

山岳トンネル用自動ズリ積込機の開発

～トンネルズリだし作業の省力化と安全性向上を実証～

(株)フジタ
(株)フジタ
(株)三井三池製作所

○林 秀晃
浅沼 廉樹
山田 照之

1. はじめに

2020年度から始動した国土交通省インフラ分野のデジタル・トランスフォーメーション(インフラDX)テーマの1つにロボットや人工知能(AI)の活用がある。この目的としては、施工の自動化や人の作業の代替を行い、危険作業・苦渋作業を減少すること¹⁾と熟練技能の効率的な伝承の実現などが挙げられている。トンネル工事においては、ドローンで撮影された画像や、センサから取得した計測値を用いて健全性の診断を行っている²⁾。今後、効率化を進めるためにAI技術などを活用した点検のデジタル化を推進するとしており、建設現場の生産性を向上させる技術開発が急務となっている。

そこでフジタでは、インフラ分野のDX推進の一部としているAI技術を活用して、山岳トンネルの掘削ズリだし作業の省力・省人化を目指した。

本論文では、AI技術搭載の「山岳トンネル用自動ズリ積込機※以下aiロックローダ」(株式会社三井三池製作所と共同開発)の概要と現場での実証実験・運用結果について報告する。

2. 開発の経緯

山岳トンネルの施工は、「①発破、②ズリだし(積込み・運搬)、③支保工」が基本的なサイクルとなっており、近年におけるトンネル工事の技術開発は、トンネル近傍での発破準備作業や支保工組立作業が主流になっている。一方、ズリだし作業は、施工現場の制約(重ダンプの台数や坑内外の運行サイクルなど)から、支保工作業までのサイクル時間が長くなることや、ホイールローダやバックホウといった積込み機械運転手の長時間拘束も問題であった。この対策として、ダンプでの移動が長くなる長距離トンネルの場合は、連続ベルトコンベヤの採用などが行われていたが、大幅な所要時間の改善はされず、施工方法の再検討が必要であった。

aiロックローダは、発破により発生したズリを切羽後方に設置したaiロックローダの前に仮置きした後、重ダンプに積込むことで、切羽作業面の早

期解放を可能とするものである。

3. aiロックローダの概要

3.1 aiロックローダの概要と構成

aiロックローダは、切羽後方に仮置きしたズリを掻き寄せるための掘削ブームとダンプに積込むための排土ベルコンで構成される。

また、aiロックローダの仕様を表-1に、本体全景を写真-1に示す。センシングは、aiロックローダの中ほどにあるGPU盤と前方にあるセンサ機器で行う。

表-1 aiロックローダ本体仕様

全長	18.5	m	総重量	50	t
全幅	3.0	m	電圧	AC400V	
全高	6.1	m	搬送能力	510	m ³ /h

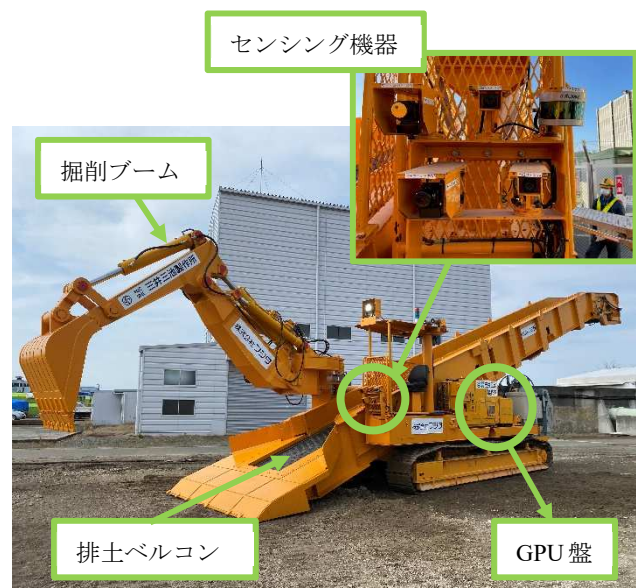


写真-1 aiロックローダ全体図

3.2 システム構成

- ・計測を行うセンシング機器
- ・GPU 盤(AI 自動運転盤)
- ・制御盤

ai ロックローダは上記の 3 点でシステム構成される。

表-2 センサとセンシング機器

種別	メーカー	型番
ズリ計測用3次元点群センサ LiDAR	Velodyne	VPL-16
ズリ認識用可視光カメラ 車載カメラ	Leopard	AR0231-GMSL
ズリ認識用赤外線カメラ サーマルカメラ	FLIR	BOSON ADK-VGA
傾斜・姿勢検出 IMU	多摩川精機	TAG265

