

基于目标结构和运动的船舶激光点云配准算法

吴应睿, 张文楷, 于天琪, 羊箭锋
(苏州大学 电子信息学院, 江苏 苏州 215006)

摘要: 由于在野外环境下船舶结构特点及激光雷达测量视野限制, 所获取的点云图像存在特征匹配错位和缺失现象, 导致经典的配准算法精度较低。在分析点云结构特点和目标运动轨迹的基础上, 提出一种基于目标结构和运动轨迹的配准算法。在对待配准点云进行预处理后, 通过结构特征的引入解决了迭代最近点法 (Iterative Closest Point, ICP) 算法特征匹配错位陷入局部最优解的问题; 在此基础上利用得出的主体变换矩阵求解出目标的运动轨迹, 并根据运动轨迹对缺乏有效特征的点云进行配准同时校准主体点云。实验结果表明, 以米为点云坐标单位, 相比于 ICP 和 4PCS + ICP 方法, 所提出方法在船舶点云配准上的均方误差 (Mean Square Error, MSE) 降低了 0.2 左右。

关键词: 点云配准; 结构特征; 运动轨迹; 迭代最近点

中图分类号: TP391.41; U698.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2023.07.004

Ship laser point cloud registration algorithm based on structural features and motion

WU Ying-rui, ZHANG Wen-kai, YU Tian-qi, YANG Jian-feng
(School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: Due to the structure of the ship in the wild and the limitations of the LiDAR measurement field of view, the acquired point clouds suffer from misalignment and lack of features, which leads to the low accuracy of the classical registration algorithms. Based on the analysis of the structural features of the point clouds and the motion trails of the ships, an alignment algorithm based on structural features and motion trails is proposed. After pre-processing the point clouds to be aligned, the structural features are introduced to solve the local optimal solutions of iterative closest point (ICP) algorithm caused by the misalignment of features. On this basis, the motion trails of the ships are solved by the transformation matrix of the main part of point clouds. Based on the motion trails, the point clouds lacking of effective features are registered and the registrations of the main part of ship point clouds are calibrated. The experimental results show that coordinating in meters, the mean square error (MSE) of the proposed registration algorithm is 0.2 lower than ICP and 4PCS + ICP algorithms.

Keywords: point cloud registration; structural feature; motion trail; iterative closest point

基金项目: 国家自然科学基金 - 青年科学基金项目 (No. 62101373); 江苏省自然科学基金 - 青年基金项目 (No. BK20200858) 资助。

作者简介: 吴应睿 (2001 -), 男, 本科, 主要研究方向为智能信息处理。

通讯作者: 羊箭锋 (1978 -), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为智能信息处理。E-mail: jfyang@suda.edu.cn

收稿日期: 2022-08-11

1 引言

航运作为最主要的交通运输方式之一,对于经济的发展起着举足轻重的作用。利用传感器对航行船舶进行远程自动检验可以提高船舶检验的效率和准确性^[1],对于航行安全的保障有着重要的意义。

通过激光雷达采集到的船舶点云图像可以反应出船舶的位置信息和物理空间上的结构关系,是对船舶进行远程自动检验的重要手段^[2]。然而,在广域航道上对运动的船舶目标采集的点云数据存在一定的偏差;并且由于激光雷达采集数据量和视野范围的限制,所采集的点云密度较低,且只能反映出船舶的局部信息。因此,需要对连续多帧的船舶点云图像进行配准,才可以得到能够准确反映船舶完整信息的点云图像。

目前经典的点云配准算法主要为利用最小二乘法迭代出最优变换矩阵进行局部配准的迭代最近点法(Iterative Closest Point, ICP)^[3-4]和选取点云四个共面点构成的集合作为特征进行全局特征匹配的四点一致性法(4-Points Congruent Sets, 4PCS)^[5]。但是,由于船舶点云图像中存在大量位于不同位置的相似结构,这些算法容易陷入局部最优解,进而导致整体的配准精度较低^[6]。并且对于重合部分较少的点云配准,如船头对船体进行配准,由于缺乏有效特征,经典的算法也很难得出变换矩阵。

针对以上问题,本文在分解船舶点云结构的基础上,提出了一种基于目标结构和运动轨迹的多帧船舶点云配准算法。实验证明,与传统的4PCS和ICP方法相比,该方法在船舶点云配准方面有着更高的精度。

