

車載式トンネル 3D スキャニングシステムの開発 Development of Automotive Tunnel 3D Scanning System

山本 悟* 三井 善孝*
Satoru Yamamoto Yoshitaka Mitsui

要 約

山岳トンネルにおける現状の内空変位計測（A 計測）では、通常 20 m 間隔程度の決められた測点においてトータルステーションを用いて変形挙動が局所的に把握されている。一方、近年ではトータルステーションの代わりに 3D レーザースキャナ（以下、スキャナ）を用いてトンネル坑壁の内空変位を面的に把握する手法が提案されており、いくつかのトンネルにおいて適用事例があるものの、計測毎にスキャナを三脚で設置する際の手間や、ノンプリズム計測による精度の確保、点群データの解析に多大な時間を要するといった課題が指摘されている。以上のような背景から、車両に搭載されたスキャナにより、トンネル内空変位を迅速かつ面的に計測可能な、車載式トンネル 3D スキャニングシステムを開発した。

目 次

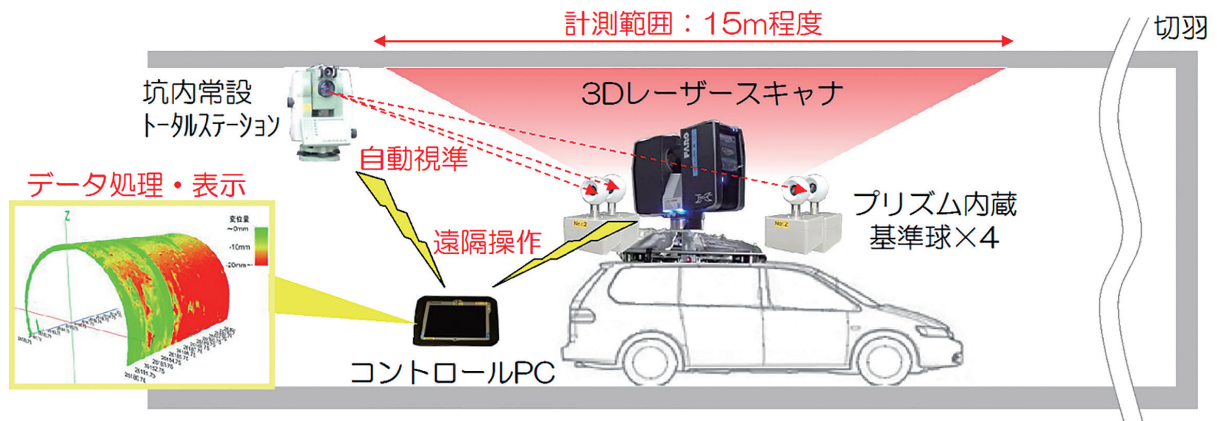
- § 1. はじめに
- § 2. システムの概要
- § 3. 作動確認試験
- § 4. 実現場での適用事例
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

山岳トンネルにおける現状の内空変位計測（A 計測）では、通常 20 m 間隔程度の決められた測点においてトータルステーション（以下、TS）を用いて変形挙動が局所的に把握されている。また、トンネル変形挙動を正確に把握するためには、測点が切羽にできるだけ近いうちに初期値を計測する必要があるが、そのためには計測用

のプリズムの養生、または計測毎の設置・取り外しが必要となり、計測に多くの時間を要してしまうという課題があった。一方、近年では TS の代わりに 3D レーザースキャナ（以下、スキャナ）を用いてトンネル坑壁の変位を面的に測定する手法が提案されており、いくつかのトンネルにおいて適用事例があるものの、計測毎にスキャナを三脚で設置する際の手間（設置から測定終了まで 30～60 分程度）や、ノンプリズム計測による精度の確保、点群データの解析に多大な時間を要するといった課題が指摘されている。ただし、先に述べたような運用・精度上の課題を克服できれば、スキャナを用いたトンネル内空変位計測はさらに増加していくものと考えられる。

以上のような背景から、トンネル内空変位を迅速かつ連続的に計測可能な車載式トンネル 3D スキャニングシステムを開発した。（図一）



図一 システム概要図

* 技術研究所土木技術グループ

§2. システムの概要

2-1 システム構成

開発したシステムの構成を写真-1 に示す。本システムは計測車のルーフキャリア上に設置した防振用空気ばね、自動水平保持架台上にスカナを搭載し、周囲にプリズム内蔵基準球（以下、基準球）を配置した上部装置と、計測の指示、点群データの処理、結果の表示を行うコントロール PC により構成される。上部装置とコントロール PC の仕様および機能について以下に示す。

