

除雪パトロールにおける MMS を活用した路面積雪深計測の検討

防災復興システム工学研究室 小林 桃子
指導教員 高橋 一義

1. はじめに

日本は国土の約 51%が豪雪地帯に指定されており、冬季の安定した社会経済活動の維持のため道路除雪が不可欠である。しかし、除雪作業員の高齢化や担い手不足により、勤務体制の悪化や作業量の増加が深刻化している¹⁾。これに対応するため、ICT を活用した除雪機械の自動化などの効率化に向けた取り組みが進められている。一方で、除雪作業の実施要否を判断する除雪パトロールは、標尺を用いた積雪深計測や目視による道路状態の調査を行っており、効率化の取り組みは十分に進められていない。また、この調査では地点ごとの情報しか得られず、路線全体の積雪状態を得ることが困難である。各路線の積雪状態に関する情報は、地域全体の除雪作業の省力化や効率化のための基礎資料となるため、除雪パトロールの効率化は重要となる。

これまで、道路の積雪状態を効率的に記録する手法として、スマートフォン画像を用いた AI 路面判定が実施されている²⁾。しかし、画像を用いた計測は照明条件の影響を受けやすい。一方、LiDAR を搭載した MMS (Mobile Mapping System) は照明条件に左右されず、周囲の環境を 3D 点群として記録できる。また、移動しながら継続的に計測できるほか、従来の標尺による積雪深計測では把握できなかった路線全体の面的な積雪情報が取得できる。これにより、作業負担の軽減や迅速な積雪情報の収集が可能となり、除雪パトロールの効率化が期待される。

本研究は、除雪パトロールでの道路積雪状態の効率的な取得にむけて、MMS を活用した路面積雪深計測の手法の検討を目的とする。本研究

室で開発した低コスト MMS³⁾を用いて路面積雪深を計測し、積雪深の違いが判別可能か評価するとともに、計測積雪深の算出方法について検討する。これにより、除雪パトロールの積雪深計測における MMS の活用の可能性を検討する。

2. 使用機器

本研究では、路面上の積雪深計測を目的として開発された低コスト MMS (以下、本装置) を用いる (図 1)。本装置は従来の MMS より低コスト化したシステムであり、LiDAR には Livox 社製の Mid-360 (価格約 10 万円)⁴⁾、GNSS/INS には Bynav 社製 X1-5H (購入時の価格約 25 万円) を使用している⁵⁾。Mid-360 と X1-5H の諸元を表 1 に示す。

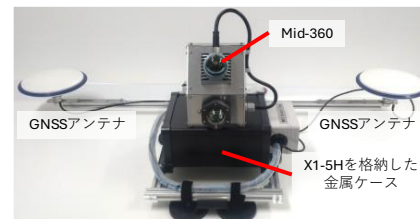


図-1 低コスト MMS の外観

表-1 LiDAR, GNSS/INS の諸元

(a) LiDAR : Livox Mid-360	
レーザ走査範囲	水平360°、鉛直59°
検出距離	40m@10%反射率
距離精度	2cm@10m
レーザ発散角	水平25.2°、鉛直8°
フレームレート	10Hz
ポイントレート	20万点/秒 (非反復走査)
波長	905nm
(b) GNSS/INS : Bynav X1-5H	
位置精度 (RTK)	水平 : 1cm+1ppm 鉛直 : 1.5cm+1ppm
姿勢角 (精度)	Roll と Pitch : 0.018° Azimuth : 0.084°
出力レート	125Hz (最大)

