

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.041

基于结构特征的大型飞机整体油箱点云初始配准方法

龚小溪¹, 邢宏文², 张凯², 易程³

(1. 玉溪师范学院 工学院, 云南 玉溪 653100;

2. 上海飞机制造有限公司, 上海 201324;

3. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:针对大型飞机整体油箱数字化模型生成的需求,提出基于结构特征的实测点云初始配准方法。传统的点云初始配准方法对整体油箱壁板上的特征辨识度较低,极易导致误匹配现象的发生,这主要是源于整体油箱内表面规则分布着大量紧固件(如铆钉、螺栓等),从而在局部区域形成了重复的结构特征。此类重复特征会显著降低点云的初始配准精度,进而影响后续的三维模型重建质量。为此,创新性地构建了能唯一描述整体油箱壁板结构的特征描述子,以提高重复结构存在的情况下,点云初始配准的准确性和精度,为后续的精确保准、模型重构等环节提供良好的点云初始位置。

关键词:飞机整体油箱;初始配准;特征描述子;面结构光三维扫描仪

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)01-0218-07

Coarse Registration of Large Aircraft Integral Fuel Tank Point Clouds Based on Structural Features

GONG Xiaoxi¹, XING Hongwen², ZHANG Kai², YI Cheng³

(1. College of Engineering, Yuxi Normal University, Yuxi 653100, China;

2. Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324, China;

3. College of Mechanical and Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To meet the requirement for generating digital models of large aircraft integral fuel tanks, proposes a coarse registration method for measured point clouds based on structural features. Traditional coarse registration methods exhibit low discriminative power for features on integral tank panels, which easily leads to mismatching. This issue primarily stems from the regular distribution of numerous fasteners (such as rivets, bolts, etc.) on the tank's inner surface, creating repetitive structural patterns in local regions. Such repetitive features significantly degrade the accuracy of coarse registration, consequently affecting the quality of subsequent 3D model reconstruction. Therefore, constructs a feature descriptor capable of uniquely characterizing the structural configuration of integral fuel tank panels. This descriptor aims to enhance the accuracy and precision of coarse registration in the presence of repetitive structures, thus providing a favorable initial point cloud position for subsequent steps like fine registration and model reconstruction.

Keywords: aircraft integral fuel tank; coarse registration; feature descriptor; structured light 3D scanner

0 引言

大型飞机整体油箱密封部位多,开敞性差,且内部存在遮挡及干涉等因素,因此密封胶涂装环节不可避免地会出现漏涂、涂敷厚度不足、以及胶体表面存在缺陷等情况,故需要采用数字化检测技术对其密封质量进行评估。然而,常规的三维模型重建技术在整体油箱(封闭、狭小,且结构化程度较高)场景下面临诸多亟待解决的技术难点。其中的首要问题便是保证模型生成的准确性,而模型生成过程分别涉及初始配准(coarse registration)、精确

配准(fine registration)以及重建误差优化(reconstruction error optimization)等多项技术。上述过程中,精确配准和后续的重建误差优化高度依赖于良好的初始位置。因此初始配准作为至关重要的环节,其对相似特征的描述及区分能力就显得尤为重要。常规基于特征描述子来搜索点云帧对应关系的方法,如PFH^[1]、FPPH^[2]、FGR^[3]、PPF^[4]等,在整体油箱场景下出现误匹配的概率较高,严重影响了实测点云模型的生成质量。其中,基于PPF描述子的方法比较适合应用于类似油箱壁板的点云特征提取。然而此类方法需要对

第一作者简介:龚小溪(1988—),男,云南人,博士研究生,研究方向为三维测量技术,yxgong2015@yxnu.edu.cn。

大量点对进行计算,算法效率欠佳。其改进算法,如 Bold3D^[5],则聚焦于对点云边缘信息的描述,缺少对油箱壁板相关的几何信息的充分利用。

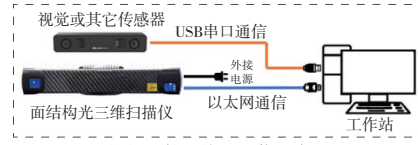
综上所述,本文从整体油箱内壁板的结构特征中所包含的拓扑信息,对局部相似度较高的油箱壁板点云数据进行描述。旨在保证相邻点云帧之间配准关系准确的同时,提升初始配准准确度,是后续精确配准、模型生成,以及相关三维测量和检测等任务^[6-8]能够有效且高质量执行的重要保障。

1 数据采集系统

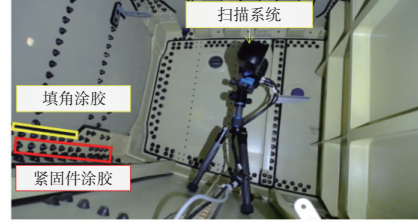
飞机整体油箱内部狭小封闭,现有三维扫描设备和检测技术无法直接应用在该场景下。本文考虑实际工况等情况约束,使用面结构光三维扫描仪作为数据采集装置来获取整体油箱内部的点云数据。硬件系统主要由一台面结构光三维扫描仪(可搭配其它传感器)、一台工作站和一个外部电源组成,扫描仪通过云台固定在三脚架一端。其中,扫描仪设备型号为 PhoXi 3D Scanner S,其投影装置与相机之间的基线为 230 mm,视场范围为 384~520 mm(其中最优视场距离为 442 mm),数据采集频率为 1 600 万点/s。在最优视场距离下获取点云数据,其点间距为 0.174 mm。扫描仪外接网络线缆,用于和工作站进行数据通信(基于以太网协议);同时通过电源线缆提供 24 V 直流电压。扫描仪输出的电缆分别连接工作站和外部电源,如图 1(a)所示。实际操作中,需将该数据采集系统放入整体油箱内部,通过换站扫描的方式来获取多视角,以及多站位下的实测点云数据,如图 1(b)所示。