(1) 3D レーザースキャナ

スカナ本体の外観を写真-2 に、その仕様を表-1 に示す。スカナは測定対象物にレーザーを照射して、非接触で本体からの相対的な距離と角度情報を取得する。最大測定範囲 130 m の中距離スカナで範囲誤差は±2 mm である。電源の供給は計測車内に設置したバッテリーにて行う。バッテリーは詰所等の 100 V 電源で充電が可能である。

(2) プリズム内蔵基準球

スカナの周囲には 4 つの基準球が取付けられている。基準球は写真-3 に示すように、同一の中心点を有する球状面とプリズム面から成り、スカナと TS の両方で中心点座標が測量できるようになっている。

計測時には、スカナで坑壁の形状を取得すると同時に基準球もスキャンすることで、スカナと基準球の相対的な位置関係を把握する。その際、基準球の「絶対座標」は TS にて事前に計測されているため、スカナ位置の「絶対座標」が算出される。

なお、基準球同士は近接しており、TS にてプリズム面を計測する際に誤認識する可能性が高いため、指定された基準球のみがプリズム面を自動的に TS の方向へ向ける機構としている。

(3) 自動水平保持架台

トンネル坑内路盤の凹凸や勾配によってスカナが傾くことによって測定誤差が生じるため、計測時にスカナの水平を調整する必要があるが、計測のたびに水平を手動で調整する作業は時間を要する。そのため、写真-4 に示す自動水平保持架台を開発した。架台は 2 軸方向に取付けられた傾斜センサーでスカナの傾きを検知し、アクチュエータで自動的に水平に保つ機構を有する。これにより、計測車が移動するたびに自動で水平が保持されるので、手動で調整することなく計測を開始することができる。

ただし、スカナの傾きが 15° を超える場合は直接スカナの水平を調整する必要がある。

(4) 防振用空気ばね

スカナは、高価な精密機器であり、振動により故障するリスクが高い。そのため、写真-4 に示す防振用空気ばねを自動水平保持架台下部に配置することで、計測車から伝わる振動を低減させている。これにより、計測



写真-1 システムの構成

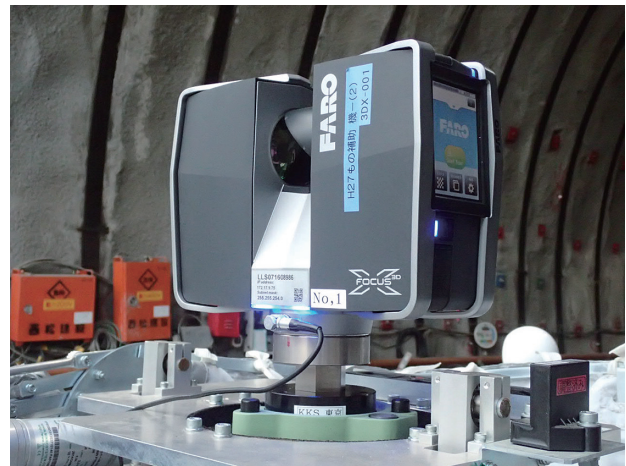


写真-2 3D スキャナ外観

表-1 3D スキャナの仕様

項目	仕様
形式	Focus3DX130
測定範囲	0.6~130m
範囲誤差	±2mm
垂直視野	300°
水平視野	360°
レーザー	レーザークラス 1
サイズ	240×200×100mm
重量	5.2kg

