

# LiDAR 計測によるトンネル切羽プロジェクトンマッピング

株式会社大本組	小野 高伸
株式会社大本組	児玉 剛
株式会社大本組	橘 伸一
株式会社大本組	○ 都川 信吾
株式会社計測リサーチコンサルタント	家村 享明

## 1. はじめに

山岳トンネルの掘削工における鋼製支保工建込作業は、その大部分は機械化されているが、掘削後のアタリ確認や支保工建込位置の確認は熟練作業員が実施している。切羽直下の作業であるため、肌落発生時に重篤な災害へ繋がるリスクが高かった。

この課題を解決するため、上記作業を作業員の目視に代え、LiDAR で計測した切羽および側面の現況と設計断面との差分をカラーコンター画像として切羽へプロジェクションマッピングする可視化システムを開発した。これにより、人員による切羽直下作業が低減され、安全性が向上するものである。

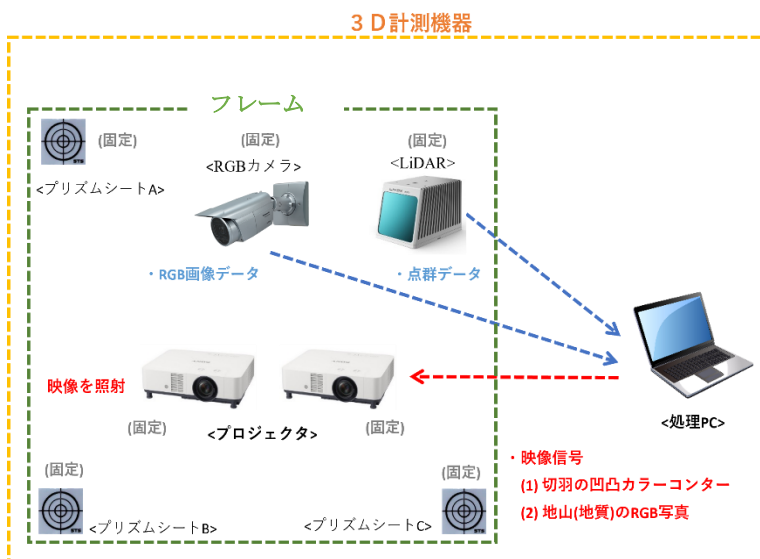
本報では「LiDAR によるトンネル切羽プロジェクトンマッピング」の概要および現場実証した結果について紹介する。

## 2. システム概要および構成

本システムは、LiDAR 計測により掘削後の凹凸状況についてプロジェクタを介し切羽にカラーコンター画像を投影するものであり、投影方法は以下の通りである。3D 計測機器のフレームに設置したプリズムシートを 3 点測量し、3D 計測機器の自己位置・姿勢を計測する。計測結果と投影設計断面位置を処理 PC へ入力し、LiDAR と RGB カメラより切羽の 3D 点群データと画像データを取得する。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および地山情報画像を処理 PC で生成し、切羽へ投影する。

図-1 に示すように 3D 計測機器はプロジェクタ、LiDAR、RGB カメラ、処理 PC で構成される。

写真-1 に 3D 計測機器の車両搭載状況を示す。なお、今回は照度確保のため 2 台のプロジェクタを使用した。必要な照度が得られれば、1 台でも構わない。



	機種名	主な性能
プロジェクタ	Panasonic ptvmz71	7000[ANSIルーメン] 1920 * 1200[pixel] 投写比 1.09 投影距離13m 投影画像が12m幅
LiDAR	Livox Mid70	視野角70[deg] 計測距離90[m] 繰返し精度20[mm]
RGBカメラ	panasonic WV-X1571LNJ	3840 * 2180[pixel] 有効画素数 840万画素 WebAPIで簡単に画像取得可

