

# バックホウがシミュレータ内で困難地形を計測し経路と地形を計画する手法の開発

## Development of a method for a backhoe to measure difficult terrain and plan paths and terrain in a simulator

○鈴木裕太\*, 小島匠太郎\*, Ranulfo Bezerra\*, 大野和則\*

○Yuta Suzuki\*, Yoshitaka Kurosaki\*, Shotaro Kojima\*, Ranulfo Bezerra\*, Satoshi Tadokoro\*, Kazunori Ohno\*

\*東北大学

\*Tohoku University

**キーワード** : ロボティクス (robotics), 災害対応 (disaster response), 不整地走行 (rough terrain mobility), 建設機械の自動化 (automation of construction machinery), 経路計画 (path planning)

**連絡先** : 〒 980-0011 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1 レアメタル総合棟 101 東北大学大学院 情報科学研究科 応用情報科学専攻 応用情報技術論講座 タフ・サイバーフィジカル AI 学 大野研究室  
鈴木裕太, Tel.: 022-752-2165, E-mail: suzuki.yuta@tr.is.tohoku.ac.jp

### 1. 緒言

地震や大雨を原因として、日本では土砂災害が多く発生している<sup>1)</sup>。バックホウはバケットを用いて土砂や瓦礫を除去する能力があるため、土砂災害の復旧時に広く用いられる。土砂災害の迅速な復旧には、バックホウによる、作業車両が通行し物資の運搬を可能とする道の確保が必要である。

災害復旧の現場において、二次被害の防止や過酷作業の省人化のため、遠隔操縦や自動化されたバックホウが災害現場で必要とされている。(Matsui 1994<sup>2)</sup>, Mori 2018<sup>3)</sup>)。土砂災害では、後続車両の通行が可能な一時的な道を迅速に通す、自動化したバックホウが有効である。

地形を改変して道を作るため、現在地から目的地までの経路や土の切り盛りにより整地する

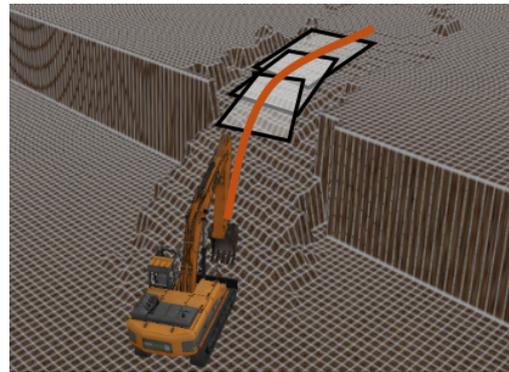


Fig. 1 Simultaneous Sequential Planning of Path and Target Terrain Modification

ための目標となる地形の計画、計画に基づく掘削動作が求められる。本研究グループではこれまでに、車両が通行可能で不整地の斜度と掘削量のコストを加えた経路の A\*ベースの逐次探索と同時に、改変目標地形を計画するアルゴリズムを提案した。(Suzuki 2024<sup>4)</sup>) (Fig.1)。土

壤と地形、バックホウを再現したシミュレータである Vortex Studio (CM Labs 社<sup>5)</sup>) を用いた、土を切り盛りし斜面に改変する動作計画を開発した (Kurosaki 2024<sup>6)</sup>) .

しかし、シミュレータ上での経路計画とバックホウの動作の連携は、DEM データ上で始点と終点を決めて経路を計画し、計画した地形を読み込ませる手順を必要とする。本研究では、リアルタイムでの地形情報とバックホウの位置姿勢情報の取得した計画、再計画が可能なシステムの開発をする。

よって、本研究の目的は、シミュレータ上バックホウが困難地形を LiDAR により計測し、現在の地形と位置姿勢情報から経路と改変目標地形を計画する手法の提案である。特徴として、GUI 上 (Rviz2<sup>7)</sup>) での経路と地形のリアルタイムな可視化と、インタラクティブにユーザが経路の終点を指定できる。経路計画アルゴリズムを Nav2<sup>8)</sup> Plugin として実装し、ROS 2<sup>9)</sup> を用いてシミュレータと連携する。

