

3DLiDAR を活用した鏡吹付け厚管理システムの開発

鹿島建設(株) 正会員 井上勇太 山下 慧 宮嶋保幸

1. はじめに

山岳トンネル工事における切羽からの肌落ちは、死亡事故に至る重大災害を引き起こし、工事のみならず社会的に大きな影響を与える。2018年1月には、厚生労働省より「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン¹⁾」が公表され、鏡吹付けコンクリートの実施や切羽監視責任者の専任などの肌落ち防止対策が示された。しかしながら、鏡吹付けコンクリートの厚さの確認は、現状、数か所の検測孔による抜き取り検査により実施されているのみであり、全ての切羽で切羽全面の鏡吹付け厚を確実に管理することは難しい。そこで、鏡吹付け厚の全面管理が可能となる、3DLiDAR を活用した鏡吹付け厚管理システムを開発した。本稿では、システムの計測精度検証試験の結果を報告する。

2. 開発目的

今回採用した 3DLiDAR は小型でスキャンが数秒で完了するものである(表-1)。また、防塵・防水規格の等級は、粉塵の内部侵入がなく、水に浸しても影響しないことが保証されている IP67 のため、吹付け作業中にリバウンドや粉塵が発生する切羽でも取り扱いが可能である。一方、数 10mm 程度の鏡吹付け厚に対して、仕様上の計測精度が±20mm と十分とは言えない。また、本システムを吹付け機に搭載した場合、吹付け機が移動すると 3DLiDAR の位置がずれ、スキャンした点群データもずれるため、そのままでは現場にてすぐに鏡吹付け厚さを演算できないという課題がある。そこで、今回、現場にて 3DLiDAR の精度検証試験を実施するとともに、吹付け機が移動した場合でも、自動かつ高精度に点群データの位置合わせができるアルゴリズムの構築し、検証を行った。

3. 3DLiDAR の精度検証試験

現場での検証試験に先だって、室内試験として厚さが既知の発泡スチロール(厚さ 30mm~100mm)を切羽に見立てた壁に貼り付け、それに 3DLiDAR でスキャンを行い、厚さを測定した(図-1)。この計測結果を基に、スキャナの計測値を校正するための回帰式を取得した。

次に、図-2 に示すように、実際の切羽において、精度検証用の型枠を設置し、型枠に吹付けられた鏡吹付けコンクリートを 3DLiDAR でスキャンするとともに、検測孔による吹付け厚の計測を行った。

室内試験で取得した回帰式で現場試験で取得したスキャナの計測値を補正し、検測孔の計測値と比較した結果を図-3 に示す。型枠①、②の計測結果は、室内試験より算定した回帰直線から±7mm の範囲内に収まっていることがわかる。以上より、スキャナの計測値を補正することで、カタ

キーワード 3DLiDAR, 点群, 鏡吹付け厚さ, 肌落ち, 切羽評価

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 1-19-1 鹿島建設(株)技術研究所 TEL 042-485-1111

表-1 3DLiDAR の仕様

項目	仕様
サイズ	91.0×61.2×64.8mm
切羽のスキャンに要する時間	3秒
防塵・防水規格の等級	IP67
計測精度	±20mm
切羽をスキャンした場合の点群密度	0.5~1.6点/cm ²

