

(37) 複数 LiDAR を用いた車両搭載型センシングユニットの自己位置補正手法に関する研究

塚田 義典¹・中原 匡哉²・梅原 喜政³・西田 義人⁴・
窪田 諭⁵・田中 成典⁶・川崎 悠史⁷・佐野 龍太⁸・
田中 剛⁹・大月 庄治¹⁰・稲見 麻央¹¹・平 謙二¹²

¹正会員 摂南大学准教授 経営学部 (〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17-8)
E-mail: yoshinori.tsukada@kjo.setsunan.ac.jp

²正会員 大阪電気通信大学講師 総合情報学部 (〒575-0063 大阪府四條畷市清滝1130-70)
E-mail: nakahara@oecu.jp

³正会員 摂南大学講師 経営学部 (〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17-8)
E-mail: yoshimasa.umehara@setsunan.ac.jp

⁴非会員 金沢工業大学講師 基礎教育学部 (〒921-8501 石川県野々市市扇が丘7-1)
E-mail: nishita@neptune.kanazawa-it.ac.jp

⁵正会員 関西大学教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

⁶正会員 関西大学教授 総合情報学部 (〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町2-1-1)

⁷学生会員 関西大学大学院 総合情報学研究科 (〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町2-1-1)

⁸非会員 株式会社エイト日本技術開発 (〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)

⁹正会員 株式会社社長大 (〒111-0041 東京都台東区元浅草2-6-6)

¹⁰学生会員 株式会社日本インシーク／関西大学大学院 総合情報学研究科
(〒541-0054 大阪市中央区南本町3-6-14／〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町2-1-1)

¹¹非会員 株式会社パスコ (〒556-0017 大阪府大阪市浪速区湊町2-2-45)

¹²正会員 三菱電機エンジニアリング株式会社 (〒102-0073 東京都千代田区九段北1-13-5)

近年、社会基盤の維持管理の高度化及び効率化のために MMS で計測した点群データが利用されている。しかし、費用対効果の観点から、日常点検等での高頻度の利用は難しい。そこで、筆者らは、安価なセンサ機器を組み合わせた車両搭載型センシングユニットを設計、開発してきた。既存研究では、水平と斜めに設置した複数の LiDAR を用いた SLAM による自己位置の推定手法を検討し、誤差要因の調査から高精度化のためのアルゴリズムの考案までを行い、提案手法の一定の有用性を確認した。ただし、提案手法では、斜めに設置した LiDAR の計測範囲が狭いことから類似した点群データを連続的に取得してしまい、自己位置の推定精度が低下する課題が残った。そこで、本研究では、水平に設置した LiDAR より推定した自己位置を用いて、斜めに設置した LiDAR の自己位置の補正手法を提案する。

Key Words : mobile mapping system, sensing unit, laser scanner, point cloud data, SLAM

1. はじめに

近年、少子高齢化と高度経済成長期に施工されたインフラ構造物の老朽化が急速に進みつつあり、将来を見据えた適切かつ効率的な維持管理が求められている。道路

分野では、道路周辺施設の管理や路面性状調査をはじめとした維持管理業務に MMS (Mobile Mapping System) が導入されている。しかし、市販の MMS は非常に高価であるため、全国の地方公共団体への導入や高頻度な利用が困難である。そのため、国土交通省では、安価な機

器を用いた車両搭載センシング技術の確立²⁾を検討している。

こうした背景のもと、筆者らは、安価なセンサ機器を組み合わせた車両搭載型センシングユニット³⁾を製作し、大学キャンパスや一般道を対象に計測実験を行い、その実用可能性を検証してきた。その結果、GNSS (Global Navigation Satellite System) のFix解が得られる地点では、搭載している各センサ機器のカタログスペックの範囲内の精度で点群データを生成できることを確認した。ただし、両側に14m以上の高さの高層構造物がある環境下では、GNSSのFix解を得ることができず、カタログスペックの範囲内の精度で点群データを生成できない課題があった。この課題に対して、既存研究^{4,5)}では、衛星測位に依らず自己位置を推定するSLAM (Simultaneous Localization And Mapping)⁶⁾技術を試行した。そして、植生等の映り込みやLiDARの設置方法がSLAMの自己位置推定精度に影響を与える誤差要因であることを明らかにし、植生等を除去することで自己位置を補正する手法を提案した。このとき、LiDARは斜めと水平に設置した。斜めは、高架橋や高層ビルのような高層構造物を計測することを目的に設置した。水平は、SLAMによる自己位置推定に必要な特徴を十分に取得するため、全方向に対して広域の点群データを計測することを目的に設置した。その結果、水平にLiDARを設置した方が安定して自己位置を推定し、植生等を除去することでより高精度な点群データを生成できることがわかった。しかし、斜めにLiDARを設置した場合、連続する計測地点間の点群データが同一形状のときに自己位置推定精度が低下する課題があった。ただし、一方のLiDARだけでは計測できない範囲をもう一方のLiDARは計測できている。このことから、周辺環境を網羅的に計測するためには、設置角度の異なる複数のLiDARの点群データを正確に重畳する必要がある。そのため、斜め設置のLiDARの自己位置を補正し、生成した点群データが必要であることが示唆された。