3. 方法

3.1 低コスト MMS による高さと形状の再現性

本装置の LiDAR のレーザ発散角のカタログスペックから算出されるフットプリントサイズは、路面上で約 112 cm×35 cm となる。このフットプリントサイズが対象物の高さや断面形状の再現性に与える影響を確認するため、発泡スチロール板を疑似積雪として室内実験を実施する。車載時とほぼ同じ高さに設置した本装置により発泡スチロール板の 3D 点群（以下、MMS 点群）を取得する。その後、MMS 点群から対象物の高さおよび断面形状の再現性を評価する。本装置の単一のレーザフットプリント内における床と発泡スチロール板の混在する状態を変化させるため、設置間隔を 0, 50, 100 cm に設定する。取得した MMS 点群から DSM を生成し、測線に沿って断面を作成する。ここで、DSM のグリッドサイズは予備検討により、グリッド内に 10 点以上の計測点が含まれる 10 cm とし、グリッド内の中央値を使用する。また、高さの算出は後述する差分 DSM 法を用いる。さらに、MMS 点群の評価には 3D スキャナである Leica BLK360-G1（測距精度:6 mm, レーザ発散角 0.02 度, 以下、BLK）で取得した 3D 点群（以下、参照点群）と比較する⁹⁾。

3.2 3D 点群の取得と DSM の生成

積雪深が異なる積雪区画を道路縦断方向に 150 cm, 横断方向に 65 cm の大きさに設置する。各区画の積雪深は、A:3 cm 以下, B:6~8 cm, C:10 cm 以上と設定する（図 2）。本装置を搭載した車両で各区画を跨ぐように約 20 km/h で計測領域を往復し、MMS 点群を取得する。また、本装置との比較のため、BLK でも参照点群を取得する。ノイズ除去後の 3D 点群からグリッドサイズ 10 cm で DSM を生成する。計測積雪深の算出には、無雪期と積雪期の DSM を用いる差分 DSM 法と、積雪期 DSM と推定した路面位置を用いる路面位置推定法の 2 種類を用いる。今回、積雪区画設置前を無雪期、設置後を積雪期

とする。

3.3 差分 DSM 法

無雪期と積雪期の 2 時期の差分 DSM を計測積雪深とする。差分 DSM の作成には、2 時期の点群の位置合わせが必要になるため、露出路面位置は水平方向に均一とみなし、2 時期の点群の Z 軸成分を位置合わせ誤差として補正する。これにより、計測積雪深 H は式(1)から算出する。

$$H = DSM^{snow} - DSM^{no.snow} - \Delta E \quad (1)$$

ここで、 DSM^{snow} と $DSM^{no.snow}$ はそれぞれ積雪期と無雪期の DSM, ΔE は 2 時期の同一路面位置（区画 D）の Z 座標値の差である。今回、参照点群は同一の器械点から取得するため、 $\Delta E = 0$ となる。

3.4 路面位置推定法

本装置の移動軌跡から推定した路面位置と積雪期 DSM の差分を計測積雪深とする。本装置の設置高さ h^{MMS} と GNSS/INS が記録した LiDAR 原点の Z 座標 Z^{traj} から路面位置 z^{road} を算出する（式(2)）。

$$z^{road} = Z^{traj} - h^{MMS} \quad (2)$$

従って、計測積雪深 H は式(3)となる。

$$H = DSM^{snow} - z^{road} \quad (3)$$

このとき、 z^{road} は計測領域全体の平均値を用いる。

3.5 MMS による積雪深計測の可能性の検討

差分 DSM 法と路面位置推定法により算出した計測積雪深をもとに、①各区画間の積雪深の違いが判別可能か、②可能な場合、何 cm の積雪深

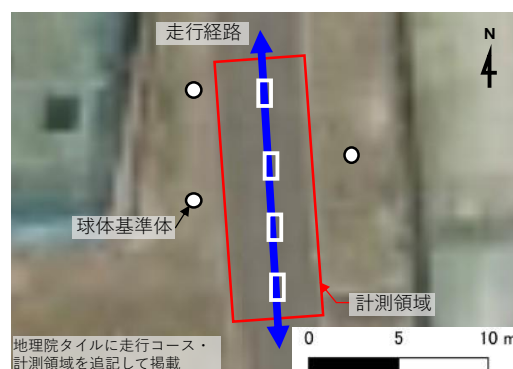


図 2 設置した 3 つの積雪区画と区画 D

の違いが判別可能か、統計的仮説検定により検討する。検討には、観測データが少ない場合や、分布形状が不明な場合に使用されるブートストラップ法を用いる。積雪区画 A と B, A と C, B と C でそれぞれ計測積雪深の差 ΔH を算出する。①は計測積雪深の差 ΔH の下位 5 パーセントイルの 90%信頼区間の下限 ΔH_{low} がゼロより大きい場合に、設置した積雪区画の積雪深の違いを判別できると判断する。②は ΔH_{low} がゼロとなる時点での計測積雪深の平均値の差 ΔH_{mean} が判別可能な積雪深の差とする。ブートストラップ法のリサンプリング回数は 10000 回とする。

