(25) 道路周辺の積雪状況の記録を目的とした Mobile Mapping System の開発と予備的評価

高橋　一義[1]・中村　健[2]・千田　良道[3]

[1]正会員　長岡技術科学大学　工学部　環境社会基盤系（〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1）
E-mail: ktakaha@vos.nagaokaut.ac.jp

[2]正会員　長岡技術科学大学　技術支援センター（〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1）
E-mail: tnakamura@konomi.nagaokaut.ac.jp

[2]非会員　中日本航空株式会社　技術部（〒480-0202 愛知県西春日井郡豊山町豊場若宮 17-1）
E-mail: ysenda@nnk.co.jp

冬期の積雪寒冷地域で，社会経済活動を営む上で道路除排雪は不可欠である．しかし，その担い手の高齢化や慢性的な人手不足の深刻化により，持続可能な道路除排雪体制の確保が課題となっている．ICT 技術の活用による道路除排雪作業の高度化は進められているものの，除雪タイミングの判断材料を収集する除雪パトロールのデジタル化は立ち遅れている．本研究では，道路周辺の積雪状況の記録を目的とした安価な Mobile Mapping System（MMS）を開発し，MMS が生成する点群の位置情報の再現性の予備的な評価を実施した．検証データは十分ではないものの，開発した MMS は地図情報レベル 500 を満足する性能を示し（$MAD = 0.121\mathrm{m}$），安価な市販品から除雪パトロールへ導入可能な MMS を構築する可能性が十分にあることを確認した．

Key Words: *snow removal, LiDAR, road patrol, point cloud, boresight calibration*

1. はじめに

積雪寒冷地域において，冬期に安定した社会生活を営むには雪処理対策が不可欠で，特に道路交通の確保が重要である．しかし，道路除排雪の担い手の高齢化や慢性的な人手不足の深刻化により，持続可能な道路除排雪体制の確保が課題となっている．課題解決の一環として，道路除排雪作業の ICT 化による作業軽減や省力化が進められている．しかしながら，持続可能な道路除排雪体制の確保には，道路除排雪作業の ICT 化に加えて，道路交通の阻害因子となる道路周辺（道路・路肩）の積雪状況を反映した道路除排雪システムの構築と運用の実現が必要である．

道路周辺の積雪状況は，除排雪作業前の除雪パトロールにより調査される [1]．しかし，パトロール結果のデジタル化は遅れ，調査結果の蓄積や活用は進んでいない．

道路周辺の積雪状況をデジタル化する手段として，空間を 3 次元点群化する Mobile Mapping System（MMS）は有用である．公的予算の制限や道路周辺の積雪状況が気象条件により変化しやすい点を踏まえると，除雪パトロールへの高価で高品位な MMS の導入は現実的でない．

一方で，安価な製品を組み合わせて，費用対効果の高い車両搭載型の MMS の開発を目指した取り組みもある．塚田ら [2]は LiDAR，GNSS，IMU から構築したセンシングユニットと LiDAR-SLAM を組み合わせ，都市空間の点群取得を目指している．また SLAM を利用せず，MMS を構成する LiDAR と GNSS/INS の低価格化と点群解析ソフトを企業が独自開発した MMS（N-Quick）もある [3]．著者らは，N-Quick を用いて道路路肩の積雪状況を点群化した事例において，積雪深を誤差 5cm で把握可能と報告している [4]．しかし，除雪パトロールに MMS を導入するには，N-Quick よりもさらに安価な MMS の開発が必要である．

本研究では， MMS の構成機器の一つである，LiDAR の位置と姿勢情報を記録する GNSS/INS を N-Quick よりも安価な市販品へ置き換え，道路周辺の積雪状況の記録を目的とした MMS の開発を試みる．さらに，簡易的なボアサイト校正手法と点群への地図情報付与手法を提案

し，生成した MMS 点群の位置情報の再現性の予備的な評価を実施する．そして，除雪パトロールへ導入可能な MMS の実現性を検討する．

2. 開発した MMS

N-Quick と同一の機械走査式の Velodyne VLP-16 は， 16 個のレーザを 360° 回転させ，周囲の空間を 3 次元点群として記録する．カタログ上の最大測距距離は 100m で，MMS 稼働時の回転速度は 10Hz である．

MMS が生成する点群の形状再現性は，GNSS/INS が出力する方位角（azimuth 角）に大きく左右される．本研究では，衛星測位環境下で静止時の方位角測定性能に優れる Moving Base を利用可能な安価な GNSS/INS 製品である BYNAV A1-3L を採用した（**表-1**）．

