

3D マッピングシステムの山岳トンネルの施工管理への適用性検証

Verifying the Applicability of 3D Mapping System to the Construction Management of Mountain Tunnels

勝部 峻太郎^{*1} 木村 圭佑^{*1} 熊谷 幸樹^{*2}
Shuntaro Katsube Keisuke Kimura Koki Kumagai
坂本 秀夫^{*3} 濱崎 年寿^{*3} 寺島 巧^{*3}
Hideo Sakamoto Toshihisa Hamasaki Takumi Terashima

【要旨】

山岳トンネル工事においては、掘削後の素掘り面に不陸が生じ、コスト増加やサイクルタイム増大に直結する。掘削形状の面的評価の取組みとして、3D スキャナのような三次元計測機器を用いた施工管理システムが開発され、トンネル工事において実用化されているが、素掘り面を計測する上で、3D スキャナをトンネル切羽付近に数十分程度据え置く必要があるため、施工を阻害するという課題がある。

そこで、筆者らは、LiDAR センサ・IMU (Inertial Measurement Unit) ・カメラが一体となった3D マッピングシステムを素掘り面計測へ適用した。これは、SLAM (Simultaneous Localizing and Mapping) 技術を利用し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高速に取得することができる。

本稿では、トンネル工事現場において、カラーおよびモノクロの二種類の3D マッピングシステム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。その結果、どちらの3D マッピングシステムにおいてもRMSEが0.040mを下回る精度で計測が行えることが分かった。

【キーワード】 三次元点群 LiDAR 余掘り 精度検証

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を余掘り、内側にある箇所をアタリといい、余掘りについては、吹付けコンクリートや掘削ずりの増量に直結し、アタリについては、手戻り作業によりサイクルタイムが増大することから、山岳トンネル工事の施工において、余掘り量やアタリ量の低減は常に課題となっている。掘削形状の面的評価の取組みとして、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、トンネル工事において実用化されている¹⁾が、3D スキャナをトンネル切羽付近に数十分程度据え置く必要があるため、施工サイクルを阻害するという課題がある。

そこで、筆者らは、LiDAR センサ・IMU (Inertial Measurement Unit) ・カメラが一体となった3D マッピングシステムに着目した²⁾。これは、SLAM (Simultaneous Localizing and Mapping) 技術を利用し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より高速に取得することができる。

本稿では、トンネル工事現場において、カラーおよびモノクロの二種類の3D マッピングシステムによるトン

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)」、 「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。



製品名	PX-80	STENCIL
LiDARセンサ	Velodyne VLP-16	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

1. 技術研究所 研究開発 G 第一研究室 2. 土木事業本部 土木技術部 技術企画 2G
3. 札幌支店 新稲穂トンネル共和作業所



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

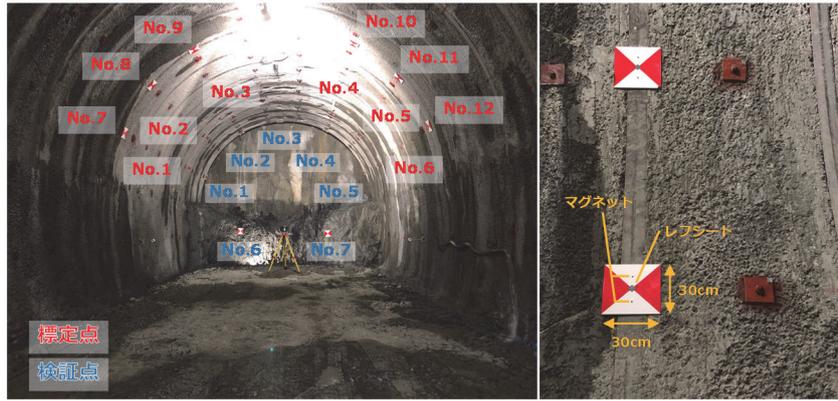


写真-1 測量マーカ設置状況

3. 精度検証実験

一般国道5号共和町新稲穂トンネルR側共和工区工事（発注者：北海道開発局）において、上記3Dマッピングシステム二種類を用いてトンネル切羽の計測を行った。写真-1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を設置し、これを標定点および検証点とした。マッピングシステムを用いて取得した点群データを現場の座標系に変換するため、図-4に示したように、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。精度検証において、標定点数の違い、点群計測密度の違いおよびIMUにおける累積誤差が計測精度に与える影響を把握することを目的に、図-5に示した標定点および検証点設置パターンと図-6に示