2 点云配准经典方法

当两帧点云的刚体变换幅度较小时,可直接采用局部配准算法进行配准。当两帧点云的位姿相差较大时,为减少计算量并提高配准精度,通常采用先全局配准再局部配准的方法对点云进行配准。

经典的点云局部配准算法为迭代最近点法(ICP),全局配准算法为四点一致性法(4PCS)。

2.1 迭代最近点法(ICP)

迭代最近点法是利用最小二乘法迭代出最优变换矩阵的局部配准方法。

首先利用KD-Tree点云数据结构搜索出目标点云 P_t 中与源点云 P_s 中各点距离最近的点 p_i ,并计算

旋转矩阵 R 和平移矩阵 t 的cost函数的欧几里得范数 $F(R, t)$:

$$F(R, t) = \sum_i^{|P_s|} \|(R \cdot p_{si} + t) - p_{ti}\|^2 \quad (1)$$

其中, p_{si} 为源点云中第 i 个点坐标向量; p_{ti} 为目标点云中与其距离最近的点的坐标向量。

$F(R, t)$ 对 t 求偏导得:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = 2Nt + 2R \sum_i^{|P_s|} p_{si} - 2 \sum_i^{|P_s|} p_{ti} \quad (2)$$

令 $F(R, t)$ 对 t 的偏导为0可得本次迭代的最佳平移矩阵:

$$t^* = \frac{1}{N} \sum_i^{|P_s|} p_{ti} - R \frac{1}{N} \sum_i^{|P_s|} p_{si} = \bar{p}_t - R \bar{p}_s \quad (3)$$

其中, N 为源点云 P_s 的点云数量; \bar{p}_t 和 \bar{p}_s 分别为目标点云和源点云的质心。

由式(3)可以看出无论旋转矩阵 R 为何值,都可以得到最佳平移矩阵 t^* ,因此对于 R, F 可以简化为:

$$F(R) = \sum_i^{|P_s|} \|R \cdot p_{si} - p_{ti}\|^2 \quad (4)$$

利用与最佳平移矩阵类似的求解方法可得最佳旋转矩阵 R^* 为:

$$\begin{aligned} R^* &= \operatorname{argmin}_R [F(R)] \\ &= \operatorname{argmax}_R \left(\sum_i^{|P_s|} (p_{ti} - \bar{p}_t)^T R (p_{si} - \bar{p}_s) \right) \\ &= VU^T \end{aligned} \quad (5)$$

其中, V, U 为矩阵 $\Sigma (p_{si} - \bar{p}_s) (p_{ti} - \bar{p}_t)^T$ 奇异值分解的结果。

利用本次迭代得出的最佳变换矩阵可将源点云变换为中间点云,然后再将中间点云作为新一次迭代的源点云重复以上过程,直到满足以下三个条件之一: R 和 t 的变化量小于某个阈值、 $F(R, t)$ 的变化量小于某个阈值、迭代次数达到最大,迭代终止,得到配准结果。

2.2 四点一致性法(4PCS)

四点一致性法是利用源点云与目标点云中具有一致性的共面四点作为基准进行全局配准的方法。

对于源点云 P_s 的任意四个共面点组成的点集 $A = \{a, b, c, d\}$,直线 ab 与 cd 相交与点 e ,如图1所示。

存在以下两个比率在点云的变换中具有仿射不变性:

$$\begin{cases} r_1 = \frac{\|a - e\|}{\|a - b\|} \\ r_2 = \frac{\|c - e\|}{\|c - d\|} \end{cases} \quad (6)$$

在目标点云 P_t 中查找满足这两个比率且两个点对组成的线段与点集 A 中两个点对组成的线段长度近似相等的点集 $B = \{a', b', c', d'\}$ 。可认为点集 A 与点集 B 具有一致性,从点集 A 到点集 B 的变换 T 即为从源点云到目标点云的变换,如图 2 所示。

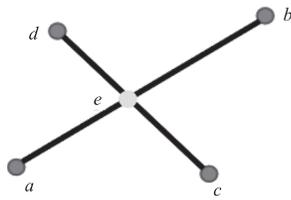


图 1 源点云基准点集示例

Fig. 1 Example of the datum points of source point cloud

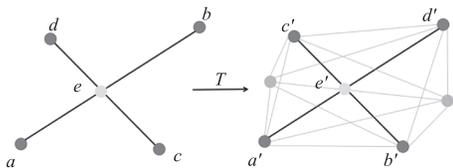


图 2 基于基准点集配准示例

Fig. 2 Example of the registration based on datum points

其中左图为在源点云中选取的共面四点示意图,右图为配准结果示意图。点 $abcd$ 与点 $a'b'c'd'$ 为配准点集 A, B , 点 ee' 为以 A, B 内点为端点的线段的交点,其余点为目标点云中 B 点集外的点。