2 方法框架

本文首先针对油箱场景下获取的点云帧数据特征差异较小的特点,研究如何在结构化程度高场景下利用空间几何信息构成具有唯一性特征描述子的问题,针对性提出包含空间拓扑信息的结构特征描述方法。针对接合面直线特征和紧固件顶点特征进行提取,并设计相应的有效性验证方法来保证结构特征描述子对相似度较高特征的描述能力。同时,通过建立相应的哈希表来对结构特征描述子向量进行存储,从而确保在进行相似性评估时能够提高对应描述子的搜索效率和特征匹配的准确度。



(a) 硬件连接及通信示意图



(b) 整体油箱内部扫描作业场景

图 1 点云数据采集系统

3 方法实现

3.1 基于空间拓扑信息的结构特征构建

点云配准主要包括两个关键步骤,分别是对应关系检索和变换矩阵计算。其中,对应关系检索较为重要,如果两帧点云之间的对应关系不准确,则最后的迭代过程有可能陷入局部最优。因此,首要任务便是提出一种对局部重复结构鲁棒的特征描述子,即由(油箱壁板)接合面区域线特征和紧固件区域顶点特征所构成的结构特征。

1) 接合面区域线特征提取

首先对点云数据帧进行法线计算^[9](其中平面法向量记为 $\mathbf{n}_\pi$),并通过区域增长方法得到参考平面 π ,以及共面区域点云 P^π ,从而进行相应的结构特征提取。接合面区域线特征提取具体步骤如下:

a) 将获取到的单帧点云数据投影到参考平面 π ,并以共面点云 P^π 的质心 p_c^π 作为平面中心。然后,将 P^π 中的第一个点 p_0^π 投影到参考平面 π ,其投影点记为 $\hat{p}_0^\pi$ 。定义 $\overrightarrow{p_c^\pi p_0^\pi}$ 为 x 轴,其正方向为 v_x ,则 y 轴方向可通过 $v_y = v_x \times \mathbf{n}_\pi$ 确定。此时,点 p_i^π 在二维平面上的坐标可表示为

$$\begin{cases} \overrightarrow{p_c^\pi p_i^\pi} = \overrightarrow{p_c^\pi p_0^\pi} - (\overrightarrow{p_c^\pi p_0^\pi} \cdot \mathbf{n}_\pi) \mathbf{n}_\pi \\ x_i = \overrightarrow{p_c^\pi p_i^\pi} \cdot v_x \\ y_i = \overrightarrow{p_c^\pi p_i^\pi} \cdot v_y \end{cases} \quad (1)$$

将 P^π 中的点通过上式投影到一个参考平面,定义参考平面的尺度因子为 $s^\pi = \{p_{\text{sort}}^\pi\}_{0.89}$,其中 $p_{\text{sort}}^\pi = \text{sort}\{p_0^\pi, p_1^\pi, \dots, p_n^\pi\}$ 表示将 P^π 中点云按照尺度升序排列的集合; $\{p_{\text{sort}}^\pi\}_{0.89}$ 表示取升序排列中 89% 处的点,以消除大部分噪声点云及离群点对特征提取所带来的影响。(根据投影平面上的点

云) 计算二值图像的宽度值和高度值, 即 $[(x_{\max} - x_{\min}) / s^{\pi}] + 1$ 和 $[(y_{\max} - y_{\min}) / s^{\pi}] + 1$, 其中 $(x_{\max}, y_{\max})$ 和 $(x_{\min}, y_{\min})$ 分别表示三维点云投影到平面的最大和最小坐标值。则点云坐标 (x_i, y_i) 所对应的二维像素坐标 (u_i, v_i) 可通过下式计算:

$$\begin{cases} u_i = \frac{(x_i - x_{\min})}{s^{\pi}} \\ v_i = \frac{(y_i - y_{\min})}{s^{\pi}} \end{cases} \quad (2)$$

b) 采用最小二乘法^[10]对油箱壁板二值图像中存在的轮廓线进行检测, 即首先将二值图像中 (u_i, v_i) 位置的线特征通过式(1)的逆向过程转换到参考平面坐标 (x_i, y_i) , 然后再通过式(2)将2D坐标点进行还原, 从而得到3D点云帧上的直线特征。该过程中, 可将拟合的直线特征依次按照长度值进行排序, 从而剔除不连续, 或者特征辨识度不高的线特征;

c) 考虑到相邻点云帧之间共有的直线特征可能仅有部分重叠, 因此需要将拟合得到的原始直线特征 F^{line} 以固定长度划分为多个子线段特征集合 $\{F_1^{\text{sl}}, F_2^{\text{sl}}, \dots, F_n^{\text{sl}}\} \in F^{\text{line}}$ 。子线段特征定义为 $F_i^{\text{sl}}(p_i^{\text{sl}}, n_i^{\text{sl}})$, 其中 $p_i^{\text{sl}} = (x_i, y_i, z_i)$ 表示子线段中点, n_i^{sl} 表示子线段方向, 如图2所示。以上过程可视作将完整的直线特征离散为一组等间距的点特征, 以确保(相邻点云帧之间)所共有的直线特征能够通过子线段来进行描述, 方便后续的结构特征描述子构建。

