

カメラ点群とレーダ距離点群との ICP 位置合わせ利用の一考察

Consideration of ICP matching use between camera reconstruction point cloud and radar's range point cloud for visual inspection

石澤 満[†] 三浦 勝吏[‡] 浜尾 和秀[†]
Ishizawa Mitsuru Miura Masashi Hamao Kazuhide

1. はじめに

近年、高度経済成長期に建設された橋梁やトンネル等社会インフラの老朽化が問題となっている。それに伴い、社会インフラの点検業務が必要であるが、少子高齢化により日本の労働人口は減少し続けており、今後のインフラ点検業務の労働力不足が懸念されている。そのため、インフラ点検の効率化が求められている。筆者らは、インフラ点検業務の効率化のため、カメラとレーダの融合による3次元構造復元システム^{[1][2]}(以降、3次元復元システムと称す)を開発した。3次元復元システムは、光学単眼カメラを用いた REMODE^[3]により得られた特徴点に対し、ミリ波レーダから得られた複数の距離値を融合させ、構造物を3次元復元するシステムである。

3次元復元システムの実用化に向けた課題は、カメラから得られる点群(以降、カメラ点群と称す)及びレーダから得られる点群(以降、レーダ距離点群と称す)の位置合わせの自動化である。現状、カメラから得られた点に対し、レーダで得られた距離値を手動で複数点融合させ、カメラ点群に寸法を与えている^[2]。実用化に向け、寸法を持たないカメラ点群に自動で寸法を与える必要があり、位置合わせ手法の利用を検討している。位置合わせ手法には、ICP(Iterative Closest Point)アルゴリズム^{[4][5][6]}や NDT(Normal Distribution Transform)アルゴリズム^[7]等が広く用いられている。ICP アルゴリズムとは、入力として与えられた2つの点群の各点における距離が最小となる、平行移動及び回転を推定し、位置合わせを自動で行うアルゴリズムである。ICP アルゴリズムの特徴は位置合わせ精度が比較的高いことである。一方、NDT アルゴリズムは探索空間をボクセルに分割し、各ボクセル内の点群から正規分布を計算し、もう一方の点群とのマッチング、収束計算を行う。NDT アルゴリズムは、ICP アルゴリズムと比較し、計算量が少ないという特徴がある。

本提案手法では、精度の高い位置合わせが可能な ICP アルゴリズムを使用し、カメラ点群とレーダ距離点群の位置合わせを行った。併せて、位置合わせ後の点群の寸法測定により、位置合わせ後の点群の寸法に対するレーダ距離分解能の影響について確認した。

2. 提案手法

カメラ点群とレーダ距離点群との位置合わせは以下の手順で行う。各手順の詳細は後記する。

[†] 福島県ハイテクプラザ Industrial Technology Institute
Fukushima Prefectural Government

[‡] 福島県ハイテクプラザ南相馬技術支援センター
Industrial Technology Institute Fukushima Prefectural
Government Minamisouma Technical Support Centre

STEP1: カメラ、レーダによる点群構築
STEP2: カメラ点群前処理
STEP3: 位置合わせ(剛体変換)
STEP4: スケール合わせ(剛体変換、相似変換)

2.1 カメラ、レーダによる点群構築(STEP1)

図 1 のとおり木製のブロックを組み合わせ、対象物を構築した。図 2 に光学単眼カメラで取得した3次元点群を示す。また、図 3(a)、(b)のとおり、ミリ波レーダを x、y 方向に 5[mm]ずつ移動させ、ミリ波レーダ方位方向の中心部(約 28[deg])の反射点(対象物までの距離)を記録した。ミリ波レーダで取得した点群を図 4(a)に示す。