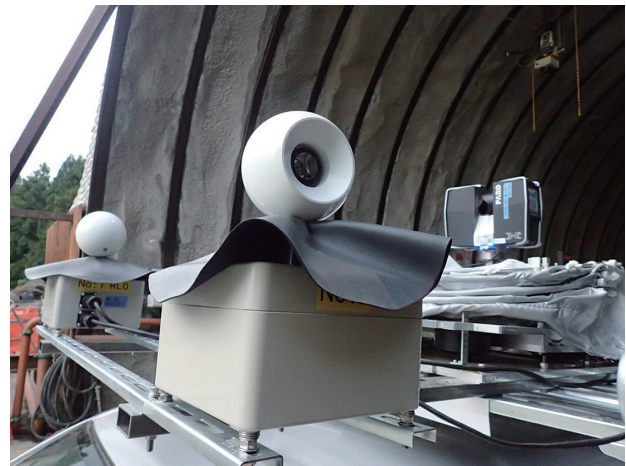


写真-3 プリズム内蔵基準球

車はスキャナを搭載したまま 10 km/h 以下で走行することが可能となっている。

(5) コントロール PC

コントロール PC はディスプレイが着脱可能なノート型であり、タッチパネルによる操作が可能である。計測の指示や点群データの処理、結果の表示など全ての処理を 1 台で行い、坑内にて直ちに計測結果を確認することができる。(写真-5)

(6) 計測車

計測車は現場で用意したライトバンに市販のルフキャリアを取付けたものを用いている(写真-5)。現状では三脚等を使用しなければスキャナの取外しが出来ない等の課題があり、今後は軽トラックの荷台を利用するなどの改善を検討している。

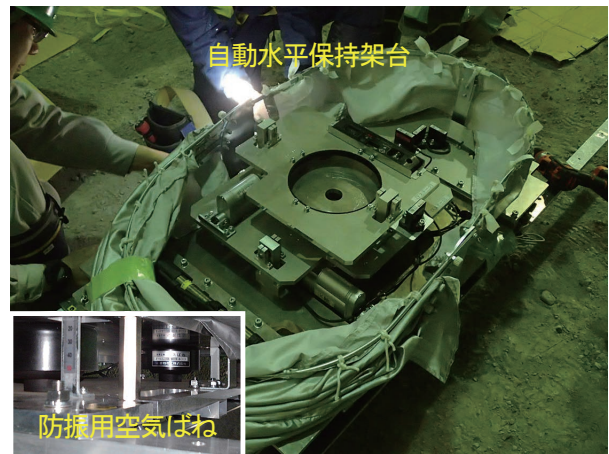


写真-4 自動水平保持架台および防振用空気ばね

2-2 計測の手順

図-2 に計測の手順を示す。計測車を計測範囲の中心に移動・停止させ、坑内常設 TS による特殊基準球の計測後、スキャナで坑壁を計測する。スキャナからコントロール PC に無線にて点群データが転送され、PC 上で直ちに解析・閲覧することが可能である。解析後は次の計測範囲へ移動して再び計測を行う。以下に手順の詳細を示す。

(1) 計測車の配置

計測車を計測範囲の中心に移動後、エンジンを切り、運転者が降車した状態で計測を行う。その際、自動水平保持架台の左右からトンネル壁面に対して照射されているレーザー光を参考に、計測車の位置合わせを行う。

(2) 計測の指示

図-3 にトンネル坑内にて実際に計測する際のコントロール PC 上での計測画面を示す。切羽に対するスキャナのおおよその位置を指定し、測定開始ボタンを押すだけで、TS による基準球の計測からスキャナによる計測、データ転送・処理までを一括して自動で行う。

(3) データ処理

スキャナ計測後の計測データの処理手順を図-4 に示す。スキャナから得られた点群データの「相対座標」を基準球の「絶対座標」を基に「トンネル座標」へ変換する。その後、断面半径等の情報を基に、障害物などのノイズデータ点を除去して、トンネル壁面の形状を算出する。内空変位はこれまでの計測結果との差分を計算することで求めることができる。これら一連のデータ処理は計測車に設置されたコントロール PC 上で直ちに解析・閲覧することが可能である。以下に各プロセスの詳細を示す。

①絶対座標系へ変換

スキャナで壁面を計測する際、最低 3 個の基準球の球面形状を含んで計測を行う。スキャナと基準球のおおよその位置関係は既知であるため、得られた「相対座標」の点群データの中から基準球の中心を識別することが可



