

LiDAR による 3D 計測およびプロジェクションマッピングの開発

～山岳トンネルにおけるインバート掘削・コンクリート打設への適用～

株式会社大本組
株式会社大本組
株式会社大本組
株式会社計測リサーチコンサルタント

○板谷 幸貴
橘 伸一
小野 高伸
家村 享明

1. はじめに

山岳トンネル工事は、機械の大型化や ICT 機器等情報化技術を用いた開発が進められているが、地山の変状監視や計測管理等において、未だに人の手が多くかかる。また山岳トンネル工事では、設計巻厚を確保するため、設計断面積より大きく余掘りすることが多い。余掘り量の低減は、土砂搬出数量やコンクリート打設数量の抑制に直結するため、現場管理では重要な項目である。インバート掘削における出来形管理においても、従来は施工用定規と水系を用いた目視による確認であったため、その省力化や効率化が望まれる。

本稿では、開発したプロジェクションマッピング技術をインバート掘削およびインバートのコンクリート打設に適用して、省力化するとともに、総合的な生産性の向上を図った。施工実績と課題を報告する。

2. 概要

インバート掘削の施工状況を写真-1 に示す。インバート掘削は岩掘削、床掘り面整形、ずり出し等一連の作業を重機により施工する。出来形確認時は、重機作業を一旦中断し作業員が掘削エリアに入り計測するが、仕上げ面では頻繁に計測を行う必要があり、作業員への負担が大きく、重機との接触により重篤な災害へ繋がるリスクや掘削作業中断等により時間ロスが発生している。

これらの背景から、作業員による計測作業を必要としない「LiDAR による 3D 計測システムおよびプロジェクションマッピング（インバート掘削・コンクリート打設）」を開発した。本システムは、掘削面および打設面にプロジェクションマッピングし、施工面の凹凸状況をカラーコンター図として可視化する。インバート掘削においては作業員による掘削エリア内の計測作業を省略し、施工効率が向上する。コンクリート打設においては、面的に天端仕上げ高を確認でき、出来形精度が向上するとともに、作業効率が向上する。



写真-1 インバート掘削状況

3. 機器構成およびシステム概要

システム構成を図-1 に示す。また、設置イメージを図-2 に示す。3D 計測機器は金属フレームで一体化した LiDAR とプロジェクタおよび処理 PC で構成される。