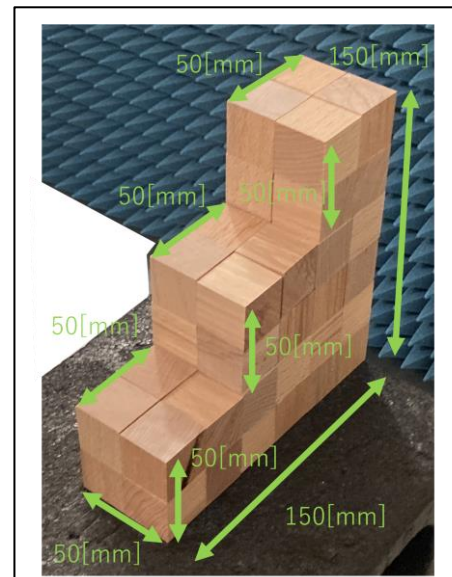
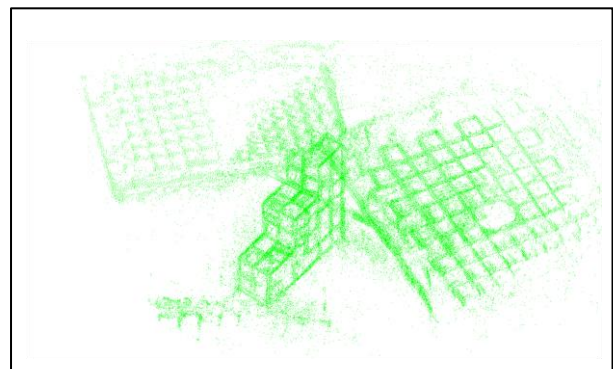
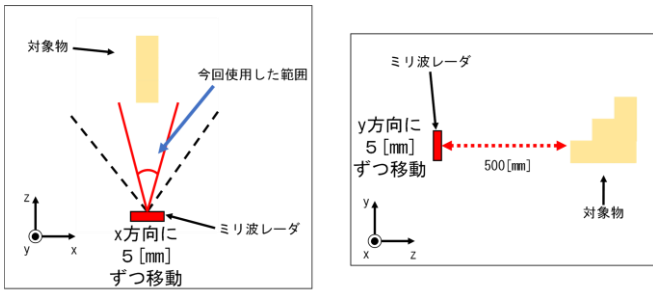


図 1 対象物の寸法

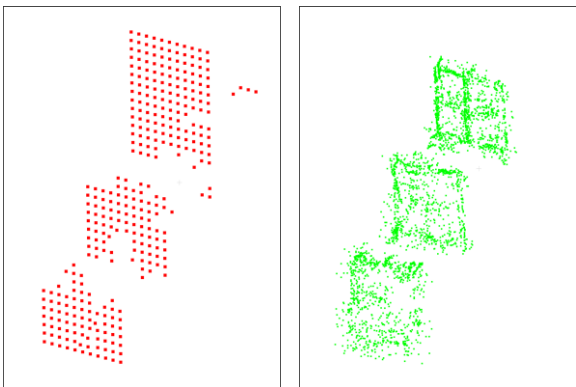


REMODEにより再構築した3次元点群

図 2 カメラ点群



(a) 上面図 (b) 右側側面図
 図 3 レーダ距離点群取得の様子



(a) レーダ距離点群 (b) 前処理後のカメラ点群
 図 4 取得した点群

2.2 カメラ点群前処理(STEP2)

カメラ点群をレーダ距離点群と同様の条件とするため、

対象物正面部のみを手動で抽出した。併せて、レーダ距離点群とカメラ点群の軸を揃えるため、レーダ距離点群と同方向を向くようカメラ点群を手動で回転させた。図 4(b)に前処理後のカメラ点群を示す。

2.3 位置合わせ及びスケール合わせ(STEP3、4)

ICP アルゴリズムによる位置合わせでは、2つの点群の大きな位置が一致している必要がある。したがって、大きな位置を合わせる処理(STEP3)及び2つの点群のスケールを合わせる処理(STEP4)の2段階の位置合わせを行う。

