

MR 技術を活用したトンネル維持管理システム（トンネル MR）の開発

(株) 鴻池組 正会員 ○若林 宏彰

(株) 鴻池組 正会員 長沼 諭

1. はじめに

我が国では、高度経済成長期に集中的に整備されたインフラが今後一斉に老朽化する。道路トンネルに関しては、現在使用されている約 1 万 1 千本のトンネルのうち、建築後 50 年以上経過するトンネルが、2018 年では約 20%、2035 年では約 42%と今後 15 年間で倍増するため、効率的に維持管理を行っていく必要がある。道路トンネルの点検は、国土交通省が定める「道路トンネル定期点検要領」に基づき、5 年に 1 回の頻度で近接目視と打音検査による定期点検が実施されている。実際のトンネル点検作業では、トンネル坑内が暗く、覆工表面が排ガスや煤塵で汚れている場合が多いため、不具合箇所を探すのに時間を要している（図-1）。また覆工の変状区分の判定では、地形や地質、水圧などの外圧に起因する変状なのか、乾燥収縮や温度変化、中性化、アルカリ骨材反応などの材質劣化に起因する変状なのかを判定するのが困難な場合が生じても、現地では設計や施工記録、維持管理記録を参考にした総合的な判定が行えないといった問題もある。



図-1 トンネル点検状況

今回開発した MR 技術を活用したトンネル維持管理システム（以下、トンネル MR）は、現地でウェアラブル端末を使用して、変状箇所と、地質情報や維持管理情報とを合わせて確認することで覆工の変状区分を的確に判定するとともに、現地で維持管理データを追加・更新することで維持管理業務の効率化を図るものである。

本稿では、トンネル MR の優位性を検証するために国道 371 号（仮称 新紀見トンネル工事）道路改良工事において現場実証試験を行い得られた知見を述べるとともに、今後の開発方針について報告する。

2. トンネル MR の概要

トンネル MR は、トンネルの点検や変状区分の判定に必要な維持管理データをウェアラブル端末を介して実構造物に投射し、現地で維持管理データを追加・更新できるシステムである。

本システムは、事前に維持管理データをウェアラブル端末に搭載された小型コンピューターに記録し、位置情報を付与したビーコンや AR マーカーと、ウェアラブル端末の各種センサーを用いて空間を認識させ、実構造物に 3 次元データを 1 分の 1 スケールのホログラムとして投射するものである（図-2）。また現地において、ひび割れや漏水などの不具合箇所を発見した場合、作図機能を使用して維持管理データを追加・更新する。

今回、トンネル MR にはウェアラブル端末に Microsoft 社製の MR デバイスである『HoloLens』を使用し、データの投射・更新には当社と共同開発を進める (株) インフォマティクスの HoloLens 対応ソフト『GyroEye Holo』をカスタマイズしたシステムを使用した。

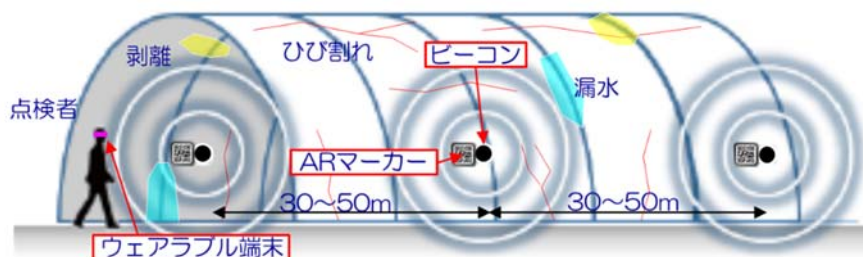


図-2 トンネル MR 概要図

キーワード MR, 複合現実, トンネル, 維持管理, 生産性向上

連絡先 〒541-0057 大阪市中央区北久宝寺町 3-6-1 株式会社鴻池組 土木技術部 TEL06-6245-6580

3. HoloLens の概要

HoloLens が映し出す MR について、VR や AR と比較しながら説明する。

一般にビデオゲーム機などで広く使用される VR (Virtual Reality) は「仮想現実」を意味し、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) 等を使用して仮想世界にさまざまな 3 次元情報を表示するもので、装着者は現実世界から完全に切り離された仮想空間にいるように感じられる。一方、AR (Augmented Reality) は「拡張現実」を意味し、タブレットやスマートフォン等を使用して現実世界に 2 次元情報を重ね合わせて表示するもので、代表的なものとしては携帯ゲームアプリの「ポケモン GO」などがある。

