

車両搭載型 LiDAR を用いたトンネル切羽形状計測手法の検証

飛島建設 正会員 ○木村 圭佑 飛島建設 正会員 勝部 峻太郎
 飛島建設 正会員 松元 和伸 飛島建設 正会員 熊谷 幸樹

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。そのため、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）が発生し、余吹き・余巻きや、掘削ずり処理量増加によるコスト増の観点から、余掘り・アタリ量の低減が課題となっている。この課題に対して、3D スキャナを用いた施工管理システムが開発されている¹⁾が、施工サイクルを阻害せずに計測することが求められている。

そこで、SLAM (Simultaneous Localizing and Mapping) 技術を利用した LiDAR に着目し²⁾、トンネル工事現場において、LiDAR により切羽形状を計測し、余掘りやアタリ計測への適用性を検証した³⁾。この検証において、計測精度は出来形管理基準の範囲内となる結果が得られたが、①人が機器を持ち歩いて計測する手法であるため計測に時間を要する、②切羽に人が立ち入る必要があり危険といった課題が残った。

本報は、機器を車両に搭載し、走行しながら計測することで上記課題の解決を図り、その検証結果を示す。

2. 検証システム概要

本検証で用いる SLAM 内蔵 LiDAR と諸元を図-1 で示す。計測角度は垂直方向に $\pm 15^\circ$ で、天端付近を計測するためには、機器を上下方向に回転させる必要がある。本検証では、上下方向に回転させるのではなく、機器を横に 90° 回転して用いることで、上記課題の解決を図った。また、機器を横向きにすると、左右方向の計測範囲が狭くなるため、制御可能な回転台を用いて計測機器を左右に回転させる機構を構築した。図-2 に示すように、これらの機能を有した装置を車両後方に固定し、自走しながら計測を実施できるシステムを制作した。



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

図-1 SLAM 内蔵 LiDAR



図-2 車両に設置した計測装置

3. 検証方法

トンネル建設工事現場で、上記のシステムを用いて切羽の計測を行った。ただし、実験のため、切羽掘削後に吹付けコンクリート・鋼製支保工・ロックボルトの施工が完了した状態で実施した。



図-3 標定点と検証点（片側）



図-4 回転方向の計測動作

本検証では、レフシートを貼付けた計

測ターゲットを、図-3 に示すようにトンネル両側に3個ずつ計6個を設置し、標定点・検証点として用いる。

検証方法は、車両後方を切羽側に向けた状態で、切羽近傍まで移動させて計測を開始する。次に図-4 で示すように回転台を所定の角度分、一定速度で回転させて切羽の点群を取得する。回転が終了後、計測を続けた

キーワード 三次元点群データ, LiDAR, トンネル, SLAM

連絡先 〒270-0222 千葉県野田市木間ケ瀬 5472 飛島建設株式会社 技術研究所 TEL 04-7198-1101

状態で、側面に設置したターゲット部の点群を取得できる位置に車両を前進させて、再度回転台を回転させる。側面の計測が完了後、計測を停止させる。

取得した点群データは、標定点を用いて現場座標系に変換した後、検証点を用いて精度検証を行った。

4. 現場検証結果

計測時の回転角度が 180° の場合で、回転速度が $2^\circ/\text{sec}$ (低速) と $10^\circ/\text{sec}$ (高速) の場合に得られた点群を図-5 および図-6 に示す。図-5 に示す低速回転の場合、切羽から離れた位置で、点群に大きな「ずれ」が見られる。一方、図-6 に示す高速回転の場合、計測誤差が少ない点群が得られ、切羽形状も密に取得できることを確認した。しかし、側面の点群が疎となり、レフシート部の反射強度が高い点群数が少ない結果となった。そのため、標定点の抽出が困難で、検証点精度は最大 $\pm 80\text{mm}$ 程度となり、目標としていた $\pm 50\text{mm}$ を満足しない結果となった。

