(36) MMS 点群の位置合わせに関する一考察

塚田　義典[1]・梅原　喜政[2]・中原　匡哉[3]・西田　義人[4]・
清水　則一[5]・田中　成典[6]・大上　航平[7]・田中　剛[8]・
平野　順俊[9]・稲見　麻央[10]・西田　大輔[11]

[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　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

[3]正会員　大阪電気通信大学講師　総合情報学部（〒575-0063 大阪府四条畷市清滝 1130-70）
E-mail: nakahara@oecu.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]非会員　関西大学　先端科学技術推進機構（〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35）
E-mail: nshimizu@yamaguchi-u.ac.jp

[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）
E-mail: tanaka@res.kutc.kansai-u.ac.jp

[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）
E-mail: k070620@kansai-u.ac.jp

[8]正会員　株式会社長大（〒111-0041 東京都台東区元浅草 2-6-6）
E-mail: tanaka-g@chodai.co.jp

[9]正会員　株式会社日本インシーク（〒541-0054 大阪市中央区南本町 3-6-14）
E-mail: hirano059@insiek.co.jp

[10]非会員　株式会社パスコ（〒556-0017 大阪府大阪市浪速区湊町 1-2-3）
E-mail: miamoa6678@pasco.co.jp

[11]非会員　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）
E-mail: Nishida.Daisuke@ma.mee.co.jp

近年，様々なレーザ計測機器が普及し，容易に点群を計測することが可能となっている．こうした背景のもと，我が国では，ICT を用いて建設現場の生産性を向上させるための取り組みとして i-Constrcution を目指し，点群の利活用を推進している．このように，点群が蓄積する中で，過去の点群を最新の点群に置き換え，保有する点群の鮮度を最新に担保する技術が求められている．道路分野で一般的な MMS では，点群を計測する際に GNSS 衛星の電波を受信し，グローバル座標系で点群を取得する．しかし，GNSS 衛星の電波受信状況に左右され，位置誤差が発生する課題がある．そこで，本研究では，MMS で計測した点群を深層学習を用いてロバストに位置合わせする技術を提案する．

Key Words: *maintenance, mobile mapping system, point cloud data, registration, deep learning*

1. はじめに

近年，地上設置型レーザスキャナ，航空レーザや Mobile Mapping System （以下，MMS）[1)]など様々な計測方法の普及に伴い，容易に点群を計測することが可能となった．特に，国土交通省では，3 次元点群を活用して建設現場の生産性向上を目指す i-Construction[2)]を推進しており，全国各地で点群が計測・蓄積されている．このように，点群が蓄積され

る中で，過去に取得した点群を最新の点群に効率的に置き換え，保有する点群の鮮度を最新に担保する技術が求められる．道路分野では，自動車にレーザ計測機器，GNSS（Global Navigation Satellite System）や IMU（Inertial Measurement Unit）などの各種機器を搭載した MMS が用いられ，街中の点群を網羅的かつ効率的に取得できる．しかし，MMS により計測した点群（以下，MMS 点群）には，GNSS 衛星の電波受信状況に応じて位置誤差が生じる課題がある．その結果，同一箇所を異なる時期に計測した点群には，トラジェクトリ間に誤差が生じる．そのため，GNSS 衛星の電波受信状況が悪化する環境においては，計測現場に調整点を設置して，点群を調整する．しかし，調整作業には，多大な労力や時間がかかる課題がある．

こうした背景のもと，点群の座標系を統一する位置合わせ手法が提案されている．既存研究では，代表的手法である ICP（Iterative Closest Point）[3] アルゴリズムや平面交線を用いて MMS 点群の位置合わせを行う研究 [4] がなされており，計測範囲の異なる点群同士の位置合わせに対し一定の有用性を示している．一方，近年では，深層学習を用いる手法も登場しつつある．しかし，著者らが調査した範囲において，MMS 点群への適用性は明らかになっていない．

そこで，本研究では，深層学習を用いて，MMS で計測した旧時期の点群（以下，旧点群）と一定期間を設けて同一地点を再計測した点群（以下，新点群）に適用可能な位置合わせ手法を考案し，その精度や課題について考察する．

2. 点群位置合わせアルゴリズム

本研究では，異なる二時期に計測され，一方の計測範囲が他方を内包しており，かつおおよその位置は一致しているものの，わずかに平行移動や回転を伴うズレが生じている点群の位置合わせを想定する．