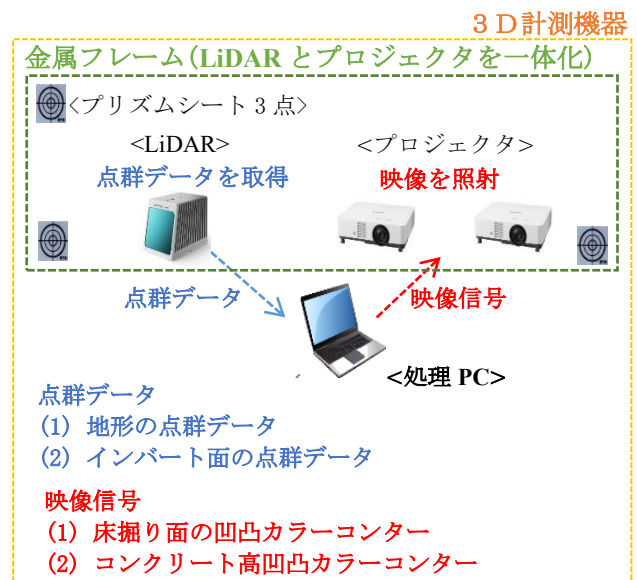


図-1 システム構成

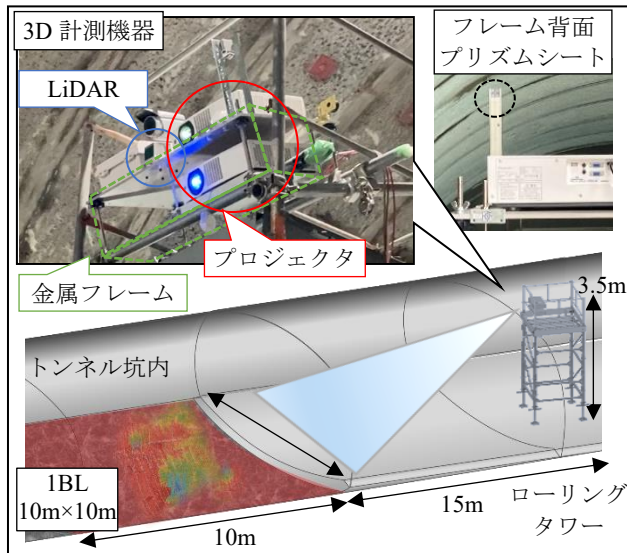


図-2 設置イメージ

本システムは、LiDARで計測した現況の掘削面やコンクリート天端と設計面との差分をプロジェクタを介し、施工面にカラーコンター画像を投影するものである。投影方法を以下に示す。

- (1) LiDARとプロジェクタを一体化した金属フレームにプリズムシートを3点設置し、プリズムシートをトータルステーション(以下TS)測量し3D計測機器の自己位置および姿勢を計測する。
- (2) 計測結果と投影設計断面位置を処理PCへ入力し、LiDARより施工面の3D点群データを取得する。
- (3) 取得した点群データと設計断面との差分をグラデーション化したカラーコンター画像を処理PCで生成し、施工面へ投影する。

4. システム仕様、機器仕様

インバート掘削およびインバートコンクリート打設におけるシステム仕様と機器仕様を以下に示す。

4.1 システム仕様

- (1) インバート掘削面とコンクリート打設面をカラーコンター画像により可視化

計測作業の課題解決を目的とし、インバート掘削面およびコンクリート打設面を可視化する。

- (2) 3D形状をリアルタイムに反映

掘削時においては重機オペレータが、コンクリート打設時は作業員がリアルタイムに状況を確認する。3D形状の表示は赤から青のグラデーションで行い、緑を設計面とし青は設計面より外側(過掘りまたはコンクリート不足)、赤は設計面より内側(アタリまたはコンクリート過多)とした。

- (3) 進行方向の曲率を反映

設計中心座標から縦断方向に対し、1mごとに

設計面を作成し曲線部に対応した。

4.2 機器仕様

プロジェクションマッピングの構成機器仕様を表-1に示す。構成機器は、インバート面全域を投影するため、図-2に示すローリングタワーに搭載した。ローリングタワーは、施工面端から15m後方、既設コンクリート打設面から高さ3.5mに設置した。プロジェクタは下向き30度の角度で設置し投影した。

表-1 機器構成仕様

	機種名	主な性能
プロジェクタ	Panasonic Ptvmz71 	照度: 7,000(ANSIルーメン) 解像度: 1,920*1,200(pixel)
LiDAR	Livox Mid70 	視野角:70(deg) 計測距離:90(m) 繰返し精度:20(mm)

(1) プロジェクタ選定根拠

プロジェクタは画角と照度より選定した。インバート部は投影面積が1ブロック約10m×10mであり、これを要求画角とした。プロジェクタはローリングタワーに対し、斜めに設置したが、10m×10mの範囲を投影するには、それを包含する大きな範囲を投影するため、広域に投影可能な機種を選定した。

また、坑口付近の照度不足対策として、キャビンにて重機オペレータが確認できるようタブレットによる3Dビューワ機能を実装した。プロジェクションマッピング情報が視認し難い場合は、タブレットにて現況をモニタリングした。

照度確保について、本実証では2台のプロジェクタを同時に使用することで明るさを確保した。なお、2台のプロジェクタを使用するが、必要な照度が得られるプロジェクタであれば1台でも構わない。

(2) LiDAR選定根拠

LiDARはLivox Mid70を選定した。選定理由を以下に示す。

- ① 選定機種は前方水平・垂直方向に対し、視野角70度であり採用したプロジェクタ画角より大きい。
- ② スキャナが静止した状態においても、スキャンラインが少しずつ移動するため、密な点群が取得できる。