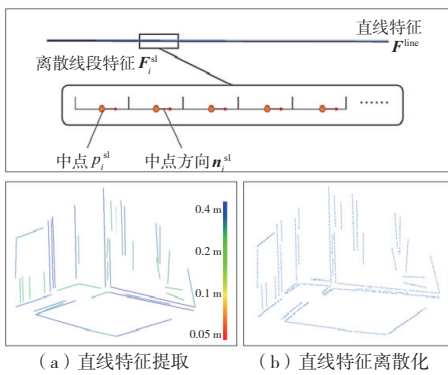


图2 直线特征离散化示意图

2) 紧固件区域顶点特征提取

紧固件区域为整体油箱内部的主要结构, 其包含了重要的空间拓扑信息, 即顶点特征。顶点特征提取步骤如下。

a) 基于平面拟合方法从输入点云当中拟合主要的油箱壁板平面, 即平面 π_i , 以此作为紧固件顶

点特征提取的参考平面;

b) 计算点云到平面之间的垂直距离, 并以此为依据将点云数据帧分割为平面所对应的局部共面点云 P^{π} ;

c) 将分割出来的共面区域点云 P^{π} 进行体素化。具体地, 针对属于参考平面 π_i 的点云, 将其划分成若干以紧固件尺寸为参考的立方体栅格;

d) 针对单个候选紧固件点云, 选取其距离参考平面最远点及其邻域点作为候选点, 同时分别计算出候选点与平面之间距离的中值 v_{med} 和平均值 v_{mean} 作为参考指标。通过计算参考指标之间的相对差异 τ , 进而评估点云噪声数据对顶点特征提取所带来的影响, 如下式:

$$\tau = \|v_{\text{med}} - v_{\text{mean}}\| \quad (3)$$

式中 $\|\cdot\|$ 表示欧式距离。若参考指标之间的差异过大, 则说明该立方体栅格内的点云数据噪声较大, 需要剔除该顶点特征; 若 τ 小于设定的阈值 τ_{thr} , 则认为点云噪声数据和异常值分布在误差容忍范围之内。此时保留中值 v_{med} 位置处的点云作为对应紧固件的顶点特征 p_i^{fst} , 该过程的数学描述如下式:

$$\begin{cases} p_i^{\text{fst}} = v_{\text{med}}, & \tau \leq \tau_{\text{thr}} \\ \text{null}, & \tau > \tau_{\text{thr}} \end{cases} \quad (4)$$

对所有候选紧固件点云数据重复上述的计算步骤可得到顶点特征集合 $F_i^{\text{fst}} = \{p_i^{\text{fst}} | i = 1, \dots, n\}$, 式中 $p_i^{\text{fst}} = (x_i, y_i, z_i)$ 为最终完成点特征提取。

3) 基于有效性验证的点线特征筛选

有效性验证策略基于 F_{score} 评分函数对结构特征集合当中所有可能的组合进行计算。如图3所示, F_1^{sl} 和 F_2^{sl} 分别属于不同的子线段特征; $p_i^{\text{sl}}, \dot{p}_i^{\text{sl}}$, p_i^{sl} 分别为离散直线特征 F_1^{sl} 的起始点、末端点和中点; $d_1^{\text{lp}}, d_2^{\text{lp}}, \dots, d_i^{\text{lp}}$ 分别表示子线段中点 p_i^{sl} 与紧固件特征集合中顶点特征 $\{p_1^{\text{fst}}, p_2^{\text{fst}}, \dots, p_i^{\text{fst}}\}$ 之间的距离。将该特征点距离计算推广至 $\dot{p}_i^{\text{sl}}$ 和 $\dot{p}_i^{\text{sl}}$, 则 F_{score} 评分函数可通过下式进行计算:

$$\begin{cases} F_{\text{score}}(z) = 1 / (1 + e^{-z}) \\ z = \sum_{i=1}^N \sigma_i(d_i^{\text{lp}}) \end{cases} \quad (5)$$

式中:

$$\sigma_i = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i^{\text{lp}} - d_{\text{ave}})^2 \right)^{1/2} \quad (6)$$

式中: d_i 为对应特征点之间的欧式距离; d_{ave} 为距离值 d_i^{lp} 的平均值。有效性验证评分函数 F_{score} 表示不同结构特征组合对构建具有唯一性的结构特征

描述子的贡献度,选取评分在设定阈值范围内的结构特征为候选集合,参与后续结构特征描述子构建。

上述筛选措施,一方面可降低无效或低辨识度特征组合的计算量;另一方面,通过构建唯一性描述子的组合来保证后续初始配准的鲁棒性。例如,对图 3 中的离散线段特征 F_1^{sl} 和 F_2^{sl} 而言,由于两者相对于紧固件区域的位置和特征之间的连线夹角不同,前者的 F_{score} 得分要略大于后者。该评分说明对于构建没有歧义的描述子, F_2^{sl} 的贡献度要小于 F_1^{sl} , 随即将阈值范围内的结构特征归入候选集合 $F_i^{LPF}(F_i^{sl}, F_i^{fst})$, 用于后续构建相应特征描述子。