ai ロックローダは、GPU 盤とセンサ類(LiDAR: 三次元点群センサや超音波センサ, ストロークセンサ)で自動運転を可能とし、安全対策も施されている。自動運転のみならず、手動運転にも対応しており、緊急時や ai ロックローダ配置場所までの移動など、人の判断で操作を行うことも可能である。

搭載したセンシング機器を、表-2 に示す。実験では、これらのセンサを運転レベル毎に使い分けて使用する。

自動運転の際、LiDAR にてズリの形状を読み取り、カメラで得た映像を画像認識することにより、仮置きしたズリ山のズリを判別する。人も検知可能なため、安全性が向上する。また、ai ロックローダ後方にある超音波センサにより、ダンプの停止位置をセンシングし、停止場所になればダンプ運転手に警報ブザーにより知らせるシステムとなっている。これは、ダンプと ai ロックローダの衝突防止対策とズリ積込み位置誘導を行うためである。

4. 実証実験に向けた準備

4.1 自動運転(AI)教師データ取得

自動運転を行うためには、多くの写真データ(教師データ)の取得が必要なため、トンネル2現場にて、カメラからトンネル坑内画像やズリ画像を約 1700 枚取得した。その後、学習データにのみ過剰に反応し、未知のデータに対応できない“過学習”に注意しながら、学習を行った。AI での学習後の動作結果を写真-2, 3 に示す。



写真-2 データ取得後の認識結果 1



写真-3 データ取得後の認識結果 2

写真-2 については、切羽面を側壁と一部誤認識しているが、その他は正確に検知していることが確認できる。写真-3 については、重機と作業員を誤認識なく検知していることが分かる。これらより、ズリを掻き込む作業と、安全性については問題ないといえる。

4.2 実証実験条件(自動運転レベルについて)

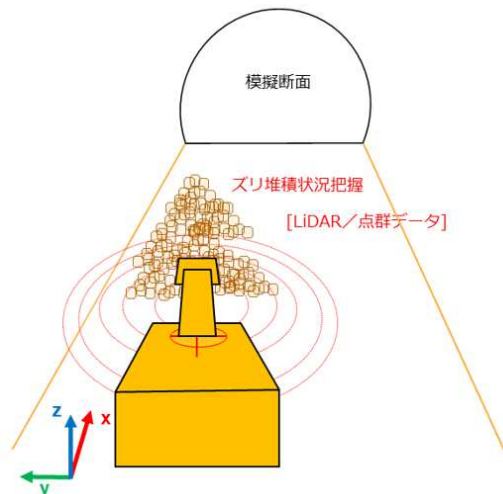


図-1 自動運転レベル 1 (L1)

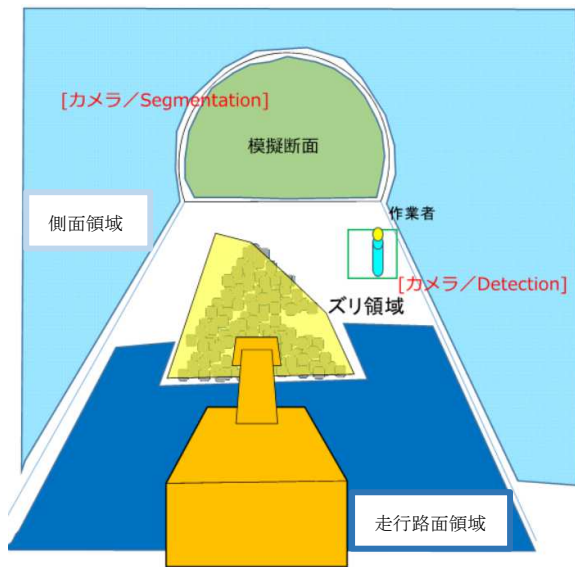


図-2 自動運転レベル 2 (L2)