そこで、本研究では、推定した水平設置のLiDARの自己位置を用いて斜め設置のLiDARの自己位置を補正し、点群データを生成する手法を提案する。

2. 提案手法

提案手法の処理フローを図-1に示す。提案手法は、時刻同期処理、自己位置推定処理と自己位置補正処理により構成される。入力データは、水平に設置したLiDARの点群データ、斜めに設置したLiDARの点群データと、それぞれに付随しているGNSSから取得した時刻情報(以下、GNSS時刻)である。出力データは、自己位置

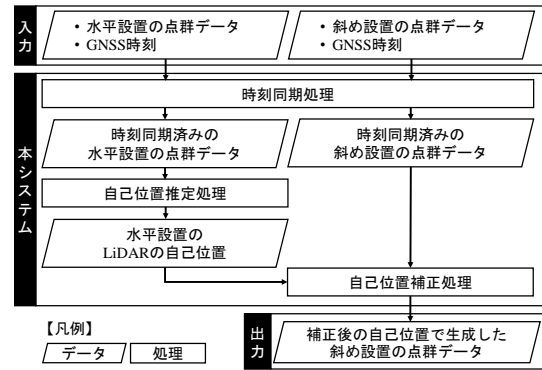


図-1 処理の流れ

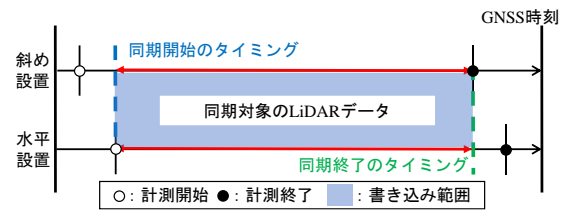


図-2 時刻同期処理

を補正し、生成した点群データとする。

(1) 時刻同期処理

本処理の流れを図-2に示す。本処理では、水平に設置したLiDARで計測した点群データ(以下、水平設置の点群データ)と斜めに設置したLiDARで計測した点群データ(以下、斜め設置の点群データ)の開始時刻と終了時刻を同期する。まず、LiDARの点群データを読み込み、それぞれの開始と終了のGNSS時刻を取得する。次に、開始時刻が遅い設置方法の開始時刻を開始のタイミング、終了時刻が早い設置方法の終了時刻を終了のタイミングとして設定する。そして、前述に記した開始と終了のタイミングの範囲にあるLiDARのデータを時刻同期済みの点群データとして出力する。

(2) 自己位置推定処理

本処理では、時刻を同期した水平設置の点群データからFLOAM (Fast LiDAR Odometry And Mapping)⁷⁾を用いて自己位置を推定する。本手法は、点群データからエッジ点や平面上の点を特徴点として抽出し、連続地点間の共通の特徴点を位置合わせすることで自己位置を推定する。また、計算コスト削減のため、非反復的に2段階で歪みを補正することで、点群データ全体の特徴の一致が重視されている。

(3) 自己位置補正処理

本処理では、自己位置推定処理により推定した水平設置の自己位置を用いて斜めに設置したLiDARの自己位置

置を補正し、点群データを生成する。まず、斜め設置の LiDAR の自己位置を推定した水平設置の LiDAR の自己位置に置換する。次に、斜め設置の LiDAR の原点を中心に、時刻同期済みの斜め設置の点群データを回転、平行移動する。最後に、自己位置を補正し、生成した斜め設置の点群データとして出力する。

