

## 基于伪特征四边形的三维点云配准算法

王 一<sup>1,2</sup>, 姚永康<sup>1</sup>, 付智超<sup>1</sup>, 程 佳<sup>1,2</sup>

(1. 华北理工大学 电气工程学院, 河北 唐山 063210; 2. 唐山市先进测试与控制技术重点实验室, 河北 唐山 063210)

**摘要:**为解决传统描述符算法在进行圆孔局部配准时存在精度低、耗时长的问题,提出了一种通过借助构建伪特征四边形实现圆孔三维点云配准算法。首先提出了基于直径系数加权的圆孔骨骼识别算法,该算法引入向量夹角阈值实现直径特征系数加权,提取出圆孔骨骼点作为关键点;然后,基于圆心特征提出了新的描述符,在圆孔骨骼的中心构建了伪特征四边形,实现关键点的粗配准;接着,采用 ICP 算法对关键点进一步配准,并将得到的变换矩阵应用到圆孔局部上实现粗配准;最后,使用 ICP 算法实现圆孔局部的精配准。实验结果表明,与传统算法相比,配准误差降低 10.41% 以上,配准速度提高 54.22% 以上,且具有更强的鲁棒性。

**关键词:**点云配准;圆孔配准;圆孔骨骼提取;伪特征四边形;ICP

**中图分类号:**TP391;TH74 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2025.03.006

## 3D point cloud registration algorithm based on pseudo feature quadrilateral

WANG Yi<sup>1,2</sup>, YAO Yong-kang<sup>1</sup>, FU Zhi-chao<sup>1</sup>, CHENG Jia<sup>1,2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China;  
2. Advanced Testing and Control Technology Key Laboratory, Tangshan City, Tangshan 063210, China)

**Abstract:** To solve the problems of low accuracy and long time-consumption in traditional descriptor algorithms for local registration of circular holes, a three-dimensional point cloud registration algorithm for circular holes by means of constructing pseudo feature quadrilaterals is proposed. Firstly, a circular hole skeleton recognition algorithm based on diameter coefficient weighting is proposed, which introduces a vector angle threshold to achieve diameter feature coefficient weighting and extracts the circular hole skeleton points as key points. Then, a new descriptor is proposed based on the center feature, and a pseudo feature quadrilateral is constructed at the center of the circular hole to achieve rough registration of key points. Next, the ICP algorithm is used to further register the key points, and the obtained transformation matrix is applied to the local circular hole for coarse registration. Finally, ICP is used to achieve precise registration of local circular holes. The experimental results show that the registration error is reduced by more than 10.41% and the registration speed is improved by more than 54.22% with stronger robustness than the traditional algorithm.

**Keywords:** point cloud registration; circular hole registration; round hole bone extraction; pseudo feature quadrilateral; ICP

**基金项目:**河北省高等学校科学技术研究项目(No. ZD2022114);唐山市应用基础研究项目(No. 21130212C);  
教育部产学研合作协同育人项目(No. 220804992272302)资助。

**作者简介:**王 一(1981-),博士,副教授,主要研究方向为视觉检测与视觉感知。E-mail:wangyi@ncst.edu.com

**通讯作者:**姚永康(2000-),男,硕士研究生,主要研究为三维视觉测量。E-mail:2378986378@qq.com

**收稿日期:**2024-07-20

## 1 引言

三维点云测量技术在先进制造中发挥着日益重要的作用<sup>[1]</sup>。一般而言,点云测量大致可分为直接测量和比较测量两种方式<sup>[2]</sup>。直接测量通过构建高精度点云扫描系统获取数据,直接测得工件表面的形状特征。虽然这种测量系统可以达到很高的测量精度,但是对硬件要求较高。相比而言,比较测量<sup>[3-4]</sup>则是通过与 CAD 模型或标准工件的点云数据进行对比分析。这种方法对于系统硬件要求较低,实现简单且有较强的实用性。

盖板类工件<sup>[5-9]</sup>广泛存在于汽车制造、航空航天、电子产品制造等领域,其上通常包含用于装配或定位的圆孔特征,圆孔的加工精度直接影响着产品的制造质量。为实现对盖板类工件圆孔位置的高精度测量,直接测量方法需要搭建高精度点云测量系统<sup>[10]</sup>,需要精密的测量设备、精确的机械结构和运动控制,通常价格十分高昂。通过比较测量的方法就成为兼顾实现成本与测量精度的解决方案<sup>[11]</sup>。获取标准工件的点云数据和待测量工件点云数据后,将二者的圆孔局部点云完成配准,就能得出测量工件圆孔局部与标准工件圆孔局部在测量系统中的位置差异,将位置偏差附加到标准工件的尺寸上就能实现对被测圆孔的测量。

为了确保精确配准,标准工件所选取的圆孔局部区域应小于测量工件所选取的局部区域。这意味着二者点云数据全局特征不完全一致,因此需要采用基于局部特征<sup>[12]</sup>的点云配准算法来进行粗配准。常见的局部特征描述符包括:三维形状上下文(3D Shape Completion registration, 3DSC)<sup>[13]</sup>, 3DSC 利用不同曲面的法向量差异构建点之间的关系,适合描述物体具有不同曲面特征时使用,因此该配准方法所以不适用于平面圆孔配准; Rusu 等<sup>[14-15]</sup>提出的 PFH (Point Feature Histogram, PFH) 和 FPFH (Fast Point Feature Histogram, FPFH) 都是通过计算点及其邻域点之间的空间关系以及表面法向量之间的相互作用实现点的局部特征描述。若利用 PFH 和 FPFH 这种基于点空间特征描述符进行圆孔局部配准,存在两个主要问题。一是精度问题,加工误差和传感器测量误差会导致圆孔骨骼点空间特征发生变化,并且这种变化是随机的,这会导致标准工件的圆孔骨骼点和测量工件的圆孔骨骼点匹配错误,造成较大误差。二是效率问

