

水路トンネルにおける目視点検作業を省力化・効率化

自律走行式ロボット（Tunnel-Rover[®]）とAI画像解析ソフトによる ひび割れの自動検出技術

本 山 昇・鈴木 健・伊藤 幸広

水路トンネルの目視点検における作業の省力化・効率化を図るため、自律走行式のロボットとAIを活用した画像解析ソフトを組み合わせた、トンネル壁面のひび割れ自動検出技術を開発した。本技術によって、当該作業における点検者への身体的負荷の低減や、ひび割れの見落としのリスク低減等を図っている。本技術では、実際の水路トンネル等において実証試験を実施し、開発技術の実環境への適用性や、その性能等を確認した。本稿では、開発した技術の概要と、複数施設で実施した実証試験の概要について報告する。
キーワード：水路トンネル、維持管理、自律走行式ロボット、AI画像解析、ひび割れ自動検出、省力化

1. はじめに

水力発電所等の水路トンネルは、建設から50年以上経過している施設が多く、老朽化が進行しており、施設管理者においては、施設の長期的かつ効率的な維持管理が求められている。水路トンネルの長期的な維持管理には、トンネル壁面の定期的な点検等の実施により、新たな変状の発生や進行を監視する必要がある。壁面の点検は、点検者による目視点検および点検ハンマーによる打音検査等によって実施され、目視点検においては、主にひび割れに着目して行われる¹⁾。しかしながら、水路トンネルは小断面かつ長距離の施設が多いため、坑内での点検作業は、点検者への身体的負荷が大きい作業である。また、トンネル天端部等の近接目視では観察しにくい箇所においては、ひび割れを見落とすリスクがある。

こうした背景から、これまでもドローン型や浮体型といった点検者の代替技術の開発が進められてきた。しかしながら、これらの技術は、飛行時間の制約や、坑内の風況・水流の影響によって機体の制御が困難であるといった課題が確認されている。

2. 開発システムの概要

開発した技術は、トンネル壁面の画像撮影を行う自律走行式ロボット（以下、「ロボット」と記す。）と、ロボットによって取得した画像から、AIを活用した画像解析によるひび割れの自動検出ソフトによって構成される。ロボットはクローラ式の走行型とすること

で、不陸走行時の安定性が確保されると共に、大容量バッテリーの搭載による長時間稼働を実現した。

(1) 自律走行式ロボット

ロボットは、トンネル内を自律走行する「走行ユニット」と、カメラや照明等を搭載した「計測ユニット」によって構成され、トンネル壁面の画像を効率的に取得することが可能である。これにより、これまで点検者が行っていた目視点検の代替として、ロボットによる画像撮影とすることで、点検者への身体的負担の低減を図っている。ロボットの全景を写真—1に、主要諸元を表—1にそれぞれ示す。



写真—1 ロボット全景

表一 1 ロボット主要諸元

項目	仕様・性能
寸法	全長：910 mm×全幅：700 mm×全高：1,310 mm
質量	約 210 kg
走行速度	最高速度 約 2 km/h
適用断面（目安）	幅 2.5 m～6 m 以下を想定 ※現場条件につき要相談
適用水深	水深 200 mm 以下
電源・稼働時間	バッテリー・最大約 3 時間（最長距離：片道 3 km）
計測用カメラ	2,400 万画素（6,000×4,000）× 5 台
検出性能	最小ひび割れ幅 0.1 mm
無線通信距離	専用コントローラによる遠隔操作：見通し 200 m

①走行ユニットの概要

ロボットの走行部分である走行ユニットは、自身に搭載したバッテリーを動力とした電動クローラ型とし、長距離の施設が多い水路トンネルでの稼働を考慮し、最高速度 2 km/h、最大約 3 時間の稼働によって、片道 3 km の水路トンネルを往復走行できる仕様とした。また、長期にわたり使用された水路トンネルの底版部は、洗掘等の影響によって不陸となっていることが多い。この対策として、機体の質量を約 150 kg とし、重心を低く保ち、安定した走行を可能とした。本機を用いた点検時の坑内は、抜水状態となる。しかしながら、底版部は、完全な抜水状態とはならない。この課題に対して、クローラ部の制御装置は防水仕様とし、水深 200 mm 以下の範囲であれば走行可能とした。

