁾。ただし、これまでの研究は、土の性質、例えば、対象が締め固まったものか、比較的軟らかいものかは、考慮していない。掘削後の土量変化を考慮した掘削計画を行うことができれば、自動掘削の効率が向上すると期待できる。そこで、本研究では、対象とする土の土量変化率に注目し、掘削計画を行う手法を提案することとした。

(2) 自動掘削の動作計画

本研究では、まず、土量変化率を考慮しない自動掘削の動作計画について考えることとした。なお、対象とする環境には、接触回避を必要とする埋設管が存在するものとする。本研究では、バケットが一回に動作するためのパラメータを図1に示す5つのパラメータと設定した。この一回の動作により、バケットが通過した部分の土が全て排除されるものと仮定し、これを場所を変えて繰り返すことで、埋設管に接触することなく掘削が可能な動作計画手法を提案した。

この動作計画は、Vortex studio という物理シミュレータ上で実行可能な Python 上に実装され、バーチャル空間内にて、掘削動作を行った。なお、今回は、接触回避のマージン目標については、埋設管の検知誤差を 30 cm と仮定し、接触回避のマージン目標を 50 cm と設定した。図2は、その動作の様子の一場面である。この動作より、埋設管（灰色の丸印で記載）に接触しないように刃先が制御され、掘削が成功している様子が見てとれる。また、このシミュレータは、軟弱土砂の挙動も考慮しているため、バケットで掘削した場所が、必ずしも図1に示したような形状にならないことも見てとれる。

(3) 土量変化率の推定

実環境における掘削では、図2のシミュレーションでも発生した地盤の崩れのみならず、圧縮された土砂が掘削によって解放され、土量が増加するという現象が生ずる。この土量変化率は、こぼさずに運搬可能な土砂重量にも変動を与えるため、掘削時の動作計画にも影響が出る。もし、初期掘削において対象環境の土量変化率を推定することができれば、その後の掘削動作を効率よく実施可能な動作を計画することが可能となると期待できる。具体的には、図1に示したバケットの動作パラメータの調節を行うことで、土のこぼれの少ない、適切な掘削パターンを生成することができる。そこで、本研究では、センサによる計測により掘削前と掘削後の地盤形状の変動を計測し、土量変化率を推定することとした。

本研究では、特に土砂の間隙比 e に着目することとした⁴⁾。間隙比 e は、式(1)によって定義される⁵⁾。

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

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⁶⁾。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。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こととした。具体的には、センサを用いて測定した3次元点群データを用いて、掘削による土砂の体積変化を算出し、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。この体積変化率 β_k は、以下の式(2)で定義される。

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

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。

掘削時の体積変化については、地面の三次元計測を行ったデータを利用する。まず、測定データの基準平面を設定して Voxel Map を生成する。Voxel の一辺の長さを d 、その点の高さを z_i とした場合、増加体積 V_{up} 、減少体積 V_{down} は、以下の式で表すことができる。

$$V_{up} = \sum_{z_i > 0} z_i d^2 \quad (\text{増加体積}) \quad (3)$$

$$V_{down} = \sum_{z_i < 0} -z_i d^2 \quad (\text{減少体積}) \quad (4)$$

以上より、土砂量の増減が推定でき、ここから(2)式を用いて、土量変化率を推定することが可能となる。

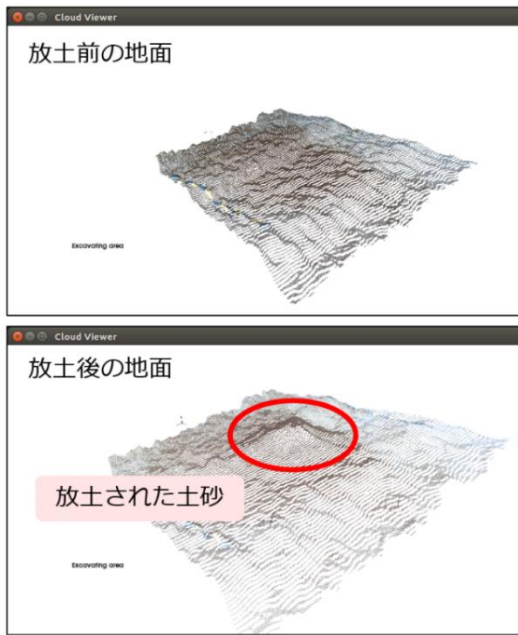


図3 放土前(上)と放土後(下)の地盤計測例

(4) 土量変化率の推定例

本研究で提案する土量変化率推定手法の動作検証を行うため、油圧ショベルで掘削した土砂を地面に放土し、土量測定を行った。土量測定には RGB-D センサである Intel 社の RealSense Depth Camera D435i⁷⁾ を使用した。

