

LiDARを使用したインバートプロジェクトンマッピング技術の検証

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 五味 春香 正会員 鈴木 麟太郎

1. はじめに

わが国では近年、人口減少および少子高齢化が深刻化しており、日本産業における労働生産人口の低下が懸念されている。特に建設業界においても、技能労働者不足は深刻な問題であり、60歳以上の技能労働者が全体の約4分の1を占めている。そして、10年後には、その大半が引退することが見込まれている。

こういった社会的背景もあり、建設業界ではICTを活用した労働生産性を向上させるための施策に取り組んでいる。具体的な施策の1つとして、国土交通省が平成28年に提唱したi-Constructionがある。その一例として、構造物や地形の状況を様々な計測機器や解析・処理技術により正確かつ効率的に把握するための取り組みも多く実施されている。この計測機器の1つとして、3Dレーザースキャナーは広く使用されており、現場の3次元点群データ取得のためには欠かせない機器となっている。

しかし、従来の3Dレーザースキャナーは精密で高額なため、施工機械への搭載や過酷な施工条件下での常設設置が必要な現場導入は、費用対効果の面で実用化が進まない課題があった。

そこで筆者らは、近年開発が進み、従来の3Dレーザースキャナーと比べて安価に入手することが可能となってきたLiDARを使用して、トンネル施工における様々な活用方法を見出すために、開発や現場検証に取り組んでいる。

本報では、LiDARを使用したトンネル施工におけるインバート掘削高さの新しい管理技術¹⁾の改善検証結果について報告する。

2. インバート掘削高さ管理技術の開発

(1) 従来の確認方法

山岳トンネルにおけるインバート掘削高さの確認は、トンネル側壁左右から基準となる水系等を張り、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)。

しかしながら、この方法では、水系を細かく移動する必要があるため、全面での仕上がり精度の確保に苦勞している。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立ち入るため、安全確保にも配慮する必要がある。

そこで筆者らは、3Dレーザースキャナーで計測した実測値と設計値の差分を、プロジェクター(以降PJと記載)によりインバート掘削面に色分け表示可能なプロジェクションマッピング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、仕上がり精度の品質確保や安全性向上を実現した。



写真-1 従来の掘削高さ確認方法

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,点群データ
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: 03-3265-5551

(2) 開発技術の現状

過去の検証では、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、生産性向上の改善を図るため、使用計測機器を3Dレーザースキャナーから自動運転等に使用するLiDARに変更することと、高所からの投影により、次の2点の改善効果を確認した。

- 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

室内検証試験で効果が確認された後、現場検証（写真-2）によって実用性の確認を行った。

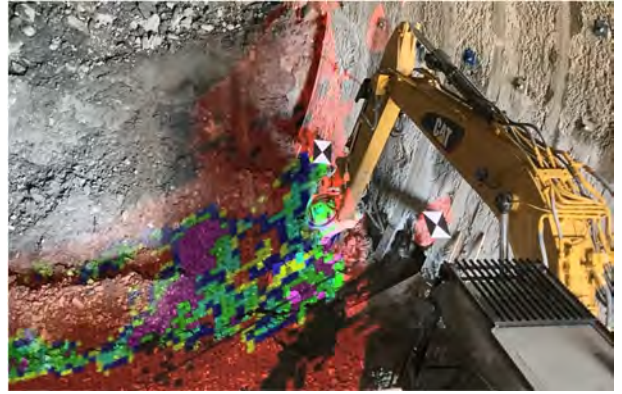


写真-2 現場検証による確認

(3) 現状の課題

室内および現場試験において、これらの効果を検証できたが、投影・計測範囲の調整に時間がかかる新たな課題が挙げられた。また、インバート周辺に配置する座標管理を目的としたターゲットのサイズが大きく、掘削機械の影になり、計測できないことや、掘削の際に邪魔になることも課題に挙げられた。

現状の範囲調整方法は、PJ および LiDAR を地上に下ろしている状態で、リフトアップ高さを想定した取り付け角度を固定し、リフトアップした後はPJの付属リモコンによってレンズ角度を前後左右に微調整する程度の範囲調整しかできず LiDAR については微調整すらできなかった。投影範囲が大きく外れた場合は、昇降装置をリフトダウンさせてから地上で再度 PJ や LiDAR の角度調整が必要であった。