题,圆孔局部的关键点为圆孔骨骼点,在局部区域中占比较小,直接使用这种描述子会对关键点和非关键点进行同等计算,从而降低配准效率。

综上,本文为了解决现有基于点及其邻域点关系的描述符在圆孔局部配准中存在配准精度不足、计算时间长的问题,引入了新的圆孔描述符 C4FP (Four False Point of Circle, C4FP), 并提出一种与之相适应的基于伪特征四边形的配准算法,实现了标准工件圆孔与测量工件圆孔的配准任务。

## 2 方法概述

本文研究对象是位于盖板工件较为平坦或低曲率表面上的圆孔。两个理想圆孔对齐,只需对齐它们的圆心即可。然而,标准工件和测量工件都具有加工误差和测量误差,拟合圆心使其对齐可能导致较大误差。

如图 1 所示,二维图像处理中经常用目标点 P 四周的像素点来替换该点,借助这个思路寻找圆心四周的点来替换圆心。

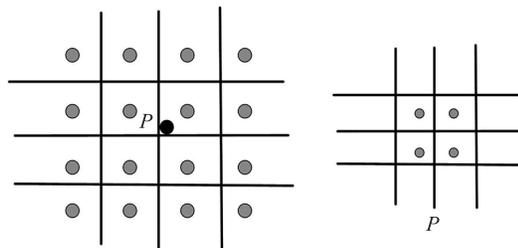


图 1 二维图像替换像素点思想

Fig. 1 Idea of replacing a pixel point in 2D images

如图 2 所示,首先在圆孔局部点云(a)中提取圆孔骨骼点(b)作为关键点,并利用主成分分析法在骨骼中心建立一个局部坐标系,将圆孔骨骼划分在四个区域。然后计算每个区域骨骼的质心,用距离质心最近的点来代替该区域,并按分区进行编码,  $P_A \setminus P_B \setminus P_C \setminus P_D$  为各自区域距离质心最近的点。

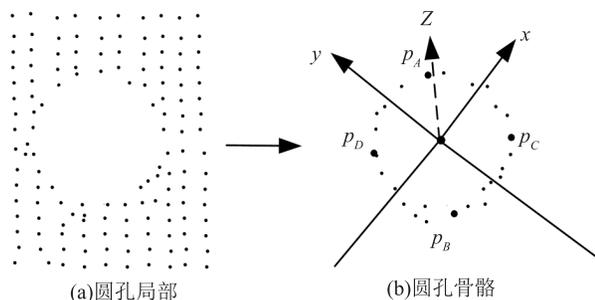


图 2 局部坐标系

Fig. 2 Local coordinate system

然而,若直接利用这四个点替换圆心进行粗配准可能会导致鲁棒性问题,如图3(b)测量圆孔误差较大时,图3(a)与其对齐重合度会明显下降。

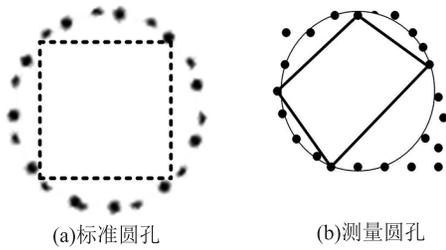


图3 四区域点对齐误差较大情况  
Fig.3 The situation where the alignment error of the four area points is relatively large

为了提升配准鲁棒性和精度,本文引入了投影面积阈值。通过在标准圆孔和测量圆孔中心之间构建大小相近的伪特征四边形,用伪特征四边形的顶点来替代先前的四区域点,使对齐过程中具有比较一致的几何尺度,从而减小了比例失真、平衡了误差分布,提升了配准的准确性和稳定性。

### 3 C4FP 配准算法

#### 3.1 边缘点提取

如图4所示,在工件表面的点云数据中,点A为边缘点,点B为内部点,边缘点一侧是没有点云数据,因此边缘点的密度远小于内部点。如图5所示,理想圆孔局部的边缘分为内边缘和截取边缘,具有圆特征的边缘点为圆孔骨骼点。圆孔骨骼点是需要的关键点,属于边缘点,于是先通过边缘点与内部点的密度差异获取边缘点<sup>[16]</sup>。