5. 点群処理フロー

点群処理フローを図-3に示す。点群データはLiDARにより毎秒10万点取得する。ソフト側では

40 万点をバッファしつづけ、密な点群データを作成する。次に点群データから設計との距離を求め、それに応じた着色を行い、**bitmap** 画像を生成し、プロジェクトに表示する。この処理フローは 1 秒間隔で実行することにより、リアルタイムな形状表示が可能である。

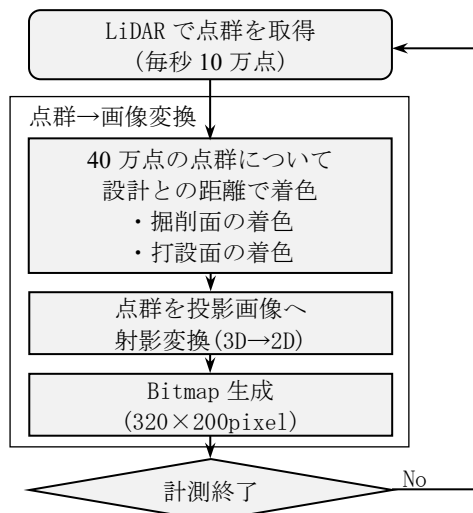
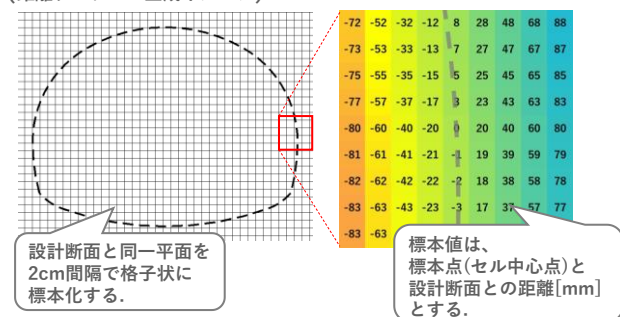


図-3 点群処理フロー

設計断面との距離算出は、設計断面ごとに距離テーブルを用いて行う。距離テーブルを用いた距離算出イメージを図-4 に示す。距離テーブルとは、設計断面と同じ平面を 2cm 間隔で格子状に標本化し、標本点から設計断面曲線までの距離を標本値としたものである。LiDAR 点群の各点は、設計断面と同一の平面に座標変換後、対応する距離テーブルの標本値を参照するだけで設計との距離が得られる。

(距離テーブルの生成イメージ)



(距離テーブルを用いた距離算出)

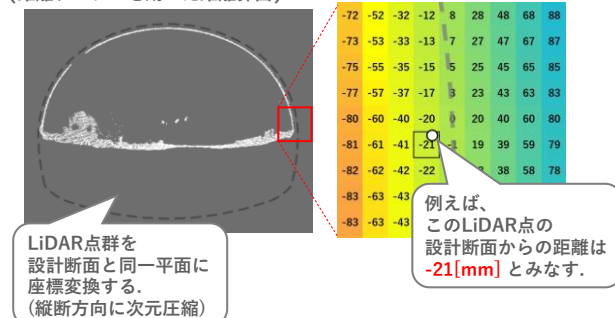


図-4 距離算出イメージ

この処理方法によって、3D 点群を 3D モデルと直接比較して距離算出するような膨大な計算処理を省略している。

6. LiDAR を用いたプロジェクト投影処理フロー

プロジェクト投影処理フローを図-5 に示す。

- ① LiDAR より取得した局所座標系の点群を 3D 計測機器の測量結果を用いて、現場座標系に座標変換する。
- ② トンネル縦断方向に 1m 間隔の区間を定義し、区間ごとに点群を分割する。
- ③ 1 つの区間の点群について、トンネル縦断方向に次元圧縮した 2D 点群に変換し、設計断面との距離に応じて各点を青～赤に着色する。
- ④ 全ての区間について③の処理を行い、全ての点を着色する。
- ⑤ 点群をプロジェクト画像座標系に座標変換し、投影画像の画素に点群の色を反映する。

