

SLAM 技術を利用した 3D ラインセンサのトンネル現場への適用性検証

飛島建設 正会員 ○勝部 峻太郎 正会員 松元 和伸 正会員 熊谷 幸樹
 正会員 坂本 秀夫 濱崎 年寿 寺島 巧

1. はじめに

山岳トンネル工事においては、掘削後の素掘り面の形状に不陸が生じる。掘削断面が設計断面より外側にある箇所（余掘り）や内側にある箇所（アタリ）の管理が重要となる。余吹き・余巻きによるコスト増や、掘削ずり処理の観点から、余掘り・アタリ量の低減が課題となっている。これに対して、3D スキャナのような ICT 技術を用いた施工管理システムが開発されているが、素掘り面を計測する上で、掘削の施工サイクルを阻害しないことが求められている。

そこで、筆者らは SLAM (Simultaneous Localizing and Mapping) 技術を利用した 3D ラインセンサに着目した²⁾。これは、LiDAR センサ・IMU (Inertial Measurement Unit) ・カメラが一体となったハンディタイプのマッピングシステムであり、周辺環境の三次元点群データを取得することができる。

本稿では、弊社トンネル工事現場において、異なる二つの 3D ラインセンサによるトンネル切羽計測を試行し、余掘りやアタリ計測への適用性を検証した結果を報告する。

2. システム概要

検証実験で用いた計測機器「PX-80 (Paracosm 社)」および「STENCIL (Kaarta 社)」の外観および諸元を図-1 に示す。また、両機器ともに採用されている LiDAR センサ「VLP-16 (Velodyne 社)」の外観および諸元を図-2 に示す。

3. 精度検証実験

弊社トンネル工事現場において、上記のマッピングシステム二種類を用いて切羽の計測を行った。マッピングシステムによって得られた点群データを現場の座標系に変換するため、点群ソフト「TREND-POINT (福井コンピュータ社)」上で座標変換を行った。図-3 に示したように、上半鋼製支保工およびベンチ部に測量マーカーを設置し、これを標定点および検証点とした。IMU における累積誤差、点群計測密度の違いおよび標定点数の違いが計測精度に与える影響を調べるため、図-4 に示した計測パターンと図-5 に示した標定点設置パターンを組み合わせ、切羽近傍に設置した検証点における精度を確認した。

4. 精度検証結果

それぞれのマッピングシステムにおける、計測パターン・標定点設置パターンの違いによる計測精度を表-1 に示す。RMSE が最大となるパターンを水色、最小となるパターンを黄色としている。また、計測に要した時間を表-2 に示す。表-1 および表-2 の結果より、横軸を計測時間 (秒)、縦軸を RMSE (m) としたグラフを図-6 に示す。



製品名	PX-80	STENCIL
LiDAR センサ	Velodyne VLP-16	
カメラ	カラー 水平360° / 垂直270° @50Hz	モノクロ 640×360@50Hz
重量	約3kg	約1.5kg

図-1 PX-80 および STENCIL の外観および諸元

センサタイプ	1走査16測線+検出器
FOV	水平360° / 垂直±15°
測定距離	1-100m
測定点数	約300,000点/秒
測定精度	±30mm (1σ@25m)
重量	約830g
レーザクラス	Class 1 Eye Safe



図-2 VLP-16 の外観および諸元



図-3 測量マーカー設置状況

キーワード 三次元点群, LiDAR, 余掘り, 精度検証

連絡先 〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬 5472 飛島建設株式会社 技術研究所 TEL 04-7198-7572