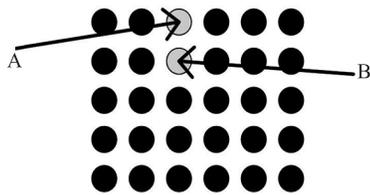


图4 工件表面点云  
Fig.4 Point cloud on the surface of the workpiece

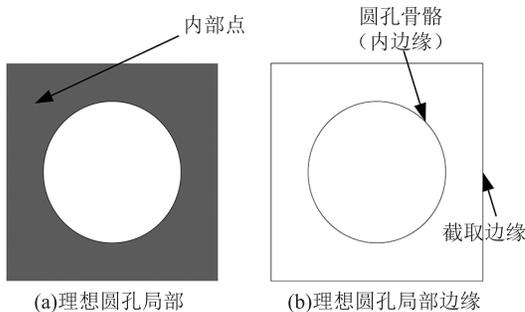


图5 理想圆孔局部边缘特征  
Fig.5 Local edge features of an ideal circular hole

在  $P = \{p_i, i = 1, 2, 3, \dots, N\}$  点云数据中建立KD-tree 空间拓扑关系,  $p_i$  为点云数据中的一个点,通过  $k$  近邻搜寻  $k$  个点,最远点到  $p_i$  的距离记作  $r_{max}$ 。定义该点的密度表达式如下:

$$\rho(p_i) = \frac{k}{r_{max}} \quad (1)$$

计算完所有  $P_i$  的密度,得到最大密度  $\rho(P_i)_{max}$  和最小密度  $\rho(P_i)_{min}$ ,计算其平均值  $\rho(P)_{mean}$ ,计算式如下:

$$\rho(P)_{mean} = \frac{\rho(P_i)_{Max} + \rho(P_i)_{Min}}{2} \quad (2)$$

若设系数为  $\mu (\mu \leq 1)$ ,密度判定阈值  $\rho_n$  设置为:

$$\rho_n = \mu \times \rho(P)_{mean} \quad (3)$$

$P$  中所有的点,密度小于阈值  $\rho_n$  标志  $Z_i$  为1则认为该点为边缘点,将其保存到边缘点集合  $E$ ,判断式如下:

$$Z_i = \begin{cases} 1, \rho(P_k) < \rho_n \\ 0, \rho(P_k) \geq \rho_n \end{cases} \quad (4)$$

#### 3.2 骨骼点提取

如图6(a)圆孔倾斜时,会获得工件表面下方的点云数据。如图6(b)所示,通过密度算子获取的边缘点有部分是工件表面下方的点。于是对局部点云图6(a)进行平面拟合,得到平面方程  $\alpha$ 。如图6(c)所示,将边缘点  $E$  投影到该平面,对每个投影点使用1近邻,得到新集合  $E_B$ ,该集合包含了圆孔骨骼点和截取边缘点。

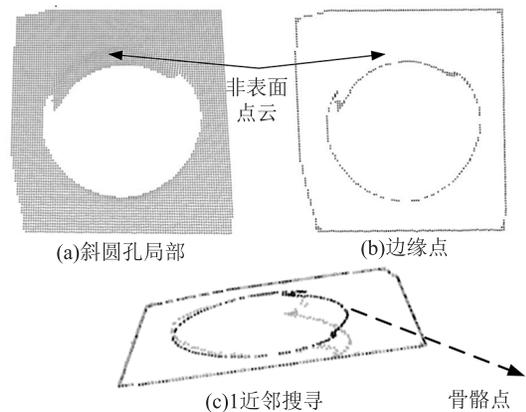


图6 斜圆孔骨骼点  
Fig.6 Oblique circular hole skeleton point

得到集合  $E_B$  后,使用密度聚类算法<sup>[17]</sup> (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise, DBSCAN) 将密度连续的点聚类到一个簇,得到两个

簇  $C_1$  和  $C_2$ , 两个簇分别为圆孔骨骼簇和截取边缘簇, 需要将圆孔骨骼簇识别出。

如图7所示, 理想圆每个直径与圆上所有点都能够构成直角三角形。基于此, 提出了基于直径系数加权的圆孔骨骼识别算法, 算法具体步骤如下。

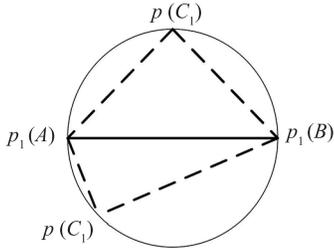


图7 理想圆直径特征

Fig.7 Characteristics of ideal circle diameter

计算  $C_1$  簇中欧式距离最大的点对, 计算式如下:

$$D_{\max} = \max(|p_i(C_1) - p_j(C_1)|) \quad (5)$$

将  $C_1$  簇中距离最大点对  $p_i(C_1)$ 、 $p_j(C_1)$  分别保存到  $A$ 、 $B$  两集合,  $A$ 、 $B$  两集合对应点对如  $p_1(A)$ 、 $p_1(B)$ , 认为是具有直径特征的点对, 对  $p_1(A)$ 、 $p_1(B)$  进行如下操作:

1) 点云簇  $C_1$  中一点  $p(C_1)$ , 计算向量  $\overrightarrow{p_1(A)p(C_1)}$  与向量  $\overrightarrow{p(C_1)p_1(B)}$  的夹角, 角度记为  $\omega$ 。

2) 设置角度阈值  $\sigma_\omega$  ( $\sigma_\omega > 0$  and  $\sigma_\omega \rightarrow 0$ ), 并遍历中  $C_1$  所有点, 计算满足式(6)点的个数  $num_1$ ,  $num_1$  越大则证明  $p_1(A)$ 、 $p_1(B)$  越具有直径特征。

$$\left| \omega - \frac{\pi}{2} \right| < \sigma_\omega \quad (6)$$

对  $A$ 、 $B$  集合中所有点对进行 1)、2) 操作, 任意对应点对  $p_i(A)$ 、 $p_i(B)$  都会获得一个  $num_i$ , 引入直径系数  $f_i$ :

$$num = \sum_{i=0}^n num_i \quad (7)$$

$$f_i = \frac{num_i}{num} \quad (8)$$

通过直径系数加权得到  $C_1$  的中心  $O_1$  和拟合半径  $r_1$ :

$$O_1 = \sum_{i=0}^n \left( f_i \cdot \frac{p_i(A) + p_i(B)}{2} \right) \quad (9)$$

$$r_1 = \sum_{i=0}^n \left( f_i \cdot \frac{\|p_i(A) - p_i(B)\|_2}{2} \right) \quad (10)$$