4. 結果と考察

4.1 低コスト MMS による高さと形状の再現性

間隔ごとの対象物の高さを確認した。間隔 0 cm, 50 cm, 100 cm のときの平均値は、本装置は 3.6 cm, 1.7 cm, 0.0 cm, BLK では 4.2 cm, 2.2 cm, 0.8 cm となった。本装置は、間隔の広さによらず BLK に比べ高さを約 1 cm 過小評価する傾向が確認された。一方、標準偏差に大きな差は見られなかった。また、図 3 より過小傾向はあるものの、本装置は形状の再現性があることを確認した。

4.2 3D 点群の取得と DSM の生成

実験は 2024 年 2 月 22 日に実施し、実施時の気温は 1.5~2.4 度であった。積雪区画の設置時の積雪深は A:2.9 cm, B:7.7 cm, C:9.9 cm と概ね設定した積雪深が再現された (図 4)。3D 点群は区画設置前、設置直後、30 分後に取得した。3D 点群にノイズ点の除去等の前処理を行い、DSM を生成した。また、明らかに積雪区画である領域において 130 cm×50 cm の範囲で解析積雪区画 A, B, C 及び路面が露出している区画 D のグリッドを抽出した (13×5 = 65グリッド分)。

4.3 差分 DSM 法

2 時期の差分 DSM から計測積雪深を算出した。図 5(a), (b)に計測積雪深のヒストグラムを示す。本装置の計測積雪深は過小傾向がみられ

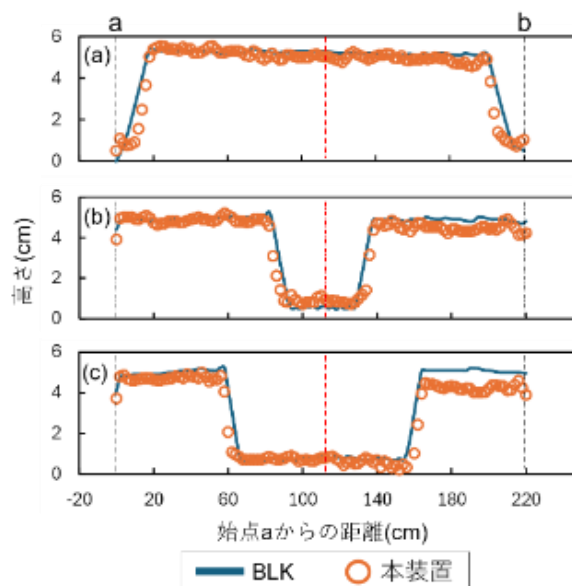


図 3 算出した形状, (a)は 0cm, (b)は 50cm, (c)は 100cm



図 4 設置した 3 つの積雪区画と区画 D

るものの、区画間の重複が少ないことが分かる。計測積雪深は BLK に比べ 0.9~2.3 cm 低く算出され、標準偏差は 0.35~1.8 cm と BLK (0.35~0.7 cm) に比べわずかに大きい値となった。隣接する区画間の積雪深の差は BLK との差は無かった。この手法は位置合わせ誤差が積雪深に影響するため、2 時期の点群間で位置合わせが可能な特徴点が見出しやすい市街地道路での適用が適している。

4.4 路面位置推定法

コースごとの LiDAR 原点の移動軌跡から路面位置を推定し、計測積雪深を算出した。図 5(c)に計測積雪深のヒストグラムを示す。計測積雪深は差分 DSM 法により算出した値に比べ、BLK に近い値となり、その差は -1.6~0.9 cm となっ

た。また標準偏差は 0.41~1.46 cm と差分 DSM 法と同様にわずかに大きい値となった。この手法は推定路面位置が計測積雪深に影響するため、一定区間で路面位置を推定する必要がある。