提案手法の処理フローを図-1 に示す．提案手法は位置合わせモデル構築機能と点群位置合わせ機能で構成される．

(1) 位置合わせモデル構築機能

本機能では，深層学習による点群の位置合わせ技術である Deep Global Registration（以下，DGR）[5] に着目した．DGR には，屋内と屋外を対象とした学習済みの位置合わせモデルが存在するが，点密度が低く，広範囲な点群を想定している．そのため，本研究では，MMS 点群に特化したモデルを構築する．

a) 学習データ生成処理

本処理では，位置合わせ前の MMS 点群を用いて，位置合わせモデルを構築するための学習データを生成する．まず，同一地点を計測した 2 点群に対して ICP を用いて位置合わせする．次に，図-2 に示すとおり，位置合わせ済みの 2 点群から，15m 四方の矩形で点群を抽出する．このとき，図中黄色枠と赤枠で示すとおり，サイドラップ率が 50%になるように 2 つの矩形を抽出し，学習データのペア点群とする．この作業を抽出位置をシフトさせながら繰り返し実行し，必要十分な学習データ数を確保する．最後に，2 点群から地物が多く含まれる同一箇所を計測した地点を目視で選定し，学習データを洗練する．

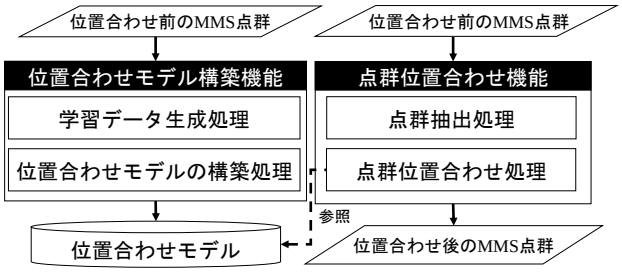


図-1 提案手法の処理フロー

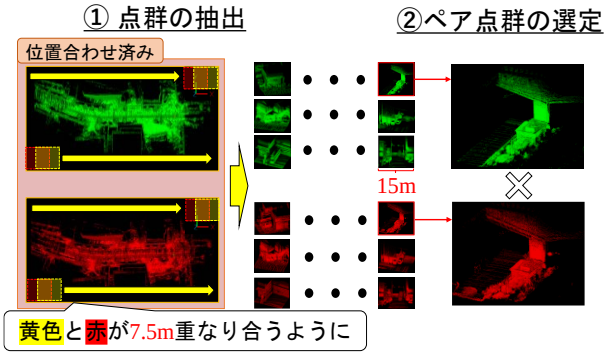


図-2 学習データ生成処理

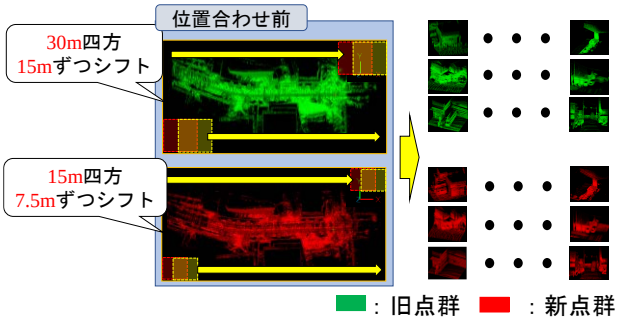


図-3 点群抽出処理

b) 位置合わせモデルの構築処理

本処理では，学習データ生成処理にて，抽出した MMS 点群を用いて位置合わせモデルを構築する．学習データのサイズやマシンスペックに応じて，主にボクセルサイズ，エポック数，バッチサイズのハイパーパラメータを調整する．

(2) 点群位置合わせ機能

本機能では，位置合わせモデルを用いて位置合わせ後の MMS 点群を出力する．

a) 点群抽出処理

本処理では，図-3 に示すとおり，位置合わせ前の 2 点群から位置合わせ対象の点群を抽出する．まず，

旧点群からは，30m 四方の矩形で 15m ズラして抽出する．次に，新点群からは，15m 四方の矩形で 7.5m ズラして抽出する．これは，片方の点群が内包する形で位置合わせを行うことを想定したためである．

b)　点群位置合わせ処理

本処理では，位置合わせモデルを用いて，選定したペア点群を対象に位置合わせを行い，位置合わせ後の MMS 点群を出力する．なお，DGR で推定する座標変換行列は剛体変換のため，スケール変化や変形は生じない．

3.　実証実験

(1)　実験内容

本実験では，大阪府豊中市の 3 つの地点（**図-4**）を対象に，車両搭載型センシングユニット[6]を用いて生成した点群を使用する．この点群は，水平に設置した VLP-16 HiRes[7]のレーザ測量成果を SLAM（Simultaneous Localization And Mapping）技術である FLOAM（Fast LiDAR Odometry And Mapping）[8]に適用して生成されたものである．VLP-16 HiRes の詳細は**表-1** に示すとおりである．計測時の車両の走行速度は時速 40km である．検証には，2022 年 7 月 1 日の走行データから生成した点群（以下，旧点群）と，2022 年 9 月 17 日の走行データから生成した点群（以下，新点群）を用いる．なお，旧点群と新点群を位置合わせモデルの構築と精度評価に用いるため，本実験では，人為的に平行移動と回転を伴う位置ズレを生じさせた．