図-1 システム構成図

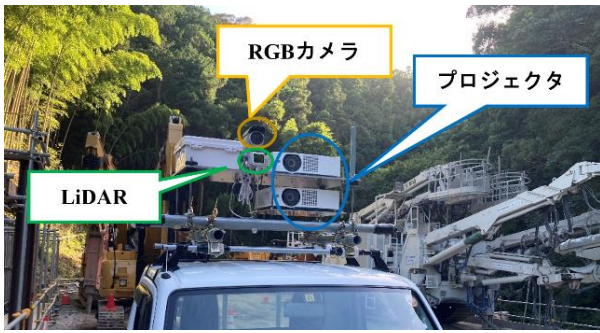


写真-1 3D計測機器車両搭載

### 3. プロジェクタ 投影処理

#### 3.1 カラーコンター画像生成フロー

投影するカラーコンター画像生成のデータ処理フローを図-2 に示す。

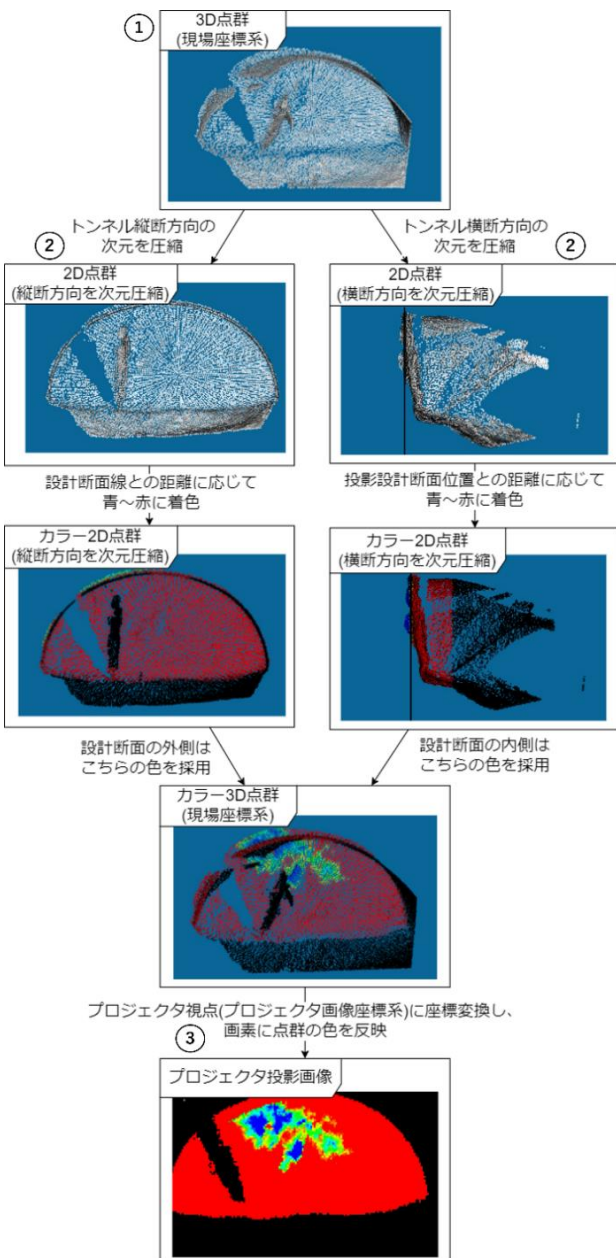


図-2 カラーコンター画像生成 処理フロー

①LiDAR 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これをトンネル縦断(横断)方向に次元圧縮した2D点群に変換し、設計断面線との距離に応じて各点を青～赤に着色する。なお、設計断面の内側にある点は、投影設計断面位置との差分に応じて青～赤に着色する。

③点群をプロジェクタ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させる。この投影画像生成処理を約1秒間隔で実行しており、LiDAR がスキャンしている現況を数秒間のタイムラグでプロジェクションマッピングできる。

#### 3.2 3D計測機器キャリブレーション

3D計測機器の各構成物について、内部標定および3D計測機器フレームに対する外部標定を得ることで、3次元の現場座標系と局所座標系、また2次元の画像座標系の間で相互に座標変換が可能となる。

外部標定：LiDARおよびRGBカメラとプロジェクタの位置・姿勢を計測

内部標定：プロジェクタおよびRGBカメラ毎にレンズ焦点距離、画素数を入力

プロジェクタ毎に異なる内部標定および外部標定に応じて投影画像を生成するため、複数台のプロジェクタで同時に投影しても、実空間上で像がずれることなく投影できる。

### 4. 実証

鋼製支保建込作業前のアタリ確認に本システムを使用して実証確認を行った。

#### 4.1 カラーコンター画像投影フロー

実証時にカラーコンター画像を切羽に投影するまでのフローを下記に示す。

##### (1) 3D計測機器の設置

3D計測機器設置状況を写真-2に示す。3D計測機器を車両に搭載し、切羽全面が投影できる位置へ設置する。(切羽より約10m後方)切羽面に対し、斜めからの照射も可能である。