4.5 MMS による積雪深計測の可能性の検討

各区画間の計測積雪深の差の下位 5 パーセントの値 (ΔH_{low}) は両手法ともにいずれのケースにおいてもゼロよりも大きい値が得られた。これにより、いずれの手法においても本装置で算出した計測積雪深の差は統計的に有意であり、設置した積雪区画間の積雪深の違いを判別できると判断できる。また、 ΔH_{mean} は差分 DSM 法では 1.3~1.9 cm、路面位置推定法では 1.4~2.0 cm となり、区画間の積雪深の差が 2 cm 以上あれば、積雪区画の違いを判別できることが示された。

5. まとめ

本研究室で開発した MMS により路面上に設置した積雪深が異なる 3 つの積雪区画の 3D 点群を取得し、差分 DSM 法と路面位置推定法により計測積雪深を算出した。その結果、差分 DSM 法では過小評価する傾向は見られたものの、両手法ともに各区画の積雪深の違いを判別可能であることが示された。また、両手法ともに各区画間の計測積雪深の差は統計的に有意であり、各区画間に 2 cm 以上の積雪深の差があれば、積雪区画の違いを判別できることが確認された。これにより、MMS の活用により、路面積雪状態を効率よく記録し、除雪パトロールにおける積雪深計測を代替できる可能性が示唆された。

しかし、実際の除雪パトロールでの積雪深計測で活用するには、データ処理の効率化や実際の車両走行速度で計測可能かを検討する必要がある。そのため、実際の降雪環境やさまざまな路面状況における MMS の活用の有効性を検討する必要がある。また、計測精度の向上に向けて、2 時期の点群間の位置合わせ誤差を最小にすることや、路面位置の推定方法を精緻化するこ

とが重要となる。

参考文献

- 1) 国土交通省 国土政策局：豪雪地帯対策における施策の実施状況等（令和 4 年），
<<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001459942.pdf>>.
- 2) 中村 一樹，砂子 宗次朗，上石 勲，宮島 亜希子，仲条 仁：スマートフォン画像を用いた AI 路面判定システムの開発，第 38 回寒地技術論文・報告書，38，pp.103-108，2022.
- 3) 高橋 一義，中村 健：Livox Mid-360 を用いた路面積雪深計測のための車両搭載 LiDAR システム開発，日本写真測量学会，令和 6 年度年次学術講演会発表論文集，pp.13-14，2024.
- 4) Livox：Livox Mid-360 User Manual v1.2，2024.
- 5) Bynav：X1 Combined Navigation System USER MANUAL，p. 30，2024.
- 6) Leica：867881 Leica BLK360 UM v4.0.0，2021.

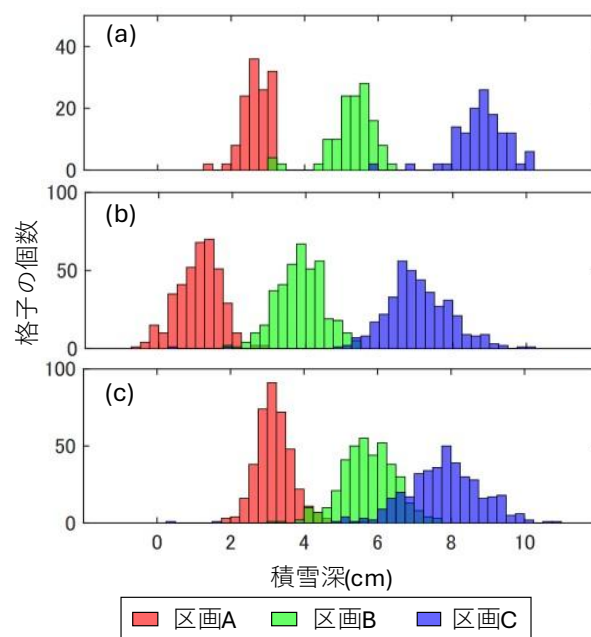


図 5 解析データ全体の計測積雪深の分布
(a)は BLK，(b)は差分 DSM 法，
(c)は路面位置推定法の結果。