位置合わせモデルの構築には，3 つの地点から抽出した 156 組のペア点群を使用した．ハイパーパラメータには，エポック数 100，バッチサイズ 1，GPU メモリに展開できる最小のボクセルサイズ 0.125m を設定した．評価データには，各地点から学習データに未使用の 4 組を選出した．位置合わせの精度は，旧点群と新点群から評価用の対応点を 3 組設定し，その対応点間のユークリッド距離で評価する．本実験の動作環境は**表-2** に示すとおりである．

(2)　結果と考察

MMS 点群の位置合わせ結果（**表-3**）より，提案手法は，全地点において 0.100m 以下の誤差で旧点群と新点群を位置合わせできた．地点 2 の平均誤差 0.035m は，VLP-16 HiRes の測定精度±0.030m に近いため良好な結果といえる．特に，**表-3** の地点 2 ペア 1（**図-5**）を確認すると，提案手法の適用前は誤差が 0.519m あるところ，適用後は 0.019m まで軽減できている．計測機器の測定精度が±0.030m であることを考慮すると，高精度に位置合わせができたといえる．同様に，**表-3** の地点 1 ペア 3 の結果（**図-6**）を確認すると，提案手法の適用前は誤差が 0.360m あるところ，適用後は 0.031m まで軽減できている．

一方で，地点 3 ペア 4 の結果（**図-7**）を確認すると，対応する辺の間で 0.184m の誤差が生じている．また，地点 1 ペア 4 の結果（**図-8**）を確認すると，提案手法の適用前は誤差が 0.407m あるところ，適用後は 0.117m まで軽減できたものの，依然として大きな誤差が残存している．この要因を分析したところ，**図-9** に示すとおり，地点 1 ペア 4 と地点 3 ペア 4 は，測定環境下に植栽を多く含まれていることがわかった．一方で，精度が良好な地点 1 ペア 3 と地点 2 ペア 1 は，総点数に対して植栽を含む割合が低く，構造物が占める割合が高いことがわかった．そのため，点群を対象とした地物認識技術（Semantic Segmentation）[9]を用いて，位置合わせ対象の点群から植栽を除去することで精度向上が期待



図-4　計測地点

表-1　VLP-16 HiRes の詳細

性能	詳細
測定精度	±0.030m
測定距離	~100m
測定点数	約 300,000 点/秒

表-2　動作環境の詳細

機器	詳細
CPU	12th Gen Intel(R) Core(TM) i7-12700
GPU	NVIDIA GeForce RTX 3090
RAM	128GB

表-3　MMS 点群の位置合わせ結果

地点	ペア 1（m）		ペア 2（m）		ペア 3（m）		ペア 4（m）		平均（m）	
	適用前	適用後	適用前	適用後	適用前	適用後	適用前	適用後	適用前	適用後
地点 1	0.118	0.041	0.251	0.040	0.360	0.031	0.407	0.117	0.284	0.057
地点 2	0.519	0.019	0.262	0.040	0.202	0.045	0.192	0.046	0.294	0.035
地点 3	0.223	0.061	0.250	0.077	0.562	0.061	0.373	0.186	0.352	0.096