VLP-16 と A1-3L はそれぞれ固有の座標系（LiDAR Frame と INS Frame）を持つ．A1-3L を用いて LiDAR Frame 原点の地図座標，LiDAR Frame の XY 平面の傾き，Z 軸周りの回転角を得るため，A1-3L，LiDAR，衛星測位用の GNSS アンテナの相対的な位置関係を金属筐体（防水性）とアルミフレームにより固定化する．VLP-16 を金属筐体の外側に固定し，内側に A1-3L や通信，給電に必要な機器と回路を格納する．そして，アルミフレーム下部にマグネットステーを取り付け，開発した MMS とした（**図-1**）．MMS への給電と操作は，車内のポータブル電源（12V）とノート PC を用いる．なお A1-3L の稼働状況を確認する目的で， 2 つの GNSS/INS 製品（Adv. Navigation Spatial Dual と Septentrio i3D pro+）を筐体に組み込んだ．

3. 方法

(1) LiDAR 点群への地図情報の付与

UAV 搭載 LiDAR システムを独自開発した Brazeal ら [6] は，レーザ走査角と計測点までの距離，レバーアームオフセットと INS Frame 原点の地図座標を用いて LiDAR 点群へ地図座標を付与している．本研究では，レバーアームオフセット調整済状態で A1-3L を利用し（LiDAR Frame 原点の地図座標と姿勢角を出力），計測対象（道路周辺の積雪）が LiDAR から近距離（数 m～十数 m）にある状況から，Brazeal らの方法を参考に，次式により LiDAR 点群へ地図情報を付与する（式 1）．

$$X_t^{map} = R_t^{ins}\left(R_b\, X_t^{lidar} + X_b\right) + X_t^{GNSS} \qquad (1)$$

ここで，X_t^{map}，X_t^{GNSS}，X_t^{lidar}は，それぞれ時刻tにおける計測点と LiDAR Frame 原点の地図座標値，LiDAR Frame における計測点の座標である．また，R_t^{ins}は LiDAR Frame の各軸の回転角（φ, θ, ψ）から得られる回転行列，R_b とX_b は LiDAR Frame と INS Frame の間の微小なズレ量を調整するボアサイト角（$\Delta\varphi, \Delta\theta, \Delta\psi$）に対応する回転行列とボアサイトオフセットである．ここで，$\Delta\varphi, \Delta\theta, \Delta\psi$はそれぞれ，仰角，横揺れ角，方位角に対応する．

表-1 BYNAV A1-3L の主要諸元 [5]

測位精度(RTK時)	
水平	1cm + 1ppm
鉛直	1.5cm + 1ppm
姿勢角精度（RTK時）	
Roll, Pitch, Azimuth	0.03度, 0.03度, 0.11度
最大データレート(Hz)	20
購入時価格	902 USD(2022年3月)