Libpointmatcher^[8]と呼ばれる位置合わせのライブラリを使用した。Libpointmatcherで行った処理を図 5 に示す。

- A) Input : 移動点群と固定点群があり、固定点群を基準とし、移動点群の位置(座標)を合わせる。
- B) Data Filters : 反復計算時間を短くするため、入力点群にランダムサンプリングを行い、点を間引く。
- C) KD Tree Matcher^[10] : 固定点群の各点と移動点群の各点との近傍点を探索し、対応付ける。
- D) Outlier Filters : C)で対応付けされると、点間の距離を元にランク付けし、距離が遠い点とのリンクを任意の割合で削除する。
- E) Point to Point Error Minimizer : 対応付けした点同士の二乗誤差を最小化する(STEP3)。
 Point to Point Similarity Error Minimizer : 対応付けした点同士の回転、平行移動及びスケールの類似度誤差を最小化する(STEP4)。
- F) Counter : 反復計算回数をカウントし、既定の反復計算回数を超えた場合、位置合わせ処理を停止させる。
- G) Differential Transformation : 変換前と変換後の移動点群の回転及び平行移動が閾値よりも小さい場合、位置合わせ処理を停止させる。回転及び平行移動が閾値よりも大きい場合、C)の処理に戻る。

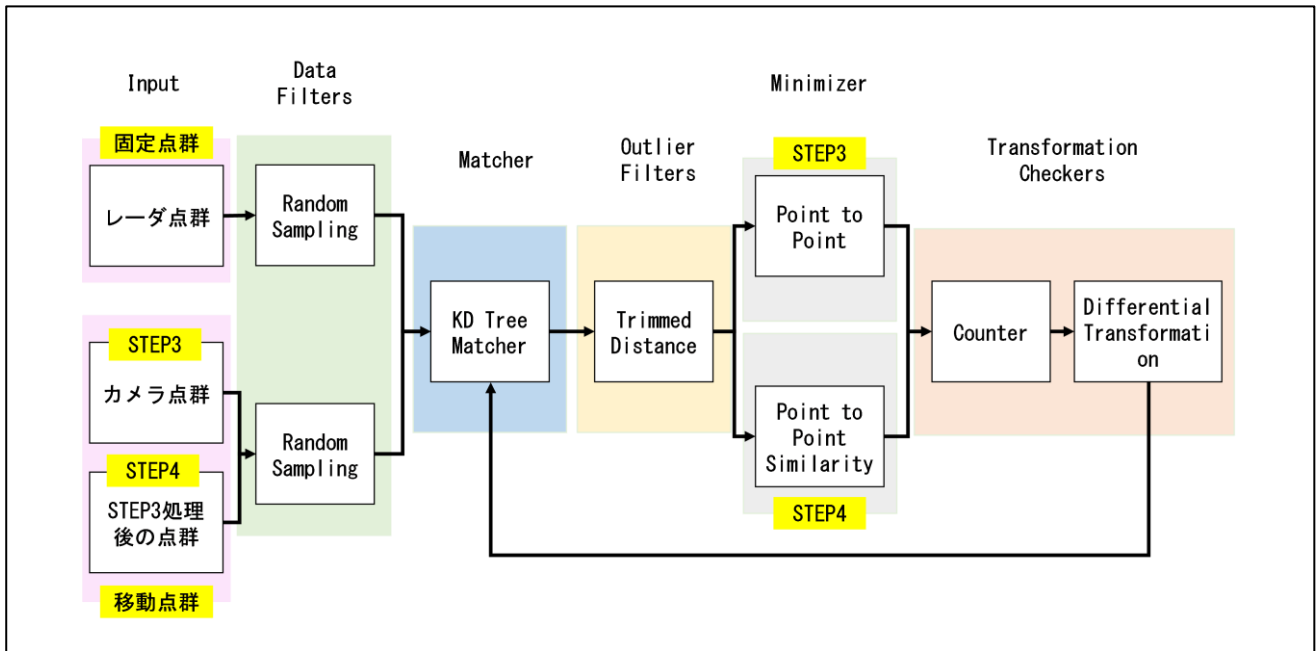
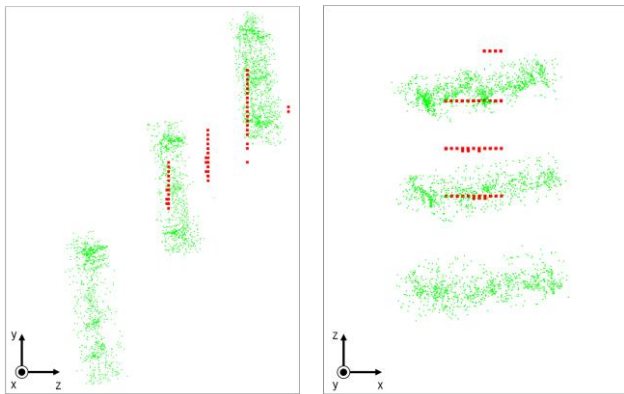