図-7 は、SLAM による自己位置推定履歴を示したものである。図から、切羽付近では回転による自己位置のぶれが少ないが、坑口方面へ移動するにつれ、回転による自己位置のぶれが大きくなっていることがわかる。SLAM は IMU の他に白黒カメラによる visual-SLAM 機能も用いられているが、トンネル内の低照度かつ特徴点の少ない環境下では、その機能が有効に働いていないことが考えられ、低速で回転した場合には、①計測時間が長くなること、②IMU のみの自己位置測位となることで誤差が増大した原因であると考えられる。

5. おわりに

本報では、SLAM 技術を利用した LiDAR による車載型のトンネル断面形状計測に関する試行を行った。計測装置を車載化することで、計測時間を短縮することができ、掘削サイクルを阻害することなく点群データを取得できることが確認できた。しかしながら、低照度かつ特徴点の少ない環境下における、回転・移動を伴う計測方法では、誤差が累積して得られる点群精度が低下したり、計測密度が疎になったりすることが明らかになった。今後もトンネル環境下での計測に対する課題を解消すべく装置の改良等、引き続き研究を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, 鈴木亮次, 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.
- 3) 勝部峻太郎, 松元和伸, 熊谷幸樹, 坂本秀夫: 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, 第 76 回年次学術講演集, 土木学会, CS9-21, 2021.

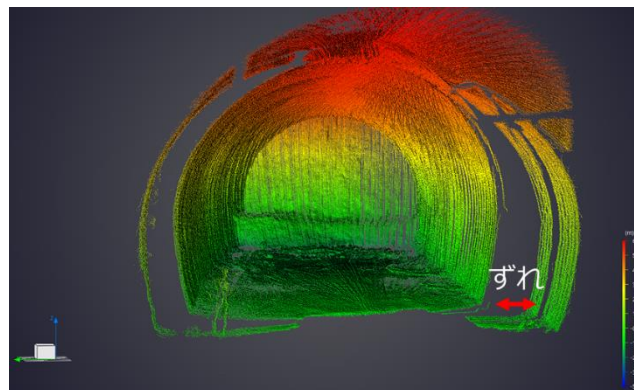


図-5 計測点群 (回転速度 $2^\circ/\text{sec}$)

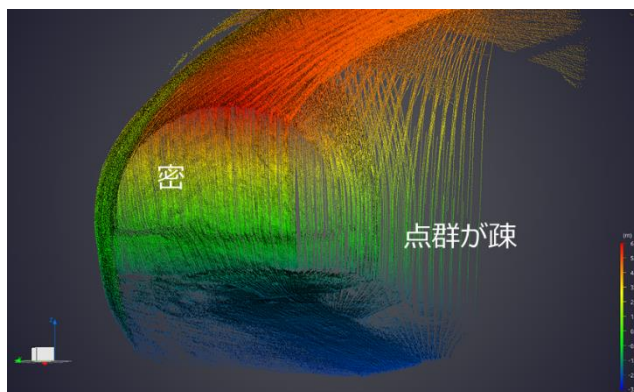


図-6 計測点群 (回転速度 $10^\circ/\text{sec}$)

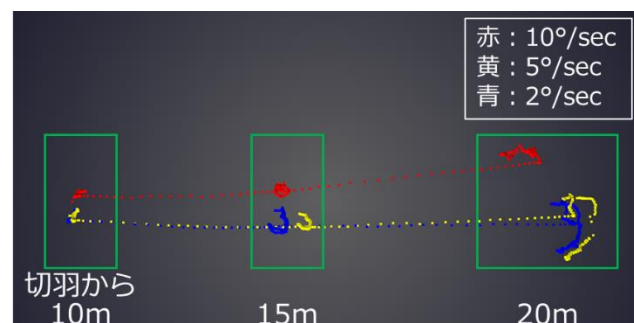


図-7 SLAM による自己位置推定履歴