これらの課題解決方法を検証するため、当社研究施設 ICI 総合センター内の模擬トンネルで実施した室内検証結果を報告する。

3. 試験概要

(1) 模擬トンネル概要

場 所：前田建設工業(株)

ICI 総合センターICI キャンプ内（写真-3）

延 長：L=29,570m（図-1）

断面積：固定部 A=50.7m²、移動部 A'=55.2m²

備 考：トンネル先端部（約6m）はスライド可動式設置目的を次に示す。

①トンネル施工に関わる技術の開発

山岳トンネルの切羽や坑内で試験を行う際に生じる時間や場所の制約を取り払い、技術開発を加速するため、実験・検証を模擬トンネルで実施する。



写真-3 ICI キャンプ内 模擬トンネル

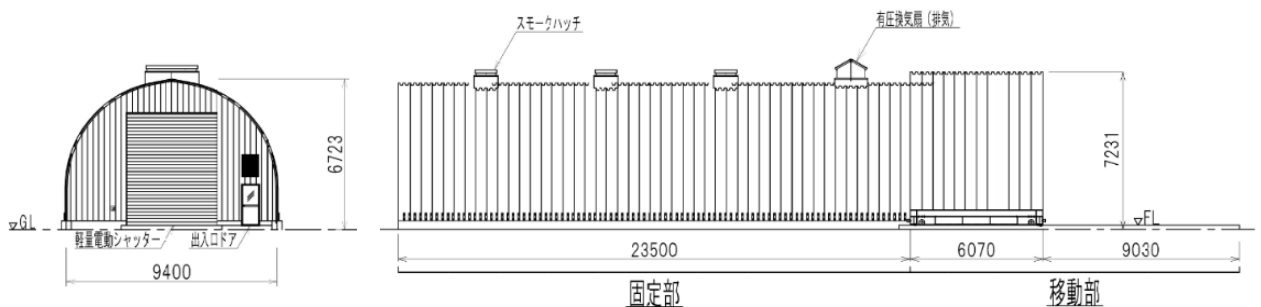


図-1 模擬トンネル概要図

②社内社外に対する教育・体験の場を提供

社内および協力会社の研修や安全教育に活用すること。また、近隣住民に対し、見学会や閉鎖空間を利用したイベントを実施し、地域貢献する。

(2) システムおよび試験概要

本システムは2車線トンネルでの使用を想定し投影範囲は幅約9.7m,奥行10.5mとしている。

今回の検証試験では、フロアレベルを基準面とし、基準面からの差分（高さ）に応じて色分け表示がされる設定とした（写真-4）。

構成する主な試験機器を以下に記載し、各機器の仕様を表-1に示す。

- ①かにクレーン（小型移動式クレーン）
- ②LiDAR
- ③PJ
- ④PJ 取付け用専用アタッチメント
- ⑤計測用パソコン（以降 PC1）
- ⑥画像処理・投影用パソコン（以降 PC2）
- ⑦ターゲット（LiDAR 座標設定用,4 種類）
- ⑧トータルステーション（以降 TS）

かにクレーンのブーム先端に専用アタッチメントを取り付け、そこに PJ・LiDAR を固定する。その後、トンネル天端とのクリアランスを考慮して、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り合いで試験を行った（図-2）。

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模擬トンネル内に設け、TS でターゲットの絶対座標を計測することにより、LiDAR の器械点を算出することができる。本手順により、LiDAR は絶対座標系の計測が可能となる。

投影の歪みをインバート面に合わせて調整するための作業として台形補正が必要となるが、本技術では OpenCV（画像処理・画像解析および機械学習等の機能を持つオープンソースのライブラリ）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ている（写真-5）。