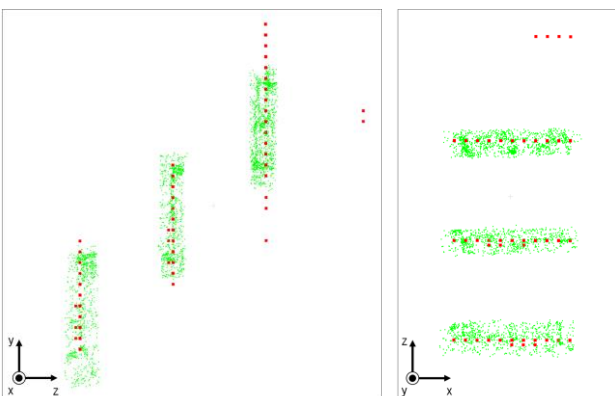
図 5 位置合わせ処理内容、[9]より引用し一部改変

3. 実験

図 4(a)のレーダ距離点群を固定点群、図 4(b)のカメラ点群を移動点群とし、提案手法による位置合わせの実験を行った。図 6 に 1 回目の位置合わせ処理後の点群を示す。図 6 より、カメラ点群及びレーダ距離点群の最後面が重畳していることが確認できた。併せて、カメラ点群中心面及びレーダ距離点群最前面も重畳していることから、カメラ点群及びレーダ距離点群も位置が大まかに一致していることが分かった。また、カメラ点群及びレーダ距離点群の面毎の距離に差異があることから、カメラ点群とレーダ距離点群のスケールが一致していないことが確認できた。図 7 に 2 回目の位置合わせ結果を示す。図 7 より、カメラ点群及びレーダ距離点群の各面が重畳していることが確認でき、カメラ点群とレーダ距離点群の位置及びスケールが概ね一致していることが分かった。



(a) 右側側面図 (b) 上面図
図 6 1 回目の位置合わせ結果



(a) 右側側面図 (b) 上面図
図 7 2 回目の位置合わせ結果

4. 評価・考察

位置合わせ後の点群に寸法が与えられていることを確認するため、寸法を測定した。なお、カメラ点群の前処理時、 x 、 y 方向の外れ値を除去していないため、以下の手順で位置合わせ後の点群の外れ値を除去した。図 8 に外れ値除去前後の点群を示す。

- (ア) 面毎に点群を分割
- (イ) 各面の重心を求める
- (ウ) 各面における重心と各点との距離の分散を求める
- (エ) 各面における重心と各点との距離の偏差の二乗を求め、分散よりも小さい点のみを抽出

図 9 に位置合わせ後の点群の z 方向の寸法評価結果を示す。図 9 より、 z 方向の面から面までの距離はレーダ側からそれぞれ 42.25[mm]、42.89[mm]だった。実対象物では z 方向に対し、面と面の間は 50[mm]あるはずだが、位置合わせ後の点群は 42~43[mm]であり、各面間の距離に約 7[mm]のずれがあった。