測定した地盤形状の例を図3に示す。この計測データから、Voxel Map を生成し、平滑フィルタをかけた後に、差分の体積を測定する。なお、3次元点群データから体積を算出するため、3次元点群の処理に適したソフトウェアである CloudCompare⁸⁾ を用いた。

今回は、測定実験を、条件を変えて2回行った。1回目の測定では、圧縮された土壌を掘削した土砂を対象とし、2回目の測定では、1回目に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行って測定を行った。このため、2回目の測定時の土量圧縮率が小さくなると予想したが、結果は、1回目の土量変化率 $\beta_k = 1.45$ 、2回目の土量変化率 $\beta_k = 1.17$ 、となり、予想通りの結果となった。これにより、土砂の体積変化を考慮した掘削軌道の生成が可能となり、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。ただし、この実験では、真値が不明であるため、本手法の精度検証については、今後の課題である。

3. 建設機械制御用標準プラットフォーム

油圧ショベルの自動掘削に関する研究開発と並行し、筆者らは、建設機械を自動制御するための標準プラットフォームについても、研究開発を進めている。本章では、現在開発中の標準プラットフォームに関する現状について紹介する⁹⁾。

(1) 標準プラットフォームに関する従来研究

まず、建設機械を制御するためのプラットフォームに

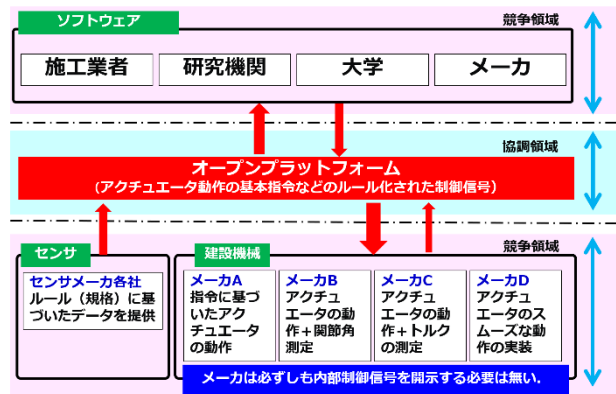


図4 標準プラットフォームの概念図

関する従来研究について紹介する。これまでの建設機械の制御に関わるシステムは、建設機械メーカーや測量機器メーカーにより、独自に研究開発が行われてきた。そのため、異なるメーカー間でのセンサの相互利用は不可能であり、ソフトウェアの再利用も不可能である。そこで、最近では、建設機械メーカーにおいてもハードウェアの依存を減らし、ソフトウェアの再利用性を向上させる取り組みがなされている。この中には、CATERPILLAR 社による機体全体が電子制御化された「デジタルプラットフォーム」¹⁰⁾、コマツ社による「スマートコンストラクション」¹¹⁾、オウル大学ラウノ教授らによる「SmartBooms project」¹²⁾などが挙げられる。しかしながら、異なる建設機械メーカー間の機種を統合して制御するシステムは存在しない。規模の大きな実建設現場においては、単一のメーカーのみで工事が実施されることは少なく、自動化施工を推進するためには、異なるメーカーの異なる機種を横断的に制御できる枠組みが必要であると考えられる。

(2) 建設機械制御のための標準プラットフォームの提案

筆者らは、建設機械施工をする上で必要となる基礎的なルールやデータ構造および、データの交換手法を定義することでハードウェアの抽象化を図り、ソフトウェアの再利用性、連携性を向上させることを目的として、ロボット用ミドルウェアを導入することとした。具体的には、基礎的なルールやデータの定義や構造を共通化する建設機械向け標準プラットフォームを提案してきた。

筆者らが提案する標準プラットフォームの概要を次ページの図5に示す。図の水色の部分が、提案する標準プラットフォームの領域であり、各メーカーから見ると協調領域となる。標準プラットフォームの上側には、各種アプリケーションが構築されるため、この領域が、ゼネコンやソフトウェア会社にとっての競争領域となる。一方、標準プラットフォームの下側には、建設機械メーカーが位置するが、この領域も、建設機械の性能自体を高めていくという意味で、競争領域となる。なお、この標準プラットフォームには、ロボットシステム開発のデファクトスタンダードとなりつつある ROS (Robot Operating System)¹³⁾をベースに、建設機械施工向けに必要な独自の package を開発することとした。



図5 標準プラットフォームを実装した油圧ショベル

(3) 標準プラットフォームの油圧ショベルへの実装

本研究では、自動掘削の研究を進めるため、建設機械を制御するための標準プラットフォームを土木研究所が所有する遠隔操縦油圧ショベルのシステム上に実装した。以下に、このシステムについて紹介する。