## 2. 関連研究

地形の計画手法の提案が行われている。EARTH-BRAIN といった施工計画ソフトでは、はじめに目標となる法面などの地形を与えることで、土の運搬や施工順序の計画をする<sup>10)</sup>。また、ベースとなる経路を入力することで、その曲線を中心線とした土の収支を合わせた目標堤防を生成 (Docofossor<sup>11)</sup>) し、その地形に合うバックホウの動作生成の研究が行われている (Jud 2021<sup>12)</sup>)。本研究では、目的地までの車両特性や土量を考慮した経路計画と土の切り盛り量からの地形決定を同時に行うことができる手法を採用する。

土砂災害現場は、豪雨や火山灰の影響で、硬質から軟弱地盤が混在する地形である可能性がある。水分量や土層を再現した土壌を用いて、実験のための地形を作成することは大きな労力

がかかるため、繰り返しの実験にはむかない。シミュレータは、土壌や地形の変更が容易に行うことができる。シミュレータでは、土壌の掘削の再現や土の締め固め具合の変更、バックホウモデルの ROS 2 による制御を可能とすることが求められる。PLAXIS<sup>13)</sup>、Optum CE<sup>14)</sup> のような FEM による地盤シミュレータは掘削に対するリアルタイム解析に向かない。Vortex Studio<sup>5)</sup> や AGX Dynamics<sup>15)</sup> では、土壌と機械との相互作用による破壊をリアルタイムでシミュレーションでき、ROS 2 によるバックホウの制御も可能である。Vortex Studio は AGX Dynamics に比べ、GUI によるビジュアルプログラミング機能や ROS2 のノード機能が充実しているため、本研究では VortexStudio を使用する。

## 3. シミュレータ内リアルタイム情報に基づく経路と改変目標地形同時計画手法

### 3.1 概要

計画アルゴリズムの特徴として、ノード間の移動において車両の旋回が可能で車体幅が確保された滑らかなひとつなぎの A\*ベースの逐次経路探索を行う。距離  $g_{move}$ 、斜度  $g_{slope}$ 、掘削量  $g_{dig}$ 、ヒューリスティックコスト  $h$ 、各コストにかかる重みを変えることで、距離、斜度、掘削量のどれを小さくするか、指針を決定することができる。移動量の重みを  $w_1$ 、斜度の重みを  $w_2$ 、掘削量の重みを  $w_3$  とする。コスト  $f$  値は以下のように定義する。

$$f = n_1 w_1 g_{move} + n_2 w_2 g_{slope} + n_3 w_3 g_{dig} + n_1 w_1 h \quad (1)$$

ノード移動後は、Fig.1 に示すように、目標平面を経路探索のノードごとに逐次的にあてはめ、最終的に目標地形を形作る。以下が経路探索アルゴリズムの流れである。

- 1) 事前に地形  $m$  を計測し DEM データとして入力する。
- 2) バックホウに取り付けた LiDAR によるリアルタイムの地形  $m_{LiDAR}$  の計測を行い、事前計測した地形  $m$  と合わせて現在の地形を更新する。
- 3) ゴールをユーザが GUI 上で指定する。
- 4) 初期位置から次のノードへ移動する。車両の旋回最小半径と車体幅を確保した曲線的な移動を行う。
- 5) ノード移動後、経路上の地形を車両が通行しやすい地形に変更するための目標平面をあてはめる。
- 6) 目的地に到達したら、経路  $P$  と目標地形  $m'$  を出力する。

### 3.2 Vortex Studio を用いたシミュレータ上での実装

土壌と地形を再現したシミュレータ上でバックホウが制御できる環境の作成を行う。シミュレータは CM Lab 社の Vortex Studio<sup>5)</sup> を用いる。Vortex Studio 内のバックホウを ROS2 によるマルチキャスト UDP 通信上の ROS2<sup>9)</sup> ノードによって制御する。ROS2 による分散型のミドルウェアにより、様々なセンサの組み合わせや複雑な制御フローの実装を可能とする。Vortex Studio は Windows 上で動作し、ROS2 ノードは WSL2, Ubuntu24.04 上で動作させる。その際、Windows 内の仮想ネットワーク上で NAT 越しの通信が必要であるため、Zenoh bridge<sup>16)</sup> を用いた。ROS2 のバージョンは Jazzy とする。Fig.2 に示すような通信構成をとる。