自動運転レベルを下記の 3 段階に区分し、これらのレベルを組み合わせることで動作検証・実証実験を行った。

- 自動運転レベル 0 (L0)
バケットの動作を固定し、決められた動作を自動的に繰り返すことでズリ積込みを行う。
- 自動運転レベル 1 (L1) (図-1)
ai ロックローダに取り付けた三次元点群計測センサ (LiDAR) から得られる点群データを基にバケットの移動先 (ズリ位置) を動的に判断し、自動積込みを行う。
- 自動運転レベル 2 (L2) (図-2)
ai ロックローダに設置したカメラ映像から、AI 技術を用いた画像認識機能により、ズリやトンネル壁面、現場作業員などの対象物を認識し、レベル 1 の結果と組合せ、ズリの有無に基づく自動運転制御を行う。

4.3 模擬トンネルでの検証

自動運転試験として、各種センシングシステム毎の動作検証 (センシング結果に基づいて油圧制御が連動して動作するかの確認) を行った。本検証は、高さ 6m、幅 12m の模擬トンネルで実施した。

検証内容は、

- ① 自動運転レベル 0 相当の動作検証
設定したストロークセンサの値によってバケットの動きが意図したものかを検証
- ② 自動運転レベル 1 相当の動作検証
LiDAR センサでの計測結果を基にズリ山位置計測を行い、より確度の高いズリ山にバケットを移動できるかを検証

- ③ 自動運転レベル 2 相当の動作検証
カメラ画像の AI 認識結果を基にズリ山の領域の認識や周辺対象物 (ズリや側壁、作業員など) の把握が可能かを検証
とした。写真-4 に使用した模擬トンネルを示す。



写真-4 模擬トンネル

4.4 模擬トンネルでの検証結果

各自動運転による効率比較を表-3 に示す。効率の比較については、ai ロックローダを運転手が手動で動かした際、ダンプ 1 台分の所要時間を 100% とした。また、自動運転では、ズリ掻き込みの優先度を ai ロックローダから遠距離としていたが、ズリをうまく掻けなかったため、近距離優先とした。実験状況については、写真-5 に示す。

表-3 作業効率比較表

操作方法	作業効率		備考
手動	100	%	降車位置で操作
レベル0	90	%	
レベル1	41	%	近距離優先
レベル2	検知のみ確認		



写真-5 模擬トンネル実験状況

検証の結果、

- ・L0 動作に関しては、固定動作での掻き込みとなる為、手動と同等の効率となるが取りこぼし量も多く見受けられた。また、動作がほとんど手動動作と同様のため、効率比較の差は10%のみとなった。
- ・L1 動作に関しては、掻き込み動作毎に機械動作を止めてセンシングを行う為、待機時間が長く感じられたが1回当たりの掻き込み量は多く、取りこぼし量も少なく感じられた。
- ・L2 動作に関しては、掻き込み動作を試みたが掘削ズリと路盤との判断が難しく、掘削ズリの認識確認のみとなった。

5. 実証実験の概要

5.1 実証実験実施現場の概要

工事名 : 令和元-4 年度横断道
羽ノ浦トンネル工事
工事場所 : 徳島県小松島市
工期 : 2020/2/26~2023/1/31
発注者 : 国土交通省四国地方整備局

5.2 坑外ズリピットでの実証実験

実験の様子を写真-6 に、使用したズリ山を写真-7 に示す。



写真-6 ズリピットでの実験

4.3 で実施した模擬トンネルでの検証と比較し、大きさや色も違う実際のズリでも模擬トンネル検証時と同等の結果が得られるかを確認するために、坑外ズリピットで実証実験を行った。

自動運転は、自動運転レベル 0 と 2 を組み合わせて実施した。操作条件は、手動操作と自動運転（自動運転レベル 0+1 と 1+2）にて実施した。本実験のズリ山は、直径 100mm~300mm 程度の碎石と栗石を採用した。

※本実験では、自動運転の運用方法として、制御を複合することで作業効率の向上を図った。



写真-7 使用ズリ山

5.3 坑外ズリピットでの実証実験結果

坑外ズリピットでの実証実験結果を表-4 に示す。効率の比較については ai ロックローダを運転手が手動で動かした際、ダンプ 1 台分の所要時間を 100%とした。