MR (Mixed Reality) は「複合現実」を意味し、VR と AR を融合したものであり、HMD 等を使用して現実世界に 3 次元情報を表示するもので、装着した人は現実世界に仮想の物体があたかもそこにあるかのように感じられる。

一般に MR 技術を活用するためには、外界の情報をリアルタイムにスキャンする仕組みと、自己位置を正確に把握する仕組みが必要とされ、これをケーブルレスかつ周囲に外部センサー機器などが一切不要な単体で実現できる機械が Microsoft 社製の HoloLens である (図-3)。

HoloLens は、物体の形状や奥行きを認識できる深度センサー、周囲の映像から特徴点を認識する環境認識センサーといった外界センサーを搭載することで SLAM 技術を活用できる。この SLAM 技術は、深度センサーにより前方 3m~5m 程度の範囲の物体を 3 次元メッシュデータとしてスキャンしながら、環境認識センサーにより広範囲かつ高精度に映像の特徴点を検出してトラッキングを行い、内部の IMU センサーにより傾きを調整して点検者の自己位置を推定するものである。また HoloLens に 3 次元データを投射するためのソフトである GyroEye Holo は、HoloLens がバックグラウンドでスキャンする現実空間の 3 次元メッシュデータ上に、専用の AR マーカーを起点として、仮想の図面や 3 次元データを連結、固定して表示させる仕組みとなっている。さらにクラウドを介して、いつでも任意にユーザーがデータを変換し、HoloLens まで取り込める流れが一連のパッケージとして採用されている。

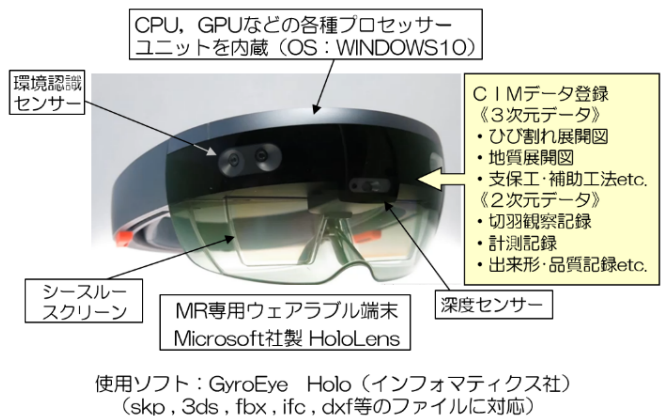


図-3 HoloLens 概要

4. 現場実証試験

(1) 実証試験の概要

トンネル MR の優位性を検証するため、国道 371 号（仮称 新紀見トンネル工事）道路改良工事において現場実証試験を実施し、システムの視認性や動作性、システム誤差について検証した。

トンネル MR におけるデータ入力方法、操作方法を以下に示す。

- ① トンネルの点検及び覆工の変状区分の判定で必要となる維持管理データを HoloLens に登録する。

現場実証試験において登録したデータを以下に示す (図-4~図-7)。

- (2 次元データ) 断面図、切羽観察記録、内空変位計測結果、トンネル品質管理記録、覆工出来形調書 等
- (3 次元データ) ひび割れ展開図、地質展開図、湧水展開図、支保パターン展開図、
3 次元モデル (舗装コンクリート・排水) 等

- ② トンネル坑内の覆工 3~5BL 毎の任意の位置に、位置情報を付与した AR マーカーを設置する。
- ③ HoloLens により AR マーカーから位置情報を読み込み、位置情報とリンクした維持管理データを呼び出す。
- ④ HoloLens の外界センサーにより、トンネル覆工表面と点検者の位置を認識し、呼び出した維持管理データを覆工表面の任意の位置にホログラムとして投射する。

- ⑤ 移動中は、常時、HoloLens の外界センサーにより、前方 3～5m 程度の範囲の物体をスキャンしながら現在位置を測定・認識し、移動に合わせて覆工表面にホログラムを追従させる。
- ⑥ 2次元データは予め任意の位置に登録ポイントとして配置しておき、点検者が 1m 以内に接近すると自動的に展開するように設定する（図-8）。

- ⑦ 作図機能により、現地でひび割れや剥離・剥落、漏水などの不具合箇所を作図する。

作図機能は HoloLens のハンドジェスチャー認識機能を使用し、SLAM 技術により覆工表面に構築された 3次元メッシュデータ上に、ひび割れのトレースや、長さ計測、記号やコメントの貼付けを行うものである。今回使用したハンドジェスチャーは、AirTap（人差し指を立てて、まっすぐ下に倒す動作。クリックに相当）と、Tap and Hold（AirTap をしてから人差し指と親指で掴むような動作。ドラッグやスクロールに相当）の 2種類で、点検者の指の動きを認識して指先の延長上にあるメッシュデータに作図を行うシステムである。