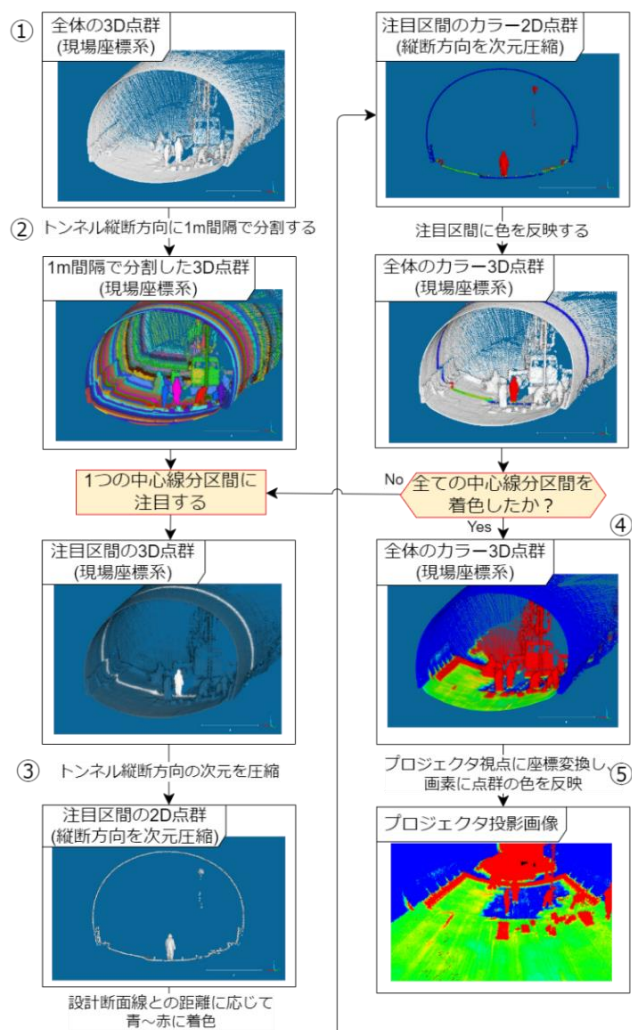


図-5 プロジェクト投影処理フロー

距離テーブルを用いた距離算出方法は、線形が直線の場合のみ成立する方法であるが、ここでは縦断方向 1m ごとに処理を細分化して繰り返すことで、曲線に対応した。この曲線を 1m ポリラインで近似した時の誤差は 0.25mm である。

2 台のプロジェクタによる座標変換イメージを図-6 に示す。処理の結果として生成される投影画像は、図-6 に示すように、2 台のプロジェクタごとに若干異なる。

図中の外部評価は LiDAR およびプロジェクタの位置・姿勢のパラメータを意味する。LiDAR およびプロジェクタは金属フレームにより一体化し、相対位置が変化しないよう強固に固定した。個々の位置姿勢についてはトンネル施工済み箇所を正として、その取得点群が設計データと一致するように位置姿勢パラメータを調整した。

図中の内部標定はプロジェクタのレンズ焦点距離、画素数等の固有パラメータを意味する。

各構成機器の外部標定・内部標定を得ることで、3 次元現場座標系と局所座標系、また 2 次元画像座標系の間で相互に座標変換が可能になる。

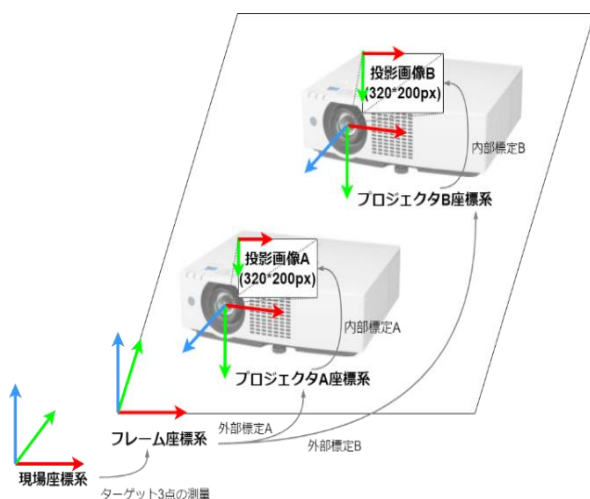


図-6 座標変換イメージ

プロジェクタごとに決定した外部標定と内部標定を用いて座標変換を行い、そのプロジェクタ視点のカラーコンター画像を生成し、別々の画像を投影することで、位置姿勢が異なる2台のプロジェクタで1つのカラーコンター画像を投影できる。これはプロジェクタが3台以上になっても同様である。