一般の建設機械は、電気信号を元にした操作に対応したものが少ないため、マシンコントロールや遠隔操縦装置を設置する際には、電磁比例弁を油圧回路に組み込み、この油圧コントローラが開閉量を操作する。そこで、本研究では、建設機械の遠隔操作用コントローラと接続し、制御指令の入力および機体情報の出力を取り扱う通信用のROSノードを実装することとした。

対象とする油圧ショベルである日立建機製ZX120は、運転質量12t、バケット容量0.45m³であり、遠隔操縦装置が設置されている(図5)。この装置は、特定省電力無線または有線(RS422通信)による操作信号入力が可能であり、入力された操作量に基づいて電磁比例弁の開閉を行い、油圧アクチュエータを動作させる。本研究では、遠隔操縦装置の有線端子と組込コンピュータを接続し、組込コンピュータ上で操作指令から操作信号に変換し、遠隔操縦装置へ入力するROSノードを開発した。なお、自動運転時は非常停止回路が無効となるため、別システムの無線通信を利用した非常停止回路を機体に搭載し、想定外の動作時にエンジン停止を行うシステムも有している。

開発したテストベッドを用いて、簡易的な自動掘削実験を土木研究所 屋外実験場にて実施したところ、指定された動作により、掘削動作を実現することができた。ただし、クローラ爪先の目標軌跡と実軌跡の誤差については、最大で約20cmの誤差が生じた。水平引き動作時の誤差が最も大きく、これは、作業機械の制御ゲインが十分に調整されていないことに起因すると考えられる。

4. おわりに

本稿では、筆者らがi-Constructionシステム学寄付講座で進めている、「油圧ショベルによる自動掘削に関す

る研究」について紹介すると共に、土木研究所と進めている「標準プラットフォームによる油圧ショベルの自動化に関する研究開発」について紹介した。現在、自動掘削のためのシステムが個別に実現している段階であるが、今後はシステム統合を行い、土量変化率の予測を考慮した油圧ショベルの自動掘削システムの実現を目指す。

謝辞

本研究の一部は、国土交通省建設技術開発費補助金の支援を受けて実施された。

参考文献

- 1) 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.
- 2) "次世代油圧ショベルによる作業自動化を実証(大成建設株式会社)", https://www.taisei.co.jp/about_us/wm/2019/190426_4636.html, (閲覧日 2020.6.6)
- 3) "土砂の積み込み作業を自動化するバックホウ自律運転システムを開発しました(株式会社 大林組)", https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20190718_1.html, (閲覧日 2020.6.6)
- 4) 勝間慎弥, 谷島諒丞, 濱崎峻資, 全邦釘, 永谷圭司, 山内元貴, 橋本毅, 山下淳, 浅間一, "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", 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2A2-A11, 2020.
- 5) 安田 進, 山田 恭央, 片田 敏行: "土質力学", オーム社, 1998.
- 6) 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.
- 7) "DEpthCameraD435i", <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d435i/> (閲覧日 2020.6.6)
- 8) "Cloud Compare", <http://www.danielgm.net/cc/> (閲覧日 2020.6.6)
- 9) 山内元貴, 橋本毅, 山田充, 新田恭士, 油田信一, "建設機械施工における標準プラットフォームの提案—建設機械制御へのロボット用ミドルウェアの導入—", 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P1-A08, 2020.
- 10) "Cat Connect テクノロジーおよびサービス", https://www.cat.com/ja_JP/by-industry/construction/catconnecttechnology-servicesnew.html (閲覧日 2020.6.6)
- 11) "スマートコンストラクション", <https://smartconstruction.komatsu/> (閲覧日 2020.6.6)
- 12) Heikkilä R., et al. "Development of an Earthmoving Machinery Autonomous Excavator Development Platform." Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Vol.36, pp.1005-1010, 2019.
- 13) "ROS", <http://wiki.ros.org/ja> (閲覧日 2020.6.6) (2020.6.12 受付)

AUTONOMOUS EXCAVATION BASED ON BULKING FACTOR OF SOIL AND DEVELOPMENT OF STANDARD PLATFORM FOR EXCAVATORS

Keiji NAGATANI, Shinya KATSUMA, Syunsuke HAMASAKI, Ryosuke YAJIMA,
Pang-jo CHUN, Jun YAMASHITA, Kazumasa OZAWA, Genki Yamauchi,
Takeshi HASHIMOTO

This paper introduces the progress of research in our research group, mainly autonomous excavation by hydraulic excavators and standard platforms for intelligent excavators. For autonomous excavation, we propose a motion planning method for excavators in consideration with the bulking factor of soil, measured by RGB-D sensors. For the standard platform, we propose a standard platform for construction machinery to improve cooperation by standardizing the basic rules, data structure, and data exchange method.