写真-2 3D計測機器設置

(2) 3D 計測機器の自己位置・姿勢を測量

写真-3 に示す 3D 計測機器フレームに設置したプリズムシート 3 点の座標を求め、各座標値と投影設計断面位置を処理 PC へ入力し、プロジェクタおよび RGB カメラの現場座標系の位置・姿勢を算出する。



写真-3 プリズムシート測量

(3) 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、トンネル断面の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 にて生成する。

(4) プロジェクタから切羽へ投影

写真-4 に示すように生成したカラーコンター画像をプロジェクタから切羽へ投影する。緑を設計面とし、青は設計面より+ (過掘り)、赤は設計面より-表示 (アタリ) する。なお、カラーコンター画像の精度として進行方向に対し±10 cm幅でグラデーション設定している。

同時にオペレータ用のモニタにも同様の画像が出力される。写真-5 にオペレータ用モニタ出力状況を示す。

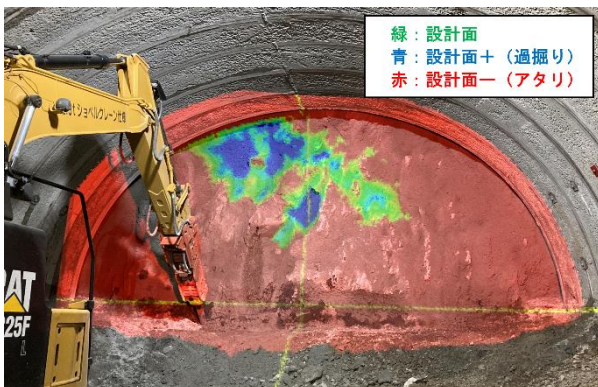


写真-4 プロジェクタ投影



写真-5 オペレータ用モニタ出力

4.2 LiDAR 精度確認

本システムに搭載している LiDAR (Livox : Mid70) と FARO3D レーザスキャナー (Focus3D X330) で切羽面の点群データを取得して精度の比較検証を行った。

SL 付近の任意点から 2 点間距離を比較した結果を表-1、図-3 に示す。差分は 15 mm であった。また、切羽より後方 2m 部分の点群データを 20 cm メッシュに変換して比較した結果を図-4 に示す。精度としては図-5 に示す通り、差分の平均値が-2mm, 標準偏差は 14mm であることが確認できた。