これらの準備が完了し、計測プログラムを実行すると、LiDAR による計測が開始し、その後 PJ が実測値と設計値の差分をインバート面に色分け表示する。

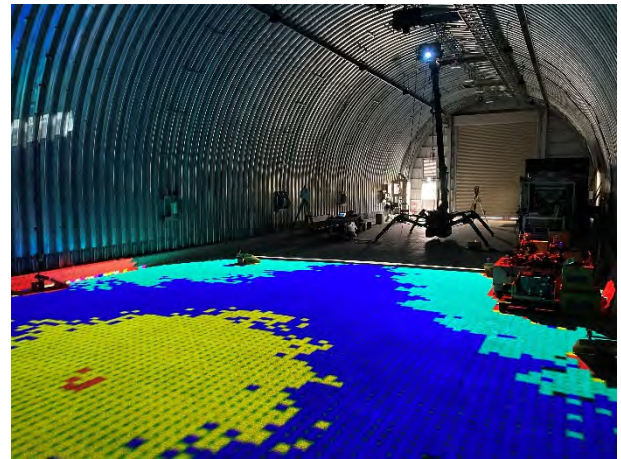


写真-4 模擬トンネル内での検証

表-1 主な試験機器の仕様

試験機器	メーカー・品番	仕様
①かにクレーン	前田製作所製	1.72t×1.0m, MC174CW
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	加工製作品他	400×400mm,プリズム, 反射シート(20mm,40mm),
⑦TS	SOKKIA 製 NET1 AXII	測角精度：1 秒 測距精度：(1+1ppm x D)mm

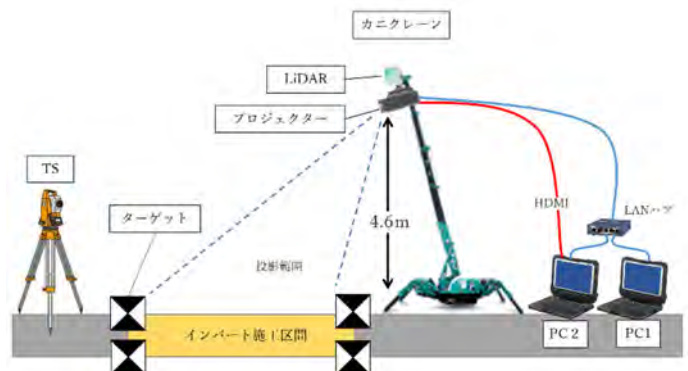


図-2 主な試験機器の配置イメージ

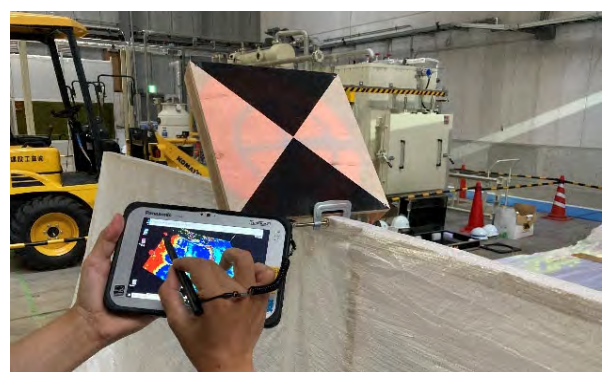


写真-5 タブレット PC を使った台形補正

本システムで設定した色分け表示を以下に示す。なお、色と高さは任意で設定が可能。

■ピンク：-90mm<差分≤-60mm

□白色：-60mm<差分≤-30mm

■水色：-30mm<差分≤0mm

■青色：0mm<差分≤30mm

■黄色：30mm<差分≤60mm

■赤色：60mm<差分≤90mm

■黒色：差分<-90mm,90mm<差分

(3) 検証その1：投影範囲調整の効率化

投影・計測範囲調整の効率化のため、今回はリモコン可動式の専用アタッチメントを製作した。ベースとなる機械は前回使用していた高所作業車の代わりに、かにクレーン（小型移動式クレーン）とした。現場において高所作業車は別作業で使用されていることも多く、その度にアタッチメントの取り外しが発生してしまうので、アタッチメントの常設が可能なコンパクトな機械として、かにクレーンを選定した。今回使用した、かにクレーン（MC174CW）の保管時寸法は長さ：1870mm、幅：590mm、高さ：1300mmとなり、一般的な高所作業車（長さ：5000～5500、幅：1900、高さ：3000）と比較して省スペースで保管できる。

かにクレーンのブーム先端に専用アタッチメント（写真-6）を取り付けて、PJとLiDARを固定し（写真-7）、アタッチメント用のリモコンを使って上下左右の角度を調整することができる。調整範囲は左右に45°ずつ、上方向に20°、下方向に60°の仕様となっている。

ブームの作業半径は約2mとし、トンネル天端とのクリアランスを考慮した高さ約4.6mまで上昇させて検証を行った。地上でのPJおよびLiDARの角度調整は実施せずに所定の位置まで上昇させて、その後アタッチメント用のリモコン操作のみで投影・計測範囲調整が可能であるか確認を行った。