写真-5 コントロール PC と計測車

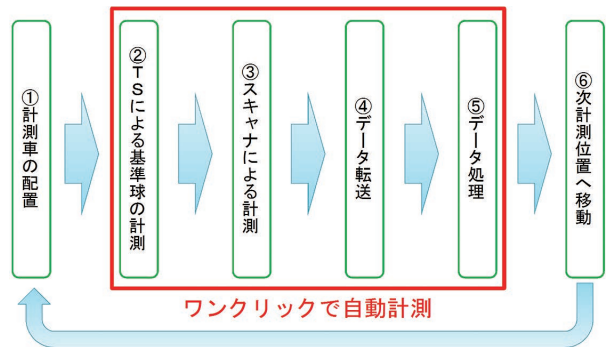


図-2 計測の手順

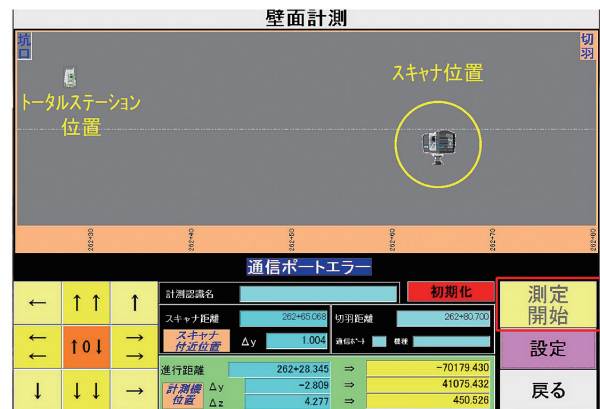


図-3 計測画面

能である。常設 TS により基準球の中心の「絶対座標」が得られているため、これを基に点群データ全体を「絶対座標」に変換する。

②トンネル座標系へ変換

「絶対座標」へ変換後、トンネル中心線の座標、トンネル線形、断面条件を基に「トンネル座標」へ変換する。「トンネル座標」とはトンネル路線接線方向を X 軸とした座標系である。トンネル座標系に変化することで、トンネル形状での処理、比較が可能となる。

③有効データ選定処理

得られた点群データには、坑内設備（給排水管、照明、風管等）や重機などの障害物が含まれる。そこで、トンネル設計断面を基に閾値を設けて、有効データの選定処理を行う。また、指定表示範囲以外のデータについてもこの段階で除外する。

④誤差補正処理

点群データは数が膨大であり、かつ計測誤差が生じている。そのため、データをトンネル進行方向に 50 mm、トンネル中心から円周方向に 1° ずつのグリッドに分割し、平均化処理を施すことでデータ数を減らすと共に、計測誤差を低減する。

⑤変位計算処理

日々の計測データと初回の計測データの差分から、内空変位を算出する。コントロール PC の計測データ選択画面（図一五）で、比較する 2 つの計測データを選択すると、測定範囲が重複している区間を対象に、自動で計算が行われる。また、任意の範囲を指定して変位計算を行うことも可能である。計測車からの距離が長くなるに従って計測誤差が大きくなるため（図一七）、距離による補正を行い影響を除去する。

⑥図面作成処理

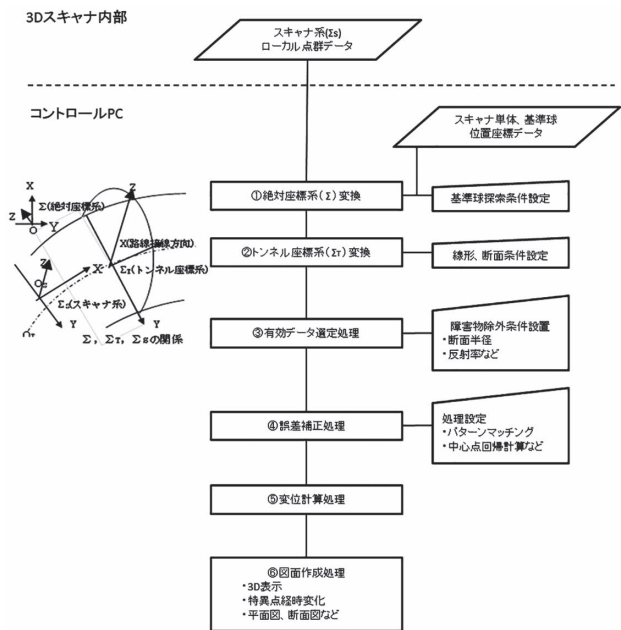
内空変位の計測結果はコントロール PC 上で、3 次元表示、展開図、断面図などの形式で表示が可能である。また、任意の点を対象とした経時・経距変化図の作成も可能である。従来は計測データを事務所に持ち帰り、解析用 PC にて解析を行わなければならなかったが、現場で結果が閲覧できることで、変位に対する対策の判断を迅速に行うことが可能である。

