

一般財団法人新潟県建設技術センター 研究助成事業

○ 除雪作業前後の道路・周辺状況計測システム構築に関する事業

○ 平成 31 年 3 月 20 日

○ 代表者 長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻 准教授 高橋一義

事業の概要

公共予算全体の縮減や除雪作業員の高齢化により、除雪作業を省力化が進められている。しかし、冬季を通じて、降積雪状況に迅速に対応する除雪体制を維持するには、路面および路肩の積雪状況を継続的にモニタリングする必要がある。

本事業では、除雪作業前後の路面ならびに路肩の残雪状態（堆雪状況）を車載LiDAR（Light Detection and Rangingの略：光による検知と測距）を用いて計測し、

- 除雪作業の点検
- 除雪した残雪量とその場所

を定量的に評価するシステムの構築を目指して以下の取り組みを実施した。

- Velodyne 社製の VLP-16（車載 LiDAR）と Robot Operating System(Ros)からなる道路・周辺状況計測システムのプロトタイプを構築
- プロトタイプシステムによる堆雪・積雪状況の計測実験の実施
- 計測実験結果によるプロトタイプシステムの計測性能評価

その結果、車速 30km/h 以下の計測環境下において、プロトタイプシステムは誤差 4cm（実測値との比較）で堆雪高さを LiDAR 計測できる可能性を確認した。また、断面形状に関して SfM 手法と同程度結果が期待できることを確認した。

本事業により、非測量目的の車載 LiDAR（測距誤差 3cm）を用いた道路およびその周辺の残雪（堆雪・積雪）状況を面的かつ定量的に記録するシステムが安価に実現できることが確認された。なお道路およびその周辺の残雪堆雪・積雪状況を網羅的にマッピングするには、GNSS 受信機により取得した車載計測時の LiDAR 位置情報を利用するシステムへプロトタイプシステムを改良することが必要である。

道路・周辺状況計測のプロトタイプシステム

道路・周辺状況計測システムのプロトタイプは、車載 LiDAR, GNSS(Global Navigation Satellite System の略：全球測位衛星システム)受信機そしてノートパソコンというハードウェアと LiDAR が取得した三次元点群データから LiDAR の位置・姿勢を推定し、LiDAR 周辺の環境（道路周辺の堆雪・積雪を含む地物）の三次元地図を生成するソフトウェアから構成される。

車載 LiDAR は、機械回転方式の走査型 LiDAR である Velodyne 社製の VLP-16 とした。VLP-16 は 16 個のレーザーと検出器を持ち、それらが 5~20Hz（本研究では 10Hz）で回転しながら三次元の点群データを取得する（表 1）。

GNSS 受信機を VLP-16 のインターフェースボックスに接続し、これらが LAN 経由で PC と通信することで、VLP-16 の制御とデータ記録する。これが、プロトタイプの概要である。VLP-16 の姿勢を計測す

表 1 VLP-16 の諸元¹⁾

距離測定方式	TOF
測定距離	100 m
測定範囲	水平: 360°, 鉛直: 30°(+15°~-15°)
角分解能	水平: 0.1°~0.4°, 鉛直: 2°
測定精度	±3 cm
レーザ波長	905 nm

るセンサは未使用である。

三次元地図を生成するソフトウェアには、Zhang ら²⁾が提案した SLAM 技術の Lidar Odometry and Mapping（以降、LOAM と呼ぶ）の実装である loam_velodyne³⁾を使用する。LOAM は GNSS や IMU（Inertial Measurement Unit：慣性計測装置）の情報を利用せずとも、LiDAR のみでリアルタイムで三次元地図を生成するデータマッピング手法である。

LiDAR 計測実験

プロトタイプシステムの道路周辺の堆雪・積雪状況計測の性能を評価するため、平成30年12月21日から23日に計測実験を実施した。実験場所は、LiDAR 計測時の人・自動車の往来が少なく、道路除雪による堆雪が見込まれ、計測協力が得られた福島県耶麻郡北塙原村桧原の休暇村裏磐梯ホテルのエントランス周辺とした。

VLP-16 を自動車（日産セレナ）の屋根に固定した吸盤式三脚に取り付け（図1）、エントランス前のロータリへ接続する直線区間（図2の点 B が起点）を取付角 0,5,15 度、車速約 30km/h で LiDAR 計測した。

また、車載計測時の比較対象として、伸縮ポール先端に VLP-16 を固定し、これを手持ち状態にロータリ周辺を移動させ（図3）道路・路肩の堆雪・積雪を LiDAR 計測した（図2の点 A が起点）。

