

DOI:10.16136/j.joel.2023.06.0337

# 基于改进 ICP 的复杂机械零件测量点云配准方法

伍济钢\*, 马佳康, 杨康, 曹鸿, 张源

(湖南科技大学 机电工程学院 机械设备健康维护湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:**点云配准是基于机器视觉进行复杂机械零件三维非接触精密测量的关键环节。针对传统迭代最近点(iterative closest point, ICP)算法对初始位置依赖性强,迭代收敛速度慢,错误对应点对多,难以满足大批量复杂机械零件测量点云配准效率和精度要求的问题,提出了一种基于 ISS-FPFH(intrinsic shape signature-fast point feature histogram)特征结合改进 ICP 的复杂机械零件测量点云配准方法。为了减少点云配准数量,并保留点云表面原来的细微特征,提出了基于重心邻近点的体素滤波器对点云进行下采样预处理。为解决传统 ICP 算法因合适初始位置难以确定而导致多视角测量点云配准失败的问题,采用了基于 ISS-FPFH 特征的采样一致性初始配准(sample consensus initial alignment, SAC-IA)算法进行粗配准。为解决传统 ICP 算法迭代收敛速度慢、错误对应点对多的问题,提出结合法向量夹角约束的点到平面 ICP 算法进行精配准。以斯坦福大学的 bunny 点云模型为对象,验证了本文提出方法对噪声点云的鲁棒性。以常见的复杂机械零件叶片和车门把手为对象,将本文提出的方法与传统 ICP 算法和 SAC-IA+ICP 算法一起进行测量点云配准实验并进行对比分析。结果表明,在两种不同机械零件的点云配准实验中,本文提出方法的均方根误差(root mean square error, RMSE)和配准时间比传统 ICP 算法分别平均减少了 80.46%、49.07%,比 SAC-IA+ICP 算法分别平均减少了 67.86%、16.97%,可以满足大批量复杂机械零件三维非接触精密测量的需求。

**关键词:**点云配准; 复杂机械零件; 三维非接触精密测量; 迭代最近点(ICP)算法

**中图分类号:**TP391 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0086(2023)06-0620-08

## Measurement point cloud registration method for complex mechanical parts based on improved ICP

WU Jigang\*, MA Jiakang, YANG Kang, CAO Hong, ZHANG Yuan

(Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, School of Electrical and Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

**Abstract:**Point cloud registration is the key step of 3D non-contact precision measurement for complex mechanical parts based on machine vision. Due to extreme dependence on initial position, slow iterative convergence speed and many wrong corresponding point pairs, iterative closest point (ICP) algorithm could not satisfy the requirements of point cloud registration efficiency and measurement precision of large quantities of complex mechanical parts, so an improved ICP method of measurement point cloud registration for complex mechanical parts by combining ICP with intrinsic shape signature-fast point feature histogram (ISS-FPFH) feature is proposed. In order to reduce the registration quantity of the point cloud and keep the original subtle features on surface of point cloud, the voxel filter based on the point close to center of gravity is proposed to preprocess for point cloud downsampling. It is difficult for traditional ICP algorithm to determine the appropriate initial position and will lead to the registration failure of multi-view measurement point cloud, the sample consensus initial alignment (SAC-IA) algorithm based on ISS-FPFH is applied for coarse registration. In order to solve the problems of slow iterative

\* E-mail: jwu@cvm.ac.cn

收稿日期: 2022-05-09 修订日期: 2022-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(51775181)和湖南省自然科学基金(2022JJ50129)资助项目

convergence speed and many wrong corresponding point pairs of traditional ICP algorithm, the point-to-plane ICP algorithm by combining with normal vector angle constraint is proposed for fine registration. The robustness of the proposed method to noisy point clouds is verified with the bunny point cloud model from Stanford University. The proposed method, traditional ICP algorithm and SAC-IA+ICP algorithm are tested and compared by taking the common complex mechanical blade and door handle as experimental objects. The results show that the root mean square error (RMSE) and registration time in the point cloud registration experiment for two different kinds of mechanical parts has an average reduction of 80.46 % and 49.07 % compared with the traditional ICP algorithm and an average reduction of 67.86 % and 16.97 % compared with the SAC-IA+ICP algorithm. Therefore, the proposed method can meet requirements of 3D non-contact precision measurement for large quantities of complex mechanical parts.