7. 実証

本システムを使用しインバート掘削およびインバートコンクリート打設を実施した。掘削用断面とコンクリート打設用断面は異なるため、両断面のデータベースを事前に登録し状況に応じ切り替え使用した。施工フローを図-7 に示す。

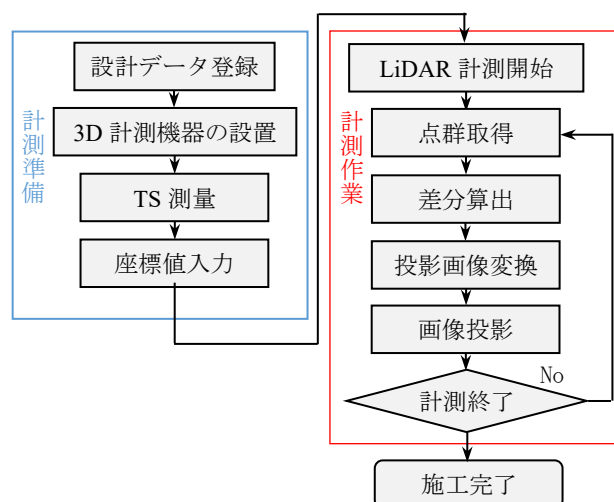


図-7 施工フロー

7.1 カラーコンター画像投影

カラーコンター画像を施工面に投影するまでのフローを以下に示す。

(1) 計測準備

LiDAR とプロジェクタの大まかな位置姿勢およびトンネル設計データを入力する。

(2) 3D 計測機器の設置

3D 計測機器の機器設置状況を写真-2 に示す。前述したとおり、今回選定したプロジェクタの仕様から照射箇所より約 15m 後方に下向き 30 度の角度で設置した。処理 PC やプロジェクタ用 AC100V はポータブル発電機より給電した。



写真-2 3D 機器設置状況

(3) 3D 計測機器の自己位置および姿勢を測量

金属フレームに設置したプリズムシート3点の座標を測量し、各座標値と投影設計断面位置を処理 PC へ入力し、プロジェクタの現場座標系の位置および姿勢を算出する。なお、TS により取得したプリズムシート3点の座標は、ローカル通信により、処理 PC に自動入力される。

(4) LiDAR より 3D 点群データを取得

取得した 3D 点群データは現場座標系に変換し、設計データとの差分を着色したカラーコンター画像を処理 PC で作成する。

(5) インバート掘削面への投影

インバート掘削時のプロジェクションマッピング投影状況を写真-3、インバート掘削全景を写真-4に示す。緑を設計面とし、青は設計面より外側(過掘り)、赤は設計面より内側(アタリ)で表示する。インバート掘削時、重機オペレータはグラデーションから設計面を確認することで、作業員による計測作業が省略でき重機作業エリアへの立入が不要である。なお、カラーコンター画像の精度は、高さ方向に対し±10 cm幅でグラデーション設定した。



写真-3 プロジェクションマッピング投影状況

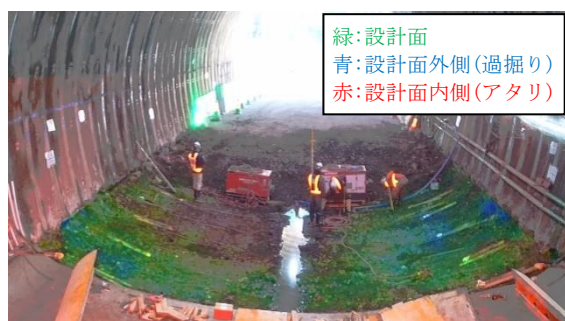


写真-4 インバート掘削全景

(6) コンクリート打設面への投影

インバートコンクリート打設時のプロジェクションマッピング投影状況を写真-5、コンクリート打設全景を写真-6に示す。コンクリート打設時、作業員はグラデーションから曲率半径のコンクリート天端を面的に均すことで、コンクリート天端高目印が不要になり、目印の設置および測量にかかる時間を省略した。なお、コンクリート面より高い位置にある型枠などは赤色で投影されていることが確認できる。