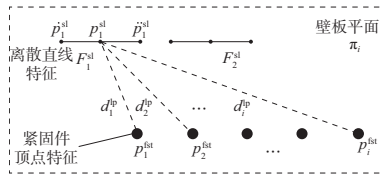


图3 壁板平面有效性验证策略

3.2 基于结构特征的油箱点云初始配准

基于上述提取的结构特征,即(离散化之后的)直线特征和顶点特征集合,设计并构建结构特征描述子,然后通过建立哈希表^[11]的方式进行存储,以提高对应描述子的搜索效率和特征匹配的准确度。

1) 结构特征描述子构建

本文提出基于结构特征的描述子,不同于传统的由四维向量所构成的 PPF 点对描述子,其在飞机整体油箱特征候选集合 $F_i^{LPF}(F_i^{sl}, F_i^{fst})$ 的基础上,利用带有方向的子线段特征 F_i^{sl} 和紧固件顶点特征 F_i^{fst} , 来对结构化特征 D_{pi} 进行唯一描述:

$$\begin{cases} D_{pi} = (\|d_i^{lp}\|, \angle(n_i^{sl}, d_i^{lp}), \angle(d_i^{lp}, d_{i+1}^{lp})) \\ d_i^{lp} = p_i^{sl} - p_i^{fst} \end{cases} \quad (7)$$

式中 $\angle(n_i^{sl}, d_i^{lp})$ 和 $\angle(d_i^{lp}, d_{i+1}^{lp})$ 的取值范围是 $[0, \pi]$; $p_i^{sl} \in F_i^{sl}$ 和 $p_i^{fst} \in F_i^{fst}$ 分别属于离散后的直线特征集合和顶点特征集合。结构特征即采用二维向量对(多个)候选顶点特征进行组合,其构建方法如图 4 所示。

本文提出的结构特征描述子能够根据不同的平面数量自适应选择最优的组合对相应特征点进行描述。如图 4(a) 所示,在顶点特征和直线特征分别位于不同平面的情况下,算法以紧固件顶点

特征为基准,与离散后的直线特征构建相应的描述子集合。与之相对应的特征组合如图 4(b) 所示,即结构特征特征集合均处于同一平面的情况下,算法会基于上述有效性验证评分函数对结构特征描述子的贡献度进行评价,以去除冗余或者特征描述性不足的特征组合。

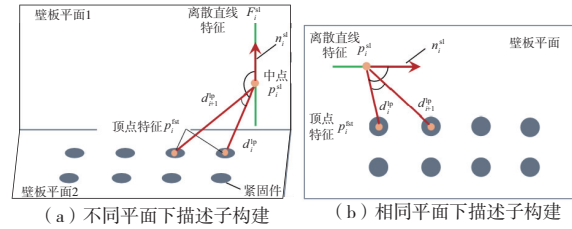


图4 结构特征描述子构建示意图

2) 基于距离约束的点云对应关系搜索

对于需要通过迭代计算来搜索最优对应关系的方法^[12-14]而言,除了进行特征描述子的计算及匹配之外,还需要进行上千次的迭代(基于 RANSAC 方法)计算,以达到相应的配准精度要求。然而,此类方法计算开销较大,从而导致配准效率低。

本文方法在搜索点云对应关系时,首先根据上述结构特征候选集和构建相应的哈希表,如图 5 所示。通过候选结构特征集合所计算的结构特征描述子 D_i 可表示为由距离和角度构成的二维向量,即针对两个不同的物理量设计相应的采样步长,然后将采样结果映射到同一个向量,作为哈希表中的键值。其次,结构特征描述子 D_i 和对应的特征点坐标将会构成哈希表的另外两行元素。对所有结构特征描述子候选集合进行上述计算,即完成结构特征哈希表构建,并可根据哈希表实现特征描述子的快速索引和定位。相邻点云帧对应关系确定过程如下,给定一对相邻的飞机油箱点云 P_{pi}^T (源点云帧)、 P_{pj}^T (目标点云帧),首先针对目标点云帧 P_{pj}^T 的结构特征描述子集合构建哈希表 T_{pj}^{hs} , 然后从源点云帧中的候选结构特征集合中计算结构特征描述子 D_{pi} , 以及对应的键值 K_{pi} , 如图 5(a) 所示。若在 P_{pj}^T 构建的哈希表 T_{pj}^{hs} 中存在与 K_{pj} 相同的键值 K_{pi} , 则可通过 K_{pi} 索引到哈希表 T_{pj}^{hs} 对应的结构特征描述子 D_{pj} 。需要注意的是,此处 D_{pi} 与 D_{pj} 即为两帧点云中其中一个描述子的对应关系,其中 $r_{pi}^T(p_i^{sl}, p_i^{fst})$ 和 $r_{pj}^T(p_j^{sl}, p_j^{fst})$ 分别为源点云帧与目标点云帧中对应描述子的坐标集合,该初始对应关系记为 $r^{ini}(r_{pi}^T, r_{pj}^T)$ 。重复上述步骤对候选集合中的描述子键值进行计算,以得到两帧点

云之间的初始对应关系。描述子对应关系搜索方式如图 5(b) 所示,以源点云帧 $\mathbf{P}_{pi}^T$ 中的一个结构特征描述子 D_{pi} 为例,上述过程可简述为通过 D_{pi} 计算相应的键值 K_{pi} ,并索引到由目标点云帧 $\mathbf{P}_{pj}^T$ 构建的哈希表 $\mathbf{T}_{pj}^{hs}$ 中的描述子 D_{pj} 的过程。