次に、図 10 に位置合わせ後の点群における x 、 y 方向の寸法測定結果を示す。図 10 より、各面における x 方向の寸法は 41.39[mm]~43.87[mm]だった。また、 y 方向の寸法は 41.13[mm]~43.22[mm]であった。

各面間の距離が 7[mm]ずれた要因に次の 2 つが考えられる。

1 つ目は、ミリ波レーダの距離分解能である。ミリ波レーダの距離分解能は、周波数帯域幅によって決まっている。本実験に用いたミリ波レーダの距離分解能の設定値は 43.6[mm]である。図 11(a)のとおり、取得したレーダ距離点群からも各面間の距離が 43[mm]であることを確認でき、ミリ波レーダの距離分解能が位置合わせ後の点群の寸法に影響を与えたと考えられる。

2 つ目は、ミリ波レーダによる距離測定の曖昧さである。ミリ波レーダは仰角方向に照射域が広いため、凹凸部の境界付近では、凹凸の両方からの反射波を受信してしまうため、距離を不正確に測定してしまうことがある。図 11(b)のとおり、実験に使用したレーダ距離点群は、最前面-中間面及び中間面-最後面の境界に距離測定の曖昧さがあり、レーダ距離点群における最前面及び中間面の y 方向の長さが実対象物(50[mm])よりも短くなってしまったことが影響を与えたと考えられる。

位置合わせ後の点群の x 、 y 方向の寸法が、43-2[mm]~43+1[mm]であったことも、上記 2 つの要因の影響を受けたと考えられる。

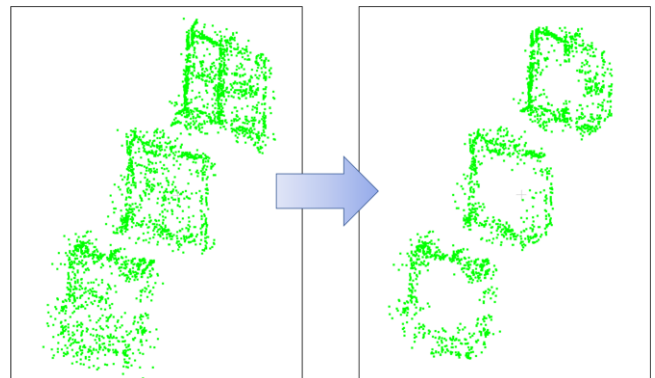


図 8 位置合わせ後の点群の外れ値除去

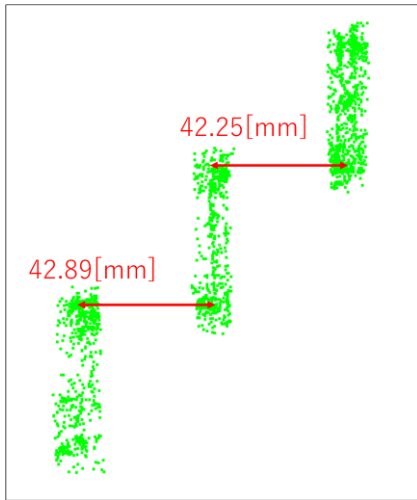


図 9 z 方向の寸法評価(右側側面図)

