

3D レーザースキャナーを用いた高精度トンネル変形モニタリング手法の開発

横浜国立大学 ○崔 瑛*

横浜国立大学 Sui, Haitong *

トンネル 変形 モニタリング
Cloud-to-Mesh 点群 3D レーザースキャナー

研究の目的

近年、トンネル構造物の維持管理において、3D レーザースキャナー（3DLS）による点群データを用いた変形検出技術が急速に普及している。特に、異なる時期に取得された点群を比較することで変位を評価する手法は有効であるが、その比較過程において生じる計算誤差が変形量の推定精度に大きく影響を及ぼすという課題がある。本研究では、一方の点群をメッシュに変換し、他方の点群からメッシュまでの法線方向の距離を算出する cloud-to-mesh（C2M）アルゴリズムに着目し、同アルゴリズムにおける計算誤差の発生メカニズムとその改善方法について検討を行った。C2M は点群比較に広く用いられているものの、その誤差発生要因や定量的な評価方法についての研究は十分ではなく、誤差を低減するための明確な指針も確立されていなかった。

そこで本研究では、点群の分布特性（点間隔および厚さ）とその統計的な限界値を導入し、C2M における比較誤差を定量的に評価する比較誤差評価法（CEE 法）を提案するとともに、この手法を応用した高精度トンネル変形モニタリングのための 3DLS 計測手法を構築した。

研究の内容

(1) トンネルにおける比較誤差評価

本研究では、点群比較アルゴリズムである C2M（cloud-to-mesh）法における計算誤差を定量的に評価するための手法（CEE 法）を構築した。C2M では、比較対象となる点群の各点と、基準点群から生成されたメッシュ面との法線方向距離（比較距離）を算出するが、点群の分布特性により誤差が生じる。そこで CEE 法では、各点とメッシュに対して「点間隔」「リング間隔」「点群厚さ」といった特徴量を割り当て、これらに基づいて誤差の最大値（式(1)）および最小値（式(2)）を理論的に導出する。

$$\Delta d_{C2M_max} = 2a^*h \quad (1)$$

$$\Delta d_{C2M_min} = \frac{(d_0 - 2a^*h)d_p d_r}{\sqrt{(a^2 d_p^2 + b^2 d_r^2)h^2 + d_p^2 d_r^2}} - d_0 \quad (2)$$

ここで、

d_0 ：実際の表面変位量（基準面からの変形距離）

a, b ：点の誤差分布に関する統計係数（ a は縦、 b は横）

h ：点群の厚さ（roughness）

d_p ：点間距離（レーザースキャンの軌跡方向）

d_r ：リング間距離（スキャンリング方向）

(2) 現場計測実験による CEE 手法の検証

本研究では、提案した比較誤差評価手法（CEE 法）の有効性を検証するため、実トンネルにおいて地上型レーザースキャナー（TLS）を用いた現場実験を実施した。対象としたトンネルは、幅 8.2 m、高さ 5.9 m の断面を有する道路トンネルであり、スキャナの設置位置を中心として半径 15 m までの範囲をスキャン対象とした。実験では、図 1 に示すようにトンネル覆工の内面に人工的な変位（擬似的な変状）を与えるため、まずトンネル壁面に大判のフォームボードを貼付し、さらにその上に 100 mm × 100 mm の小型フォームブロックを装着することで、壁面からの突出量を段階的に調整した。フォームブロックの厚さは 0 mm（基準状態）から最大 28 mm まで、1～8 mm、14 mm、21 mm、28 mm の複数段階で設定した。これにより、実験的に既知の変位量を持つ測定対象を構築した。

計測は、変位の付加前後で 2 回に分けて TLS 計測を行い、得られた点群データをそれぞれ比較対象とした。スキャン位置・姿勢・環境条件（温度・湿度）は可能な限り同一に保ち、測定誤差の影響を抑制した。変位箇所はトンネルの長手方向に 1.5 m 間隔で配置され、各位置において厚さの異なるブロックを設置したことで、スキャン距離による誤差の変化も同時に評価できる構成とした。