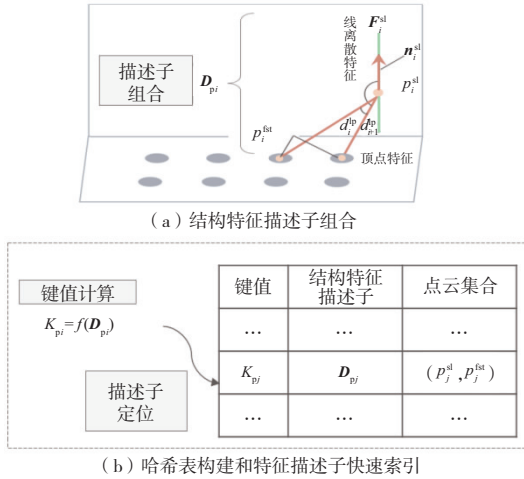


图 5 描述子相似性度量示意图

本文在哈希表计算对应关系的基础上,进一步通过基于距离约束对初始对应关系中的描述子对应关系进行筛选,去除错误匹配的对点。具体而言,从初始对应关系 $\mathbf{r}^{ini}(\mathbf{r}_{pi}^T, \mathbf{r}_{pj}^T)$ 的集合中随机选取多个点,记为 $p_i^{pi}, p_j^{pi}, p_i^{pj}, p_j^{pj}$,然后判断相邻两点之间的欧式距离是否相等,该过程可表示为

$$\forall i \neq j, \quad \sigma < \frac{\|p_i^{pi} - p_j^{pi}\|}{\|p_i^{pj} - p_j^{pj}\|} < \frac{1}{\sigma} \quad (8)$$

式中: $i, j=1, 2, 3, \sigma$ 表示距离约束阈值(经验值为 0.95)。候选对应关系 $\mathbf{r}^{ini}(\mathbf{r}_{pi}^T, \mathbf{r}_{pj}^T)$ 中满足上述条件的对应关系将被保留下来并记为 $\mathbf{r}^{FN}$,反之则被剔除。

3) 基于对应关系的点云帧初始配准

初始配准的过程本质上是相邻点云帧之间的坐标系变换过程。以面结构光三维扫描仪获取的相邻点云帧 $\mathbf{P}_{pi}^T, \mathbf{P}_{pj}^T$ 为例,单帧点云以扫描仪的相机光心为坐标原点,即位于扫描仪坐标系下。因此初始配准目的就是第一帧 $\mathbf{P}_{pi}^T$ 为参考帧构建世界坐标系,然后根据结构特征描述子的对应关系 $\mathbf{r}^{FN}(\mathbf{r}_{pi}^T, \mathbf{r}_{pj}^T)$,计算出从源点云 $\mathbf{P}_{pi}^T$ 变换到目标点云 $\mathbf{P}_{pj}^T$ 的刚性变换矩阵,即将 $\mathbf{P}_{pj}^T$ 转换到世界坐标系。初始配准的关键为变换矩阵的求解,其具体过程如下:

a) 构建求解的目标函数,该函数定义为源点云与目标点云在满足对应关系 $\mathbf{r}^{FN}(\mathbf{r}_{pi}^T, \mathbf{r}_{pj}^T)$ 前提下的欧式距离。最小化目标函数,即可得到点云 $\mathbf{P}_{pi}^T$ 和 $\mathbf{P}_{pj}^T$ 之间的刚性变换矩阵 $\mathbf{T}$,该矩阵能够将源点

云 $\mathbf{P}_{pi}^T$ 变换到以目标点云 $\mathbf{P}_{pj}^T$ 为参考的世界坐标系,目标函数的具体形式如下:

$$E(\mathbf{T}) = \sum_i (\mathbf{T} p_i^{pi}, p_i^{pj})^2 = \sum_i [(\mathbf{R} p_i^{pi} + t) - p_i^{pj}]^2 \quad (9)$$

式中变换矩阵 $\mathbf{T}$ 为目标函数中的待优化变量,该变换矩阵可通过最小化目标函数进行求解;

b) 上述变换矩阵可采用 SVD 方法^[15] 来进行求解。具体地,首先需要分别计算源点云和目标点云的质心,记为 μ_{pi}, μ_{pj} 。其次,假设源点云 $\mathbf{P}_{pi}^T$ 与目标点云 $\mathbf{P}_{pj}^T$ 的对应关系 $\mathbf{r}^{FN}(\mathbf{r}_{pi}^T, \mathbf{r}_{pj}^T)$ 中点的数量为 N ,则有:

$$\mu_{pi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i^{pi} \quad (10)$$

$$\mu_{pj} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i^{pj} \quad (11)$$

c) 将质心 μ_{pi}, μ_{pj} 加入目标函数,并进一步将上式展开及化简,则目标函数可表示为

$$E(\mathbf{T}) = \sum_{i=1}^N [(\mathbf{R}(p_i^{pi} - \mu_{pi}) - (p_i^{pj} - \mu_{pj}))^2 + (\mathbf{R}\mu_{pi} - \mu_{pj} + t)^2] = \sum_{i=1}^N [(\mathbf{R}\hat{p}_i^{pi} - \hat{p}_i^{pj})^2 + (\mathbf{R}\mu_{pi} - \mu_{pj} + t)^2] \quad (12)$$