式中得到  $O_1 = (x_1, y_1, z_1)$ , 通过  $C_1$  中各点到  $O_1$  距离离散程度  $\sigma$  判断簇  $C_1$  是否为圆孔骨骼:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (|O_1 - p_i(C_1)| - u)^2}{n-1}} \quad (11)$$

$$u = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_1 - p_i(C_1)| \quad (12)$$

$$J = \begin{cases} 1, & 3\sigma \leq 0.15r_1 \\ 0, & 3\sigma > 0.15r_1 \end{cases} \quad (13)$$

当  $J$  为 1 时, 簇  $C_1$  为圆孔骨骼簇, 记作  $P_1$ 。

### 3.3 局部坐标系的构建

利用主成分分析法<sup>[18]</sup> (Principal Component Analysis, PCA) 在圆孔骨骼簇建立局部坐标系。对簇  $C_1$  质心有:

$$\bar{C}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i(C_1) \quad (14)$$

计算其协方差矩阵  $E_1$ :

$$E_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i(C_1) - \bar{C}_1) (p_i(C_1) - \bar{C}_1)^T \quad (15)$$

将  $E_1$  奇异值分解得到单位特征向量:

$$E_1 = U_1 D_1 V_1^T \quad (16)$$

$$U_1 = (u_1, u_2, u_3) \quad (17)$$

如图8所示, 利用得到单位特征向量在圆孔骨骼中心建立局部坐标系,  $u_1, u_2, u_3$  分别对应  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴。将骨骼点划分到四个区域, 按照坐标系  $x$  轴、 $y$  轴的正向和负向编码为 1~4。每个区域的骨骼求质心, 并用该区域距离质心最近的骨骼点代替该区域, 得到四区域点按照编码顺序分别为  $P_A$ 、 $P_B$ 、 $P_C$ 、 $P_D$ 。

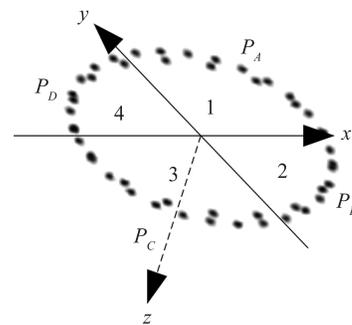


图8 局部坐标系

Fig.8 Local coordinate system

### 3.4 构建伪特征四边形

对标准圆孔局部  $P$  完成上述步骤, 得到局部平面  $\alpha_p$ 、圆孔骨骼簇  $P_1$ 、伪特征四边形角点:  $P_A$ 、 $P_B$ 、 $P_C$ 、 $P_D$ 。同理对测量圆孔局部  $Q$  完成上述步骤, 得

到局部平面  $\alpha_Q$ 、圆孔骨骼簇  $Q_1$ 、伪特征四边形角点:  $q_A, q_B, q_C, q_D$ 。

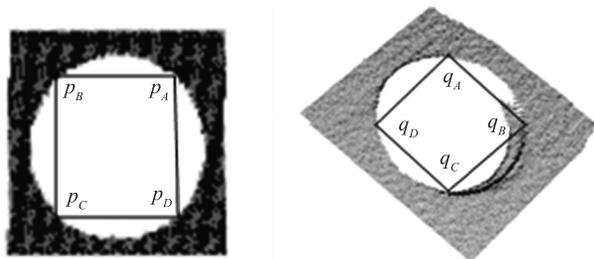


图9 初代伪特征四边形

Fig. 9 First generation pseudo feature quadrilateral

二者的四角点构建的初代伪四边形如图9所示,其角点按顺序编码构成  $C4FP$  如下:

$$C4FP_P = \begin{bmatrix} P_A \\ P_B \\ P_C \\ P_D \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$C4FP_Q = \begin{bmatrix} q_A \\ q_B \\ q_C \\ q_D \end{bmatrix} \quad (19)$$

为解决直接利用该四点配准存在的鲁棒性问题,引入投影面积阈值  $\delta$  ( $\delta > 0$  and  $\delta \rightarrow 0$ ) 构建大小近似的伪特征四边形,具体步骤如下:

1) 计算  $P_A, P_B, P_C, P_D$  在平面  $\alpha_P$  投影四边形的面积  $Area_P$ , 计算  $q_A, q_B, q_C, q_D$  在平面  $\alpha_Q$  投影四边形面积  $Area_Q$ , 进行判定。

$$|Area_P - Area_Q| < \delta \quad (20)$$

2) 若不满足式(20),则通过两点之间的中点依次进行更新,更新公式如下:

$$\begin{bmatrix} P'_A \\ P'_B \\ P'_C \\ P'_D \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} P_A + P_B \\ P_B + P_C \\ P_C + P_D \\ P_D + P_A \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} q'_A \\ q'_B \\ q'_C \\ q'_D \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} q_A + q_B \\ q_B + q_C \\ q_C + q_D \\ q_D + q_A \end{bmatrix} \quad (22)$$