走行ユニットの主な特長としては、トンネル内の自律走行機能が挙げられる。自律走行には、機体前方に搭載した LiDAR（Light Detection And Ranging）等のセンサを使用する。センサによって、左右のトンネル壁面と自身との距離を常時計測し、得られた計測値を基に、ユニット内に搭載したクローラの制御装置によって、トンネル中央部を常に維持した自律走行を可能とした。自律走行時のイメージを図一 1 に示す。また、自律走行の開始・停止の操作は、専用のコントローラによって行うことが可能である。さらに、同コントローラでは、自律走行モードと遠隔走行モードの切り替えや、ロボットの遠隔走行モードにおける操作も可能である。

走行ユニット単体での自律走行性能を確認するため、簡易的な検証試験を実施した。試験は、試験者 2 名が板を持ち、ロボットを左右から挟み込むことで、トンネルの左右の壁面を模擬し、壁面間の中央を維持した自律走行が可能であることを検証した。試験の結果、ロボットは搭載した LiDAR 等のセンサによって、左右の壁面を認識し、壁面間の中央を維持した直進走行および曲線走行が可能であることを確認した。試験状況を写真一 2 に示す。

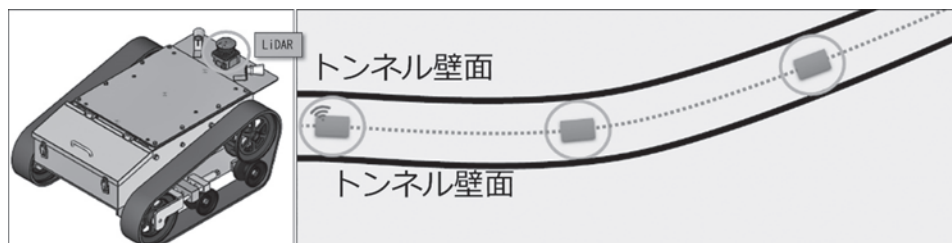
②計測ユニットの概要

走行ユニットの上部に搭載した計測ユニットには、トンネル壁面を撮影する計測用のカメラ 5 台を、トンネル断面の法線方向に向けて均等に配置し、ロボットがトンネル内の中央位置から、壁面全体の画像をまとめて撮影できるようにした。これにより、前述した走行ユニットによる自律走行と、計測用カメラの連続撮影を組み合わせて、坑内中央ラインの 1 回の自律走行によって、壁面の効率的な画像撮影が可能である。また、計測用カメラは約 2,400 万画素の画像の撮影が可能な仕様とし、カメラの配置と同様に LED 照明を 4 灯搭載して、照明設備の無い水路トンネル内においても、適切な照度にて高精細な画像撮影を可能とした。

さらに、計測ユニットの前方・後方には、広角のビデオカメラを 1 台ずつ搭載した。これにより、計測用カメラでは撮影困難なトンネル内の底版部や、坑内全体の概況確認を可能とした。計測ユニットの全景を写



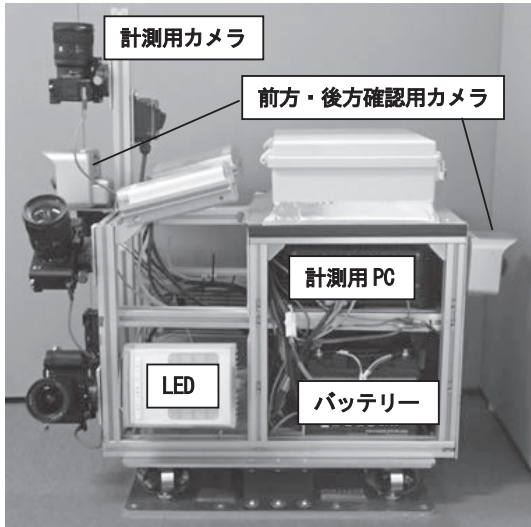
写真一 2 走行ユニット自律走行試験状況



図一 1 走行ユニットの自律走行イメージ

真一3に、トンネル壁面撮影時のイメージを図一2に示す。

(2) AI 画像解析ソフトによるひび割れ自動検出
ロボットによって撮影した壁面画像は、目視点検に

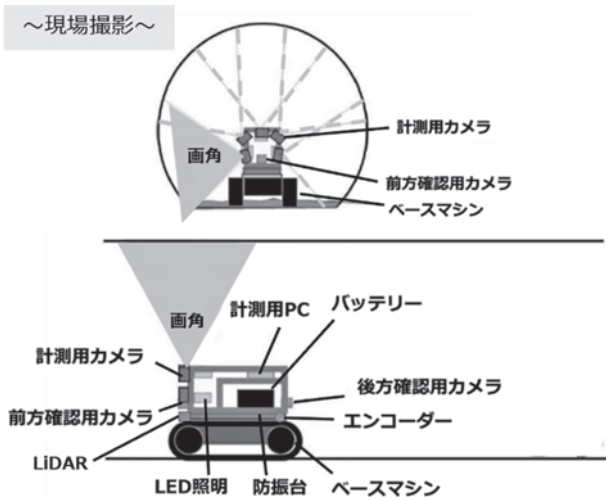


写真一3 計測ユニット全景 (側面)