### 3.3 経路と地形の可視化とインタラクティブなゴール指定

Fig.3 に示すように、Sensor Layer での Vortex Studio 内でモックした LiDAR による地形

計測情報は、Point Cloud 形式で送られ、マップ座標系に変換しフィルタリングを行ったあと、Grid Map として高さデータを統合する。Rviz2 Layer では、Grid Map の可視化や、現在のバックホウの 3D モデル、経路や計画軌道の表示、経路計画におけるゴール位置の指定を行う。Nav2 Path Layer では、経路と変更目標地形を計画するアルゴリズムを Nav2 Plugin, Planner Server として実装し、Rviz2 上で指定したゴールとバックホウの現在地、GridMap から経路計画を行う。今後の展開として、経路追従や障害物回避のためのコストマップへの橋渡しを行う。

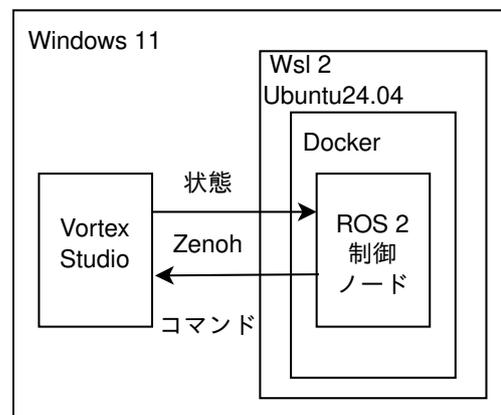


Fig. 2 Communication architecture between Vortex Studio and ROS2 nodes

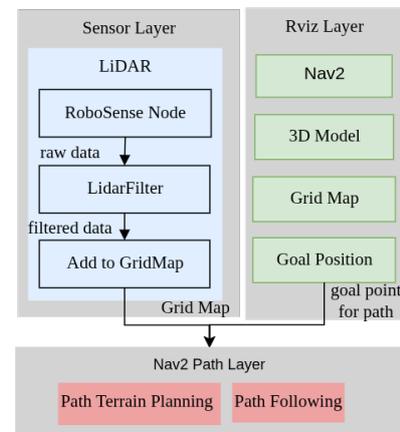


Fig. 3 System architecture of the proposed method

## 4. GUI上でゴールを指定し経路と改変目標地形の同時計画実験

1[m/Grid], 30×30[m], 高さは3[m]のGrid Mapの段差地形上で, ゴールを手動でGUI上, Rviz上で指定し経路計画と改変目標地形の計画を行った.

車両特性は, 操舵角を $-20, -10, 0, 10, 20$  [deg], フットプリント $5 \times 5$  [m], 車体からフットプリントへのオフセット長さ $k = 3$  [m], 限界走行斜度 $\phi_{max} = 30$  [deg], 最大掘削量 $v_{max} = 35$  [m<sup>3</sup>]とした. スタートは $(-13, 0)$ , コストの重みは移動重みのみとする $(w_{move}, w_{slope}, w_{dig}, h) = (0.5, 0, 0, 0.5)$ .

結果はFig.4に示すように, 図左側のVortex Studio内のバックホウの位置姿勢, 地形情報の基づき, 図右側のRviz上でゴールを指定し, 現在地からゴールまでの緑色の経路と, 改変目標地形が虹色のGridMapで計画された.