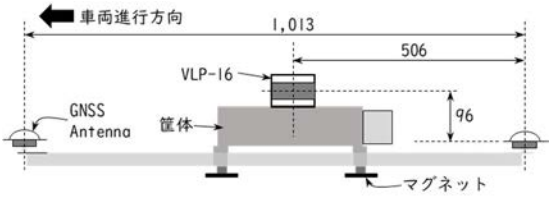


図-1 開発した MMS の概観

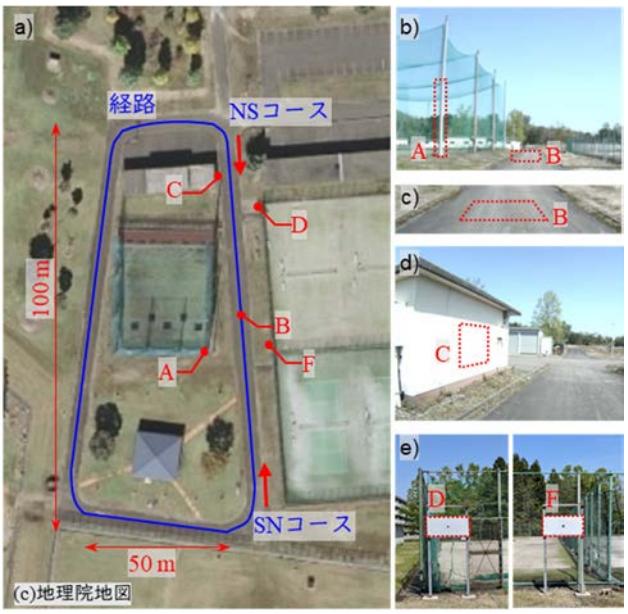


図-2 ボアサイト校正・評価用点群の記録経路と対象物の配置

(2) ボアサイト校正

ボアサイト校正は，LiDAR Frame と INS Frame の精密な対応関係を決定する処理である．本研究では「支柱などの鉛直な棒状の構造物」，「水平と見なせる道路面」，「鉛直な壁面」の点群を用いて，対象物の形状の再現性に着目した簡易的なボアサイト校正を実施する．

a) 校正作業用点群の生成

図-2 に示す経路を MMS を搭載した車両を低速度で走行させ，経路周辺地物を LiDAR 点群として記録する．式 1 のR^b を単位行列，X_b をゼロベクトルとして，LiDAR 点群に地図情報を付与する．この時，LiDAR 反射

強度のほかに，校正作業に必要なX_t^{GNSS}，X_t^{lidar}，LiDAR Frame の各軸の回転角も出力する．ここから，南から北へ向かう SN コースと北から南へ向かう NS コースで記録した対象物 A，B，C 周辺領域を抽出し，これを校正作業用点群とする．

b) ボアサイト角の計算

対話的な手法により，ボアサイト角の概算値を決定した後，概算値近辺に選好解が存在すると仮定し，単純な探索的手法によりボアサイト角を決定する．

所与のボアサイト角と式 1 を用いて（X_b はゼロベクトル），校正作業用点群から校正後点群を生成する．ボアサイト角の値を変化させると，校正後点群の対象物 A, B，C の形状の再現性が変化することを利用し，それらの形状の再現性を目視で評価し，概ね形状の再現性が高くなった時点の値をボアサイト角の概算値とする．

次に概算値を初期値として，式 2 の目的変数を最小化する値をグリッドサーチにより探索する．式 2 中のC_1は対象物Aの水平断面形状の円形らしさを示す指標で，点群の水平座標から推定した楕円の楕円率（ε）が 1 に近いほど値が小さくなる．C_2は対象物BとCの点群座標から推定した平面の水平性（C_{21}）と鉛直性（C_{22}）を示す合成指標である．対象物BとCの点群がそれぞれ水平面と鉛直面に近いほど，これらの値は小さくなる（式 3）．

$$\begin{cases} C_1 = |\varepsilon - 1| \\ C_2 = C_{21} + C_{22} \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} C_{21} = |n_h| \\ C_{22} = |n_v - 90| \end{cases} \tag{3}$$

グリッドサーチによるボアサイト角の探索手順は次の通りである．(i) $\Delta\varphi$と$\Delta\theta$を固定し，C_1を最小化する$\Delta\psi$を探索する．この時のC_1の値を$C_{1_{pre}}$とする．(ii) $\Delta\psi$を探索結果に固定し，C_2を最小化する$\Delta\varphi$，$\Delta\theta$の組を探索する．(iii) 探索した値を用いて，改めて処理 1 を実行し$\Delta\psi$を探索する．この時，C_1の変化量：r（式-4）が閾値未満ならば，グリッドサーチを終了し，この時点の値を選好解とする．rが閾値以上の場合，概算値を見直し，グリッドサーチによる探索を再度実行する．

$$r = \left| C_1 - C_{1_pre} \right| \tag{4}$$

本研究では，NS，SN コースで記録・生成した対象物の点群から算出したC_1とC_2の平均値を用いて，処理(i)～(iii)を実施する．また 閾値に小さい値を設定すると，選好解の探索処理が収束しない可能性があるため，選好解を得ることを優先し，閾値を10^{-2}とする．

d) ボアサイトオフセットの計算

ボアサイト角の選好解を用いて，NS，SN コースの対象物Aの校正作業用点群に地図座標を付与し，各コースの点群の水平座標から推定した楕円の中心座標（$\boldsymbol{p}_c^f$と$\boldsymbol{p}_c^b$）を求める．水平方向のボアサイトオフセットがゼロならば，両者は一致する．仮に中心座標のズレが生じていたら，これを解消するように水平方向のボアサイトオフセットを設定する．なお，本研究では鉛直方向のボアサイトオフセットはゼロとする．

