

自律型掘削機による擁壁の構築

リンダ・ウィルソン

スイス連邦工科大チューリッヒ校の研究者らが設計した掘削機には、ライダーセンサー、RGBカメラが装備されている。

スイスのある公園には、珍しいものがある。自律型掘削機で構築された石積み擁壁だ。

このプロジェクトに使われたのは、「HEAP」(Hydraulic Excavator for an Autonomous Purpose)というロボット掘削機で、スイスのメンツィムック社(Menzi Muck)の4輪多関節型作業機械「M545」(重量12トン)をカスタマイズしたものである。HEAPは、スイス連邦工科大チューリッヒ校(ETH Zurich)のRobotic Systems Labによって開発された。同チームは、ETH Zurichのランドスケープアーキテクチャ学科の学長と協力した。

「建築業界は世界の温室効果ガス排出の主な原因であるため、より持続可能な建築慣行に向けて新技術を活用することが重要である。その1つの手段が、建設に使用される材料システムの内包

エネルギーを見直して作り変えることである。特に、現場でのロボット建築手法の開発は、安価かつ豊富で内包エネルギーが低く、目的に特化した、地元調達またはアップサイクルされた材料を活用する機会を創出する」と、ETH Zurichの研究者らは説明している。

例えば、自律型建設システムは、現場にある巨石や他のプロジェクトで出たコンクリートのがれきを使って、擁壁を構築することができる。

初期実証プロジェクトとして、ETH Zurichの研究者らは、109個の巨石とコンクリートガラで10×1.7×4mの独立した石壁を構築した。この構造物は、石一個あたり17.4分という、人間が作業するのとはほぼ同じ速度で、2週間かけて構築された。

続いて研究者らは、この最初の壁の構築で得た実地体験を基に、938個の

石からなる65.5×1.8×4mの永久擁壁を構築し、スイスのオーバーグラットにあるサーキュラリティ公園(Circularity Park)の2つの歩行者用傾斜路を備えた4段の段丘に組み込んだ。壁と段丘からなるこの構造により、人々は公園の自然な高低差を横断することができる。この構造は、水の流出や土壌の浸食の抑制にも役立つ。

独立壁は、施設内のコンクリートスラブ上に構築されたため、掘削機の操縦席に人間が乗り込まない状態で建設された。

一方、永久擁壁は公園内の現場で構築されたため、人間がキャビンに乗り込み、落石や、石が思ったとおりの位置に収まらないなどの不測の事態に対処した。また、掘削機は自律的に石を取り上げ、配置し、スキャンしたが、掘削機の運転は人間が行った。

壁を構築するための自律型プロセス

Science Robotics誌([bit.ly/3Jv0Hhb](https://doi.org/10.1109/5646811.2023.1018811))に掲載されたこの取り組みを報告する論文の中で研究者らは、次のように記している。「われわれの包括的なパイプラインにより、光検出と測距(LiDAR)マッピング、学習による画像セグメンテーション、グラスブ動作のヒューリスティクス、分類を使用して、非構造化環境において石のインスタンスを隔離、デジタル化、操作することで、非常に不均一な石から、任意に湾曲していて明示的に定義された壁の形状を構築することができる」。

壁を構築するための最初の処理は、利用可能な巨石とコンクリートガラの



図1 メンツィムック社製の作業機械が、巨石を1つずつ取り上げてスキャンし、壁を構築した

点群表現を作成することだった。これを行うために掘削機は、個々の石をグリッパーで取り上げ、キャビンとブームに取り付けられたライダーセンサでスキャンしてから、地面に戻す。

これによって研究者らは、点群で表現された、石の限定的なインベントリを作成することができた。これを幾何学的プランニングソフトウェアで使用するにより、壁の初期プランを作成した。

その後、掘削機は、再度個々の石を取り上げ、必要に応じて向きを変えながら、壁に配置していく。HEAPが石を配置した後、ビジョンシステムがその石を再びスキャンして、幾何学的プランニングソフトウェアを更新した。

上記の処理は、掘削機の作業状況に応じて動的に行われた。

これとは別だが関連するプロジェクトで、HEAPは段丘地形の造成も行った。具体的には、この自律型掘削機によって現場の土壌を掘り上げて近くに積み上げた。その土壌を段丘の造成に再利用できるようにするためである。

マシンビジョンシステムの構成要素

AI対応のこのマシンビジョン構築システムは、多数のコンポーネントで構成されている。

具体的には、米ベロダイン社 (Velodyne) のライダーキャナ「Puck VLP-16」と、中国ライボックス社 (Livox) のライダーセンサ「MID-70」が、キャビン天井部の前端に取り付けられている。掘削機のアームに搭載された2つめのMID-70は、上方から見下ろした映像を提供する。また、米テレダインFLIR社 (Teledyne FLIR) のRGBカメラ「Blackfly」がキャビン基部に取り付けられており、2つめのRGBカ



図2 サーキュラリティ公園の擁壁の航空写真

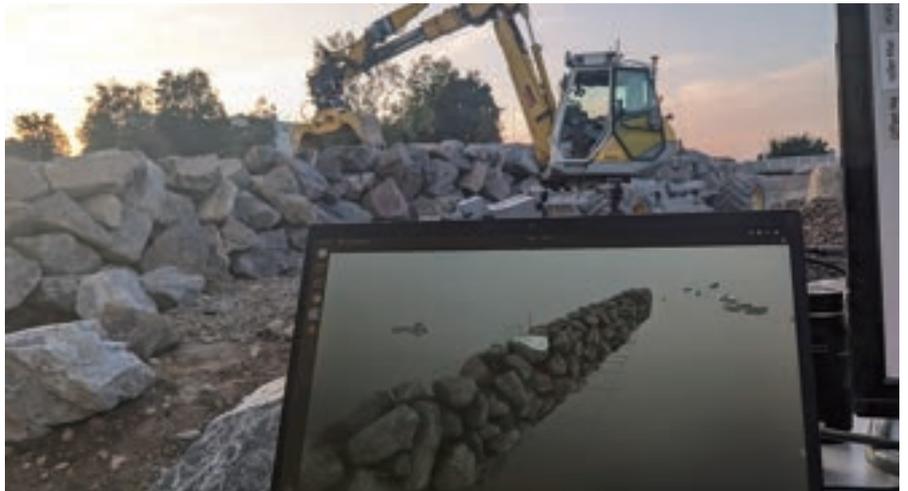


図3 コンピュータによるプランニングと自律型HEAPを使用した石の配置

メラが天井部に取り付けられている。

スイスのライカジオシステムズ社 (Leica Geosystems) のマシンコントローラソリューション「iCON iXE3 3D」により、掘削機のブームとバケットの機能が自動化されている。ブームのスイング動作時に3Dマップが生成される。ブームが横にスイングすると、マップはライダーセンサからの情報で更新される。

油圧アームとグラップルシリンダの位置と速度の測定には、ドローワイヤエンコーダが使用された。

ソフトウェアはすべてC++で記述されており、ROS (ロボットオペレーティ

ングシステム) が、複数のコンピュータ上に分散されたさまざまなソフトウェアノードの間のネットワークを介したデータ転送に使用されている。プロセスの間の接続を管理するROSマスターは、HEAPのオンボードコンピュータに搭載されている。

「このプロセスは公共インフラや造成地用の擁壁、耐荷重構造物、護岸の建設など、コンクリートの代わりに適用できる完全に可逆的な方法である」と、研究者らは同プロジェクト用に作成したウェブサイト (<https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/382.html>) に記している。