した計測パターンを組み合わせ、トンネル切羽近傍に設置した検証点における精度について検討した。

4. 精度検証結果

4.1 検証点を用いた精度検証結果

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

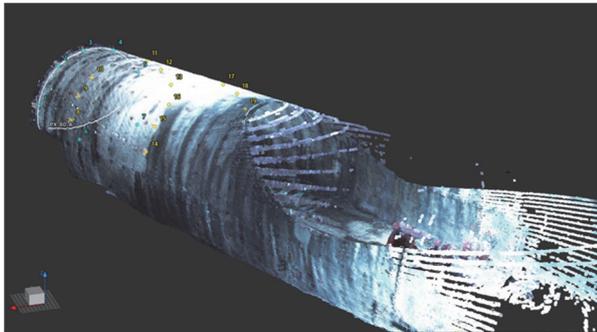


図-4 TREND-POINT 上での処理画像 (PX-80, 計測パターンA)

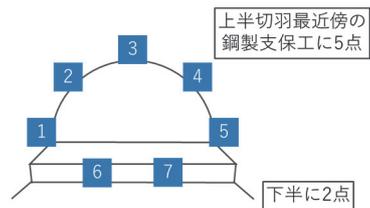
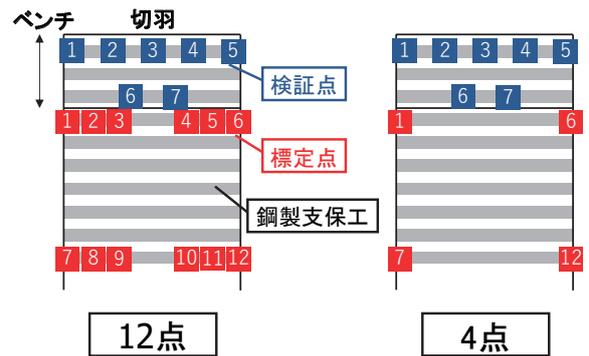


図-5 標定点および検証点の設置パターン

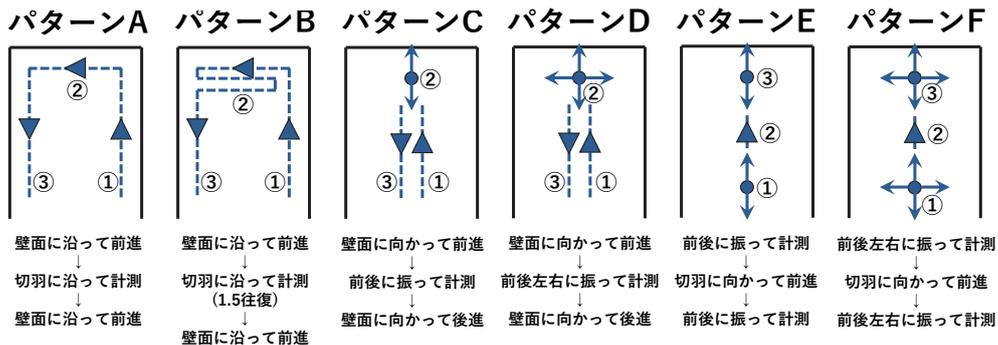


図-6 旋回の有無や機器の振り方が異なる6つの計測パターン

に示す。二乗平均平方根誤差（以下 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、計測に要した時間および計測点群数を表-2に示す。STENCIL の計測パターン A~D では、PX-80 と比較すると、計測時間はほとんど同じにも関わらず計測点群数がおよそ半分になっている。例えば、計測パターン C では、PX-80 の計測点群数は 13.4×10^6 個、STENCIL の計測点群数は 7.6×10^6 個となっている。これは、搭載している LiDAR センサは共に VLP-16 であるが、SLAM における点群の処理過程が異なっていることによるものと考えられる。

