

点群レジストレーションによる 形状整合の実装と評価

インターン課題 提出スライド

提出日: 2025年7月22日

名前: 安藤颯太郎

課題の要約

3D点群の位置・姿勢のズレを補正するレジストレーション手法をPythonで実装し、精度をRMSEで評価・可視化する課題に取り組みました。

本課題の仕様・実装要点

- 使用言語はPython、ライブラリは `numpy` / `matplotlib` のみ
- PCAによる初期整列 + ICPアルゴリズム を実装
- Trimmed / Weighted ICPなどの拡張手法も検討・比較
- 精度指標: RMSE (目標: 0.1m以下)
- 実行結果を点群画像・RMSE推移グラフ として可視化
- 全関数に型アノテーション + Googleスタイルdocstring を付与
- Notebookは禁止、モジュール構成で提出
- poetry による依存管理。REPORT.md, slides.pdf, Dockerfile も含めて提出
- PCAを複数回適用し、最良の初期整列を選択する Multi-start ICP を実装

初期整列：PCA（主成分分析）による姿勢合わせ

ICPは初期位置に依存するため、事前に点群の姿勢を揃える初期整列が重要です。本実装ではPCA(主成分分析)を用いて、点群の主軸を基準に回転・平行移動させることで整列を行いました。

- 青 : Source (整列対象の入力点群)
- オレンジ : Target (基準となる点群)
- 緑 : Aligned (PCA整列後のsource)

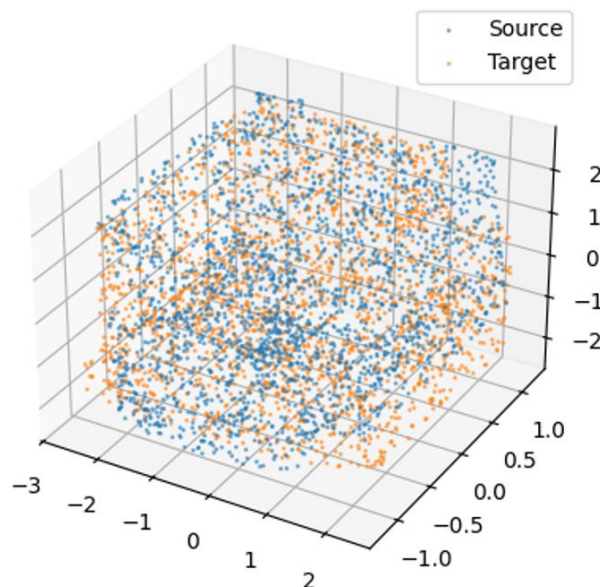


図1 PCA整列前(sourceとtargetが未整列)

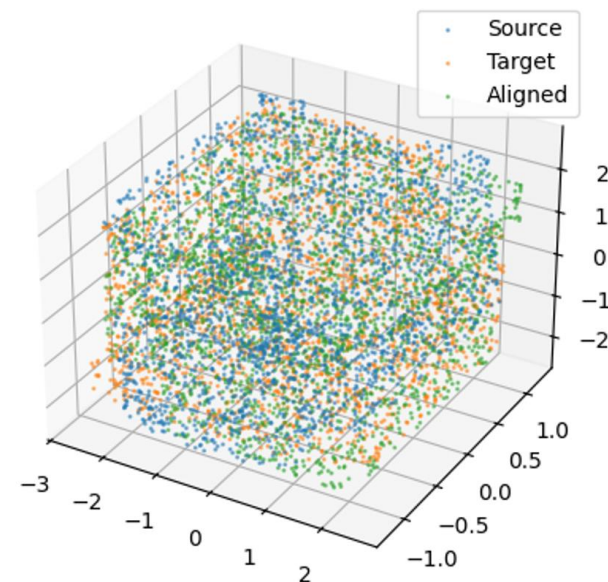


図2 PCA整列後(主軸を揃えた初期整列結果)

PCAによる初期整列によって、source点群の姿勢がtarget点群と一致し、主軸が揃った状態になっています。その結果、点群同士の重なりが改善され、ICPの初期誤差を軽減できることが確認できます。