§ 3. 作動確認試験

開発したシステムの作動確認試験を、施工中の山岳トンネル現場にて実施した。三脚を用いた従来方式と比較して、「同程度の計測精度を確保すること」と「計測時間を半分程度に短縮すること」を開発目標としていたため、これらの値を取得し、従来方式と比較した。

3-1 計測精度

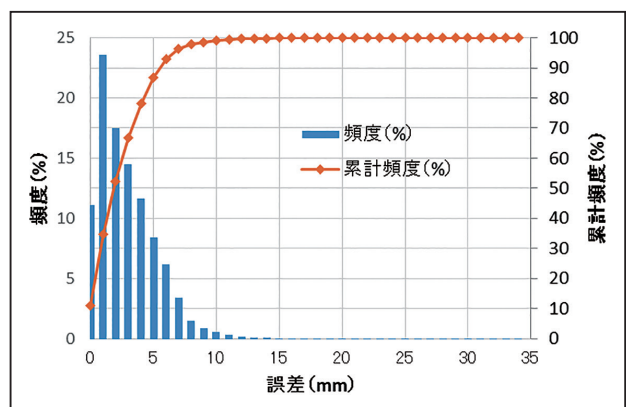
計測車を中心とした 20 m (=2D) の範囲で計測を 2 回実施した時の計測誤差（各断面の誤差の平均値）の分布



図一四 計測データ処理手順



図一五 計測データ選択画面



図一六 計測誤差の分布

表一 計測誤差の最大値 (10 m, 20 m)

計測範囲	開発技術 (モバイルスキャン)	従来方法 (三脚使用スキャン)
計測車を中心に10m	±4mm程度	±5mm程度
計測車を中心に20m	±6mm程度	±15mm程度

を図-6 に示す。また、計測誤差の最大値を従来方式の一般的な計測誤差と併せて表-2 に示す。計測したデータのうち、約 90% が誤差 5 mm 以下であり、計測誤差の最大値は、1D 範囲では 4 mm 程度、2D 範囲では 6 mm 程度であった。これらの値は、スキャナを三脚で設置する場合の誤差よりも小さく、従来方式と同程度の精度を確保できることが確認された。

また、各断面における、計測誤差の平均値と計測車からの距離の関係を図-7 に示す。断面が計測車から遠いほど計測誤差が大きくなる傾向が見られる。これは、計測対象が遠くなるほど壁面に対するレーザーの入射角が大きくなり、表面の凹凸の影響を受けやすくなるためであると考えられる。

これらの結果より、現場運用時の許容最大誤差を 5 mm とした場合、計測車を中心に 15 m 程度が有効な計測範囲であると考えられる。

3-2 計測時間

本システムの計測時間を従来方式の一般的な計測時間と比較した結果を表-3 に示す。本システムでは、スキャナや基準球が車載されており、三脚による設置の手間が無く、基準球の測量もコントロール PC による操作のみで実施が可能であるため、準備や片付けに要する時間が短い。また、スキャナと基準球の距離が短く、位置関係がおおむね既知であるため、計測点密度が低い条件下においても基準球が検知されやすいなどの利点がある。

上記の理由により、本システムでは一回あたりの計測時間が 6 分程度まで短縮されたが、これは従来の三脚方式の 1/6 以下の時間となっている。

§ 4. 実現場での適用事例

4-1 内空変位計測

図-8 に内空変位の計測結果を示す。広範囲にわたって赤色で表示された部分で最大 -20 mm 程度の変位が計測されている。従来の A 計測では計測断面の内空変位から断面間の内空変位を推定しているが、本システムでトンネル全体の変位を面的に把握することで、3 次元的にトンネル変形挙動を評価することが可能となる。

これにより、例えば変位抑制対策として増しロックボルトを施工する際の範囲や本数、補強プレートの設置位置の検討、変状発生時の縫い返し位置の特定などの判断ができると考えられる。

また、維持管理の段階においても、掘削時の地山挙動を面的に把握し、記録しておくことで、覆工コンクリートのひび割れや剥離などが生じた際の原因究明の資料としての活用も期待される。