作図機能の項目を以下に示す。

- ひび割れ朱書き機能：ひび割れの進展に合わせてひび割れをトレースする機能（図-9）
- 計測機能：ひび割れや不具合箇所の長さや大きさを計測する機能（図-10）
- 記号貼付け機能：現地の漏水箇所や剥離・剥落箇所などに記号を付記する機能（図-11）
- コメント貼付け機能：現地のひび割れや不具合箇所に音声や文字を付記する機能



図-4 レイヤー一覧表示例

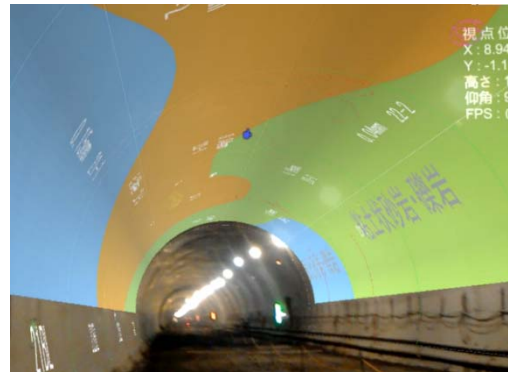


図-5 地質展開図表示例



図-6 ひび割れ展開図表示例



図-7 舗装コンクリート表示例



図-8 2次元データ登録ポイント表示例



図-9 ひび割れ朱書き表示例

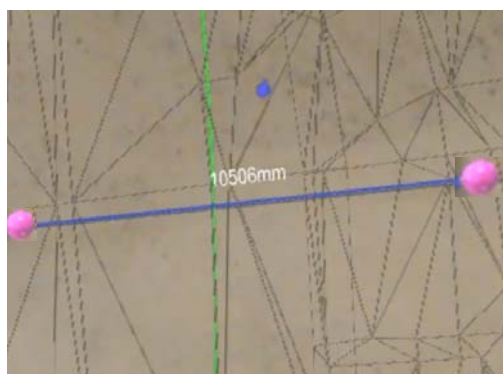


図-10 計測機能表示例



図-11 記号貼付け機能表示例

⑧ 現地で作図した3次元の維持管理データを事務所に持ちかえり、2次元展開図や3次元展開図としてCADデータに出力する(図-12, 図-13)。

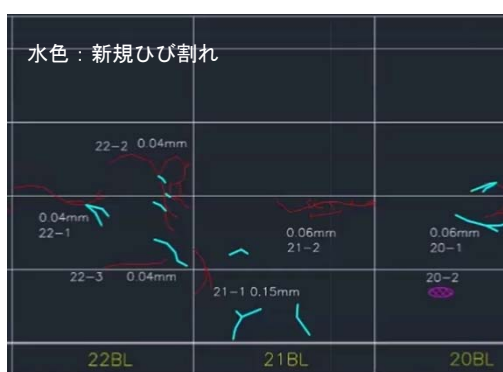


図-12 2次元ひび割れ展開図表示例

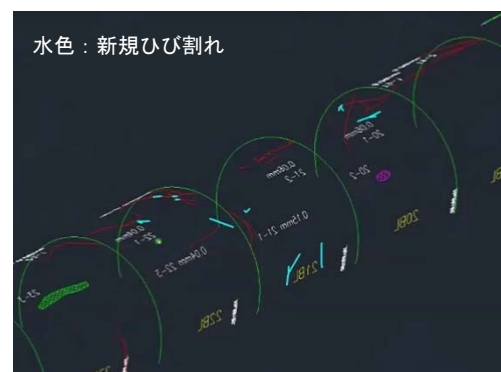


図-13 3次元ひび割れ展開図表示例

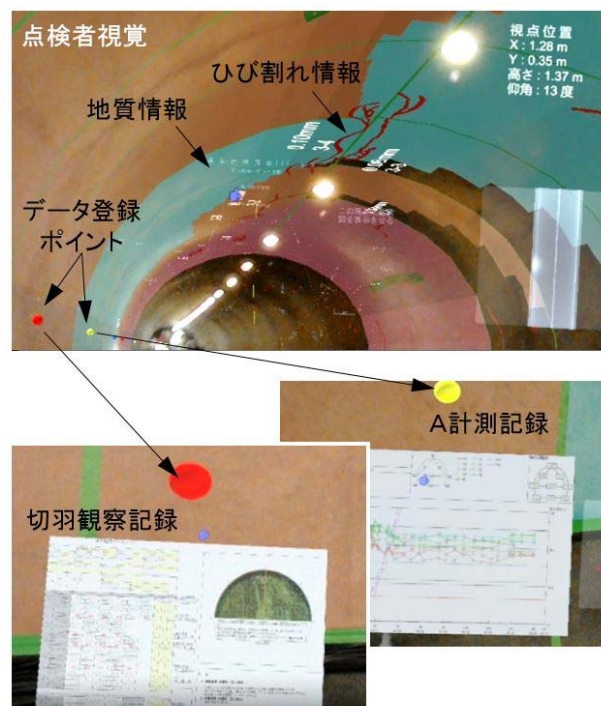
(2) システムの視認性、動作性の検証

図-14 にひび割れ展開図、地質展開図及び2次元データ登録ポイントを重ね合わせて表示させた点検者視覚画像を示す。

HoloLens で投射されるホログラムは、坑外の明るい照度条件下においては視認しにくいことがあるが、トンネル坑内の20～30ルクス程度の暗い照度条件下においては鮮明に視認できることを確認できた。また特徴点の少ない覆工表面において、自己位置を特定しながら地質展開図やひび割れ展開図など複数のホログラムを重ねて表示させても、点検者の動きや移動に対して、ずれや遅れを生じることなくスムーズに追従することを確認できた。

図-15, 図-16 に作図機能によるひび割れ作図状況を示す。

HoloLens でスキャンした覆工表面の3次元メッシュデータ上に、点検者が外界センサーの認識距離となる3～5m離れた位置からひび割れや記号を作図できることを確認できた。また一旦 HoloLens 内に外界センサーの認識距離内で3次元メッシュデータが記録されると、点検者の指先の延長上にある約7m先のトンネル天端のメッシュデータ上にも、ひび割れや記号などを作図できることも確認でき