LiDAR 計測結果と比較する情報として、堆雪高・積雪深の実測（点計測）と SfM 計測（面計測）を実施した。



図1 車載時の VLP-16

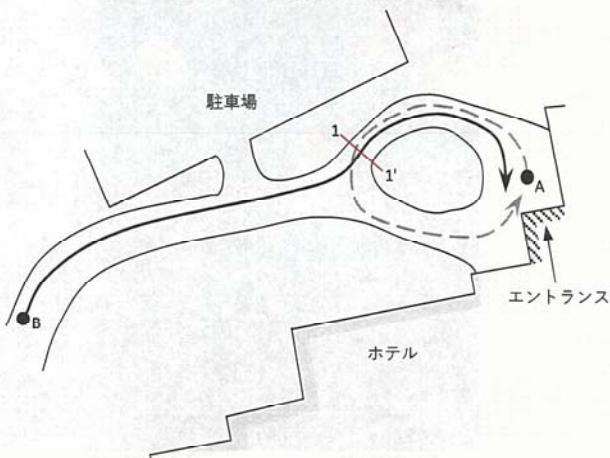


図2 LiDAR 計測コース



図3 手持ち計測時の様子

三次元点群の生成

LiDAR 計測で取得した三次元点群を前述の loam_velodyne で処理し、エントランス周辺の三次元地図を生成した。計測ごとに三次元地図の原点が異なり、LiDAR の取付角に応じて水平面が傾く。そこで、これらを補正し、水平面と X-Y 平面が平行かつ三次元地図の原点を統一する処理を実施した。

生成した三次元地図の一例を図 4、エントランス・ロータリ周辺の様子を図 5 に示す。両

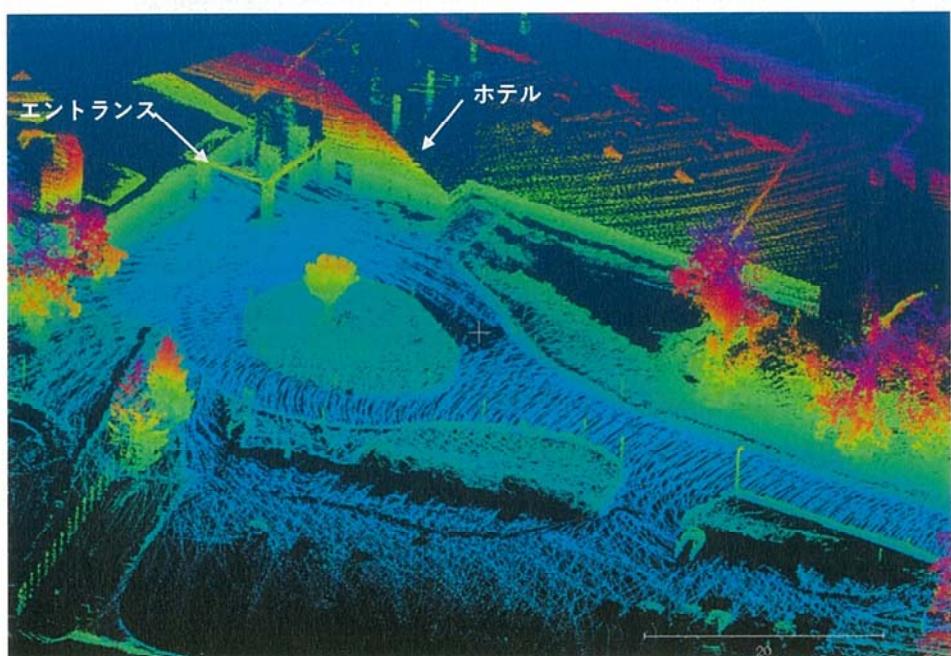


図 4 LOAM で出力した三次元点群の例



図 5 エントランス・ロータリ周辺の堆雪・積雪状況（エントランス付近から直線道路を見込む方向）

者を見比べると道路周辺の無雪状況が三次元地図上で十分再現されていることが分かる。また三次元地図上で路肩に設置されたスノーポール（直径 3cm）が明瞭に確認できる。

実測堆雪高との比較

スノーポール周辺で雪面が平坦な領域を選択し、実測した堆雪高さと LiDAR 計測した堆雪高（以降、LiDAR 堆雪高）を比較した（図 6）。取付角度の違いにより若干変動するものの、両者の間に正の相関があることが見て取れる。この時の RMSE は最大で 4cm であった。ただ全体として LiDAR 堆雪高が実測値よりも低い傾向が見て取れ、系統的な計測誤差の存在が考えられる。