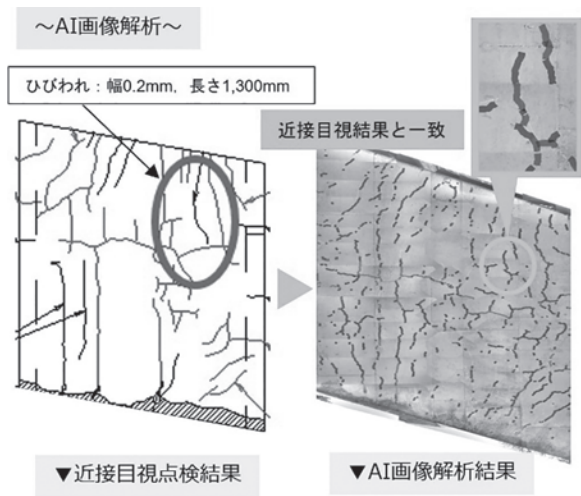
よるひび割れ検出作業の効率化を図るため、AIを活用した画像解析ソフトを使用することとした。本ソフトは、画像上のひび割れを自動で検出することが可能であり、検出できる最小ひび割れ幅は0.1 mmである。これにより、ひび割れ検出作業が自動化され、点検者の主観に依存しない、客観性が担保された検出結果を得られると共に、トンネル天端部などの目視点検では観察しづらい箇所も、容易に検出できるため、見落としのリスク低減効果も期待される。

また、本ソフトによるひび割れ自動検出結果については、従来の点検者による目視点検結果と比較し、概ね一致することを確認した。ひび割れ自動検出結果と目視点検結果とを比較した画像の一例を図一3に示す。

さらに、本ソフトでは、検出したひび割れの幅や長さ等の情報を、図面データや積算表として出力することが可能である。これにより、施設の長期にわたる維持管理の観点において、点検結果を電子データとして記録・蓄積し、過去の点検結果との比較や、経時的変化の把握を可能とした。出力したひび割れ情報のテキストデータの一例を図一4に示す。



図一2 トンネル壁面撮影時のイメージ



図一3 点検結果の比較例

	A	B	C	D	E	F	G
1	ひびわれラベル番号	ひびわれの幅 (代表値) (mm)	ひびわれの長さ (mm)	ひびわれ地点・X座標(m)	ひびわれ地点・Y座標(m)	ひびわれ終点・X座標(m)	ひびわれ終点・Y座標(m)
2	"1"	1.65	53.47	0.0296	0.7648	0.0383	0.8146
3	"2"	0.9	32.49	0.0299	0.7529	0.0307	0.7204
4	"3"	0.18	58.16	1.9003	0.2034	1.9072	0.2599
5	"4"	0.18	31.88	1.9037	0.1842	1.9053	0.1531
6	"5"	0.2	54.65	1.9224	0.2898	1.9357	0.3419
7	"6"	0.18	28.96	1.9264	0.3592	1.9326	0.3874
8	"7"	0.18	28.65	2.1627	1.1637	2.1788	1.1400
9	"8"	0.55	44.52	2.1971	1.1189	2.2313	1.1361
10	"9"	0.23	57	2.2344	0.0850	2.2387	0.1380
11	"10"	0.28	25.58	2.2413	0.1421	2.2431	0.1665
12	"11"	0.18	19.24	2.2431	0.1662	2.2434	0.1854
13	"12"	0.28	131.08	2.2434	0.1843	2.2668	0.3064
14	"13"	0.73	37.96	2.2460	0.0678	2.2454	0.0308
15	"14"	0.42	223.27	2.4999	0.4461	2.4594	0.2400
16	"15"	0.33	70.94	2.4740	0.2333	2.4883	0.1690
17	"16"	0.5	96.21	2.5119	0.1211	2.4999	0.0415
18	"17"	0.32	20.3	2.5007	0.6214	2.5059	0.6410
19	"18"	0.32	66.91	2.5187	0.4989	2.5044	0.4414
20	"19"	0.5	479.92	2.5102	0.4678	2.5523	0.9202
21	"20"	0.5	192.68	2.5242	1.0994	2.5493	0.9212