(4) 検証その2：ターゲットサイズの最小化

今回の検証では、前回と同じターゲットを含めて全4種類を用意した（写真-8）。それぞれのターゲットにおいて、本システムでの①ターゲット中心部の認識精度と②点群データの座標変換精度を比較することによって、従来のターゲットに代わる最小サイズのものを選定することとした。検証するためのターゲットはLiDARから直線距離で6m,10m,15m離れた場所に設置した。

精度比較の元データとして、LiDARよりも高価で計測精度の高い3Dレーザースキャナー（LeicaP40）の算出データを使用した。

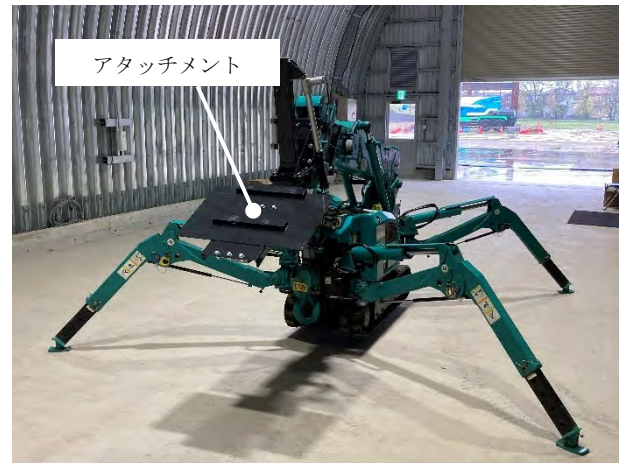


写真-6 可動式専用アタッチメント

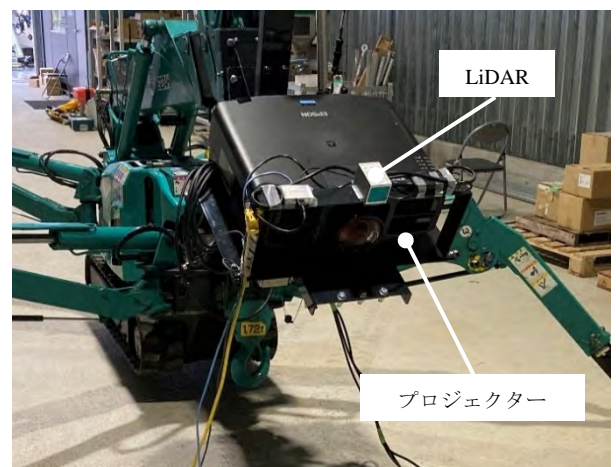


写真-7 PJおよびLiDARの取り付け状況

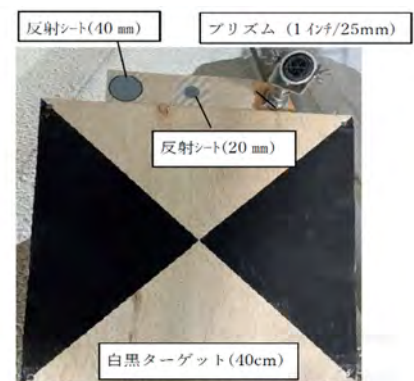


写真-8 4種類のターゲット

4. 検証結果

(1) 投影範囲調整の効率化

PJ や LiDAR を地上に下ろしている状態で角度の管理をしなくても、上昇させた状態から前後左右に十分な可動調整範囲があり、想定している 2 車線トンネルの規模においては投影範囲の調整が容易にできることが確認できた。また、計測範囲についても LiDAR の点群データ画像を確認した際に、ターゲットが計測範囲から外れている場合でも、同様に可動式アタッチメントを調整することで容易に計測範囲を変えることができるため、アタッチメントを使用しない固定式の仕様に比べて約 3~4 倍（15~20 分→5 分）の作業効率となった。

(2) ターゲットサイズの最小化

a) ターゲット中心部の認識精度

表-2 に示すように、6m、10m まではプリズム、反射シート共に輝度の強い赤色の中心がターゲット中心と認識できたが、15m 先のターゲットでは上部中央の 20mm 反射シート中心部の認識は困難であったため、この先の検証では 20mm 反射シート以外の計測データを使用した。