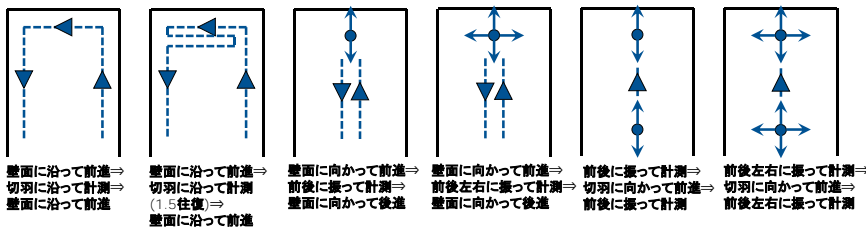


図-4 旋回の有無や機器の振り方が異なる
6つの計測パターン

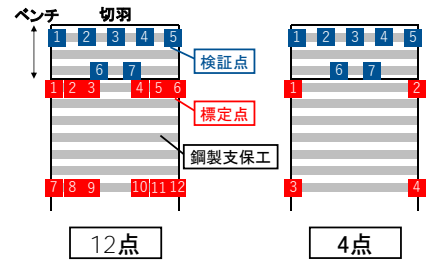


図-5 標定点および検証点の
設置パターン

図-6 の黒丸で囲った計測条件で精度が低下している。これは、計測密度が低く視認性が悪い標定点を多く用いて座標変換を行ったことが要因と考えられる。また、黄丸で囲った計測条件では、PX-80 に対して STENCIL の精度が良い。これは、図-7 に示したように、STENCIL ではレフシートでレーザが反射し受光強度が大きくなるため視認性が良くなる一方、PX-80 では測量マーカの視認性が悪くなり、標定点の設定精度が左右されたことが要因と考えられる。

以上のことから、標定点の数が少なくても、視認性が良い標定点を用いて座標変換を行えば、RMSE=0.040m 以内の計測精度を確保できることが分かった。

表-1 精度検証結果

計測パターン	PX-80 標定点設置パターン		計測パターン	STENCIL 標定点設置パターン	
	RMSE (m)	12点		4点	RMSE (m)
A	0.079	0.037	A	0.035	0.034
B	0.045	0.044	B	0.040	0.032
C	0.058	0.049	C	0.157	0.054
D	0.046	0.033	D	0.044	0.034
E	0.050	0.039	E	0.429	0.044
F	0.062	0.074	F	0.025	0.037

表-2 各計測パターンにおける計測時間

計測パターン	A	B	C	D	E	F
計測時間 (秒)						
PX-80	37	42	34	40	10	16
STENCIL	32	39	32	37	8	14

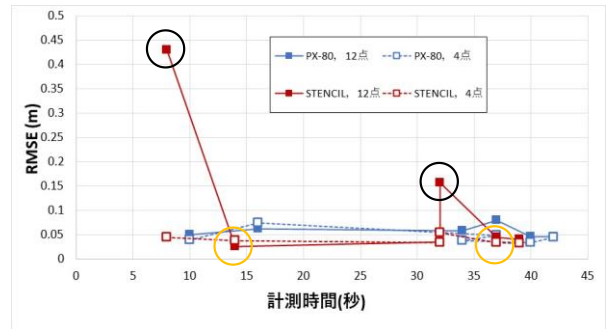


図-6 計測機器・計測パターン・
標定点設置パターンと精度の関係

5. まとめ

本実験において、以下の結果が得られた。

- ① PX-80 および STENCIL どちらの機器でも、1分以内で計測が行えた。どちらも標定点が4点あれば RMSE=0.040m を下回る精度で計測が行えた。
- ② 本マッピングシステムにおいては標定点の自動抽出・設定ができないため、解析者が手動で設定を行う必要がある。この作業によって生じる設定誤差は、光波測距儀による標定点の測量誤差およびマッピングシステムによる計測誤差より大きいいため、座標変換の際の精度低下につながる。

今後、余掘り・アタリ低減システムを開発していくにあたり、標定点設定作業の自動化による精度向上・省力化が課題となる。また、実際の運用に向け、マッピングシステムの車載化や専用ソフトウェアの開発も進めていく予定である。

参考文献

- 1) 須佐美朱加, 京免継彦: レーザースキャナを用いたアタリ判定, 第74回年次学術講演集, 土木学会, VI-388, 2019.
- 2) 勝部峻太郎, 松元和伸, 鈴木亮汰, 天野和人: リニューアル工事における可搬型3Dマッピング技術の適用性検証, 第45回土木情報学シンポジウム講演集, pp.37-40, 2020.

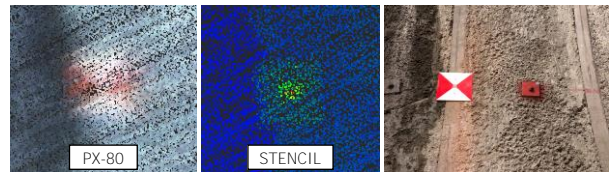


図-7 PX-80 および STENCIL によって
取得した点群の視認性の違い