

高速応答および広範囲投影が可能な リフト式インバートプロジェクションマッピングシステムの開発

前田建設工業（株） 正会員 ○小笠原 裕介 正会員 水谷 和彦 正会員 下山 悠

1. はじめに

山岳トンネルにおけるインバート掘削高さの確認は、トンネル側壁左右に基準となる水糸等を張り、そこからの下がり寸法を確認する方法が一般的である（写真-1）。この方法では、水糸を細かく移動する必要があり、全面での仕上がり精度の確保に苦労している。また、掘削高さの確認は2名以上の作業員で行っており、足場が不安定な場所に加えて重機の近くに入り込むため、安全確保にも配慮する必要がある。



写真-1 従来の掘削高さ確認方法

そこで筆者らは、3D レーザースキャナで計測した実測値と設計値の差分を、プロジェクターによりインバート掘削面に色分け表示可能なシステムを開発している。本システムにより、面的な管理とインバート内に立ち入らない高さ管理が可能となり、仕上がり精度等の品質確保や安全性向上を実現した。

しかし、投影範囲が狭く、掘削範囲の一部しか投影できないことや、計測実行から投影までに時間を要することから、生産性向上が実現できていなかった。

今回は、自動運転等に使用する LiDAR の採用と、高所からの投影により、以下2点の効果を期待した。

- ①LiDAR 採用による計測から投影までの高速応答
- ②リフト式の投影方法による広範囲への投影

これらの効果を確認するため、当社研究施設 ICI 総合センターで実施した室内試験結果を報告する。

2. システムおよび試験概要

本試験では2車線トンネルを想定し、インバートのサイズは幅 9.7m、深さ 1.4m とした。室内では掘削ができないため、フロアレベルを掘削底面とし、中心から側方に向けて高さが 1.4m 高くなるような模擬インバートを製作した。

構成する主な試験機器は、①高所作業車、②LiDAR、③プロジェクター（以降 PJ）、④計測用パソコン（以降 PC1）、⑤画像処理、投影用パソコン（以降 PC2）、⑥ターゲット（LiDAR 座標設定用）、⑦トータルステーション（以降 TS）とし（表-1）、高所作業車のバスケット部分に PJ および LiDAR を取り付け、フロアレベルから約 4.6m の位置に PJ のレンズが配置されるような取合いで試験を行った（図-1）。

表-1 主な試験機器の仕様

試験機器	メーカー・品番	仕様
①高所作業車	AICHI 製	テーブルリフト式、8m
②LiDAR	Livox 製 Avia	TOF 方式 最大 72 万点/秒
③PJ	EPSON 製 EB-L1755U	15000lm 画質 1920×1200
④PC1	Panasonic 製 TOUGH BOOK	Corei5, 8G メモリ
⑤PC2	Panasonic 製 TOUGH BOOK	Corei5, 8G メモリ
⑥ターゲット	加工製作品	400×400mm
⑦TS	SOKKIA 製 NET1 AXII	測角精度：1 秒 測距精度：(1+1ppm x D)mm

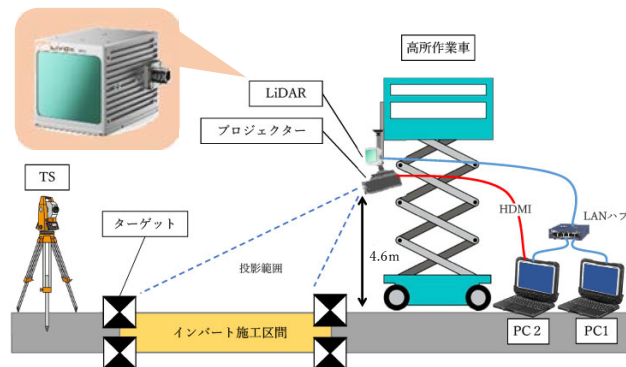


図-1 主な試験機器の配置関係

キーワード 山岳トンネル、インバート、LiDAR、プロジェクションマッピング

連絡先 〒102-8151 東京都千代田区富士見 2-10-2 前田建設工業（株） TEL：03-5276-5551

LiDAR はローカル座標系のため、トンネル坑内を想定した絶対座標を室内に設け、ターゲットを TS で計測することにより、LiDAR の座標を決定した。本手順により、LiDAR は絶対座標系の計測が可能となる。

インバート面に合わせて投影するためには台形補正が必要となるが、本技術では OpenCV をもとにした独自の台形補正プログラムを作成し、タブレット PC からの操作で補正点（マーカー）をターゲットの中心点に合わせることで台形補正が可能なシステムとした（写真-2）。