点検者がデータ登録ポイントに近づくと
ハンズフリーで自動的にデータ表示

図-14 点検者視覚画像

た。

以上より、トンネル MR を使用することで、点検者が現地において移動しながら覆工表面にホログラムをスムーズに映し出し、覆工表面の離れた位置から維持管理データを追加・更新できることを確認できた。



図-15 ひび割れ作図状況（トンネル側壁部）



図-16 ひび割れ作図状況（トンネル天端）

(3) システム誤差の検証

点検者の移動時や作図時に生じるトンネル MR のシステム誤差を検証するため、トンネルの幅や高さ、その他の条件に応じて生じる誤差の関係性や規則性について確認し、その要因を推定した。

図-17、図-18 に誤差精度検証用の方眼紙設置状況を示す。

誤差精度検証用の方眼紙は、トンネル側壁部（GL+1.5m）と底盤部（GL±0m）の L 側，R 側の 30m 区間において、10m 間隔で合計 16 点設置した。システム誤差の測定方法は、トンネル MR の作図機能を使用して 3 次元データによる計測ポイントを方眼紙の原点に重ね合わせ、点検者が 30m 移動した際の方眼紙の原点と HoloLens が映し出す計測ポイントとのずれを確認する方法とした。

表-1、表-2 にシステム誤差検証結果を示す。

システム誤差が 50mm 以上確認された箇所は、トンネル側壁部で 2 点/8 点、底盤部で 1 点/8 点であり、その値は最小 7mm から最大 50mm の範囲にあった。これにより、HoloLens のシステム誤差精度は歩行距離を 30m とした場合に 0.17% 程度の小さい値であることを確認できた。また検証結果から、トンネルの幅や高さとの関係性や規則性は認められなかった。このシステム誤差の要因としては、HoloLens の SLAM 技術の活用にあたり必要な自己位置を推定するための情報や情報処理能力が不足していたことが考えられる。とくに点検者の歩行速度が速い場合や動作が大きい場合に、HoloLens の外界センサーにより 3 次元メッシュデータが新しく再構築され、HoloLens の映し出す計測ポイントにずれが生じる傾向が見られた。

以上より、ホログラムの投射精度や作図精度を向上させるためには、HoloLens の情報処理能力の向上、自己位置推定機能の改善や周囲環境情報の補填などについて開発を進める必要があると考えられる。