式中 $\hat{p}_i^{pi} = p_i^{pi} - \mu_{pi}$ 和 $\hat{p}_i^{pj} = p_i^{pj} - \mu_{pj}$ 分别为源点云和目标点云去质心后的空间位置。

d) 此时,最小化目标函数,即最小化式(12)中的平方项。因平方项 $(\mathbf{R}\hat{p}_i^{pi} - \hat{p}_i^{pj})^2$ 当中涉及的变量仅有 $\mathbf{R}$,因此优先选择将其最小化,则目标函数可简化为

$$\hat{\mathbf{R}} = \arg \min_{\mathbf{R}} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{R}\hat{p}_i^{pi} - \hat{p}_i^{pj}\|^2 \quad (13)$$

e) 对上式进行 SVD 分解可得:

$$\sum_{i=1}^n \|\mathbf{R}\hat{p}_i^{pi} - \hat{p}_i^{pj}\|^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{p}_i^{piT} \hat{p}_i^{pi} + \hat{p}_i^{pjT} \mathbf{R}^T \mathbf{R} \hat{p}_i^{pj} - 2 \hat{p}_i^{piT} \mathbf{R} \hat{p}_i^{pj}) \quad (14)$$

由于上式中的前两项系数 $(\mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{I})$ 均与旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 无关,因此,可继续将上述目标函数化简为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n -\hat{p}_i^{piT} \mathbf{R} \hat{p}_i^{pj} = \sum_{i=1}^n -t_{\text{trace}}(\mathbf{R} \hat{p}_i^{pi} \hat{p}_i^{pjT}) = \\ -t_{\text{trace}}(\mathbf{R} \sum_{i=1}^n \hat{p}_i^{pj} \hat{p}_i^{piT}) \\ \mathbf{W} = \sum_{i=1}^n \hat{p}_i^{pj} \hat{p}_i^{piT} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $t_{\text{trace}}(\cdot)$ 表示矩阵的迹运算,而 $\mathbf{W}$ 表示 3×3

的矩阵,其通过特征值分解可得:

$$W = U \Sigma V^T \quad (16)$$

式中: Σ 表示由特征值所组成的对角矩阵; U, V 分别表示对角矩阵。当 W 满秩时,可计算旋转矩阵 R :

$$R = UV^T \quad (17)$$

最后,计算对应的平移向量 $t = \mu_{pj} - R\mu_{pi}$,并结合旋转矩阵 R 得到刚性变换矩阵 T ,通过该变换矩阵即可实现相邻点云初始配准。

4 实验分析

4.1 基于实测数据的初始配准精度分析

本文根据提出的基于结构特征描述子的初始配准方法,首先在实测点云数据上选取典型壁板区域(包含多平面区域和单平面区域),然后分别采用传统方法 FPFH、FGR 和 PPF,以及本文方法进行配准后的误差(RMSE)比较分析,具体而言:

1) 针对多平面区域(包含实测数据#1 和实测数据#2)进行配准的可视化结果如图 6 所示。根据可视化结果,本文方法在壁板平面区域,以及紧固件局部区域的配准效果明显优于 FGR、FPFH 以及 PPF。其中 FGR 和 FPFH 两个算法虽然实现了壁板平面区域的初始配准,然而从局部放大图可见紧固件区域在匹配后出现了点云分层的情况。而 PPF 方法则由于其对结构化点云数据的描述能力不足,其初始配准效果不甚理想。

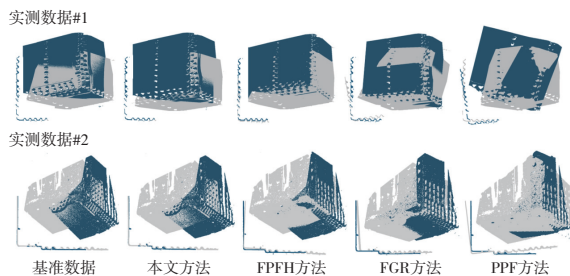


图 6 进行配准的可视化结果

2) 针对单平面区域(包含实测数据#3 及实测数据#4)数据进行配准的可视化结果如图 7 所示。

本文提出的基于结构特征描述子初始配准方法在特征描述子构建阶段通过有效性判断函数对预先提取的结构特征特征集合进行筛选,从而能够构建出具有唯一性的特征描述子,因此实现了壁板单平面区域的准确初始匹配。相比较而言,FPFH、FGR、PPF 方法在此类点云数据上虽可以实现大平面的匹配,然而其在局部区域却会频繁出现错位的情况。由此看出,结构特征方法充分利用了油箱壁板及紧固件的结构信息,以此作为对单一点云数据帧的描述,因此能够最大程度避免特征描述子在构建时可能出现的歧义性。

3) 本文试验以实测数据#1 至#4 为样例,分别对上述初始配准方法的精度进行量化比较。试验结果如表 1 所示,具体而言,本文方法的平均 RMSE 相对而言最小,其 RMSE 误差范围在 0.677~4.101 mm 之间;FPFH 和 FGR 的 RMSE(方均根误差)相对比较接近,3 种传统方法在实测数据#3 上的 RMSE 要显著小于其它区域的实测数据,这得益于其局部区域的紧固件特征相似度相对较低;由于对相似特征的识别度较弱,PPF 方法的平均 RMSE 则相对其他算法相对较高。结合图 6、图 7 中的可视化结果可知,PPF 方法在初始配准过程中已经产生了严重偏移。在算法运行时间方面,FGR 初始配准方法的运行时间最短,原因在于其采用 1 种对应关系筛选策略来代替 RNASAC 迭代搜寻对应关系的过程,从而提升了算法的运行效率。本文方法算法运行效率与 FGR 相对接近,并且远优于 FPFH 和 PPF 方法。