表-4 ズリピットでの作業効率の比較

操作方法	作業効率	備考
手動	100 %	乗車にて操作
レベル0+2	78 %	
レベル1+2	44 %	

実証実験結果

- ・模擬トンネルでの検証時と同様、自動運転レベル 1 と 2 共に、基本動作には問題なく、ズリ山を掻けることを確認できた。
- ・バケットのスタックなどが原因で自動運転の停止が見られたので改善が必要。
- ・模擬トンネル検証結果と比較し、レベル 0+2 の作業効率については、自動運転（=レベル 2 の画像認識）が付加されたため下がった。
- ・センサを用いた完全自動であるレベル 1+2 での作業効率は、模擬トンネルでの検証から改善され、上昇した。
- ・模擬トンネルとは異なり、大きい岩でも、ズリの掻き寄せやコンベヤ搬送には問題がなく、工事現場でも動作すると考えられる。

5.4 現場運用

全体の俯瞰図を図-3 に示す。

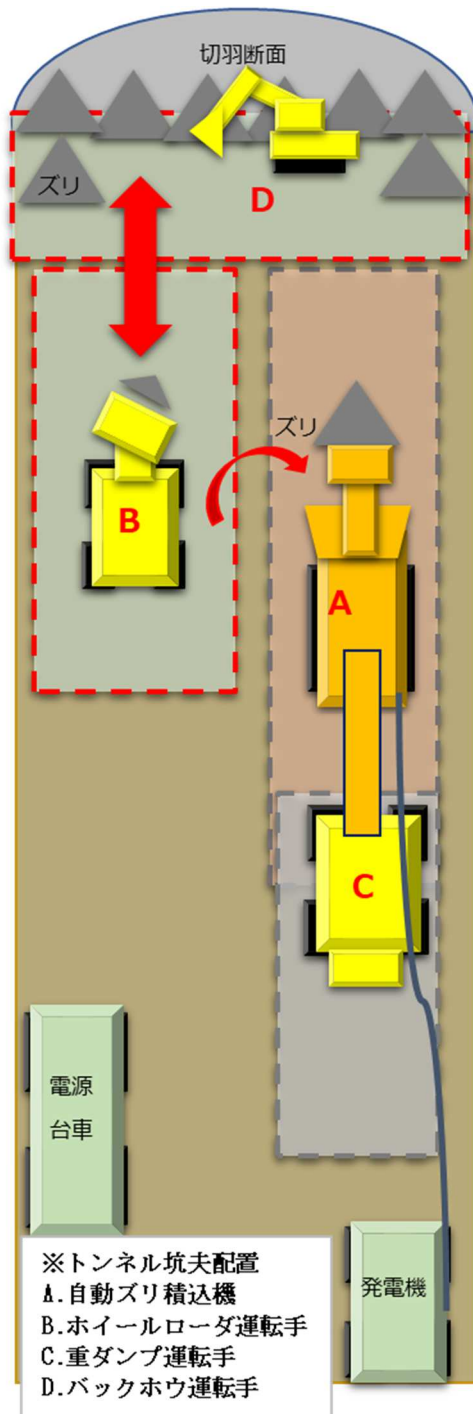


図-3 坑内実験時全体俯瞰図

模擬トンネルでのシステム調整と新たな学習用教師データの取得作業が終了した後、運用検証を現場坑内で行った。

運用内容は、動作確認として手動操作と自動運転レベル0～2を実施した。また、手動操作と自動運転のデータの比較を行った。自動運転については、自動運転レベル1と2を組み合わせた条件で行った。

ai ロックローダは切羽より約 30m 手前にセット。切羽直前にズリ寄せのバックホウ 1 台、ズリ山もりのためのホイールローダ 1 台、ai ロックローダ後方にズリ搬送のための 25t 重ダンプ 1 台を配置した。

5.5 現場運用結果

手動・自動ともに動作は正常なことを確認した。

表-5 坑内運用検証での作業効率の比較

操作方法	作業効率	備考
手動	100 %	乗車にて操作
レベル0+2	79 %	
レベル1+2	67 %	

坑内での実証実験結果を表-5 に、実験状況を写真-8, 9 に示す。効率の比較については ai ロックローダを運転手が手動で動かした際、ダンプ1台分の所要時間を 100%とした。



写真-8 トンネル坑内運用状況(後方)



写真-9 トンネル坑内運用状況(前方)