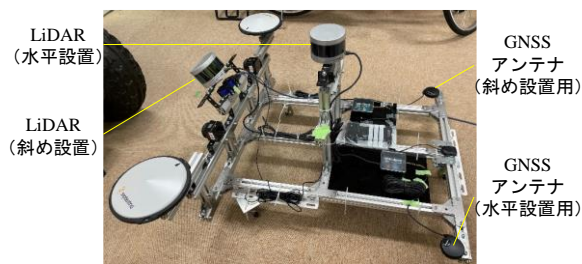


図-3 既存研究⁵⁾で製作した車両搭載型センシングユニット

3. 実証実験

本実験では、既存研究⁵⁾と同様に図-3 に示す車両搭載型センシングユニットで計測した道路空間を対象に提案手法の有用性を確認する。

(1) 実験概要

本実験では、都市空間を想定した周辺環境が異なる 3 地点において、以下の 3 つの点群データを最確値と比較することで提案手法の有用性を評価する。

- 水平設置の点群データに FLOAM を適用して生成した点群データ
- 斜め設置の点群データに FLOAM を適用して生成した点群データ
- 提案手法により生成した斜め設置の点群データ

(2) 実験条件

本実験では、図-4 に示す関西大学高槻キャンパス内を計測した点群データを用いて評価する。計測現場は、路肩に並木道がある道路（以下、パターン 1）、片側 2 車線以上の大通り（以下、パターン 2）、都市部の片側 1 車線の小道（以下、パターン 3）を想定して選定した。計測時の車両の走行速度は、計測現場の制限速度である時速 20km とし、一定の速度で走行した。車両搭載型センシングユニットには Velodyne 社の VLP-16 HiRes を 2 台搭載した。本機器の計測精度のカタログスペックは 3cm であり、計 16 本のレーザ測線で水平全方位に 360 度、垂直視野に 20 度の範囲を計測できる。それぞれの LiDAR の設置角度は、斜め設置は 30 度、水平設置は 0 度とした。

最確値に用いる地上設置型レーザスキャナは、PENTAX 社の S-3180 とした。提案手法により生成した点群データの精度は、各計測現場内にある建造物の壁面の横幅や高さを最確値と比較して評価する。また、生成した点群データの平坦性や密度を確認するため RMS 値と密度を評価する。

(3) 結果と考察

パターン 3 における生成した斜め設置の点群データの可視化結果例を図-5、各手法により生成した点群データ

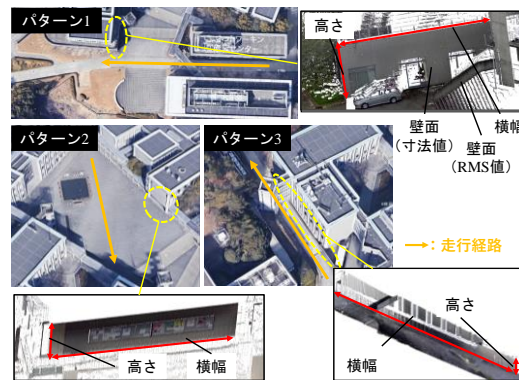


図-4 計測現場と評価対象地物

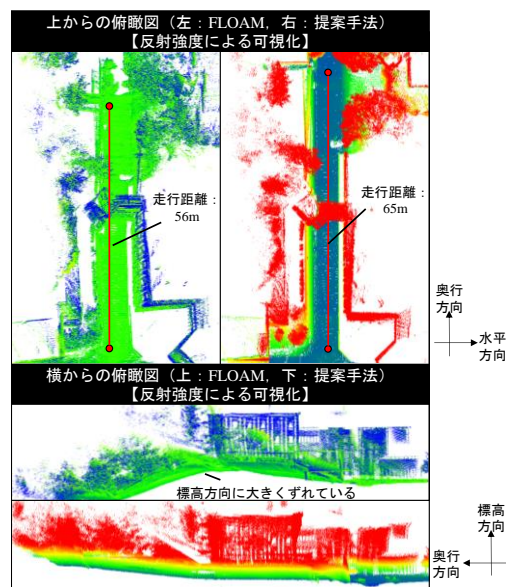


図-5 生成した斜め設置の点群データの可視化結果例

の精度を表-1 に示す。表-1 の壁面の寸法値を確認すると、パターン 1 の横幅と高さ、パターン 2 の高さ、パターン 3 の横幅は、斜め設置の点群データに FLOAM を適用して生成した点群データより、提案手法を用いて生成した斜め設置の点群データの方が高精度な傾向が見られた。特に、パターン 3 の横幅は提案手法の導入により大幅な精度向上が確認できた。また、図-5 の可視化結果を確認すると、標高方向の大きなずれを改善できていることがわかった。ただし、パターン 3 の横幅は 0.135m の誤差が発生している。これは、パターン 3 の計測現場が連続し