(3) 校正結果の検証

図-2 中の経路脇に，再帰性反射テープを貼りつけた反射板（横 90cm，縦 45cm）を鉛直に配置し（図中の D と E），校正作業用点群の記録と同様に，開発した MMS にて評価作業用点群を別途記録する．開発した MMS の位置情報の再現性は，別途測量して求めた反射板の中央座標との較差の平均絶対偏差（MAD）を用いて評価する（式 5）．

$$MAD = 1/n \sum \left\| \boldsymbol{p}_i^{MMS} - \boldsymbol{p}_i^{ref} \right\| \tag{5}$$

iは 1～4 を取り，ぞれぞれ NS，SN コースの対象物 D, Eを意味する（n=4）．$\boldsymbol{p}_i^{MMS}$と$\boldsymbol{p}_i^{ref}$は対象物の中央座標で，それぞれ MMS 計測した値と測量した座標値となる．VLP-16 では，再帰性反射点の反射強度値が 100 以上となる．ここから，閾値以上の反射強度をもつ点を反射板として抽出し，その平均座標を$\boldsymbol{p}_i^{MMS}$とする．

4．結果と考察

(1) ボアサイト角の概算値

開発した MMS を用いて点群を記録（2023 年 4 月 20 日）し，ここから対象物 A，B，C 周辺の点群を抽出し校正作業用点群とした．その後，ボアサイト角の概算値を対話的な手法で探索した．探索開始時は，$\Delta\psi \rightarrow \Delta\varphi \rightarrow \Delta\theta$の順に値を変化させ，対象物の形状が概ね読み取れる状態にし，最終的には 3 つ角の大きさを微調整し，式 6 の概算値を得た．

$$(\Delta\varphi, \Delta\theta, \Delta\psi) = (-3.6533°, -2.1650°, 0.9749°) \tag{6}$$

ボアサイト角の概算値を適用して生成した対象物 A, B，Cの校正後点群（SN コース）を**図-3** に示す．図中の(a)～(c)は校正前，(d)～(f)は校正後点群である．校正前点群では，対象物の形状が確認できない状態であるものの，校正後点群では支柱の水平位置(d)，路面の高さ(e)，壁面の形状(f)が明瞭に読み取れる．

(2) ボアサイト角とボアサイトオフセット

グリッドサーチによる選好解の探索では，変数の探索間隔と範囲の設定が必要である．本研究では，概算値を初期値として採用する．そのため，探索範囲を広く設定せず，$\Delta\psi$は±0.1°，$\Delta\varphi, \Delta\theta$は±0.2°の範囲を探索間隔 0.0025 度でグリッドサーチを実施した．その結果，処理(i)では，$\Delta\psi = 0.9674°$（$C_1 = 0.0728$），処理(ii)では，$\Delta\varphi = -3.5083°, \Delta\theta = -2.1025°$となった．また，処理(ii)では，$\Delta\psi = 0.9674°$（$C_1 = 0.0738$），$r = 0.001$と

なり，ここでグリッドサーチを終了し，式 7 の選好解をボアサイト角とした．

$$(\Delta\varphi, \Delta\theta, \Delta\psi) = (-3.5083°, -2.1025°, 0.9674°) \quad (7)$$

ボアサイト角を用いて校正作業用点群に地図座標を付与し，対象物 A の点群の水平座標から推定楕円の中心座標を計算し，ボアサイトオフセット（水平座標）を式 8 とした．

$$X_b = (-0.030\mathrm{m}, -0.039\mathrm{m}, 0.000\mathrm{m}) \quad (8)$$

(3) 校正結果の検証

反射板（対象物 D と E）を設置し，ボアサイト校正時と同じ NS と SN コースで，LiDAR 点群を記録した（2023 年 5 月 9 日実施）．その後，ボアサイト校正後点群を生成し，そこから反射板の中央座標を決定した（$\boldsymbol{p}_i^{MMS}$）．そして，別途測量した反射板中央の座標（$\boldsymbol{p}_i^{ref}$）との較差（**表-2**）から MAD を計算し，$MAD = 0.121\mathrm{m}$を得た．

較差は南北成分（Y）が他の方向成分と比較して大きくなったものの，すべての方向で較差成分のバラつきは 0.01～0.03m と小さい．これらの結果は，開発した MMS が生成する点群は，地物の相対位置の再現性が高く，地図座標の再現性として地図情報レベル 500[7]を満足する水準であることを示唆する．現時点では，検証データが不足しているものの，VLP-16 よりも安価な LiDAR 製品が市販されていることから，除雪パトロールへ導入可能な MMS を安価に構築可能と言える． 一方，南北の較差成分が大きくなった原因に関して，評価作業用点群の記録コースが南北のみであった点が関係している可能性がある．これに関しては，位置情報の再現性の評価方法の改善が必要である．