図一4 ひび割れ情報のテキストデータ例

3. 開発システムの実証試験

本技術の開発にあたっては、これまで馬蹄形水路トンネル、鉄道トンネルおよびボックスカルバートを対象に、試験的な調査を実施した^{2), 3)}。これにより、走行条件等が異なる各施設での、本技術の性能および適用性等を確認した。

(1) 馬蹄形水路トンネルでの実証試験

走行ユニットの自律走行性能の検証を目的に、馬蹄形水路トンネルでの走行試験を実施した。試験では、インバート幅約2.8mの水路トンネルにおいて、坑口から自律走行を実施した。その結果、トンネル中央部を維持しながら約500mを往復走行し、合計約1kmの自律走行を確認した。走行路には途中、緩やかな曲線区間や凹凸の大きい不陸区間もあったが、トンネル中央部を安定して走行することが可能であった。試験状況を写真—4に示す。



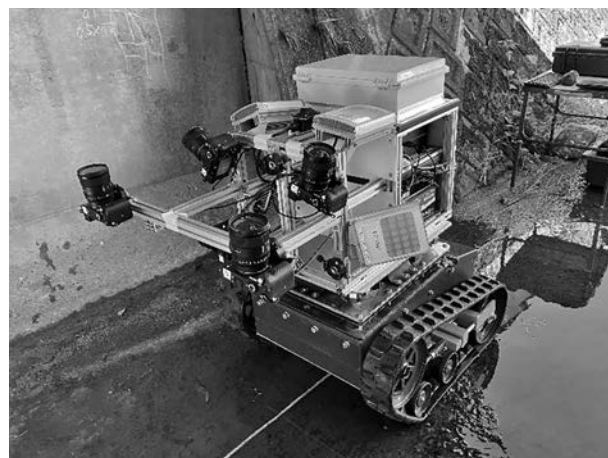
写真—4 馬蹄形水路トンネルでの試験状況

(2) 鉄道トンネルでの実証試験

鉄道トンネルの実証試験では、路面幅約3mの坑内には軌条設備があったため、走行ユニットの代替として手押し台車を使用して、画像撮影を実施した。画像解析の結果、ひび割れの自動検出が可能であったと共に、走行ユニットが適用できない施設での目視点検にも有効であることが確認された。試験状況を写真—5に示す。

(3) ボックスカルバートでの実証試験

ボックスカルバートの水路では、躯体の縦横比の関係から、標準のカメラ配置では撮影が困難なため、カルバート形状に合わせたカメラ配置とした。走行においては、カルバートの幅が大きく、ロボットの自律走行機能の適用条件外であった。そのため、画像のラップ率から予め設計した測線に沿って、専用コントローラによる遠隔操作での走行とした。画像解析の結果、ひび割れの自動検出が可能であり、本技術がボックスカルバートの目視点検にも適用できることを確認した。試験状況を写真—6および写真—7に示す。



写真—6 ボックスカルバート仕様のロボット



写真—5 鉄道トンネルでの試験状況



写真—7 ボックスカルバートでの試験状況

4. おわりに

本開発では、水路トンネルの目視点検の省力化・効率化を目的に、自律走行式のロボットと、AI画像解析ソフトを組み合わせた点検技術を開発した。開発技術の性能検証のため実施した、各施設での実証試験を通して、水路トンネルおよびその他施設の点検へ適用できることを確認した。一方で、撮影環境によって都度異なる計測用カメラの調整作業や最適な照度確保には、専門的な知識が要求されることが課題として確認された。今後は、その他確認された課題の改善と共に調査実績の蓄積を進める所存である。

謝 辞

実証試験のフィールド提供にご協力いただいた各施設の管理者の皆様と、本技術の開発にご協力いただいた皆様へ、この場を借りて感謝の意を表します。

JCMA

《参考文献》

- 1) (公社)土木学会エネルギー委員会編, 「水路トンネル維持管理の手引き」, (公社)土木学会, P108, 2021年7月
- 2) 本山ほか, 「自律走行式小断面トンネル調査ロボットの開発」, 土木学会全国大会第79回年次学術講演会 VI-579, 2024年9月
- 3) 本山ほか, 「水路トンネル調査ロボット (Tunnel-Rover®) による点検技術の開発」, 電力土木, No.435, P54-56, 2025年1月

【筆者紹介】



本山 昇 (もとやま しょう)
西松建設(株)
技術研究所 先端技術グループ
主任



鈴木 健 (すずき たけし)
西松建設(株)
土木技術部 リニューアル課
課長



伊藤 幸広 (いとう ゆきひろ)
佐賀大学
理工学部
教授