对于 N 组不同的共面点集 A_i , 重复上述过程得到 T_i , 并对 T_i 的配准结果进行比较, 得到最优的变换 T_{out} 作为最终的配准变换。

2.3 经典方法在船舶点云配准中的局限

ICP 和 4PCS 原理简单、易于实现,但是对于变换 T 的求解容易陷入局部最优解而得不到较高的全局精度。船舶点云图像由于其船体部分不同位置的特征极为相似,放大了经典算法的缺陷,导致利用经典算法进行点云配准时,无论时直接进行局部配准还是先进行全局配准再进行局部配准,都常会将源点云的某一点集匹配至目标点云不具备相对位置一致性但具有相似特征的地方,导致特征匹配的错位,影响配准精度,如图 3 所示。

此外,对于不存在结构重叠部分或重叠部分较少的点云,经典配准方法也缺乏有效信息对其进行

变换矩阵的估计,无法得到有效的配准结果,如图 4 所示。

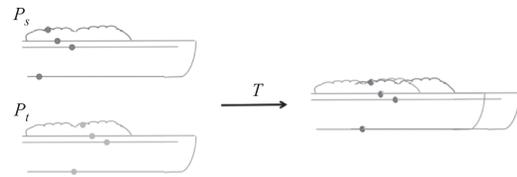


图 3 特征匹配错位示例

Fig. 3 Example of the misalignment of features

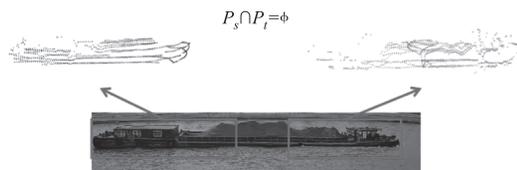


图 4 匹配特征缺失示例

Fig. 4 Example of the lack of features

3 基于目标结构和运动轨迹的稀疏船舶点云配准算法

本文提出的基于目标结构和运动轨迹的稀疏船舶点云配准算法具体步骤如图 5 所示,主要可分为四个阶段:

- 1) 点云数据预处理与水平面投影;
- 2) 基于随机采样一致性算法 (Random Sample Consensus, RANSAC) 和点云二维密度的目标结构特征提取及基于提取结果的各帧点云分类;
- 3) 基于船舶主体结构特征和 ICP 算法的变换矩阵求解;
- 4) 基于运动轨迹的边缘部分变换矩阵求解和主体部分变换矩阵优化。

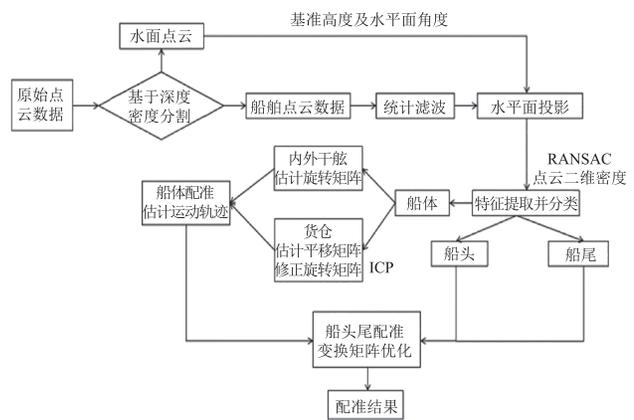


图 5 配准算法流程

Fig. 5 Process of the registration algorithm

3.1 点云数据预处理及投影

在野外航道的测量环境中,主要有激光雷达临

近处水面、船舶和对岸河沿三类物体能够对激光产生有效反射,形成点云图像,如图6所示。

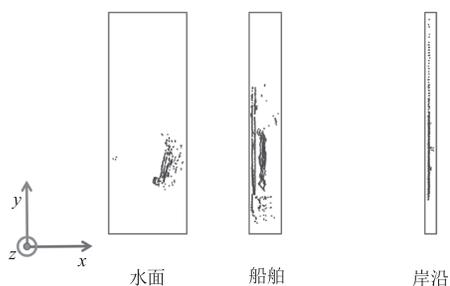


图6 单帧点云图像示例

Fig. 6 Example of the single-frame point cloud

利用该类点云图像的分布特点,根据深度方向(x 轴)上的点云密度即可快速地分割出一帧点云场景中水面、船舶和河沿三个部分。

分割完成后,对于船舶部分点云采用统计滤波去除离群点。对于水面部分点云,采用随机采样一致性算法对其进行平面拟合,得到拟合平面的法向量 $n = (x, y, z)$,并计算出拟合平面法向量与 z 轴的夹角 α :

$$\alpha = \arccos\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}\right) \quad (7)$$