如图10所示,重复1)、2)步骤直到得到大小近似的伪特征四边形,其顶点组成最终的  $C4FP$ , 表达式如下:

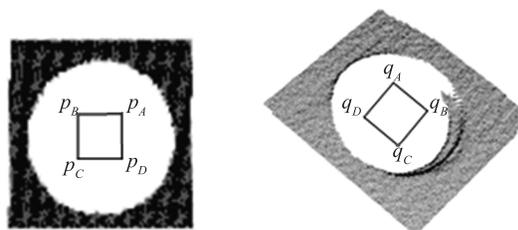


图10 大小近似的伪特征四边形

Fig. 10 Pseudo feature quadrilateral with approximate size

$$C4FP_P = \begin{bmatrix} P_A \\ P_B \\ P_C \\ P_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{P_A} & y_{P_A} & z_{P_A} \\ x_{P_B} & y_{P_B} & z_{P_B} \\ x_{P_C} & y_{P_C} & z_{P_C} \\ x_{P_D} & y_{P_D} & z_{P_D} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$C4FP_Q = \begin{bmatrix} q_A \\ q_B \\ q_C \\ q_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{q_A} & y_{q_A} & z_{q_A} \\ x_{q_B} & y_{q_B} & z_{q_B} \\ x_{q_C} & y_{q_C} & z_{q_C} \\ x_{q_D} & y_{q_D} & z_{q_D} \end{bmatrix} \quad (24)$$

得到最终的  $C4FP$  后进行粗配准,分为两个阶段。

1) 初始位置矩阵  $C4FP_P$ , 目标位置矩阵  $C4FP_Q$ , 转化为求最小二乘问题。

$$(R_a, T_a) = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^3 \|R_a \cdot C4FP_P + T_a - C4FP_Q\|_2 \quad (25)$$

经过去中心和奇异值分解得到计算初始旋转变换矩阵  $R_a$  和初始平移变换矩阵  $T_a$ , 变换关系如下式所示:

$$P'_1 = R_a P_1 + T_a \quad (26)$$

2) 圆孔骨骼点集  $P_1, Q_1$  利用 ICP<sup>[19]</sup> (Iterative Closet Point, ICP) 得到二次的变换矩阵  $R_b$  和  $T_b$ , 变换关系如下:

$$P''_1 = R_b P'_1 + T_b \quad (27)$$

通过式(26)和式(27)得到粗配准矩阵:

$$P''_1 = R_b (R_a P_1 + T_a) + T_b = R_b R_a P_1 + R_b T_a + T_b \quad (28)$$

将粗配准得到变换矩阵应用到标准圆孔局部  $P$ , 公式为:

$$P' = R_b (R_a P + T_a) + T_b = R_b R_a P + R_b T_a + T_b \quad (29)$$

完成粗配准后,将变换的标准圆孔局部  $P'$  作为精配准的初值,使用 ICP 算法进行点云精配准。

#### 4 实验验证

实验平台的硬件配置为 Intel(R) Core(TM) i5 - 7300HQ CPU @ 2.50GHz 的 CPU 处理器, 配备 16 G

运行内存。操作系统为 Windows 10, 在 Visual Studio 2015 C++ 编程环境结合 PCL 1.8.1 开源点云库完成实验。图 11 为某新能源汽车电池盒盖的点云图, 图 12 为标准工件的圆孔局部点云图。为验证本文基于伪特征四边形的三维点云配准算法在圆孔配准任务中优于基于点及其邻域点关系描述符的算法, 使用不同被测工件的圆孔进行配准实验, 并与 PFH<sup>[14]</sup> + RANSAC 和 FPFH<sup>[15]</sup> + RANSAC 算法进行对比(后续简称为 PFH 和 FPFH)。