表-1 および表-2 の結果より、計測時間と RMSE の関係を図-7 に示す。計測時間 8 秒および 32 秒で、STENCIL の RMSE が増加している。これは、図-8 に示したように、STENCIL を用いて短時間の計測を行った場合に、点群密度が低く視認性が悪い標定点を、不必要に多く用いて座標変換を行ったことが要因と考えられる。PX-80 を用いて同様の条件で計測を行った場合では、図-9 に示したように、天井照明付近に設置した標定点が白飛びし、視認が困難になるという課題も発生した。また、図-7 に示す、計測時間 14 秒および 37 秒で、PX-80 に対して STENCIL の精度が高くなっている。これは、図-10 に示したように、十分な点群密度が得られている状況において、STENCIL ではレフシートでレーザーが反射し受光強度が大きくなるため、PX-80 と比較して視認性が良く、標定点の設定精度が向上し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 が 0.040m 以内の計測精度を確保できることが分かった。これは、日々の出来形管理における、リアルタイムな計測手法としては、十分な精度であると考えられる。

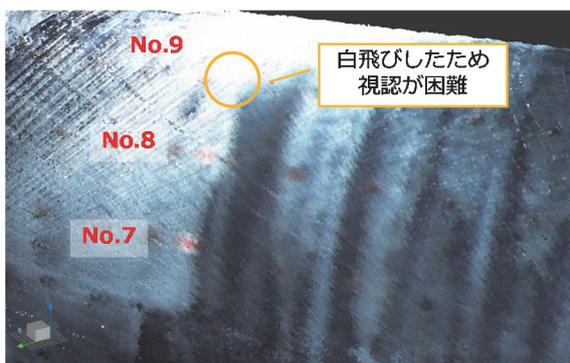


図-9 PX-80 によって取得した点群

表-1 精度検証結果

標定点設置パターン

RMSE(m)	PX-80		STENCIL	
	12点	4点	12点	4点
A	0.079	0.037	0.035	0.034
B	0.045	0.044	0.040	0.032
C	0.058	0.049	0.157	0.054
D	0.046	0.033	0.044	0.034
E	0.050	0.039	0.429	0.044
F	0.062	0.074	0.025	0.037

計測パターン

表-2 各計測パターンにおける計測時間

計測パターン		E	F	C	A	D	B
計測時間 (秒)	PX-80	10	16	34	37	40	42
	STENCIL	8	14	32	32	37	39
計測点群数 ($\times 10^6$ 個)	PX-80	7.8	9.3	13.4	12.7	14.1	13.4
	STENCIL	8	8.9	7.6	5	7.8	6.5