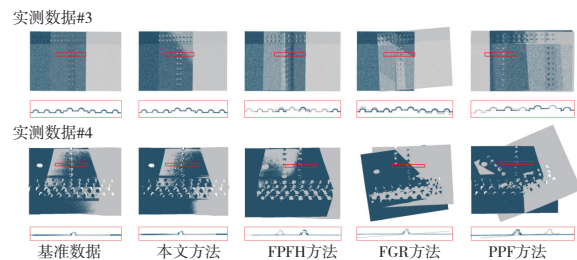


图 7 单平面区域初始配准结果对比

表 1 油箱实测数据初始配准量化结果

测试样例	PPF		FPFH		FGR		本文方法	
	RMSE/mm	时间/s	RMSE/mm	时间/s	RMSE/mm	时间/s	RMSE/mm	时间/s
实测数据#1	12.083	196.2	7.555	181.7	6.118	10.7	2.971	6.7
实测数据#2	11.871	49.7	8.808	43.7	8.937	4.9	4.101	7.2
实测数据#3	1.221	38.8	1.020	5.6	1.193	2.7	0.951	2.5
实测数据#4	7.095	11.8	1.088	10.1	1.982	2.9	0.677	3.4
平均值	8.068	74.1	4.618	60.3	4.558	5.3	2.175	5.0

4.2 初始配准方法消融试验

以下将通过(包含合成数据和实测数据)消融实验来验证初始配准方法中,有效性验证策略和距离约束限制条件的必要性。

1) 有效性验证策略旨在消除结构特征特征集中可能存在歧义性的组合,在构建结构特征描述子时保证其唯一性。如表2所示,在缺少有效性验证策略时,合成数据#1的RMSE从0.724 mm迅速上升至14.765 mm;对于合成数据#2,其RMSE从0.350 mm上升至3.148 mm。以上实验结果表明:在缺少有效性验证策略时,所构建的描述子有较大概率在描述结构特征时存在歧义。对于实测数据#1,其在不使用有效性验证策略的情况下RMSE从3.020 mm陡升至59.360 mm,两者之间的RMSE相差数十倍。这充分说明了当特征描述子存在歧义时,会给初始配准过程引入极大的不确定性。

2) 基于距离的约束条件旨在从初始对应关系集合中去除可能存在的错误对应点。如表2所示,在缺少基于距离的约束条件的情况下,合成数据#1的RMSE略微有所升高,而实测数据#1和实测数据#2的RMSE平均值则从3.660 mm上升到7.452 mm,即相邻点云帧之间的初始配准精度有所下降,其原因可能是通过哈希表进行描述子相似度匹配时选择了次优的对应关系作为相邻点云帧的初始位置。由于受到噪声点云数据及离群点的影响,在实测数据#1至#2上的初始位置配准误差相较于合成数据要略大,然而其精度变化趋势同样证明了采用基于距离的约束条件来保证相邻点云帧之间的正确对应关系是十分必要的。

表2 初始配准消融实验量化结果 单位:mm

测试样例	有效性验证	距离约束	RMSE
	✓		0.891
合成数据#1		✓	14.765
	✓	✓	0.724
	✓		1.236
合成数据#2		✓	3.148
	✓	✓	0.350
	✓		6.834
实测数据#1		✓	59.360
	✓	✓	3.020
	✓		8.070
实测数据#2		✓	49.540
	✓	✓	4.300

5 结语

本文针对大型飞机整体油箱的数字化测量需求,设计了基于结构特征描述子进行初始配准的方法,旨在解决从油箱实体到数字化实测模型生成过程中,其首要环节所面临的难点,从而最大程度保证后续精确配准、模型重构,以及相关测量和检测任务的精度和可靠性。本文方法利用油箱壁板三维数据中所蕴含的特征分布拓扑关系,对局部高相似度的壁板点云数据进行表征。实验表明:本文方法在保证初始配准过程稳定和结果准确的同时,还能够小幅提高初始配准精度,且在一定程度上减少计算开销。

参考文献:

- [1] RUSU R B, BLODOW N, MARTON Z C, et al. Aligning point cloud views using persistent feature histograms[C]//2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Nice, France: IEEE, 2008: 3384-3391.
- [2] RUSU R B, BLODOW N, BEETZ M. Fast point feature histograms (FPFH) for 3D registration[C]//2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Kobe, Japan: IEEE, 2009: 3212-3217.
- [3] ZHOU Q Y, PARK J, KOLTUN V. Fast global registration [M]//Computer Vision - ECCV 2016. Cham: Springer International Publishing, 2016: 766-782.
- [4] DROST B, ULRICH M, NAVAB N, et al. Model globally, match locally: Efficient and robust 3D object recognition[C]//2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2010: 998-1005.
- [5] ZHOU J, LIU Y P, LIU J S, et al. BOLD3D: A 3D BOLD descriptor for 6Dof pose estimation[J]. Computers & Graphics, 2020, 89: 94-104.
- [6] 曹轩铭. 大型飞机中央翼油箱点云模型重建技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2022.
- [7] 焦靖淇, 王平. 油气管道内表面涡流无损检测系统设计[J]. 机械制造与自动化, 2025, 54(1): 16-19.
- [8] TAM G K L, CHENG Z Q, LAI Y K, et al. Registration of 3D point clouds and meshes: a survey from rigid to nonrigid[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012, 19(7): 1199-1217.
- [9] 邹敏. 基于整体最小二乘的多视点云配准方法研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.