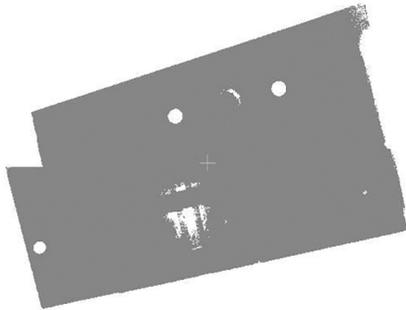


图 11 某新能源汽车电池盒盖点云

Fig. 11 Point cloud of new energy vehicle battery box cover

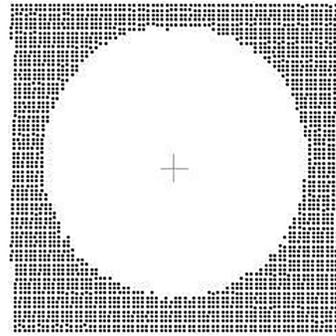


图 12 标准圆孔

Fig. 12 Standard circular hole

#### 4.1 配准效果对比

圆孔局部配准效果对比主要从两个方面评估, 一是圆孔重合度, 二是点云重合度。图 13、图 14 和图 15 中, 黑色圆孔表示标准圆孔, 灰色圆孔表示测量圆孔。

图 13、图 14 和图 15 分别展示了测量圆孔 1、测量圆孔 2 和测量圆孔 3 与标准圆孔的粗配准结果。

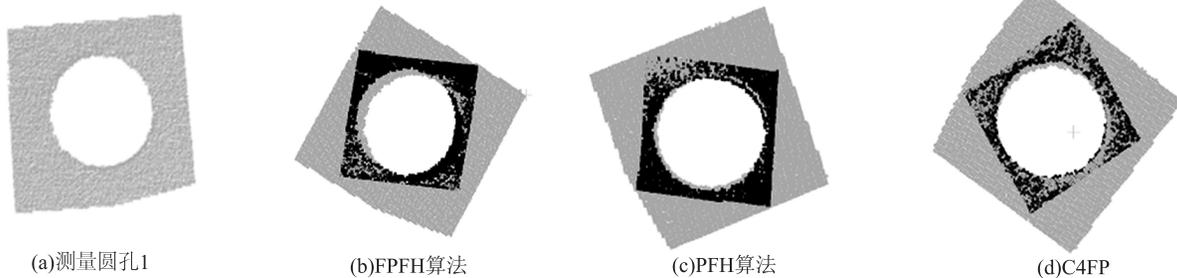


图 13 标准圆孔与测量圆孔 1 算法粗配准效果

Fig. 13 Coarse registration effect of standard circular hole and measurement circular hole 1 algorithm

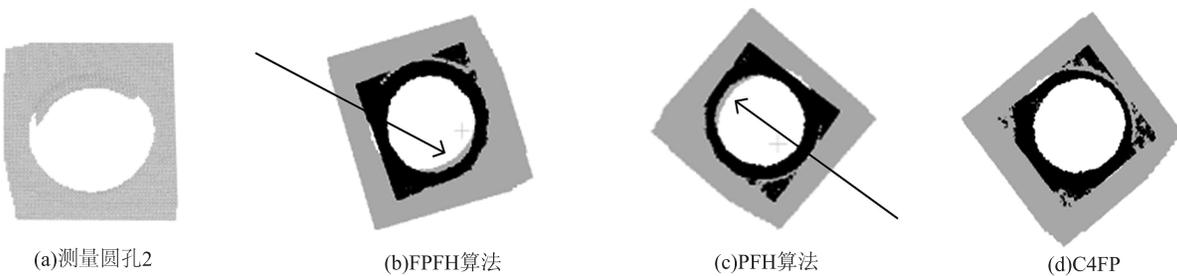


图 14 标准圆孔与测量圆孔 2 各算法粗配准效果

Fig. 14 Coarse registration effect of each algorithm for standard circular hole and measurement circular hole 2

##### 1) 圆孔重合度

图 13、图 15 中能明显看出 FPFH(b) 的圆孔重合度表现最差, 本文算法(d)和 PFH(c)的效果相近。图 14 中的测量圆孔 2 为加工误差较大的圆孔, (b)和(c)中箭头指出的位置可以看出, FPFH 和 PFH 在标准圆孔内部显现出测量圆孔缺陷部

位的点云, 这是由于标准圆孔向一侧偏移所致, 产生偏移的原因是部分边缘点匹配错误, 对于加工误差较大的圆孔, 这种偏移更为明显。本文算法表现较好的原因在于, 借助二维图像处理的思路, 用伪特征四边形的顶点代替圆心实现粗配准, 在一定程度上抵消了边缘误差导致的局部

偏差。

## 2) 点云重合度

在图 13、图 14、图 15 中,可看出本文算法(d)点云重合度表现最好。FPFH(b)和 PFH(c)表现差的原因:测量误差导致圆孔部分边缘点的空间特征发

生变化,产生差异会造成 FPFH 和 PFH 这类基于点及其邻域点关系的描述符在边缘区域匹配错误。而本文算法表现较好的原因在于,将边缘点投影到局部平面来搜寻圆孔骨骼点作为关键点,降低了边缘噪声的影响。

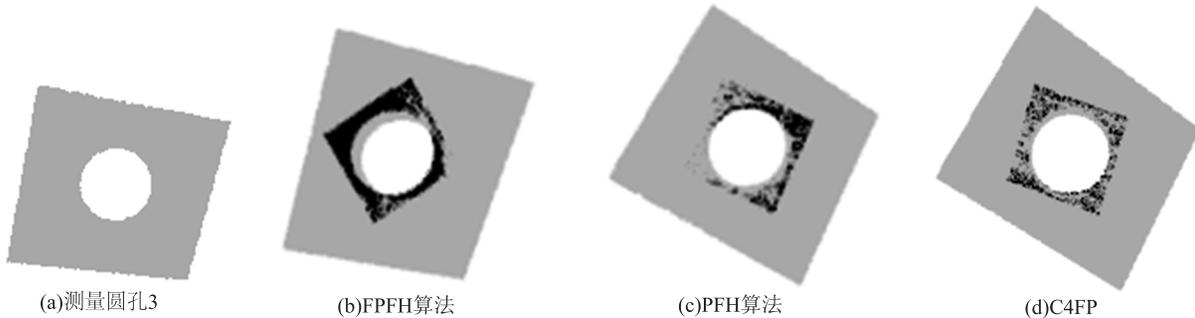


图 15 标准圆孔与测量圆孔 3 各算法粗配准效果

Fig. 15 Coarse registration effect of each algorithm for standard circular hole and measurement circular hole 3

## 4.2 配准结果对比

为了更加直观体现出本文算法在应对圆孔局部配准任务时优于传统 PFH 和 FPFH 算法,计算均方根误差和配准时间作为评判标准, RMSE 表达式如下。

$$R_{\text{rmse}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|X_i - \hat{X}_i\|^2} \quad (30)$$