根据得到的夹角可以进一步计算出旋转矩阵 t_0 (式8),并利用旋转矩阵对因激光雷达的倾斜安装而产生的固定角度偏差进行修正:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = t_0 \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (8)$$

将角度修正后的水面点云的平均 z 坐标值作为该帧点云的 z 坐标基准,并将该帧点云中各点数据的 z 坐标值减去基准值。此时,可以认为各帧点云均具有相同的 z 坐标基准,即之后的配准工作只需得出在 xy 平面上的变换矩阵,无需考虑 z 轴方向。

在角度修正和 z 轴方向同基准后,进一步对船舶点云进行分析,可以发现,它在 z 轴正方向视角上具有最多的特征,能够较为方便地求解出 xy 平面上的变换矩阵。因此,将船舶点云沿着 z 轴方向投影到 xy 平面上,得到二维的船舶点云数据,如图7所示。

3.2 目标结构特征提取与分类

根据对 xy 平面上二维船舶点云数据的分析,可以发现所有位于激光雷达视野中心区域的船体部分点云均可以清晰地分辨出外干舷、内干舷和货舱三个部分,如图8所示。

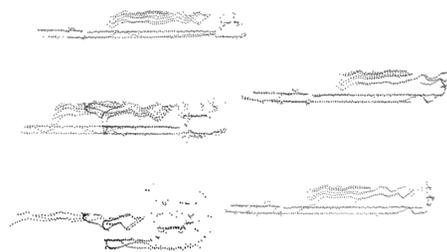


图7 2D 船舶点云示例

Fig. 7 Example of the 2D ship point clouds

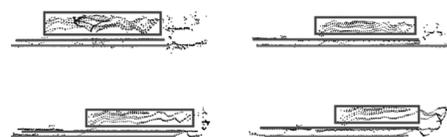


图8 船体部分点云特征示例

Fig. 8 Example of the features of the main part of ship point clouds

因此,对于位于中心区域的船舶点云,可以使用RANSAC拟合出外干舷 L_1 和内干舷 L_2 。在去除属于内外干舷部分的点云后,分格计算剩余点云的密度 ρ ,及其算术平均值 $\bar{\rho}$ 。点云密度大于 $\frac{2}{3}\bar{\rho}$ 的部分为货舱部分点云。

除了船体部分点云外,待配准的船舶点云还有位于激光雷达视野边缘区域的船头点云和船尾点云。它们无法有效分割出内外干舷和货舱,因此将它们与船体点云进行区分,在对船体点云配准后,再对它们进行处理。

3.3 船舶主体变换矩阵求解

将待配准的各帧点云图像根据能否有效分割出内外干舷和货舱三个特征分成船体、船头、船尾三类后,优先对船体点云进行配准。在船体点云分割出的内外干舷和货舱三个特征中,内外干舷能够拟合成两条直线,提供较为精确的旋转信息,但无法得到配准的平移信息;基于货舱特征进行配准能够同时得到旋转信息和平移信息,但由于其轮廓的不规整,得到的旋转信息可信度并不高。因此,在对船体点云进行配准时,通过内外干舷特征得到初始旋转矩阵,通过货舱特征得到平移矩阵并对初始旋转矩阵进行小范围的修正。

设相邻的两帧船体点云分别为源点云 P_s 和目标点云 P_t ,其分割出的内外干舷分别为:

$$\begin{cases} L_{s_1}: A_{s_1}x + B_{s_1}y + C_{s_1} = 0 \\ L_{s_2}: A_{s_2}x + B_{s_2}y + C_{s_2} = 0 \\ L_{t_1}: A_{t_1}x + B_{t_1}y + C_{t_1} = 0 \\ L_{t_2}: A_{t_2}x + B_{t_2}y + C_{t_2} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