表-1 2 点間距離比較

1	LiVOX: : Mid70 計測値	10.172m
2	FARO : Focus3D X330 計測値	10.187m
	差分	15mm

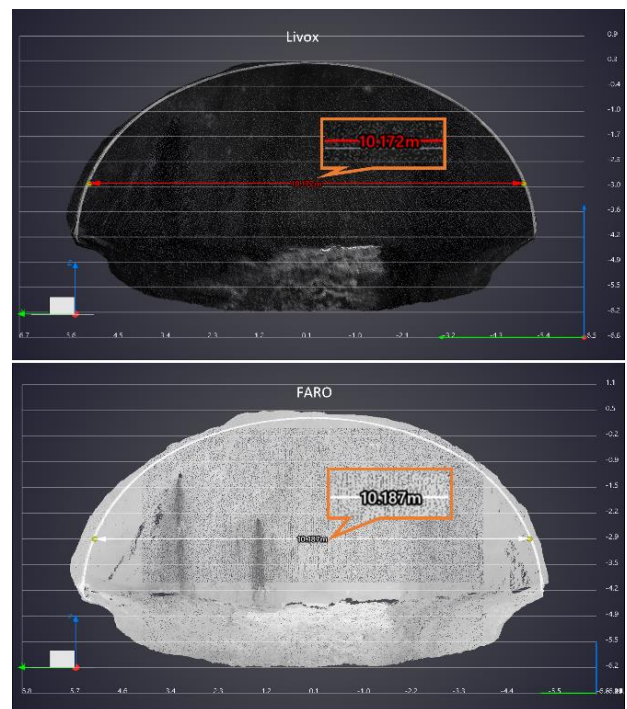


図-3 2 点間距離データ

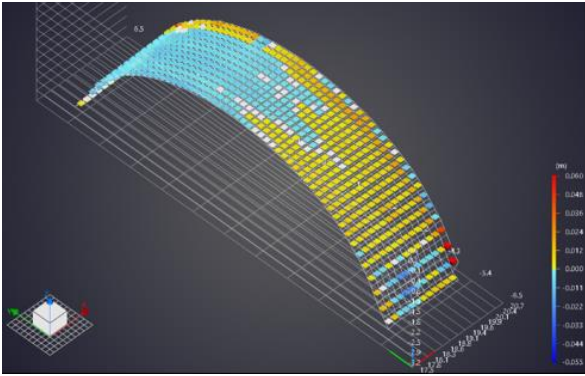


図-4 比較メッシュ



写真-6 スケッチ画像投影

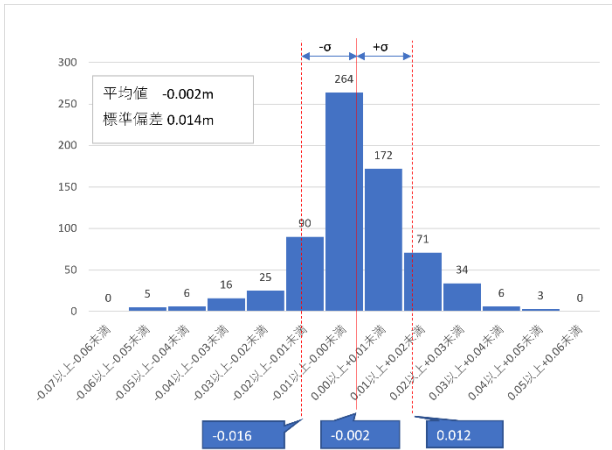


図-5 精度ヒストグラム

#### 4.3 計測に係るサイクルタイム

表-2に示すように3D計測機器設置から測量結果を処理PCへ入力までは約10分を要しているが、カラーコンター画像の出力中は常時LiDAR計測しているため、全面を約10秒で最新のカラーコンター画像に更新する。これによりプロジェクションマッピングを目視確認しながら、重機オペレータはアタリ除去作業が可能となる。

表-2 計測に係るサイクルタイム

番号	作業内容	所要時間
1	3D計測機器設置	180秒
2	トータルステーション測量	300秒
3	測量結果を処理PCへ入力	120秒
4	LiDAR計測～カラーコンター画像生成・出力	10秒
合計		10分10秒

#### 4.4 スケッチ画像投影

写真-6に地山写真をRGBカメラで撮影し、スケッチやコメントを入れて1次吹付け後の切羽面に投影した状況を示す。これにより地山の亀裂や状態等の地山情報を作業班交代時の引継ぎに利用可能となる。

#### 4.5 期待される効果

現場実証の結果、従来の切羽確認作業においては本システムの導入により安全性の向上が見込まれる。

(1) 支保工建込前のアタリ確認作業時に熟練作業員やオペレータによる切羽直下での確認作業を必要せず、人員による切羽直下作業が削減され、肌落ち災害の危険性が低減する。

(2) 支保工建込時のプロジェクションマッピングにより、浮石などの突出した部分をグラデーション表示するため、アタリ除去時に対応可能であり、浮石等の落下災害の低減に繋がる。

#### 5. 今後の課題

現場実装に向け、ハード部分の対策としてシステム機器のコンパクト化や防塵・防水対策の検討を要する。また、LiDAR計測の前準備として毎回実施するトータルステーションによる測量に時間を要するため、自動計測等の時間短縮方法についても検討が必要である。

#### 6. おわりに

従来、アタリ確認時の切羽直下作業は重篤災害に繋がるリスクがあったが、本システムの活用により、人員が切羽直下への立入りがなくなり、安全性の向上や人員の省力化が期待できる。

今後は、現場実装に向けてシステムの完成度を高めるとともに、今回のシステムを応用して山岳トンネルのインバート施工等への展開を考えている。