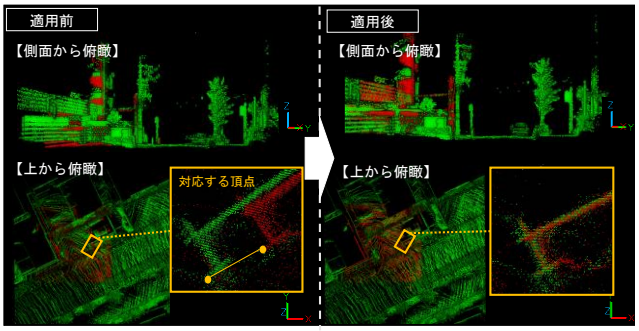


図-5　地点 2 のペア 1 における位置合わせ結果

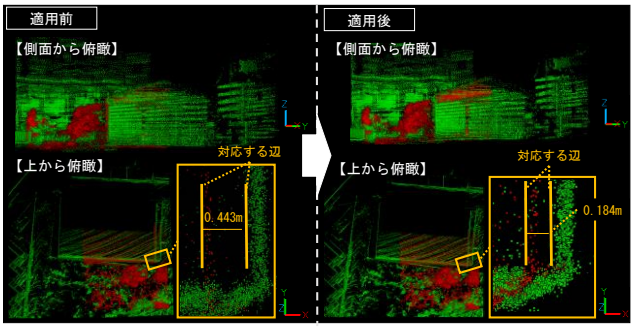


図-7　地点 3 のペア 4 における位置合わせ結果

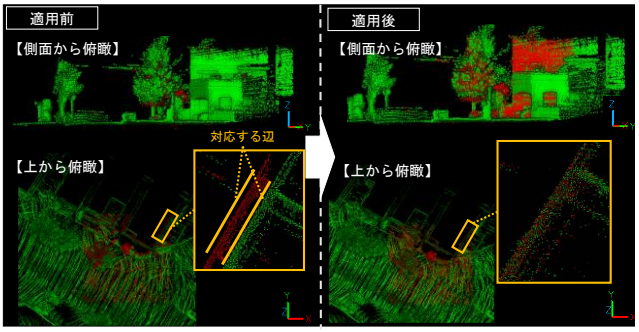


図-6　地点 1 のペア 3 における位置合わせ結果

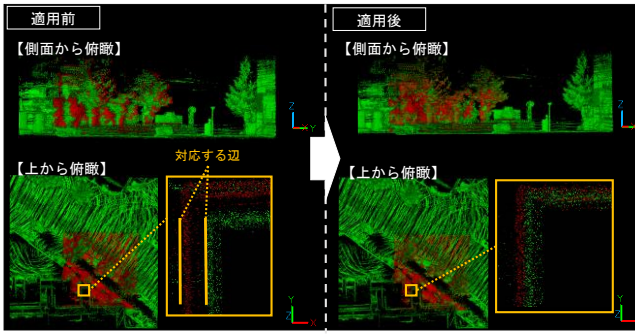


図-8　地点 1 のペア 4 における位置合わせ結果

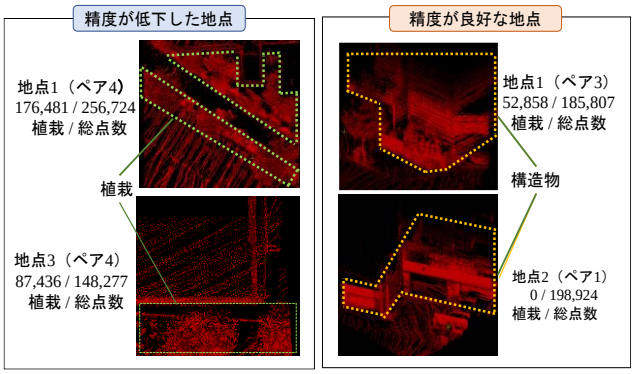


図-9　地点 1 のペア 4 における位置合わせ結果

できると考える．

4.　おわりに

本研究では，異なる時期の MMS 点群から抽出した局所的な点群に対して提案手法を適用し，実証実験により，その有用性を明らかにした．そして，実験の結果，植栽が占める割合が低く，構造物が多く含まれる地点では，計測機器の測定精度に近い精度で位置合わせできることを確認した．

今後は，計測範囲が異なる MMS 点群や異なる計測機器で取得した点群同士の位置合わせへの適用可能性を検証する予定である．また，精度の高い結果の座標変換行列を抽出元の点群に適用することで，広域な MMS 点群にも適用可能かを検証する．

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) 三菱電機：三菱モービルマッピングシステム高精度 GPS 移動計測装置，<https://www.mitsubishielectric.co.jp/mms/pdf/mms.pdf>，（入手 2023.6.5）．
2) 国土交通省：i-Construction，<http://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html>，（入手 2023.6.5）．
3) Rusinkiewicz, S., and Levoy, M.: Efficient Variants of the ICP Algorithm, *IEEE Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp.145-152, 2001.
4) 北川悦司，加藤諒，安彦智史，吉永京平，津村拓実：平面交線を用いた 3 次元点群データの位置合わせ手法の開発，情報処理学会論文誌，61 巻 1 号，pp.49-59，2020.
5) Christopher, C., Wei, D. and Vladlen, K.: Deep Global Registration, *IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.2514-2523, 2020.
6) 塚田義典，中原匡哉，梅原 喜政，西田 義人，窪田論，田中成典，川﨑悠史，佐野龍太，田中剛，大月庄治，稲見麻央，平 謙二：複数 LiDAR による車両搭載型センシングユニットを用いた事故位置補正と広域点群データの生成に関する研究，土木学会論文集，79 巻 22 号，pp.22-22018，2023.
7) Wang, H., Wang, C., Chen, C. and Xie, L.: F-LOAM: Fast LiDAR Odometry and Mapping, *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2020.
8) アルゴ：全方位 3D-Lidar センサー，<https://www.argocorp.com/cam/special/Velodyne/common/pdf/VLP-16.pdf>，（入手 2023.6.5）．
9) Boulch, A.: ConvPoint: Continuous Convolutions for Point Cloud Processing, *Computers and Graphics*, Vol.88, pp.24-34, 2020.