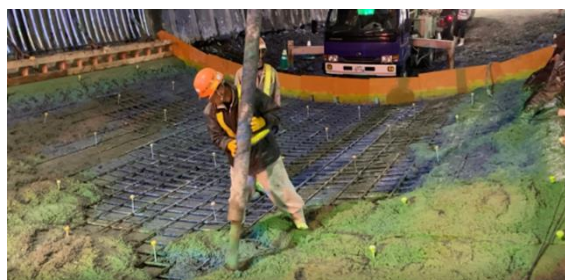


写真-5 カラーコンター画像投影状況

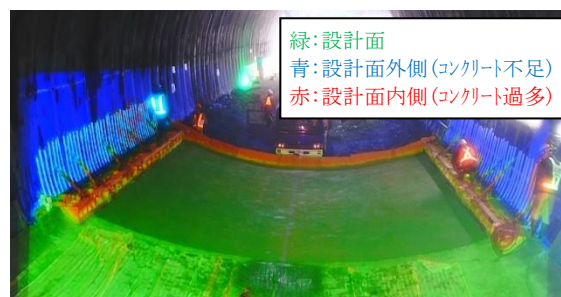


写真-6 コンクリート打設全景

7.2 ビューワ機能

本システムでは3Dビューワ機能を搭載した。処理PCモニター画面を写真-7、タブレット出力状況を写真-8に示す。3Dビューワ機能は、プロジェクションマッピングと同時に管理者用のタブレットにも同様の画像を出力する。投影映像を視認しがたい場合は、職員または作業員によりタブレットにてインバート掘削およびインバートコンクリート打設指示が可能である。

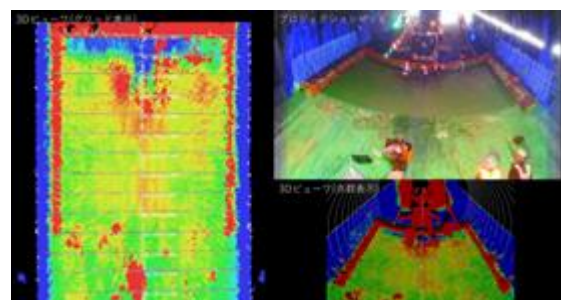


写真-7 モニター画面

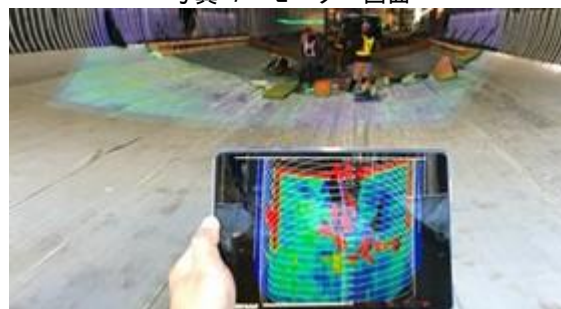


写真-8 タブレット出力状況

7.3 計測に係るサイクルタイム

計測に係るサイクルタイムを表-2に示す。3D計測機器の設置およびターゲット測量は事前に実施できるため実際に計測にかかる時間は、計測から投影まで10秒程度である。

表-2 サイクルタイム

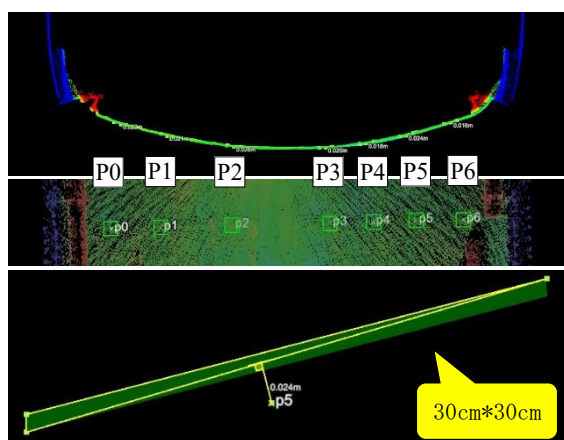
1	3D 計測機器の設置	事前に準備
2	ターゲット3点のTS測量	事前に準備
3	LiDAR計測～ 投影カラー画像生成・出力	10秒
	合計	10秒