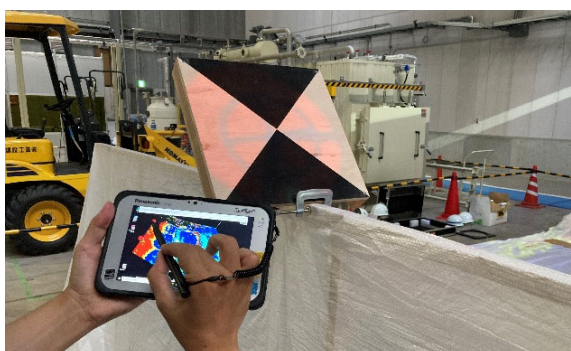


写真-2 タブレット PC を使った台形補正

これらの準備が完了し、計測プログラムを実行すると、LiDAR による計測が開始され、実測値と設計値の差分が PJ によってインバート面に色分け表示される。本試験での色分け表示は次のとおりとした。

■ピンク： $-90\text{mm} < \text{差分} \leq -60\text{mm}$ 、□白色： $-60\text{mm} < \text{差分} \leq -30\text{mm}$ 、■水色： $-30\text{mm} < \text{差分} \leq 0\text{mm}$ 、■青色： $0\text{mm} < \text{差分} \leq 30\text{mm}$ 、■黄色： $30\text{mm} < \text{差分} \leq 60\text{mm}$ 、■赤色： $60\text{mm} < \text{差分} \leq 90\text{mm}$ 、■黒色： $\text{差分} < -60\text{mm}, 90\text{mm} < \text{差分}$

3. 検証結果

(1) 仕上がり精度の検証

インバート内に高さ 35mm（幅と奥行き：約 50mm）の物体を置いて、色分け表示の変化を確認した結果、青色から黄色への変化が確認できた。

(2) 投影応答速度の検証

LiDAR の採用により、スキャン速度およびスキャン後のデータ処理速度が向上したため、計測を実行してから投影面に色変化が反映される応答速度は 9～14 秒となり、3D スキャナ（Leica 製 P40）（写真-3）を使用した当社の従来方式（45～63 秒）と比較して約 5 倍の応答速度となった。従来機との性能比較を表-2 に示す。

(3) 投影範囲の検証

高さ約 4.6m から投影することにより横幅 9.7m、奥行 10m の範囲で投影が可能であった（写真-4）。

(4) 省力化の検証

計測実行により自動で高さ変化が出力されるため、掘削機オペレーターのみで高さ管理ができる。

(5) 安全性の検証

インバート外側から投影して掘削高さの確認ができるため、掘削中のインバート内への作業員の立ち入りを無くすることができる。



写真-3 Leica 製 P40

表-2 Leica P40 と Livox Avia (LiDAR) の比較

性能	Leica P40	Livox Avia
レーザータイプ	高速 TOF 方式	TOF 方式
スキャン密度	最小 0.8mm@10m/16.5 秒	非反復 参考：1.5cm@10m/3 秒
スキャンスピード	最大 100 万点/秒	最大 72 万点/秒
外観寸法 (D×W×H)	238×358×395mm	91×61.2×64.8mm
インバートスキャン範囲 (機器の最大値)	水平 160°、鉛直 60° (水平 360°、鉛直 290°)	水平 70.4°、鉛直 77.2° (上記と同じ)
応答時間 (計測～投影)	45～63 秒	9～14 秒

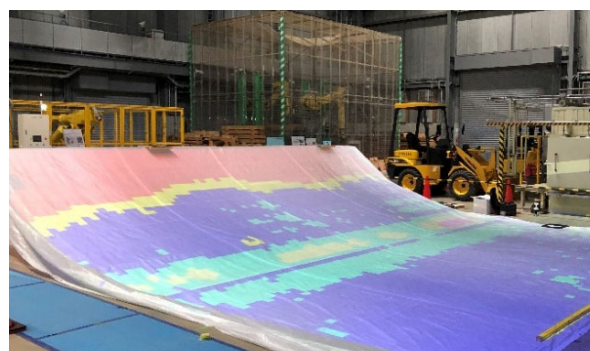


写真-4 模擬インバートへの投影状況

4. おわりに

今後は、計測プログラム実行前の工数削減、システムの簡略化や作業の効率化を目指すとともに、現場適用を重ねて実用性の検証を行っていく。

謝辞：本技術の開発および本試験の実施においては、(株)ソーキ、(株)コンテンツ・クリエイトの協力を得て行ったものであり、ここに記して謝意を表します。