表-1 生成した点群データの精度

パターン	LiDARの設置方法	処理内容	壁面の寸法値 (m)						RMS値 (m)		密度 (点/m ²)
			推定結果		最確値		最確値との差		地面	壁面	地面
			横幅	高さ	横幅	高さ	横幅	高さ			
1	水平	FLOAM	14.340	5.715	14.382	5.739	0.042	0.023	0.015	0.042	227
	斜め	FLOAM	14.348	5.154			0.033	0.585	0.014	0.037	1087
		提案手法	14.500	5.182			0.014	0.557	0.017	0.059	1029
2	水平	FLOAM	11.860	2.864	11.756	2.886	0.104	0.022	0.088	0.056	510
	斜め	FLOAM	11.701	2.821			0.055	0.065	0.023	0.050	1016
		提案手法	11.848	2.846			0.092	0.040	0.047	0.141	914
3	水平	FLOAM	44.801	2.805	44.735	2.790	0.066	0.014	0.059	0.035	480
	斜め	FLOAM	37.523	2.623			7.211	0.167	0.022	0.261	1005
		提案手法	44.600	2.533			0.135	0.257	0.031	0.032	1121

赤太字：提案手法の方が3cm以上精度が高い箇所 白字：FLOAMの方が3cm以上精度が高い箇所

黒字：FLOAMと提案手法の精度の差が3cm未満の箇所

た計測地点間で計測データが同一形状となる環境であり、移動量を推定するための手掛かりとなる特徴が少ないためであると考えられる。一方、パターン1の横幅と高さ、パターン2の高さは、1.9cm、2.8cm、2.5cmとなっており、LiDARのカタログ精度の範囲内である。ただし、パターン3の高さに関しては、提案手法の方が精度が低下した。これは、斜め設置のLiDARは壁面に対する計測範囲が狭く、走行位置から近い壁面の標高方向の全形を計測することが困難なためと考えられる。これに対しては、水平設置の計測データを併用し、補完し合うことでより高精度化可能か確認する必要がある。

次に、RMS値を確認すると、パターン2の壁面において提案手法の方が大幅に精度が低下した。これは、評価対象とした地物が走行位置から25m程度離れているためと考えられる。一般的に、レーザスキャナでは遠方ほど計測精度が低下しやすい特性がある。そのため、精度の低い遠方の計測点を除去するような距離のフィルタリングを前処理として行うことで高精度化が期待できる。

最後に、地面の密度を確認すると、提案手法と斜め設置の点群データにFLOAMを適用して生成した点群データでは大きな変化は見られなかった。また、水平設置に比べて斜め設置の点群データの方が高密度な傾向が見られた。これは、斜め設置の方がLiDARを地面に向けて垂直に近い角度で照射しているためであると考えられる。これらのことから、広域かつ高密度な点群データを生成するためには、両LiDARの点群データを重畳する必要があると考えられる。

4. おわりに

本研究では、水平設置のLiDARから推定した自己位置を用いて、斜め設置のLiDARの自己位置を補正し、点群データを生成する手法を提案した。そして、実証実

験の結果より、提案手法の有用性を確認できた。

今後は、一般道で計測した点群データを対象に同様の検証実験を行うことで提案手法の汎用性を確認する。また、提案手法により生成した斜め設置の点群データと水平設置の点群データを重畳することで広域の点群データを生成し、その網羅性と精度を確認する。そして、3台以上のLiDARを設置した場合においても提案手法により、自己位置を補正し、高精度な点群データを生成可能か確認する。

謝辞：本研究を取りまとめるにあたり、関西大学携帯型3次元センシング技術研究会の各氏から貴重なご意見を賜った。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 西川啓一, 瀧口純一, 石川貴一郎: 高精度GPS移動計測装置三菱モービルマッピングシステム(MMS)、画像ラボ, Vol.22, No.1, pp.74-81, 2011.
- 2) 国土交通省: 車両搭載センシング技術を活用した道路基盤地図データの収集実験の開始について、<<https://www.mlit.go.jp/common/001157623.pdf>>, (入手2022.6.1)。
- 3) 窪田諭, 塚田義典, 梅原喜政, 中原匡哉, 田中成典: 車両搭載型センシングユニットの設計・製作と計測実験による評価, 土木学会論文集F3(土木情報学), Vol.77, No.2, pp.II_58-II_67, 2021.
- 4) 塚田義典, 梅原喜政, 中原匡哉, 田中成典, 窪田諭, 川崎悠史: 特徴点抽出によるMMSの自己位置補正に関する研究, 情報処理学会全国大会講演論文集, Vol.83, No.4, pp.33-34, 2021.
- 5) 塚田義典, 梅原喜政, 中原匡哉, 西田義人, 窪田諭, 田中成典, 川崎悠史: 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.
- 6) Wang, H., Wang, C., Chen, C. and Xie, L.: F-LOAM: Fast LiDAR Odometry and Mapping, *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2020.