4-2 切羽面変位計測

図-9 に切羽面変位の計測結果を示す。切羽面の押出

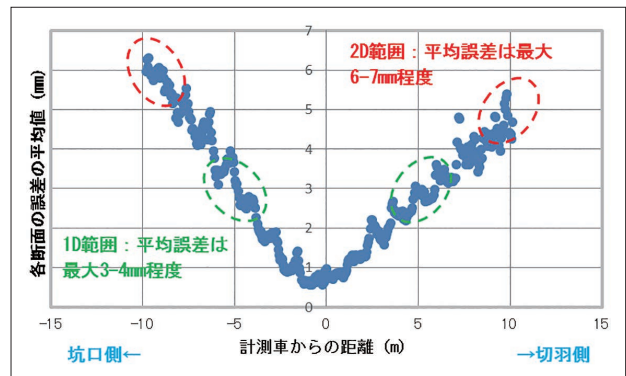


図-7 計測誤差の平均値と計測車からの距離の関係

表-3 計測時間の比較

坑内作業内容	【開発技術】 モバイルスキャン (sec)	【従来方法】 三脚使用スキャン (sec)
(1) 計測準備作業 (スキャナ、基準球の設置)	20	1,200
(2) スキャナ位置測定 (TSIによる基準球測量)	50	360
(3) 3Dスキャン	130	130
(4) データ転送	50	50
(5) データ処理	90	90
(6) 片付け	20	480
計	360 (約6min)	2,310 (約39min)

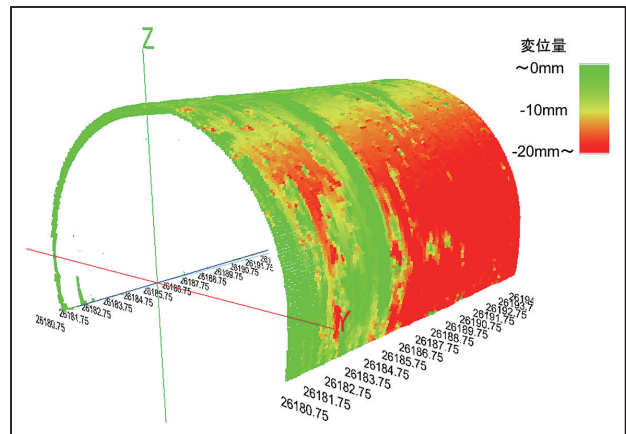


図-8 内空変位の計測結果 (例)

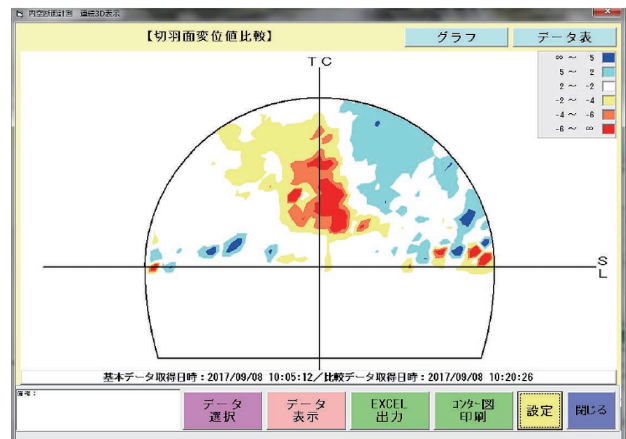


図-9 切羽面変位の計測結果 (例)

し変位は切羽の崩落に直結することから、切羽面の変位計測はこれまでもレーザー距離計を使用した多点変位計測が行われてきたが、切羽面の特定の点のみを計測しているため、切羽全体の変位を確実に捉えることが出来なかった。一方、スキャナによる計測では切羽面を面的に捉え、切羽全体の変位を把握することで、切羽監視責任者の切羽監視を補助することが可能となる。

切羽面は施工サイクル毎に更新されるため、常時計測することは現実的ではないが、現場が休止する週末や長期休暇時に計測を実施し、管理値以上の変位が計測された際にメールにて警報を送信するなどの運用が考えられる。

§ 5. まとめ

今回、3D レーザースキャナによりトンネル内空変位を迅速かつ面的に計測可能な車載式トンネル 3D スキャニングシステムを開発した。トンネルの変形挙動を面的に把握し、A 計測を補完することができたが、トータルステーションによる計測と比較して計測精度が低いという課題が残っている。今後もスキャナ自体の性能向上、基準球の配置距離の検証、データの処理・補正方法の検討などにより計測精度の向上を目指していく。また、トンネル CIM との連携についても検討を進めている。