運用結果

- ・坑外ズリピットでの検証時、発生したバケットのスタックはシステム改良により、動作の自動復旧が確認できた。
- ・各自動運転レベルにおける作業効率は、ズリピットでの検証時と比較し、上昇した。
- ・ズリの有無についても、センシング画像と現場目視確認にて、しっかりズリが掻き込めることが分かった。また、センシングも問題なく動作していることを確認できた。
- ・バケットのスタック対策(キャンセル動作)の導入により待機時間が減少したため、ズリピット実験時に比べ、効率が向上したと考えられる。
- ・ズリピットでの実験時に取得したズリ山のデータで学習を行ったことでスムーズにしっかりズリを掻き込めたと考えられる。

6. まとめ

ai ロックローダは、切羽でのズリ運搬作業の待ち時間が減少することでトンネル工事による施工サイクルタイムが速くなる機械である。ここで、ai ロックローダの特徴を5点まとめる。

- ① 後方にズリを仮置きすることで切羽の早期解放が可能となり、生産性が向上
- ② AIによる自動運転が可能である
- ③ 自動運転により、約20%の省人化が可能
- ④ 手動でも操作可能
- ⑤ 人の検知が可能で安全性向上

切羽の早期解放時の運用状況を写真-10に示す。



写真-10 切羽の早期解放状況

エレクターを切羽に移動することができ、ズリ搬出作業と支保工作業を同時にすることが可能となった。

7. おわりに

今回の運用・検証では、回数を重ねるにつれて各自動運転レベルの作業効率は上昇した。今後も写真データの収集を継続し、AIによる学習を行い、ダンプ運搬方式(図-4)の安全性向上や生産性向上など、自動運転の発展に努めていく。また、今回はズリ運搬方法が異なる、連続ベルトコンベヤ運搬(図-5, 6)採用のトンネル工事への導入も進めていく所存である。

※図-5, 6はイメージ図

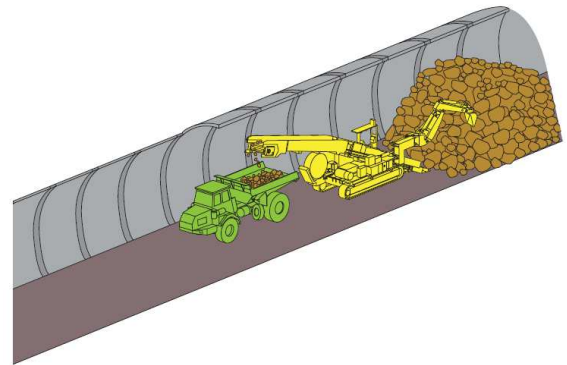


図-4 ダンプ運搬方式

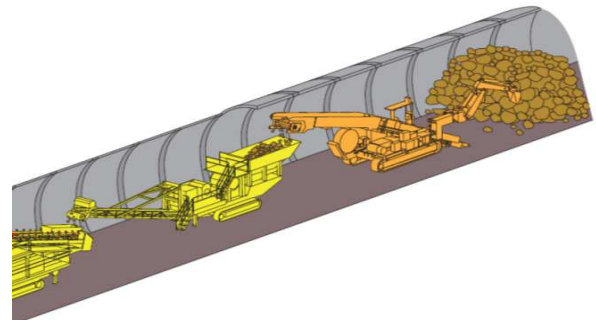


図-5 連続ベルトコンベヤ運搬方式

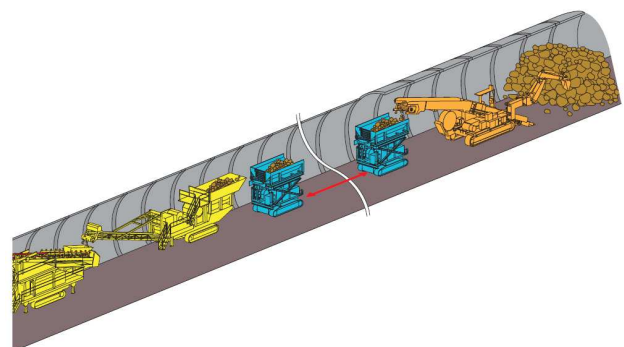


図-6 運搬機付き連続ベルトコンベヤ運搬方式

参考文献

- 1) 国土交通省：インフラ分野のデジタル・トランスフォーメーション(DX), p.1, p.3, 令和3年2月9日
- 2) 国土交通省：資料 3 インフラ分野のDXに向けた取組紹介, p19, 令和2年7月29日