５． おわりに

本研究では，LiDAR の位置と姿勢情報を記録する GNSS/INS を N-Quick よりも安価な市販品に置き換え，道路周辺の積雪状況の記録を目的とした MMS の開発を試みた．そして，提案した簡易的なボアサイト校正手法と点群への地図情報付与方法を用いて生成した MMS 点群の位置情報の再現性を評価した．その結果，2 カ所の検証点における位置情報の再現性は，地図情報レベル 500 を満足するものであった．現時点では検証データが不足するものの，除雪パトロールへ導入可能な安価な MMS の実現は十分可能といえる．

今後，点群の位置情報の再現性の評価方法を改善し，開発した MMS が生成する点群の位置精度を明らかにする．また，2023 年 1 月～2 月に，開発した MMS にて記録済の積雪を含む道路周辺空間のデータを解析し，道路脇の雪堤高の計測精度を評価する予定である．

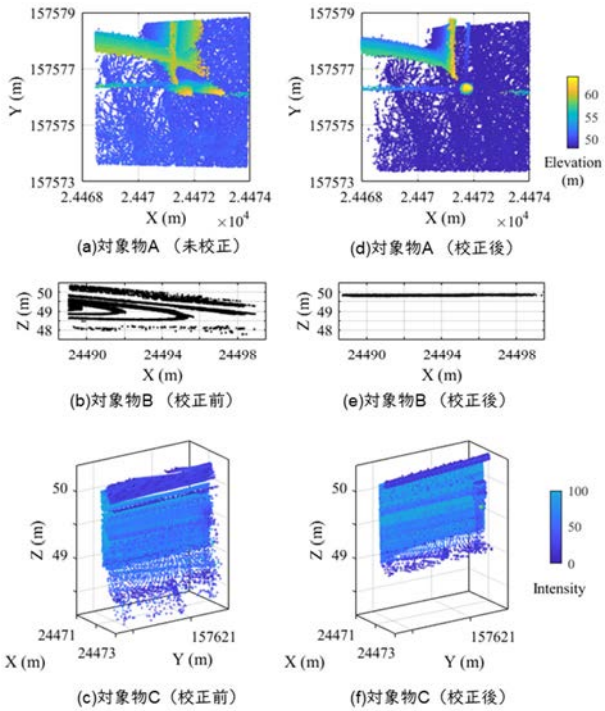


図-3 対象物 A，B，C の校正前・校正後点群

表-2 反射板中央の座標の較差

i	X	Y	Z	3D
1	-0.009	0.117	-0.052	0.128
2	0.041	0.116	-0.009	0.123
3	-0.008	0.125	-0.017	0.127
4	0.027	0.098	-0.024	0.104
標準偏差	0.025	0.011	0.019	0.011

謝辞：本研究の一部は，（一財）新潟県建設技術センターの助成を受けて実施したものです．

参考文献

1) 新潟県：道路除排雪委託条項，＜https://www.pref.niigata.lg.jp/uploaded/attachment/340433.pdf＞，（入手 2023.06.05）
2) 塚田ほか：LiDAR-SLAM による都市空間の点群データの誤差要因とその補正に関する研究，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol.78，No.2，pp. I_131-I_140，2022.
3) 千田ほか：簡易 MMS の開発と実証実験結果の報告，第 43 回 測量調査技術発表会要旨集，pp. 4-5，2021.
4) 中村ほか：簡易 MMS による道路路肩の積雪分布記録と積雪深計測， 寒地技術論文・報告集，38，pp. 38-42，2022.
5) Bynav：GNSS/INS Receiver A1 USER MANUAL，UG015, Version 2021.1, 2021.
6) Brazeal, R.G et al : Investigating Practical Impacts of Using Single-Antenna and Dual-Antenna GNSS/INS Sensors in UAS-Lidar Applications, Sensors, 21, 5382 , 2021.
7) 国土交通省国土地理院：測量法第 34 条で定める作業規程の準則，https://psgsv2.gsi.go.jp/koukyou/jyunsoku/pdf/R5/R5_junsoku.pdf（入手 2023.06.09）