積雪深（堆雪高）の分布（断面形状）

カーボンポール先端に吊り下げたカメラ（高さ約 4m）から空撮した雪面の写真データから SfM 手法により積雪面の三次元点群を生成した。これと LiDAR 計測により生成した三次元点群において、図 2 中の 1-1' 断面形状の整合性を比較した。取付角 0 度の三次元点群は道路上の空中に本来存在しない点が出力されているため、断面形状の比較対象から除外した。結果を図 7 と表 2 に示す。表 2 中の相関係数は、SfM 手法で求めた断面形状と LiDAR 計測した断面形状の変化傾向の一一致度合いを示している。また MAD は両断面デ

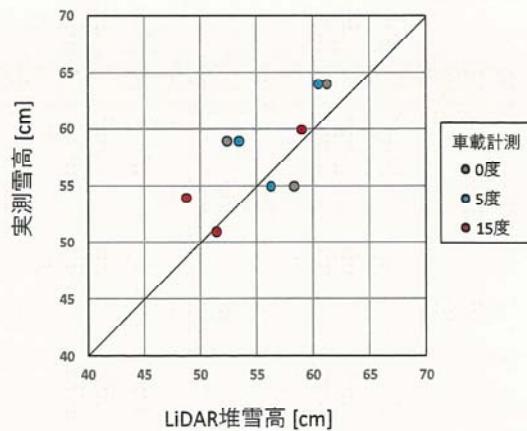


図 6 堆雪高の比較

表 2 断面形状の整合性

	断面 1-1'	
	相関係数	MAD (cm)
手持ち(5度)	0.998	2.4
車載(5度)	0.992	2.6
車載(15度)	0.865	5.5

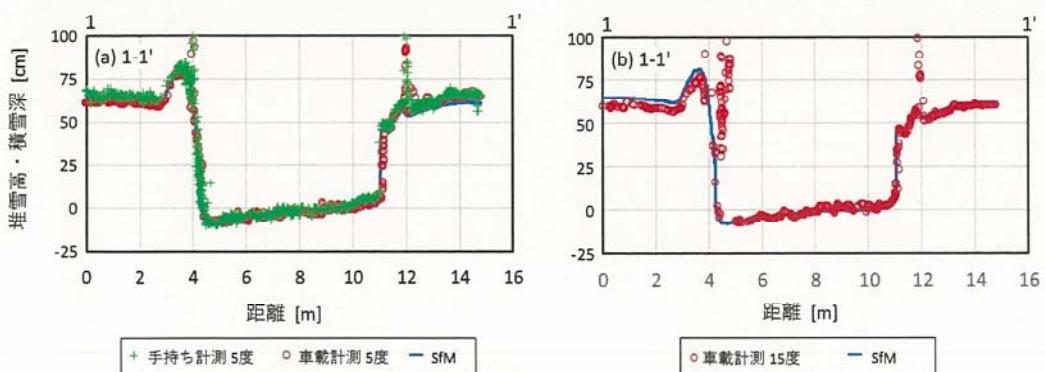


図 7 断面形状の比較

ータの高さの平均的な差を表している。図7、表2より、手持ち5度、車載5度の計測ではSfM手法の断面形状との整合性が高い(MAD3cm以下)ことがわかる。一方、車載15度ではそれより一致度が若干低く、高さの平均的な差が大きくなつた。これはSfMとLiDAR計測日の違いにより、断面測線上の物体が移動したことが原因である。

まとめ

除雪作業前後の路面(道路)およびその周辺(路肩)の残雪状態を継続的にモニタリングするシステムのプロトタイプを車載LiDAR(Velodyne社製VLP-16)を用いて構築した。そして、自動車に搭載したプロトタイプシステムにより、道路・路肩の積雪計測を実施し、堆雪高および堆雪・積雪の断面形状に関して、プロトタイプシステムの計測性能を評価した。その結果、車速30km/h以下の計測環境下において堆雪高の計測誤差は4cmであった。また断面形状の再現性はSfM手法と同程度であることを確認した。

本事業では、計測時の自動車速度が30km/h程度と低速であった。また計測時の天候は晴れもしくは曇りであった。道路パトロールと併せて積雪計測する運用形態を考えると、自動車速度40km/h以上や降雪時・降雨時における堆雪高・積雪深の計測性能の評価が必須である。また道路およびその周辺の残雪堆雪・積雪状況を網羅的にマッピングするには、GNSS受信機により取得した車載計測時のLiDAR位置情報を利用するシステムへプロトタイプシステムを改良することが必要である。

参考文献

- 1) Velodyne : VLP-16 Datasheet(Rev-A),2015
- 2) J. Zhang and S. Singh : LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time. Robotics: Science and Systems Conference (RSS). Berkeley, CA, July 2014.
- 3) Leonid Laboshin:loam_velodyne, https://github.com/laboshinl/loam_velodyne(2018年1月5日アクセス)