根据内外干舷的夹角估计出源点云到目标点云的旋转角度:

$$\beta = \frac{1}{2} S \left[\arccos \left(\frac{A_{s_1} A_{t_1} + B_{s_1} B_{t_1}}{\sqrt{A_{s_1}^2 + B_{s_1}^2} \sqrt{A_{t_1}^2 + B_{t_1}^2}} \right) + \arccos \left(\frac{A_{s_2} A_{t_2} + B_{s_2} B_{t_2}}{\sqrt{A_{s_2}^2 + B_{s_2}^2} \sqrt{A_{t_2}^2 + B_{t_2}^2}} \right) \right] \quad (10)$$

其中, S 表示旋转角度的正负:

$$S = \begin{cases} 1, \arccos \left(\frac{B_{s_1}}{\sqrt{A_{s_1}^2 + B_{s_1}^2}} \right) \geq \arccos \left(\frac{B_{t_1}}{\sqrt{A_{t_1}^2 + B_{t_1}^2}} \right) \\ -1, \arccos \left(\frac{B_{s_1}}{\sqrt{A_{s_1}^2 + B_{s_1}^2}} \right) < \arccos \left(\frac{B_{t_1}}{\sqrt{A_{t_1}^2 + B_{t_1}^2}} \right) \end{cases} \quad (11)$$

利用该角度得到的初始旋转矩阵为:

$$R_0 = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (12)$$

对于船体点云分割出的货舱部分,利用 ICP 可以得到对于货舱部分点云的配准旋转矩阵 R_1 和配准平移矩阵 t_1 。将三个特征得到的配准信息进行综合,得到船体部分点云的配准矩阵为:

$$\begin{cases} t_m = t_1 \\ R_m = 0.9R_0 + 0.1R_1 \end{cases} \quad (13)$$

3.4 边缘部分配准与主体部分配准优化

因为待配准的点云图像由单一激光雷达采集,且该激光雷达位置固定,所以得出的相邻两帧点云图像的配准矩阵同时也是目标船舶的运动轨迹。

当平移矩阵和旋转矩阵的归一化方差矩阵较小时,即可以认为在经过激光雷达视野范围时,船舶的航行速度和自转角速度保持不变,即待配准点云组的各帧间运动轨迹为:

$$\begin{cases} t_p = \overline{t_m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_m \\ R_p = \overline{R_m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_m \end{cases} \quad (14)$$

无法根据点云特征进行配准的船头与船尾部分点云便可以利用此运动特点进行配准,也就是说所得出的运动轨迹同时也是船头与船尾部分点云对相邻帧点云的配准矩阵。

同时,该运动轨迹也能对之前得出的船体部分点云的配准矩阵进行修正,得到最终的船体部分点云对相邻帧点云的配准矩阵为:

$$\begin{cases} t'_m = 0.8t_m + 0.2t_p \\ R'_m = 0.8R_m + 0.2R_p \end{cases} \quad (15)$$

4 实验结果与分析

4.1 实验环境与条件

本文的测试环境为约 100 m 宽的野外运河航道;采用最高每秒可捕获 240000 点点云数据,等效于传统 64 线激光雷达的 LIVOX HORIZON 高性能激光雷达进行数据采集;在 Ubuntu20.04 操作系统下,使用 C++ 进行数据处理,如图 9 所示。

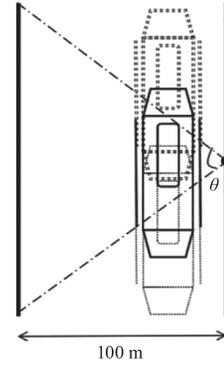


图 9 实验环境

Fig. 9 Environment of the experiment

进行实验的数据为随机抽取的 800 组不同时间上的待配准船舶点云图像。对每组点云各帧间的配准矩阵求均值与归一化方差,归一化方差矩阵的均值如表 1 所示。

表 1 各帧间配准矩阵的归一化方差矩阵均值

Tab. 1 Means of the normalized variance matrices of the transformation matrices

| $\overline{t_D}$ | $\overline{R_D}$ |
|--|--|
| $\begin{bmatrix} 0.0017 \\ 0.0053 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0.0007 & 0.0008 \\ 0.0009 & 0.0007 \end{bmatrix}$ |