(下转第228页)

图5(a)中,模糊神经网络PID控制算法的温度控制精度显著高于其他几种算法,300 ms后达到了95%的控制精度。表明模糊神经网络PID控制算法能够更快地响应温度变化,实现更精确的温度控制。图5(b)中,模糊神经网络PID控制算法的调节时间为80 ms,上升时间为48 ms,显著低于其他算法。说明模糊神经网络PID控制算法具有更快的响应速度和更短的稳定时间,能够迅速调整系统状态以适应其温度变化。

3 结语

针对中央空调系统的温度调节和开关混合控制的需求,研究开发了一种基于模糊比例积分原理的模糊神经网络PID控制策略。通过结合传统PID控制与模糊逻辑算法,并引入RBF神经网络,以提高中央空调系统的能效和稳定性,同时增强控制策略的自适应和学习能力。研究结果表明:该算法在50 ms内能迅速达到阶跃信号峰值,300 ms后控制精度能达到95%,显著优于其他算法。这表明所提出的控制算法在响应速度、控制精度和抗干扰能力方面均具有显著优势。然而,算法在实际复杂环境下的稳定性和鲁棒性还需进一步验证。未来的研究将致力于算法的实地测试和优化,以期在更广泛的应用场景中实现更优的控制效果。

参考文献:

- [1] 王瑞,秦建敏. 多传感特征融合的空调送风温度模糊PID控制方法[J]. 传感技术学报,2023,36(6):943-948.
- [2] 杨威,戴劲松,王茂森. 基于模糊RBF-PID的张紧装置电机控制研究[J]. 机械制造与自动化,2023,52(6):193-198.
- [3] 赵慧玲. 基于PID控制技术的变风量空调系统多变量解耦回路控制[J]. 电子器件,2023,46(2):498-502.
- [4] 张硕,张爱华,董世杰,等. 基于Smith模糊多级积分分离PID的加热盘温度控制[J]. 西北工业大学学报,2024,42(5):939-947.
- [5] 祖文超,高亚南. 太阳能—地源热泵式空调自适应模

糊PID复合控制方法[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2024,55(1):123-130.

- [6] 张勇,赵冠华,龚乐. 基于干扰观测器的模糊PID控制在冶炼炉中的应用[J]. 工业加热,2025,54(1):27-31.
- [7] 陈伟,涂钊,刘建宏,等. 基于油电混动六旋翼无人机的模糊PID飞行控制策略研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2024,43(8):124-132.
- [8] 肖乾,葛一帆,符远航,等. 基于BP神经网络PID自适应控制的激振系统研究[J]. 机床与液压,2025,53(1):52-57.
- [9] BUDAK E,KORKMAZ M,DOĞAN A, et al. Experimental analysis of pid-controlled heat recovery air handling unit by machine learning methods [J]. Heat Transfer Research,2023,54(18):37-52.
- [10] 张馨,孔祥书,郑文刚,等. 基于模型预测控制的菇房空调节能控制方法[J]. 农业机械学报,2024,55(3):352-361.
- [11] 翟鑫,刘薇,刘玲玲. 考虑打纬影响的碳纤维角联织机经纱张力控制方法[J]. 科学技术与工程,2025,25(4):1587-1594.
- [12] 吴杰,张辉. 遗传算法优化的双线圈磁流变制动器模糊PID控制[J]. 汽车工程,2024,46(3):526-535.
- [13] 陈思宁. 基于视觉舒适度的展示墙智能化照明控制系统[J]. 兵工自动化,2025,44(1):28-32.
- [14] 陈岁繁,杨松,李其朋. 基于BP-NSGA-II优化的高速电梯轿厢水平振动变论域模糊PID控制[J]. 噪声与振动控制,2024,44(2):63-69,81.
- [15] 王伟峰,杨泽,赵轩冲,等. 矿井带式输送机液压拉紧Fuzzy-PID控制技术研究[J]. 煤炭科学技术,2024,52(3):217-224.
- [16] 腰彩红,李扬,王建春,等. 温室草莓精准灌溉系统的设计与试验[J]. 河北农业大学学报,2024,47(6):17-23,39.
- [17] 李智辉,杨曦,肖刚,等. 基于模糊PID控制的燃料电池稳压技术研究[J]. 武汉理工大学学报,2024,46(1):138-143.
- [18] 李景景,谢鹏. 基于模糊PID算法的电动汽车再生制动控制仿真[J]. 计算机仿真,2024,41(10):101-105.

收稿日期:2024-11-06

(上接第224页)

- [10] DROST B, ULRICH M, NAVAB N, et al. Model globally, match locally: Efficient and robust 3D object recognition [C]//2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2010: 998-1005.
- [11] 马如林,蒋华,张庆霞. 一种哈希表快速查找的改进方法[J]. 计算机工程与科学,2008,30(9):66-68.

- [12] 姚朋. 基于几何特征的异尺度点云配准算法研究[D]. 重庆:重庆理工大学,2024.
- [13] 王婉琪. 基于几何特征点云配准算法研究[D]. 长春:长春理工大学,2023.
- [14] 张强. 基于局部几何信息的ICP点云配准算法研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2022.
- [15] 杨现辉. 基于对偶四元数的点云配准算法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.

收稿日期:2025-06-11