7.4 LiDAR 精度確認

本システムに搭載している LiDAR (Livox : Mid70) の点群データとトータルステーション (Leica : TS15R1000) で任意測線上に 7 点測量した座標を用いて、精度の比較検証を行った。

TS で測量した点と、LiDAR の点群データから推定した平面について、点と平面の座標空間上の距離を比較した結果を図-8 に示す。点群データから推定する平面は、TS で測量した点付近の点群データから 30cm 角の平均的な平面である。

図-8 に示すとおり比較結果は、最大 26mm、最小 16mm、平均は約 21.4mm であり、いずれも TS よりも標高は高い結果であった。これは構成機器の設置位置および姿勢パラメータの誤差に起因する系統誤差である。



測点名	x[m]	y[m]	z[m]	推定した面までの距離[m]
P0	84758.1024	74324.5745	18.2891	0.022
P1	84757.1614	74325.0549	18.0236	0.024
P2	84755.8072	74325.7414	17.7774	0.026
P3	84753.9576	74326.7008	17.7601	0.020
P4	84753.1414	74327.1257	17.8586	0.018
P5	84752.3243	74327.5345	18.0354	0.024
P6	84751.4272	74328.0109	18.3278	0.016

図-8 LiDAR 精度比較

7.5 実証結果

本システムを適用したインバート掘削およびコンクリート打設の施工実績を以下に示す。

(1) リアルタイム性および視認性の確認

点群処理は 1 秒ごとに投影画像を更新するが、地形の変状にカラーコンター画像が全面反映されるまで 10 秒程度要した。

日中の坑口部はコントラストが低下するため照度不足対策として管理用タブレットを併用した。

(2) 施工効率の向上

本システムを使用することで、各作業に含まれる計測確認および段取工程を短縮し施工効率が向上した。インバート施工における従来作業と本シ

ステムを使用した場合の施工歩掛りを表-3 に示す。導入現場では、従来作業と比較し施工歩掛りが 32% 程度低減した。

表-3 施工歩掛り比較

(1 サイクルあたり)

作業内容	従 来 作 業			本システム使用		
	時間	人工	時間 人工	時間	人工	時間 人工
測 量	8.0	3.5	28	7.0	2.0	14
掘 削	8.0	6.0	48	7.0	5.0	35
打 設	8.0	6.0	48	7.0	5.0	35
小 計			124			84

(3) 余掘低減および生コンロス率低減

掘削高さおよび打設高さの管理が点管理から面管理が可能となり、余掘りと生コンロス率が低減した。導入現場では、インバートコンクリート 15 ブロックの内 8 ブロックに本システムを適用し、生コンロス率を 2% 程度低減した。

システム未使用： 7BL 平均ロス率 107.6%

システム使用： 8BL 平均ロス率 105.7%

(4) 作業効率の向上

プロジェクションマッピングで設計面との差分を表示することで、掘削面やコンクリート高を示す杭やピンなどの準備工が不要であり、作業効率が向上する。

(5) 重機と作業員の近接作業低減

従来の計測は、作業員 2 人で計測の基準となる水系を張り、施工用定規を用いて出来形計測作業を行っていたが、本システムを使用することで、手元作業員なしで掘削可能となり、重機と作業員の近接作業が低減され安全性が向上した。

8. おわりに

プロジェクションマッピング技術を山岳トンネルのインバート掘削およびインバートのコンクリート打設への適用により、出来形管理の効率化および生産性が向上することが確認できた。また、近接作業が低減され安全性も向上した。今後更なる、計測サイクルタイムの短縮や計測精度の向上を図るため、システム改善に取組み、建設業界における労働力不足の解消を含めた働き方改革の一助となるよう努めていきたい。

参考文献

- 1) 小野高伸ほか：LiDAR 計測によるトンネル切羽プロジェクトマッピング、令和 4 年度「建設施工と建設機械シンポジウム」論文集・梗概集、pp71-74、2022