实验结果表明,算法中所作的经过激光雷达视野范围时,船舶的航行速度和自转角速度保持不变的假设合理。

同时采用相邻帧配准后的均方误差 (MSE) 的均值作为配准算法的欧拉适应度得分,得分越低,配准效果越好:

$$M = \frac{1}{(n-1)m} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^m \|(R_i \cdot p_j + t_i) - p_{i+1,j}\|^2 \quad (16)$$

4.2 实验结果

为验证所提出算法的配准效果,实验分别采用 ICP、4PCS + ICP 和本文的基于目标结构和运动轨迹的配准算法对 800 组待配准船舶点云图像进行配准,效果如图 10 所示。

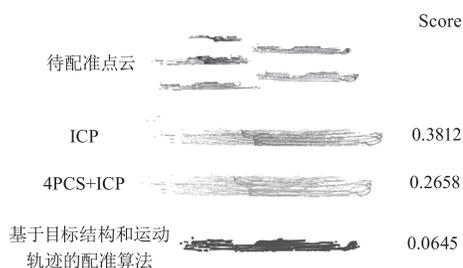


图10 实验结果示例

Fig. 10 Example of the result of the experiment

从配准结果可以看出,通过 ICP 和 4PCS + ICP 算法进行配准时,由于船舶点云存在位于不同部分的相似结构,配准算法陷入了局部最优解,进而导致了特征匹配的错位。因此,配准后的船舶点云图像尺寸明显大于实际尺寸,且各点分布分散、船舶点云主要特征模糊,无法反应出船舶的实际情况。

相较于 ICP 算法 0.3812 和 4PCS + ICP 算法 0.2658 的欧拉适应度得分,基于目标结构和运动轨迹的配准算法欧拉适应度得分仅为 0.0645,约为经典算法的 1/5。所得出的配准后点云点与点之间联系紧密,能较为准确地反映出船舶结构和航行位姿的实际情况,为后续的分析识别提供了有效的点云数据。

三种算法对于 800 组测试数据的平均欧拉适应度得分如表 2 所示。

表 2 提出算法与经典算法的实验结果对比
Tab. 2 Result of the experiments using proposed registration algorithm compared with classical algorithms

| 算法 | 得分 |
|------------------|--------|
| ICP | 0.3762 |
| 4PCS + ICP | 0.2531 |
| 基于目标结构和运动轨迹的配准算法 | 0.0978 |

实验结果表明,相较于经典的 ICP、4PCS + ICP 算法,本文提出的基于目标结构和运动轨迹的配准算法对于野外环境下多帧船舶点云的配准普遍具有更好的效果。

5 结论

本文对野外测量环境下多帧船舶点云图像的配

准进行研究,针对经典配准算法(如 ICP、4PCS 等)容易陷入局部最优解而降低全局精度和无法对特征不明显的部分进行配准的缺陷,设计了基于目标结构和运动轨迹的配准算法。实验表明,相较于经典的 ICP 和 4PCS + ICP 算法,本文提出的算法在配准精度上有着较大的提升。

在后续的工作中,将采用深度学习等手段将特征提取泛化,并将该算法推广至移动目标的点云图像配准中。

参考文献:

- [1] Gao Guang. Research on lidar imaging simulation and point cloud ship position estimation [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020. (in Chinese)
高广. 激光雷达成像模拟及点云船舶位姿估计研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
- [2] Zhang Jie. Research on ship object detection method based on LiDAR point cloud [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021. (in Chinese)
张杰. 基于激光雷达点云的船舶目标检测方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
- [3] Tianyu Ren, Ruicheng Wu. An acceleration algorithm of 3D point cloud registration based on iterative closet point [C]//Proceeding of 2020 Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers, Dalian, 2020: 271 - 276.
- [4] Shihua Li, Jingxian Wang, Zuqin Liang, et al. Tree point clouds registration using an improved ICP algorithm based on kd-tree [C]//Proceeding of 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Beijing, 2016: 4545 - 4548.
- [5] Mustafa Mohamad, Mirza Tahir Ahmed, David Rappaport, et al. Super generalized 4PCS for 3D registration [C]//Proceeding of 2015 International Conference on 3D Vision, Lyon, 2015: 598 - 606.
- [6] Fei Liu, Hanlin Huang, Tian Yang, et al. Robust multi-view registration method for narrow scenes [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 8(98): 1 - 14. (in Chinese)
刘飞, 黄瀚霖, 杨恬, 等. 面向狭窄场景的鲁棒多视角配准方法 [J]. 红外与激光工程, 2021, 8(98): 1 - 14.