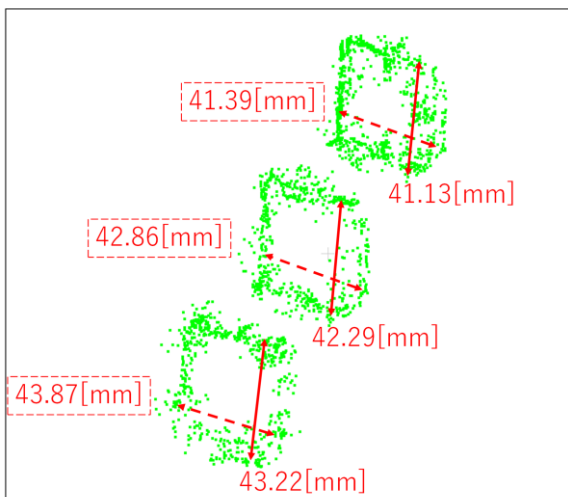


図 10 x、y 方向の寸法評価

5. まとめ

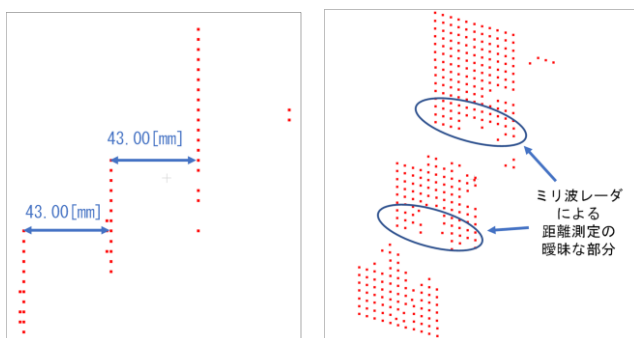
ICP アルゴリズムによる大まかな位置を合わせる処理及び 2 つの点群のスケールを合わせる処理の 2 段階の位置合わせ処理を施すことで、カメラ点群にレーダ距離点群の寸法を与えることができた。しかし、位置合わせ後の点群の寸法は、実寸法どおりにならなかった。その要因は以下のとおりである。

- ミリ波レーダの距離分解能
- ミリ波レーダによる距離測定の曖昧さ

今後は、ICP アルゴリズム以外の手法によるカメラ点群とレーダ距離点群との位置合わせを行い、本提案手法と比較する。また、本提案手法は手動でカメラ点群の前処理を行う必要があるため、前処理の自動化が課題である。

参考文献

- [1] 鈴木健司, 山田昌幸, 石澤満, 浜尾和秀, 三浦勝吏, 太田悟, “狹隘内部空間における三次元構造復元に関する研究“, 土木学会 第 3 回 i-Construction の推進に関するシンポジウム講演論文 (2021).
- [2] 三浦勝吏, 太田悟, 鈴木健司, 山田昌幸, 石澤満, 浜尾和秀, “単眼カメラとレーダを用いた三次元構造復元及び距離測定手法の検討“, 情報処理学会 第 20 回情報科学技術フォーラム (2021).
- [3] Matia Pizzoli, Christian Forster, Davide Scaramuzza : “REMODE: Probabilistic, monocular dense re-construction in real time”, 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2609-2616 (2014).
- [4] Paul J. Member, IEEE, Neil D. McKay, “A Method for Registration of 3-D Shapes”, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.14, No.2, pp.239-256 (1992).
- [5] 増田健, “ICP アルゴリズム”, 情報処理学会研究報告, Vol.2009-CVIM-168, No.23 (2009).
- [6] 玉木 徹, “20090924 姿勢推定と回転行列“, <https://www.slideshare.net/ttamaki/20090924>, (参照 2021-02-09)
- [7] Peter Biber, Wolfgang Straßer, “The Normal Distributions Transform: A New Approach to Laser Scan Matching”, Proceedings of 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol.3, pp. 2743-2748 (2003).
- [8] Francois Pomerleau, Francis Colas, Roland Siegwart · St’ephane Magnenat, “Comparing ICP Variants on Real-World Data Sets”, Autonomous Robots, Vol.34, No.3, pp.133-148 (2013).
- [9] ETHZ ASL, “Default Configuration of the ICP Chain”, <https://github.com/ethz-asl/libpointmatcher/blob/master/doc/DefaultICPConfig.md>, (参照 2022-06-01).
- [10] J. L. Bentley, “K-d trees for semidynamic point sets”, Proceedings of the sixth annual symposium on Computational geometry, pages 187-197 (1990).



(a) 右側側面図 (b) 鳥瞰図
図 11 レーダ距離点群