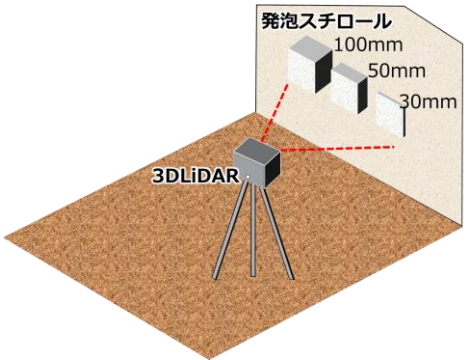


図-1 室内での精度検証試験状況



図-2 現場での精度検証試験状況

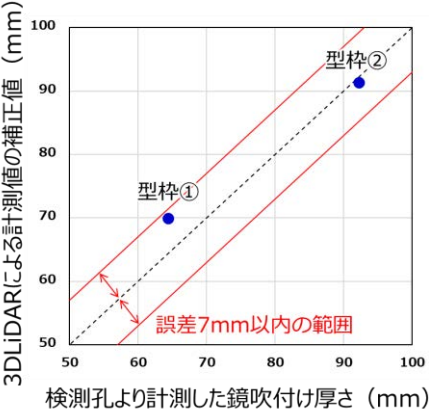


図-3 スキャナの計測値と真値との比較

ログ精度に比べて、高い精度（約 $\pm 7\text{mm}$ ）で鏡吹付け厚を計測できることがわかった。

4. 点群データの位置合わせ技術の構築

鏡吹付け厚は、吹付け前後の点群データの差分から算出するが、吹付け機が移動すると点群データがずれるため、位置補正が必要である。これに対し、トンネルの点群データは図-4に示すように形状や反射強度に特徴があり、これを利用することで精度良く位置合わせができる可能性がある。今回、点群データの位置合わせには、ICP(Iterative Closest Point)アルゴリズムを利用した。ICPアルゴリズムとは、2つの点群同士の位置合わせを繰り返し計算によって実現する手法で、一般的な位置合わせ手法として広く用いられている²⁾。しかし、位置合わせを行う2つの点群の初期位置が離れていると、精度よく位置合わせを行うことができないという課題がある。そこで、取得した点群に対して、段階的にICPアルゴリズムを適用し、初期位置が離れている場合でも、自動かつ高精度に点群の位置合わせを行う手法を考案した。

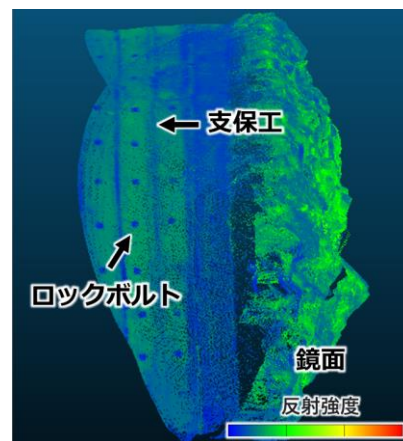


図-4 トンネルの点群データ

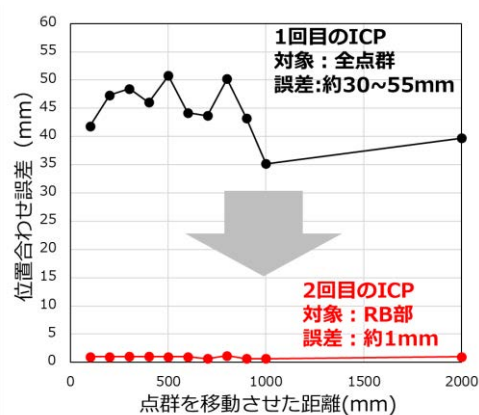


図-5 位置合わせアルゴリズムの精度検証結果

本手法では、まず全ての点群データを対象にICPアルゴリズムを適用し、1回目の位置合わせを行う。この時の位置合わせ誤差は数10mm程度と大きいですが、全ての点群を対象にすることで、トンネル形状の特徴を利用した位置合わせが可能となり、おおよその位置を合わせることができる。次に、点群の反射強度に基づいてロックボルト部のみを抽出し、この点群データを使って、2回目のICPアルゴリズムにより位置合わせを行うことで、高精度に位置合わせを行うことができる。

本手法の精度確認のため、吹付け機の移動を模擬した点群データに対して、高精度に位置合わせが可能か検証を行った。そのため、まず異なる位置から計測した吹付け前後の点群データに対して手動で位置合わせを行い、次に吹付け後の点群データをトンネル軸方向に意図的に移動させ、吹付け前の点群データとの初期位置を変えることで、疑似的に吹付け機の移動を模擬した。

図-5に疑似的にトンネル軸方向に100～2,000mm移動させた際の位置合わせ誤差を示す。グラフには、1回目のICPを適用した時の位置合わせ誤差を黒のプロットで示し、2回目のICPを適用した時の誤差を赤のプロットで示した。これより、1回目のICPでは35～50mm程度の誤差でおおよその位置合わせができており、さらに、ロックボルトの点群を利用し2回目のICPを適用することで、位置合わせ誤差を1mm程度まで小さくできることが明らかとなった。これにより、吹付け機が移動した場合でも、本手法を適用することで、自動的に誤差1mm以下で位置合わせを実施できることがわかった。

5. おわりに

鏡吹付け厚を切羽で簡単に高精度に計測するシステムを構築するため、3DLiDARの計測精度を室内試験、現場試験を通じて確認を行った。また、吹付け機が移動した場合でも、今回開発した手法を利用することにより、誤差1mm程度で位置合わせできることがわかった。これにより、システム全体として、計測精度10mm以下で鏡吹付け厚を計測できるシステムを開発することができた。今後は、本システムを活用し、鏡吹付け厚の全面管理を行うことで、切羽での肌落ち災害防止に努めたい。

参考文献

- 1) 厚生労働省：山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン，2018.1.18，
<https://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-11300000-Roudoukijunkyokuanzeniseibu/0000149302.pdf>（参照2022.3.3）
- 2) 須崎純一，出口翔理：平面交線を用いた3次元点群データの位置合わせ手法の開発，土木学会論文集F3[土木情報学]，vol.74，No1，1-10，2018