



Title	Accurate Point Cloud Alignment for Pose Estimation and Recognition
Author(s)	李, 斐然
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/91994
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏名 (Feiran Li)	
論文題名	Accurate Point Cloud Alignment for Pose Estimation and Recognition (高精度な点群位置合わせを用いた姿勢推定と物体認識)

論文内容の要旨

Point cloud alignment plays an important role in computation vision and related fields such as robotics and computer graphics. Given a source point cloud and a target one, point cloud alignment aims at recovering the rigid spatial transformation between them to make their poses as similar as possible. After the alignment procedure, the estimated transformation can straightforwardly help to solve the fundamental pose estimation problem encountered in various applications such as autonomous driving and 3D reconstruction. Moreover, the aligned point clouds appear to be an ideal data format for varying high-level recognition tasks such as object classification and detection.

Given the importance of point cloud alignment, various solution methods have been developed in the past decades. Despite such decade-long studies, we realize that there still exist some fundamental problems that are shared by distinct existing algorithms, preventing the alignment accuracy from being further improved. Consequently, the advances of the down-streaming pose estimation and recognition tasks are also hindered. Motivated by this fact, in this thesis, we present detailed analyses and solution methods to mitigate such shared problems, hoping to push the pose estimation and recognition accuracy one step further.

In Chapter 2, we tackle the problem that the relations between the existing geometric and probabilistic alignment algorithms developed for pose estimation are not well studied. These two types of approaches are dominant in solving the point cloud alignment problem but have been developed independently so far, making their respective merits not sharable. As a solution, we present a unified framework by leveraging the knowledge from information geometry to explain them. Our unified explanation makes the respective merits of these two classes of algorithms mutually commutable, leading to more accurate alignment and pose estimation results.

In Chapter 3, we simultaneously solve two problems that existing alignment algorithms may present infeasible point-wise correspondences and suffer from outliers, diminishing the pose estimation accuracy. While the recently raised research topic of shuffled linear regression can perfectly solve the infeasible estimation problem, it still cannot effectively handle outliers in point clouds. As a solution, we present a generalized version of the shuffled linear regression problem. Our proposal can not only theoretically guarantee that the estimations are always feasible, but also introduces effective robust estimation tools to reject outliers. Various applications show the effectiveness of our proposal.

In Chapter 4, we analyze in detail the ambiguity problem of principal component analysis when applied to intra-category alignment, which is a popular pro-processing step in deep learning-based point cloud recognition tasks. We show that its associated number of ambiguities is not sufficiently recognized in existing works. Moreover, we empirically find that sufficient identification of the ambiguities can lead to conspicuous performance improvements on varying recognition tasks, and such improvements are particularly visible on challenging real-world point clouds.

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏名 (LI Feiran)		
論文審査担当者	(職)	氏名
	主査 教授	松下 康之
	副査 教授	鬼塚 真
	副査 准教授	矢内 直人
	副査 教授	原 隆浩
	副査 教授	藤原 融
	副査 教授	下條 真司
	副査 教授	春本 要

論文審査の結果の要旨

点群の位置合わせ問題は、コンピュータビジョンの分野において中心的な問題のひとつである。点群の位置合わせ問題を解くことにより、点群間の相対的な位置・姿勢を推定することが可能となり、車両の自動運転やロボットの自律ナビゲーション、また建物などの三次元形状復元などにおける姿勢推定が実現できる。本論文では、従来の点群の位置合わせ手法を新しい切り口で高精度化・頑健化し、点群の位置合わせを利用する点群認識問題の高精度化手法を提案している。本論文の主要な研究成果を要約すると次の通りである。

- 従来の点群位置合わせ手法は、幾何学的アラインメント法と確率的アラインメント法の2つのアプローチに基づいてそれぞれ独立に研究が進められてきた。本論文では、この2つの異なるアプローチが情報幾何によって統一的に解釈可能であることを示し、双方のメリットを享受する新しい点群位置合わせ手法を提案している。結果として、従来の幾何学的アラインメント法、確率的アラインメント法よりも高精度な点群位置合わせと姿勢推定を実現した。ベンチマーク評価においても、従来手法に比べて高精度な点群位置合わせが可能であることが示されている。
- 外れ値や欠損値を含む点群の位置合わせ問題は困難な問題として長く研究されてきた。この問題に対して、シャッフル線形回帰を外れ値・欠損値を扱えるよう一般化した、一般化シャッフル線形回帰問題を新たに定式化し、この問題に対する効率的な解法を提案している。また、提案した一般化シャッフル線形回帰を、外れ値や欠損値を含む点群の位置合わせに応用し、従来手法に比して高精度な点群位置合わせができる事を示した。これに加えて、解法アルゴリズムの収束性に関して明らかにし、頑健に外れ値を除去するロバスト推定手法を提案した。この結果として、従来より高精度で頑健な点群位置合わせが可能となった。
- 点群の位置合わせによる姿勢のアラインメントは、点群認識問題における重要な前処理である。従来は、主成分分析による主成分軸のアラインメントが広く用いられてきた。この処理に関して、これまで見過ごされてきた曖昧性が存在することを指摘し、従来検討してきた8自由度の曖昧性では不十分であり、24自由度の曖昧性を考慮する必要があることを明らかにした。さらに、24自由度の曖昧性を考慮して点群姿勢をアラインメントすることにより、既存の点群認識手法を高精度化できることを確認した。

以上のように、本論文は高精度で頑健な点群位置合わせに関する先駆的な研究として、情報科学に寄与するところが大きい。よって本論文は博士（情報科学）の学位論文として価値のあるものと認める。