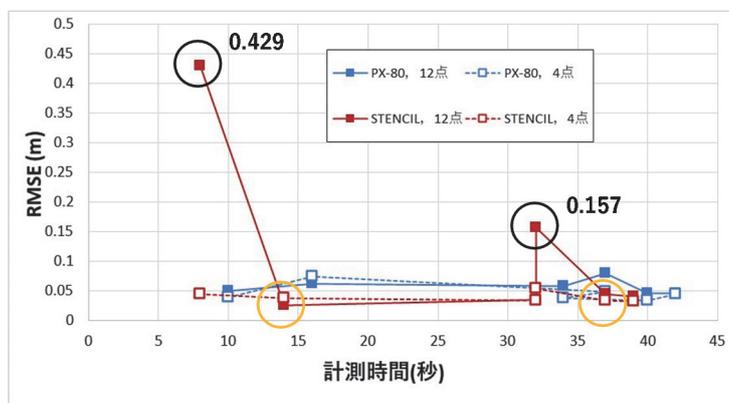


図-7 計測時間と RMSE の関係

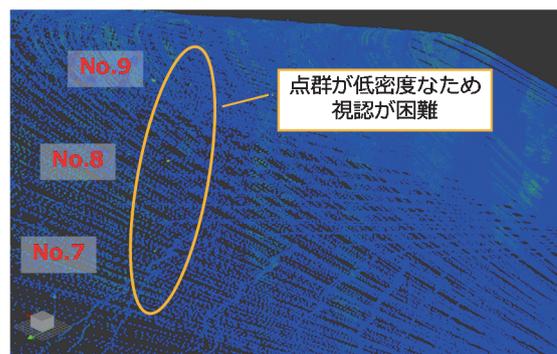


図-8 STENCIL によって取得した点群

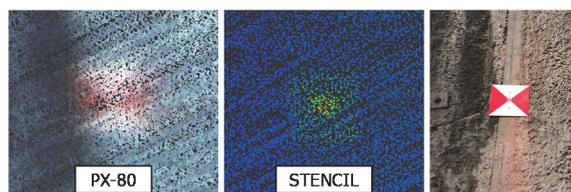


図-10 PX-80 および STENCIL によって取得した点群の視認性の違い

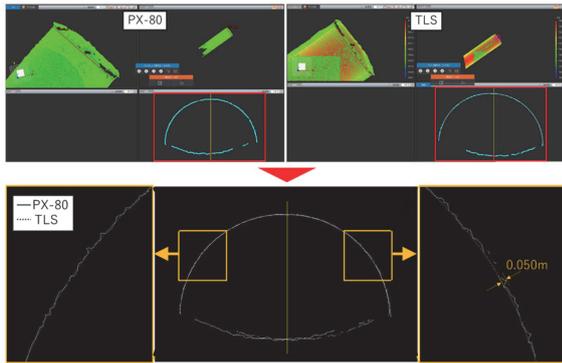


図-1 1 切羽最近傍の鋼製支保工断面における
それぞれの点群のずれ (PX-80, 計測パターンA)

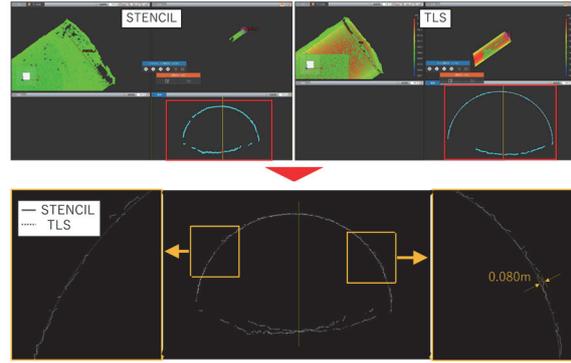


図-1 2 切羽最近傍の鋼製支保工断面における
それぞれの点群のずれ (STENCIL, 計測パターンA)

4.2 トンネル断面形状による精度検証結果

面的な精度検証を行うため、それぞれのマッピングシステムを用いて取得した点群と、地上型レーザスキャナ（以下 TLS）を用いて取得した点群について、切羽最近傍の鋼製支保工において断面図を作成し、手動で位置合わせを行い、図-1 1および図-1 2のようにそれぞれ重ね合わせた。TLS を用いて取得した点群を真値とせずれを比較したところ、PX-80 では最大0.050m、STENCIL では最大0.080mとなった。ただし、これは最大値での評価のため、平均としてはこれ以下の範囲に収まると考えられ、切羽計測への適用は可能と考える。

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。短時間で計測でき掘削サイクルを阻害しにくいという点で、マッピングシステムは TLS に対し優位性があると言える。
- (2) どちらのマッピングシステムにおいても標定点の自

動抽出・設定ができないため、解析者が手動で標定点を設定し、座標値を与える必要がある。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く、座標変換の際の精度低下につながる。このため、標定点の計測密度および設置場所に留意する必要がある。

今後、トンネル出来形管理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.

Summary Unevenness of the open excavation surface following excavations performed as part of mountain tunnel construction can increase costs and cycle time. To evaluate the surface of excavated forms, a construction management system incorporating three-dimensional measurement devices such as 3D scanners has been developed and entered into use in tunnel construction. However, to measure the open surface, the 3D scanner must be kept near the tunnel face for several tens of minutes, which can hinder construction work.

The authors applied a 3D mapping system integrating a LiDAR sensor, an IMU (Inertial Measurement Unit), and a camera to measure open excavation surfaces. This portable mapping system based on SLAM (Simultaneous Localizing and Mapping) technology is capable of acquiring 3D point cloud data on the surrounding environment at high speed.

In this study, we performed tunnel face measurement using two types of 3D mapping system, color and monochrome, at a tunnel construction site, and verified their applicability to over-cutting and chiseling location measurement. As a result it was found that RMSE can be measured with an accuracy of less than 0.040 m in both 3D mapping systems.

Key Words : 3D Point cloud data, LiDAR, Over-cutting, Accuracy verification