点群データを解析した結果、最大輝度に近いデータのみ（赤色の点群データ）を抽出し、その中央値を座標値として採用することが最も精度が高いことが分かった。

b) 点群データの座標変換精度

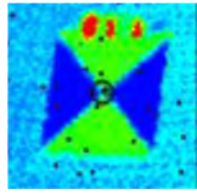
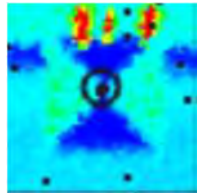
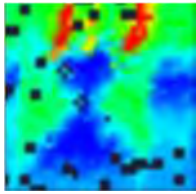
また、今回は検証用に 6 か所にターゲットを設置（写真-9）してターゲット種類別に座標変換後の精度を比較（表-3）した結果、プリズム、反射シートともに従来の白黒ターゲットと比較して、同等もしくはそれ以上の精度で座標変換可能なことが確認できた。

次にこれらの座標変換結果を用いて LiDAR の器械点を算出し、フロアレベルを基準面と設定した場合の計測高さの結果を 3D レーザースキャナーの計測結果と比較した（表-4）ところ、プリズム、反射シートともに白黒ターゲットと同等の精度で、反射シートについてはスキャナにより近い結果が得られた。

表-3 座標変換後の比較データ
（比較対象：TS による測量座標データ）

ターゲット 番号	白黒ターゲット			プリズム(149mm)			反射シート(40mm)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
①	-2.4	-5.7	-3.5	11.2	0.6	0.0	10.8	0.6	0.1
②	10.7	-3.2	-0.4	1.2	4.0	-6.0	5.7	0.0	-0.2
③	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
④	15.2	13.9	2.9	-1.5	5.4	-14.0	-2.2	7.6	0.5
⑤	18.9	11.7	21.3	-9.0	6.5	-11.6	-0.4	9.3	-0.5
⑥	8.1	9.2	-5.7	-18.4	13.2	0.0	-8.0	17.9	0.0
絶対差 平均	9.2	7.3	5.6	6.9	4.9	5.3	4.5	5.9	0.2

表-2 ターゲット中心部の認識状況

距離 6m	距離 10m	距離 15m
		

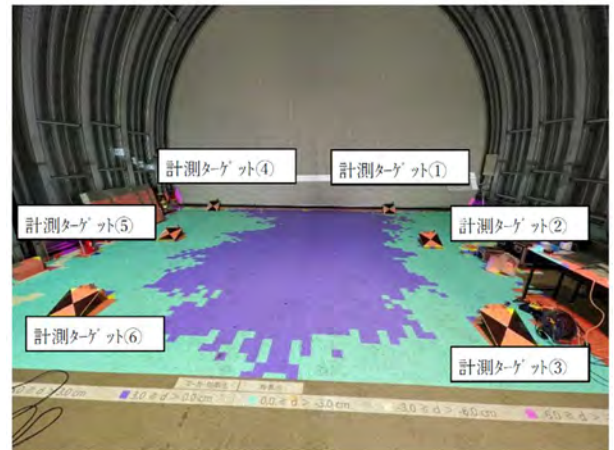


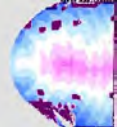
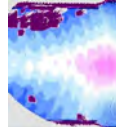
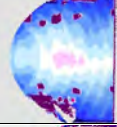
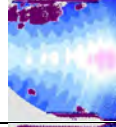
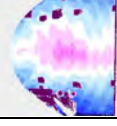
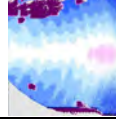


写真-9 検証用ターゲット設置状況

表-4 高さの計測結果比較

LiDAR との 計測機器 ターゲット	距離	
	切羽から 8m	切羽から 12m
3D レーザースキャナー(P40)計測		
LiDAR 計測 反射シート		
LiDAR 計測 プリズム		
LiDAR 計測 白黒ターゲット		

5. おわりに

今後は今回改善された仕様で現場検証を行っていき、さらなる実用性の向上を目指す。また、かにクレーン用の可動式アタッチメントだけでなく、様々なタイプの高所作業車に対応した汎用タイプのアタッチメントを計画し、現場検証を行っていく。

謝辞：本技術の検証においては、(株)ソーキ、(株)コンテンツ・クリエイト、(株)前田製作所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。

参考文献

1) 小笠原裕介・水谷和彦・下山悠：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, 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会論文