ICPアルゴリズム : Iterative Closest Point の流れ

ICPは、対応点を見つけて剛体変換(回転・並進)を繰り返し適用し、点群を整列させるアルゴリズムです。

本実装では、対応点の探索 → 剛体変換の計算 → 点群の更新 → 収束判定 の順で処理を行っています。

- ・ 実行の流れ

- ① 対応点探索:

- sourceの各点に対し、target内で最も近い点を対応点とする(最近傍探索)

- ② 剛体変換の計算:

- 対応点の差を最小化するような回転行列 R と並進ベクトル t を求める

- ③ 点群の更新:

- 計算した R と t をsourceに適用して点群を更新

- ④ 収束判定:

- RMSEの変化が十分小さくなれば終了、そうでなければ繰り返す

ICPの拡張手法: Trimmed / Weighted / Multi-start

ICPはすべての対応点を等しく扱うため、外れ値や初期姿勢のずれに弱いという課題があります。本実装では、精度・ロバスト性向上のために、以下の3つの拡張手法を実装・比較しました。

手法名	特徴・目的
Trimmed ICP	距離が大きい上位10%の対応点を除外。外れ値の影響を抑える。
Weighted ICP	対応点の距離に応じて重みをつけて最適化。ノイズや局所誤差へのロバスト性を向上。
Multi-start ICP	PCAによる初期整列を複数パターン試行し、最もRMSEが小さい初期姿勢を選択。初期依存性の緩和。

表1 ICP拡張手法の特徴比較

3つの拡張手法は、それぞれ異なる観点からICPの課題にアプローチし、精度と安定性を向上させる狙いがあります。

整列結果とRMSE収束: Multi-start ICP による最良構成

Multi-start PCA によって初期整列の候補を複数試行し、最良の初期姿勢に基づいてICPを実行しました。その結果、点群の重なりが大幅に改善され、Full RMSE = 0.076868 を達成しました。