図-17 誤差精度検証用の方眼紙設置位置



図-18 誤差精度の検証に使用した方眼紙

表-1 システム誤差検証結果（トンネル側壁部）

測点		L-1			L-2			L-3			L-4			R-1			R-2			R-3			R-4		
坑内距離		0m			10m			20m			30m			0m			10m			20m			30m		
誤差 (mm)	方向	Y	Z	Δ	Y	Z	Δ	Y	Z	Δ	Y	Z	Δ	Y	Z	Δ	Y	Z	Δ	Y	Z	Δ	Y	Z	Δ
	1回目	8	0	8	0	0	0	-15	-5	16	-15	0	15	-40	10	41	-20	10	22	0	20	20	10	10	14
	2回目	-32	-25	41	-40	-20	45	-50	5	50	-50	0	50	0	-20	20	5	-20	21	15	-10	18	20	0	20
Δ最大値(mm)		41			45			50			50			41			22			20			20		

表-2 システム誤差検証結果（トンネル底盤部）

測点		LD-1			LD-2			LD-3			LD-4			RD-1			RD-2			RD-3			RD-4		
坑内距離		0m			10m			20m			30m			0m			10m			20m			30m		
誤差 (mm)	方向	X	Y	Δ	X	Y	Δ	X	Y	Δ	X	Y	Δ	X	Y	Δ	X	Y	Δ	X	Y	Δ	X	Y	Δ
	1回目	-30	40	50	0	15	15	15	20	25	25	20	32	5	-5	7	-10	-2	10	10	-10	14	35	-10	36
	2回目	10	30	32	5	30	30	15	20	25	38	20	43	7	-5	8	-15	8	17	10	0	10	20	5	21
Δ最大値(mm)		50			30			25			43			8			17			14			36		

(4) トンネル MR の導入効果

現場実証試験で得られた知見を踏まえ、今後のトンネル MR の開発を進めていくことで、トンネル坑内の暗い照度条件下かつ特徴点の少ない覆工表面において、高精度にホログラムを投射させ作図できることが可能になる。

トンネル MR の維持管理業務への導入効果について以下にまとめる。

- ① 現地において、ひび割れ展開図などの 3 次元データを実構造物に投射することでトンネル変状箇所を容易に認識でき、点検もれや見落としを防止できる。
- ② 現地において、変状箇所と、地質や施工情報、維持管理情報などのデータを紙媒体ではなく電子データとして比較することで、より多くの情報を手軽に確認できるため、変状箇所と、設計・施工との因果関係や発生原因を的確に評価できる。
- ③ 現地において、内空断面や設計寸法が確認できるとともに、舗装や排水管などの地下埋設物を 3 次元にモデル化できるため、補修・補強工事実施時の支障物への損傷を防止できる。
- ④ 現地において、作図機能を使用して維持管理データを追加・更新し、事務所に持ち帰って 2 次元展開図や 3 次元展開図として CAD データに出力できるため、点検調書の作成効率が向上する。
- ⑤ 現地において、補修・補強工事の対策範囲を設定する場合、計測機能を使用して離れた場所から不具合箇所の範囲を測定できるため、材料ロスを少なくでき作業効率が向上する。

5. おわりに

今回、新紀見トンネルの現場実証試験において、トンネル MR の優位性を確認できた。

HoloLens は 2017 年に国内でリリースされた新しい技術であり、MR 技術はさまざまな分野で活用の広がりを見せている。建設業界では MR 技術を活用することで、維持管理段階のみならず、設計や施工段階の多種多様な業務においても効率化や省力化が図れるものと期待される。しかし、MR 機器に入力するデータが正確なものでなければ、現地において不具合箇所と投射画像との整合性がとれないため、正確な点検や評価が行えない可能性がある。近年ではトンネル点検に MIS (Mobile Imaging Technology System) や MMS (Mobile Mapping System) などの技術が広く導入され、3 次元の正確なひび割れ展開図を取得することができ、これらの技術で取得したデータを MR 機器に取り込むことで高精度な点検や評価が行えるものと考えられる。またトンネル MR の実用化に向けては、ソフト面では、今回開発した作図機能の項目選定や機能拡張に加え、国土交通省が進める i-Construction の一環である CIM との連携や AI によるひび割れ自動抽出技術などの導入を進めるとともに、ハード面では、屋外作業時の気温や湿度変化への対応と防水性、防塵性の向上、バッテリー時間延長などの問題点を解決することで、さらなる業務の効率化や省力化を図れるものと考えられる。

今後、トンネルを含むインフラの点検業務や建設工事における業務の効率化に寄与できるよう、さらに MR 技術の活用を図り、開発を進めていきたい。