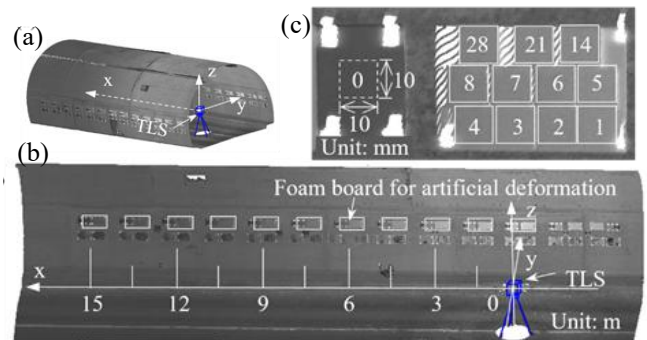


図 1 実験の概要 (a) トンネルの TLS 計測; (b) 壁面変位の設置位置; (c) 変位モデル化のためのフォームブロック

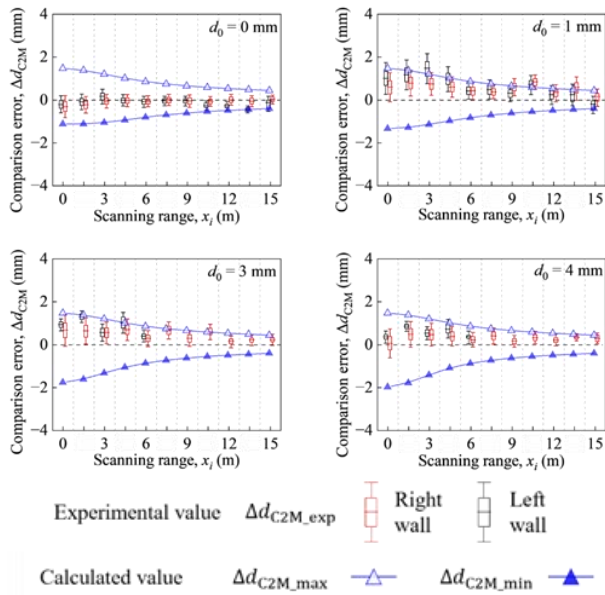


図2 比較誤差 CEE に関する実測値と計算値の比較

図2は、CEE法によって理論的に算出された比較誤差の最大値および最小値と、実験により得られた比較誤差との整合性を視覚的に示した図である。各サブプロットには、C2M アルゴリズムにより計測された距離と実際の変位量との差から求められた比較誤差の分布が箱ひげ図として描かれており、中央値、四分位範囲、外れ値が含まれている。また、理論的な誤差の上限および下限は、それぞれ破線で表示されており、実測値との比較が可能となっている。厚み0~4mmまでの結果のみ示すが、多くのスキャン距離および変位量において、実測された比較誤差は理論範囲内に収まっており、CEE法の妥当性が実験的に確認された。

研究の成果、新発見

以上の検討をまとめ、本研究では比較誤差評価法（CEE法）によって得られる理論的誤差範囲に基づき、C2M アルゴリズムにおける比較誤差を所定の精度内に抑えるための点群最適化手法を提案した。本手法は、取得された点群データに対して特徴量の制限処理を行うことで、比較誤差の発生要因を事前に除去または低減し、点群比較の精度を向上させるものである。図3にその詳細を示す。

a) ノイズ除去領域の抽出 (図3a))

まず、比較誤差に対して所定の閾値を設定し、誤差が閾値を超過するスキャン距離範囲を「ノイズ除去領域 (denoising region)」として特定する。この範囲は、点群後処理が必要な領域として扱われる。図3(a)では、スキャン距離 x_i に対する比較誤差の変化曲線（最大値および最小値）を描いた上で、あらかじめ設定した比較誤差の

閾値を1mmを基準として、誤差が閾値を超えるスキャン距離範囲（0~約7.46m）を「ノイズ除去領域 (denoising region)」として抽出している。

b) 点間隔に対する制限値の設定 (図3(b))

ノイズ除去領域内において、CEE法で用いられる点間隔（点間距離 dp およびリング間隔 dr ）に上限値を設定する。これはメッシュの傾斜を制御し、比較誤差の下限値を抑えるために有効である。

c) 点群厚さに対する制限値の設定 (図3(c))

同様に、点群厚 h に対しても統計係数（例： $a=0.35$, $b=0.25$ ）を用いて制限を設けることで、メッシュの粗さを抑え、誤差の上限値を制御する。図3(c)では、点群の厚さ h に対しても同様に制限を設けている。この厚さ制限により、誤差式（特に式1, 2）における誤差の増幅要因が抑制され、メッシュと比較点の誤差が大幅に縮小される。

d) 最適化後の比較誤差評価 (図3(d))

設定された特徴量の制限値をもとに、再度CEE法を用いて比較誤差を算出する。その結果、比較誤差が設定された閾値以下に収まることが確認できれば、点群最適化は達成されたと判断される。

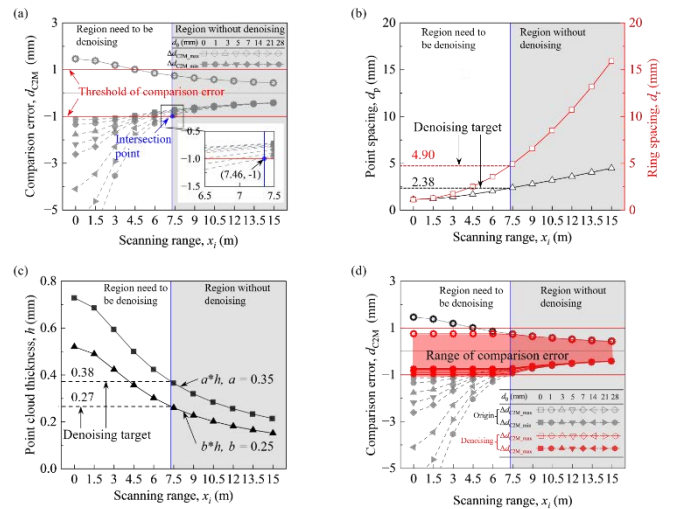


図3 CEE法を用いた最適化手法の概要 (a)ノイズ除去領域の抽出; (b)点間隔に対する制限値の設定; (c)点群厚さに対する制限値の設定; (d)最適化後の比較誤差評価

今後の予定

本研究は円筒形状のトンネルにおいて地上型レーザースキャナ（TLS）を用いた点群計測に限定して検討を行っているが、今後は湾曲トンネルや配管・ケーブル類を有する複雑な形状のトンネルへの適用が課題である。さらに、水平変位や回転といったトンネル全体の移動・変形には対応できなく、今後はこれらの変形を検出するために、既知の基準点を活用した変位解析手法を導入する。