図3は整列後の点群の2次元投影で、青いSourceが赤いTargetとほぼ完全に重なっています。整列精度の高さが視覚的にも確認できます。

図4はRMSEの収束グラフで、わずか10回の反復でRMSEが安定し、それ以降の改善が見られないことから十分な収束が確認されました。

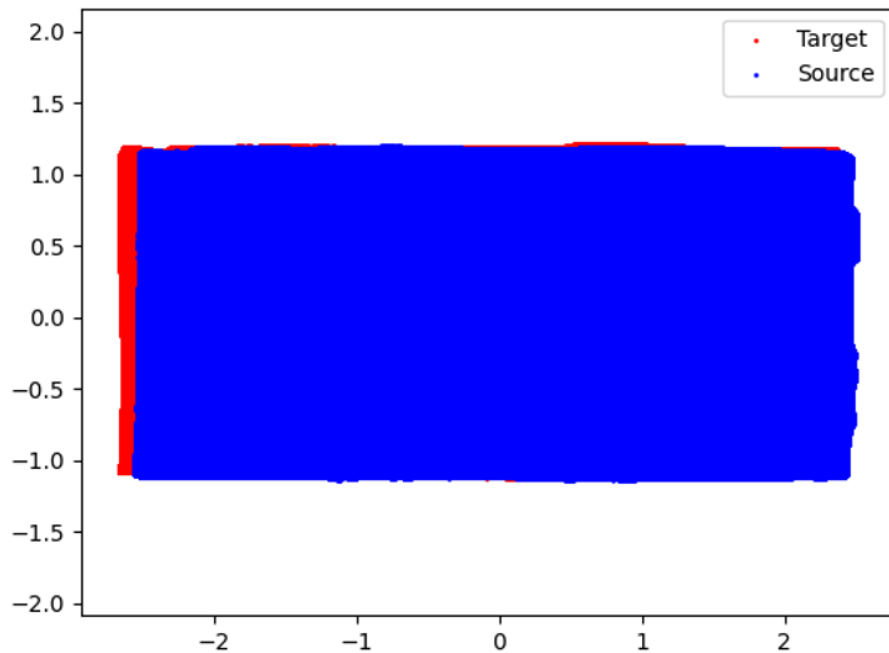


図3 Multi-start ICP による整列後の点群

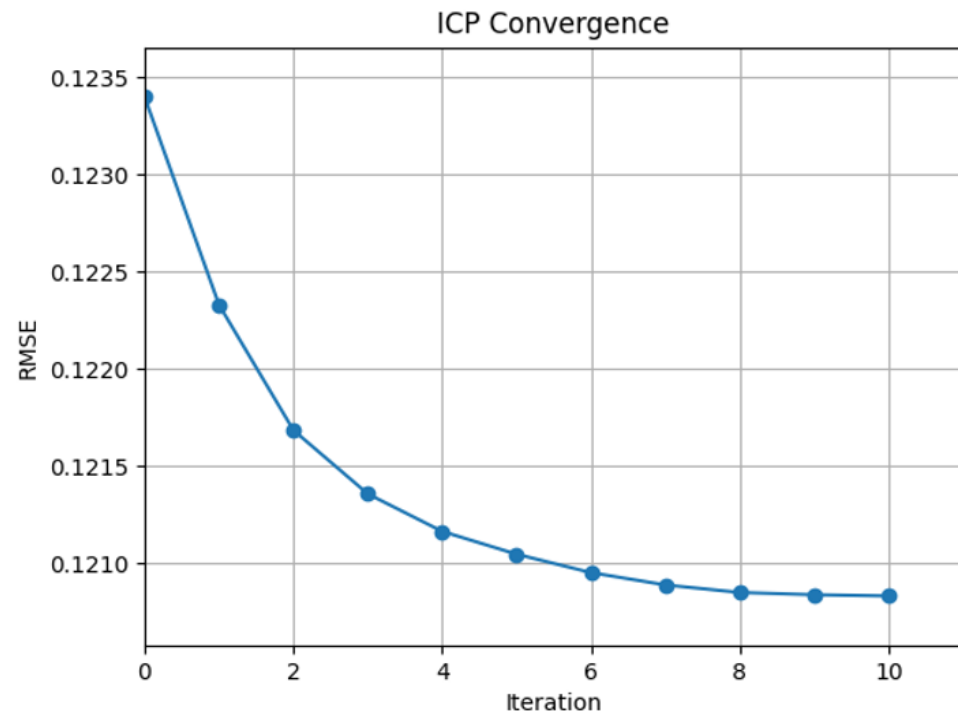


図4 RMSE収束グラフ

各ICP手法の精度比較: Full / Robust RMSE

複数のICP拡張手法を実装し、Full RMSE と Robust RMSE (Top 90%) によって精度を比較しました。

その結果、**Multi-start PCA ICP** が最も低い誤差を記録し、他手法と比較して整列精度・ロバスト性の両面で最も優れた性能を示しました。

手法名	Full RMSE	Robust RMSE(Top 90%)
Weighted ICP	0.285121	0.137743
Trimmed ICP	0.303427	0.136388
Threshold ICP	0.296559	0.132678
Multi-start PCA ICP	0.076868	0.064665
Testpoints ICP (N=2000)	0.250126	0.160161

表2 各ICP手法の精度比較

- Robust RMSE は外れ値を除いた上位90%の対応点で評価した精度指標
- 各手法の評価は全点群(約58万点)に対して実施

考察: Multi-start ICP が最良となった理由と今後の課題

本課題では複数のICP拡張手法を実装・比較した結果、**Multi-start PCA ICP** が最も高精度な整列結果を示し、唯一 Full RMSE < 0.1 (0.076868) を達成しました。PCA整列に内在する初期姿勢依存性を、複数パターンの試行によって構造的に克服した点が最大の特徴です。Trimmed や Weighted ICP は外れ値に対しては有効でしたが、初期整列の弱点を補うには不十分であり、いずれも RMSE は 0.1 を超える結果となりました。

比較ポイント

- **Multi-start ICP**: 初期姿勢のバリエーションを評価 → 最良のRMSEを選択(◎)
- **Trimmed ICP**: 外れ点除去は有効だが、初期位置には効果なし(△)
- **Weighted ICP**: ノイズ対策は可能だが、姿勢依存は変わらず(△)
- **Threshold / Testpoints ICP**: パラメータに敏感・精度安定せず(△)

今後の課題

- 初期整列の候補生成をPCA以外(ランダム回転、教師あり予測)に拡張する可能性
- Multi-startにおけるRMSE比較の計算コスト削減(事前評価の工夫)
- 非剛体変形や点群欠損に対するロバスト性強化