其中,  $X_i$  为配准后对应点之间的欧式距离,  $\hat{X}_i$  为对应点之间欧式距离的真值。RMSE 值越小,配准结果越好。

表 1 不同测量圆孔各配准算法对比结果

Tab. 1 Comparison results of different registration algorithms for measuring circular holes

测量圆孔	配准算法	$R_{\text{rmse}} / \text{mm}$	时间/s
测量圆孔 1	FPFH	0.35785	10.439
	PFH	0.21309	14.051
	<b>C4FP</b>	<b>0.19091</b>	<b>4.779</b>
测量圆孔 2	FPFH	0.75821	15.843
	PFH	0.68227	20.752
	<b>C4FP</b>	<b>0.60411</b>	<b>5.103</b>
测量圆孔 3	FPFH	0.27192	24.978
	PFH	0.12293	34.824
	<b>C4FP</b>	<b>0.10773</b>	<b>8.985</b>

表 1 可得,FPFH 在粗配准阶段表现最差,本文算法表现最好。对于测量圆孔 1,本文算法误差较于 PFH 降低 10.41%;对于测量圆孔 2,本文算法误差较于 PFH 降低 11.46%;对于测量圆孔 3,本文算

法误差较于 PFH 降低 12.36%。

对于配准时间,通过表 1 可得出本文算法与 PFH、FPFH 相比,配准速度提高了 54.22%~75.41%,这是由于提取圆孔骨骼作为关键点,大大减少了粗配准的计算量。

综上,本文算法在粗配准阶段无论是配准误差还是配准速度都表现最好。

## 4.3 鲁棒性验证

在后续的精配准实验过程中,发现传统 PFH 加上 ICP 算法精配准后能够达到与本文算法精配准后近似的效果。为进一步验证本文算法的优势,进行鲁棒性实验。

选择在测量圆孔 1 与标准圆孔中同时添加高斯噪声进行实验。添加标准差分别为 0.004 mm、0.006 mm、0.008 mm、0.01 mm 的高斯噪声进行实验验证。为真实反映算法优势,精配准阶段都使用 ICP<sup>[19]</sup> 算法,且参数设定相同。

在 ICP 参数设定相同的前提下,传统算法 PFH + ICP 在精配准阶段平均用时为 1.122 s,本文算法精配准平均用时为 1.033 s。表 2 可以得出,在应对标准差为 0 mm 和 0.01 mm 的高斯噪声情况时,本文算法较于 PFH + ICP 误差降低较少;在应对标准差为 0.004 mm 的高斯噪声时,本文算法误差较于 PFH + ICP 降低 40.62%;在应对标准差为 0.006 mm 的高斯噪声时,本文算法较于 PFH + ICP 误差降低 18.40%;在应对标准差为 0.008 mm 的高斯噪声时,本文算法误差较于 PFH + ICP 降低了

43.43%。PFH + ICP 鲁棒性不强的原因在于,当高斯噪声引起空间特征变化的圆孔边缘点越多,圆孔边缘匹配错误的点对就会越多,从而导致配准精度下降。相比而言,本文是基于圆心的几何特征去构建伪四边形实现配准,这种设计能够有效抵抗噪声和误差的干扰。

表 2 不同噪声各算法 + ICP 配准结果对比结果

Tab. 2 Comparison results of ICP registration results with different noise algorithms

高斯噪声/mm	$R_{\text{mse}} / \text{mm}$ (PFH + ICP)	$R_{\text{mse}} / \text{mm}$ (C4FP + ICP)
0	0.15045	<b>0.14979</b>
0.004	0.25678	<b>0.15248</b>
0.006	0.18575	<b>0.15157</b>
0.008	0.26876	<b>0.15203</b>
0.01	0.15367	<b>0.15339</b>

如图 16 所示,本文算法鲁棒性明显优于传统 PFH + ICP 算法。

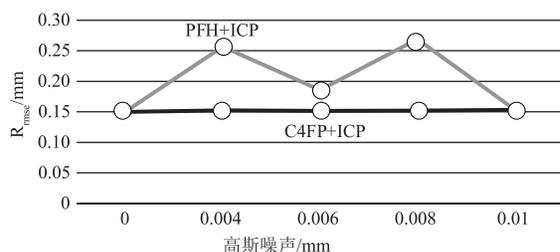


图 16 不同噪声情况下算法误差折线图

Fig. 16 The situation where the alignment error of the four area points is relatively large