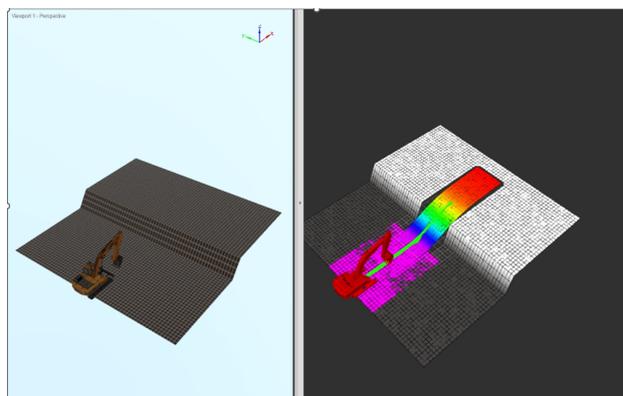


Fig. 4 Planning result

## 5. 結言

本研究では, シミュレータ上でバックホウが困難地形を計測し, 経路と改変目標地形を同時計画する手法の開発を行った. GUI上での経路と地形のリアルタイムな可視化と, インタラクティブにユーザが経路の終点を指定できる特徴を持つ. 経路計画アルゴリズムをNav2 Plugin

として実装し, ROS 2を用いてシミュレータと連携する.

今後の展開として, 計画した経路に対し経路追従を行い, 適切なwaypoint上で目標平面への掘削を行い, 実際に地形を改変する動作計画との統合を行う.

## 謝辞

本研究は, 東北大学GAPファンドBIPの支援を受けて行われた.

## 参考文献

- 1) 土砂災害防止広報センター. 土砂災害とは. [https://www.sabopc.or.jp/library/sediment\\_disaster/](https://www.sabopc.or.jp/library/sediment_disaster/), Accessed On 23.01.2025.
- 2) 松井宗広. 雲仙普賢岳における無人化施工について. 砂防学会誌, Vol. 47, No. 1, pp. 51–53, 1994.
- 3) 森直樹, 古屋弘. 建設機械の改造が不要で着脱可能な装置による無人化施工技術: 熊本城崩落石撤去へ汎用遠隔操縦装置「サロゲート」の適用事例. 建設機械/建設機械編集委員会 編, Vol. 54, No. 4, pp. 6–10, 2018.
- 4) 鈴木裕太, 黒崎吉隆, 大野和則, 小島匠太郎, Ranulfo Bezerra, 里見知昭, 高橋弘, 田所諭. 困難地形を改変するバックホウの法面を有する経路と地形計画. 第42回日本ロボット学会学術講演会. 一般社団法人日本ロボット学会, 2024. 1L4–02.
- 5) CM Labs Simulations. Vortex Studio Real-Time Simulation Software. <https://www.cm-labs.com/vortex-studio/>, Accessed on 22.01.2026.
- 6) 黒崎吉隆, 大野和則, 小島匠太郎, Ranulfo Bezerra, 里見知昭, 高橋弘, 田所諭. 凹凸の少なく走行しやすい斜面に改変するバックホウの動作生成. 第42回日本ロボット学会学術講演会. 一般社団法人日本ロボット学会, 2024. 1L4–03.
- 7) Dave Hershberger and David Gossow and Josh Faust and William Woodall. RViz 2. <https://github.com/ros2/rviz>, Accessed on 23.01.2025.
- 8) Open Navigation LLC. Nav2. <https://docs.nav2.org/>, Accessed on 11.03.2026.
- 9) Open Robotics. ROS 2. <https://docs.ros.org/>, Accessed on 11.03.2026.

- 10) 株式会社 EARTHBRAIN. Earthbrain. <https://www.earthbrain.com/>, Accessed on 23.01.2025.
- 11) Ilmar Hurkkens and Mathias Bernhard. Computational terrain modeling with distance functions for large scale landscape design. *Journal of Digital Landscape Architecture*, Vol. 4, pp. 222–230, 05 2019.
- 12) Dominic Jud, Ilmar Hurkkens, Christophe Girot, and Marco Hutter. Robotic embankment: Free-form autonomous formation in terrain with heap. *Construction Robotics*, Vol. 5, pp. 101 – 113, 06 2021.
- 13) Incorporated Bentley Systems. Plaxis 3d. <https://ja.bentley.com/software/plaxis-3d/>, Accessed on 23.01.2025.
- 14) Optum CE. Optum ce. <https://optumce.com/>, Accessed on 23.01.2025.
- 15) Algorix. AGX Dynamics. <https://www.algorix.se/agx-dynamics/>, Accessed on 30.09.2024.
- 16) Eclipse Foundation. Zenoh. <https://zenoh.io/>, Accessed on 11.03.2026.