## 5 结论

对于盖板工件圆孔的局部配准问题,本文提出了基于伪特征四边形的配准算法。该算法相较于传统算法,不仅减少了计算量,还具有更强的鲁棒性,能够有效减小边缘误差的影响,实现圆孔局部的高精度配准。这对于通过低成本实现圆孔位置的高精度测量具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] Qiao Junfeng, Zhou Yuanzhen, Wang Yong, et al. Three dimensional laser scanning volume measurement technology and its application progress [J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(9): 1115 - 1122. (in Chinese)  
乔俊峰,周沅桢,王永,等. 三维激光扫描测体积技术及其应用进展[J]. *激光与红外*, 2021, 51(9): 1115 - 1122.
- [2] Zhao Gang, Guo Xiaokang, Liu Dezheng, et al. Rapid recognition and localization of point cloud scene CAD models for random workpieces [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(12): 1490 - 1496. (in Chinese)  
赵刚,郭晓康,刘德政,等. 随机工件的点云场景 CAD 模型的快速识别与定位[J]. *激光与红外*, 2019, 49(12): 1490 - 1496.
- [3] Wang Shuixian, Deng Chaohui, Ge Jimin, et al. Research progress on point cloud registration technology based on industrial 3D detection [J]. *Diamond and Abrasive Tools Engineering*, 2023, 43(3): 285 - 297. (in Chinese)  
王水仙,邓朝晖,葛吉民,等. 基于工业三维检测的点云配准技术研究进展[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2023, 43(3): 285 - 297.
- [4] Azad M S, Männle D, Hesser J, et al. Point cloud registration for measuring shape dependence of soft tissue deformation by digital twins in head and neck surgery [J]. *Bio-medicine Hub*, 2024, 9(1): 19 - 15.
- [5] Liu Neng, Yang Longshan, Yang Yang. Research on efficient processing methods for small thin plate parts [J]. *Mechanical Manufacturing*, 2024, 62(5): 74 - 77. (in Chinese)  
刘能,杨龙山,杨阳. 小型薄板类零件高效加工方法研究[J]. *机械制造*, 2024, 62(5): 74 - 77.
- [6] Qin Xianzhi, Wang Peng, Luo Yanhua, et al. Study on the influence of different coated aluminum cover plates on the mechanical drilling performance of PCB [J]. *Printed Circuit Information*, 2024, 32(5): 14 - 18. (in Chinese)  
秦先志,王鹏,罗艳华,等. 不同覆膜铝片盖板对 PCB 机械钻孔性能的影响研究[J]. *印制电路信息*, 2024, 32(5): 14 - 18.
- [7] Zhang Yuchun. Research and application of protective cover plate for measuring and laying out holes with light holes [J]. *Anhui Architecture*, 2022, 29(7): 41 - 43. (in Chinese)  
张玉春. 设有通光孔的测量放线孔防护盖板研究与应用[J]. *安徽建筑*, 2022, 29(7): 41 - 43.
- [8] Kang Y, Wang T, Song S, et al. Real-time modeling of the riveting process forces for aircraft panel structures [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 124: 90 - 109.
- [9] Zhang Jin, Wang Zhong, Li Xia. High precision positioning method for circular holes in micro components [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2008, (3): 47 - 50. (in Chinese)  
张进,王仲,李霞. 微型零件中圆孔的高精度定位方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2008, (3): 47 - 50.

- [10] Du Bo. Research on hole position correction and edge cutting technology of wing wall panel based on laser scanning data[J]. *Communication World*, 2019, 26(4): 256 – 257. (in Chinese)  
杜博. 基于激光扫描数据的机翼壁板孔位修正及切边技术研究[J]. *通讯世界*, 2019, 26(4): 256 – 257.
- [11] Zhuang Zhiwei, Tian Wei, Li Bo, et al. A hole position and normal vector detection algorithm based on template matching [J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2021, 27(12): 3484 – 3493. (in Chinese)  
庄志炜, 田威, 李波, 等. 基于模板匹配的孔位与法矢检测算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(12): 3484 – 3493.
- [12] Fan Linlin, Wang Junyi, Xu Zhigang, et al. Registration method between partial point cloud and overall point cloud of large workpieces[J]. *Journal of Computer Aided Design and Graphics*, 2023, 35(9): 1323 – 1332. (in Chinese)  
范林林, 王军义, 徐志刚, 等. 大型工件部分点云与整体点云的配准方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2023, 35(9): 1323 – 1332.
- [13] Timo S, Roland W, Jörg S, et al. 3DSC-a dataset of superconductors including crystal structures[J]. *Scientific Data*, 2023, 10(1): 816 – 816.
- [14] Rusu R B, Blodow N, Marton Z C, et al. Aligning point cloud views using persistent feature histograms[C]//*Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2008: 3384 – 3391.
- [15] Rusu R B, Blodow N, Beetz M. Fast point feature histograms (FPFH) for 3D registration[C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2009: 3212 – 3217.
- [16] Yang Yunjie, Fang Yu, Yang Hao, et al. Gate spacing measurement method based on three-dimensional point cloud[J]. *Advancing Technology*, 2022, 43(11): 404 – 410. (in Chinese)  
杨蕴杰, 方宇, 杨皓, 等. 基于三维点云的栅极间距测量方法[J]. *推进技术*, 2022, 43(11): 404 – 410.
- [17] Ester, Martin, Hans-Peter Kriegel, Jörg Sander, et al. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise[C]//*KDD'96: proceeding of the Second International Conference on knowledge Discovery and Data Mining*, 1996: 226 – 231.
- [18] Liu De'er, Liu Peng, Xiao Jian. Seamless 3D reconstruction of multi-source point clouds based on PCA TrICP[J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(4): 447 – 453. (in Chinese)  
刘德儿, 刘鹏, 肖健. 基于 PCA-TrICP 的多源点云无缝三维重建[J]. *激光与红外*, 2021, 51(4): 447 – 453.
- [19] Xie Xiaopeng, Gu Jiawei. An improved two-dimensional ICP point cloud registration algorithm[J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(7): 951 – 955. (in Chinese)  
谢小鹏, 古家威. 一种改进的二维 ICP 点云配准算法[J]. *激光与红外*, 2021, 51(7): 951 – 955.