**Key words:** point cloud registration; complex mechanical parts; 3D non-contact precision measurement; iterative closest point (ICP) algorithm

## 0 引言

随着科学技术的不断发展,如齿轮、叶片等形状十分复杂的机械零件应用越来越广泛。此类机械零件制造工艺复杂、成形精度难以控制。为保障产品质量,需对这些复杂机械零件进行高精度多参数的三维测量<sup>[1,2]</sup>。相比于传统测量方法,基于机器视觉的三维非接触测量技术具有无损伤、高效率和高精度等优点,已在工业制造质量检测等领域广泛应用<sup>[3,4]</sup>。该方法首先利用三维扫描设备获得测量对象的全方位多视角点云数据,进而进行点云配准和三维重建获得测量对象全面精细的网格模型,最后将网格模型与设计模型对比进行精密测量。其中,点云配准是获得测量对象完整点云的基础和必备条件,其精度和效率直接决定了三维非接触精密测量的精度和效率。

最经典的点云配准算法是 BESL 等<sup>[5]</sup>在 1992 年提出的迭代最近点(iterative closest point, ICP)算法,该算法简单直观、易于实现,但是对初始位置要求较高,容易陷入局部最优解,导致配准失败,并且配准精度和效率较低,难以满足大批量复杂机械零件测量点云配准精度和效率的要求。

已有众多学者对 ICP 算法进行了研究和改进。针对传统 ICP 算法对初始位置依赖性强的问题,一般通过添加粗配准来解决。张彬等<sup>[6]</sup>利用基于关键点 FPFH (fast point feature histogram)特征的随机抽样一致性(random sample consensus, RANSAC)算法实现了点云的粗配准,虽然得到了较好的配准效果,但是该算法的计算负荷大,配准时间长。王飞等<sup>[7]</sup>利用基于 RANSAC 思想的 4PSC(4-points congruent sets)算法实现了多期城市道路车载激光点云的粗配准,增强了鲁棒性,减少了配准时间。姚敏等<sup>[8]</sup>利用主成分分析

(principal component analysis, PCA)法分别计算复杂结构件检测点云和模型点云的主轴方向,实现了两组点云的粗配准,但是在对初始位置相差较大的工件进行粗配准时,可能会出现 180°的角度偏差,导致粗配准失败。孙文潇等<sup>[9]</sup>提出了基于法线特征约束的粗配准算法,通过计算待配准点云中所有点的 FPFH 特征来寻找对应点对,获得了较高的配准精度,但是该算法计算量大,配准效率低。针对传统 ICP 算法配准精度差和效率低的问题,PAVLOV 等<sup>[10]</sup>利用安德森迭代法加快传统 ICP 算法的迭代速度,但难以保证较高的配准精度。朱启兵等<sup>[11]</sup>利用点到面的 ICP 算法实现了对盆栽金桔的精配准,虽然减少了迭代次数,但是配准精度还需进一步提高。综上所述,在传统 ICP 算法优化方面已开展了大量的研究,但对初始位置依赖性强、配准时间长和配准精度差的问题依然没有得到很好的解决,难以满足大批量复杂机械零件测量点云配准精度和效率的需求。

因此,本文提出了一种基于 ISS-FPFH(intrinsic shape signature-fast point feature histogram)特征结合改进 ICP 的复杂机械零件测量点云配准方法。在点云预处理中,提出了基于重心邻近点的体素滤波器对零件点云进行下采样,以重心邻近点而非重心代替每个体素内的所有点,在减少零件点云数量的同时,保留点云表面原来的细微特征。在点云粗配准中,采用了基于 ISS-FPFH 特征的采样一致性初始配准(sample consensus initial alignment, SAC-IA)算法,通过比较 ISS(intrinsic shape signature)关键点的 FPFH 特征获得两组点云的对应点对,并通过 SAC-IA 完成粗配准,使两组点云处于一个合适的初始位置,避免传统 ICP 算法陷入局部最优导致配准失败。在点云精配准中,提出了结合法向量夹角约束的点到平面 ICP 算法,利用法向量夹角剔除错误的对应点对,提高

配准精度,并利用点到平面的 ICP 算法减少迭代次数,提高配准效率。以斯坦福大学的 bunny 点云模型为对象,验证了本文提出方法对噪声点云的鲁棒性。以常见的复杂机械零件叶片和车门把手为对象验证了本文提出方法的配准精度和效率。

## 1 算法改进

### 1.1 基于重心邻近点的体素滤波器

零件点云存在较多特征相似的表面,原始体素滤波器会改变零件点云表面的细微特征,增加配准误差。为了在减少点云配准数量的同时,保留点云表面的原始特征信息,本文提出基于重心邻近点的体素滤波器进行下采样预处理。

原始体素滤波器采用每个体素的重心或中心近似代替体素内的所有点来实现下采样,但是由于该点不一定是原始点云中的点,可能导致下采样后会损失原始点云的细微特征。为此,本文提出了一种基于重心邻近点的体素滤波器,以原始点云每个体素网格重心的邻近点近似代替体素内的所有点,保证点云信息表达的准确性。假定存在点云  $P$ ,算法的基本步骤如下:

1) 根据原始点云坐标,计算点云在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴上的最大值  $x_{\max}$ 、 $y_{\max}$ 、 $z_{\max}$  和最小值  $x_{\min}$ 、 $y_{\min}$ 、 $z_{\min}$ 。

2) 根据步骤 1) 计算点云最小包围盒的边长  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ ,

$$\begin{cases} X = x_{\max} - x_{\min} \\ Y = y_{\max} - y_{\min} \\ Z = z_{\max} - z_{\min} \end{cases} \quad (1)$$

3) 设置每个体素立方体的边长  $L$ ,则原始点云被分割为  $l \times w \times h$  个体素:

$$\begin{cases} l = \text{ceil}(X/L) \\ w = \text{ceil}(Y/L) \\ h = \text{ceil}(Z/L) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\text{ceil}(\cdot)$  为向上取整符。

4) 计算原始点云中每个点所在的体素空间的编号  $N_{p_i}$ :

$$\begin{cases} l' = \text{ceil}[(x_i - x_{\min})/L] \\ w' = \text{ceil}[(y_i - y_{\min})/L] \\ h' = \text{ceil}[(z_i - z_{\min})/L] \\ N_{p_i} = h' + w' \times h + l' \times w \times h \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $(x_i, y_i, z_i)$  为点云中任意一点  $p_i$  的坐标。

5) 计算每个体素内所有点的重心,并利用 KD-Tree 遍历点云  $P$ ,寻找距离重心最近的点,并以该点近似代替体素内的所有点,完成下采样。

### 1.2 基于 ISS-FPFH 特征的 SAC-IA 算法

传统 ICP 算法对合适的初始位置依赖性强,容易导致多视角机械零件点云配准失败,所以通过提取零件点云的 ISS 关键点并对其邻域进行 FPFH 特征描述来确定对应关系,然后利用 SAC-IA 算法完成粗配准,使两组点云处于一个合适的初始位置。

#### 1.2.1 提取 ISS 关键点

ISS 关键点由 ZHONG<sup>[12]</sup> 等在 2009 年提出,该算法利用邻域信息,通过计算查询点协方差矩阵的特征值来提取关键点,由此得到的关键点可以较好地描述原始点云的几何特征,提高点云配准的效果。设点云  $P$  中存在  $n$  个点,  $p_i$  为  $P$  中任意一点,其坐标为  $(x_i, y_i, z_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,算法的基本步骤如下:

1) 对点云中的每一个查询点  $p_i$  设置邻域搜索半径  $r$ 。

2) 查找点  $p_i$  以  $r$  为半径的邻域中的所有点,根据邻域点与  $p_i$  的欧氏距离计算权重  $w_{ij}$ :

$$w_{ij} = \frac{1}{|p_i - p_j|}, |p_i - p_j| < r. \quad (4)$$

3) 根据查询点  $p_i$  及其邻域点构造协方差矩阵:

$$\text{cov}(p_i) = \frac{\sum_{|p_i - p_j| < r} w_{ij} (p_i - p_j)(p_i - p_j)^T}{\sum_{|p_i - p_j| < r} w_{ij}}. \quad (5)$$

4) 计算上述协方差矩阵的特征值,并按从大到小的顺序排列:  $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ 。

5) 设置阈值  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$ ,满足下式即可确定  $p_i$  为关键点,

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \leq \epsilon_1, \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \leq \epsilon_2, \quad (6)$$

式中,  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$  通常不超过 1。

#### 1.2.2 FPFH 特征描述

FPFH<sup>[13]</sup> 由 PFH(point feature histogram)<sup>[14]</sup> 改进而来,其基本思想是:通过参数化查询点与邻域点法线之间的相互关系,对查询点的  $K$  邻域几何属性进行完整描述。图 1 所示为查询点  $S$  的 FPFH 计算原理图。

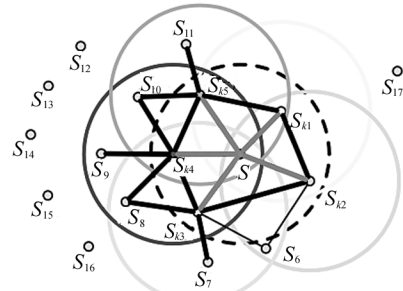


图 1 FPFH 特征计算原理

Fig. 1 Calculation principle of FPFH feature

FPFH 特征估计的基本步骤如下:

1) 建立局部坐标系,对任意两点  $S_i$ 、 $S_j$  之间的法线偏差进行参数化统计,如图 2 所示为以  $S_i$  为坐标原点建立的局部坐标系。

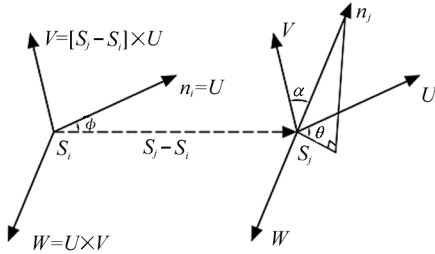


图 2 局部坐标系

Fig. 2 Local coordinate system

2) 根据局部坐标系,定义  $(\alpha, \varphi, \theta, d)$  4 个参数,用来表示任意两点  $S_i$  和  $S_j$  之间的法线偏差,计算式如下:

$$\begin{cases} \alpha = V \cdot n_j \\ \varphi = U \cdot \frac{S_j - S_i}{d} \\ \theta = \arctan(W \cdot n_i, U \cdot n_j) \\ d = \|S_j - S_i\|_2 \end{cases} \quad (7)$$

3) 计算每个采样点与邻域点之间的 4 个参数,记为  $SPFH$ ,则点  $S$  的  $FPFH$  特征可由下式表示:

$$FPFH(S) = SPFH(S) + \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{1}{d_i} \cdot SPFH(S_i), \quad (8)$$

式中,  $d_i$  为对应点对的欧式距离,  $S_i$  为点  $S$  的邻域点。

FPFH 特征是对查询点及其邻域点的法线夹角进行参数化统计,对于点云中处于不同几何位置上的查询点,其邻域点的相对位置分布也是不同的,进而导致法线夹角  $(\alpha, \varphi, \theta)$  的不同,最终影响  $FPFH$  特征估计。图 3 为对斯坦福大学的 Armadillo 点云模型不同位置上的点进行  $FPFH$  特征提取。

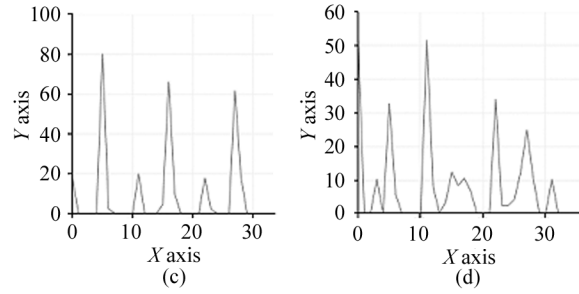
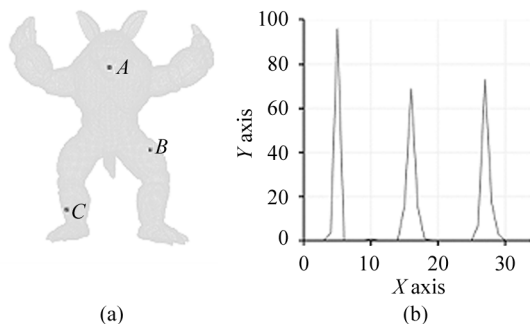


图 3 FPFH 特征矢量示例:(a) 不同位置的 3 个点;  
(b) A 点 FPFH 值;(c) B 点 FPFH 值;(d) C 点 FPFH 值

Fig. 3 FPFH feature vector example;

(a) Three points in different locations;

(b) FPFH value of A; (c) FPFH value of B;

(d) FPFH value of C

### 1.2.3 SAC-IA 算法

SAC-IA 算法利用相同或相似的点云特征确定对应点对,实现点云粗配准,假设存在点云  $M$ 、 $N$ ,算法的基本步骤如下:

1) 从点云  $M$  中选取若干个采样点,每个采样点之间的欧氏距离要大于设置的最小距离阈值  $d_{\min}$ ,以保证采样点具有不同的  $FPFH$  特征。

2) 根据相同或相似的  $FPFH$  特征,在点云  $N$  中寻找每个采样点的若干对应点,并随机选择一个对应点,形成对应点对。

3) 利用 2) 中的对应点对求解初始变换矩阵,并利用误差和 Huber 函数,记为  $\sum_{i=1}^n H(l_i)$ ,评价变换矩阵的质量,其最小值对应的初始变换矩阵即为粗配准所求的最优变换矩阵。Huber 函数的计算式如下:

$$H(l_i) = \begin{cases} \frac{1}{2} l_i^2, & l_i \leq m_l \\ \frac{1}{2} m_l (2 \|l_i\| - m_l), & l_i > m_l \end{cases}, \quad (9)$$

式中,  $m_l$  为设定阈值,  $l_i$  为第  $i$  组对应点对经过变换之后的欧式距离。

### 1.3 基于法向量夹角的点到平面 ICP 算法

面向工业现场中的复杂机械零件测量点云配准精度和效率要求较高,而传统 ICP 算法迭代收敛速度慢、错误对应点对多,导致配准精度和效率难以满足大批量复杂机械零件三维非接触精密测量的需求。为此,本文提出了结合法向量夹角约束的点到平面 ICP 算法,提高了配准精度和效率。

#### 1.3.1 点到平面的 ICP 算法

点到平面的 ICP 算法由 CHEN 等<sup>[15]</sup>于 1992 年



提出,该算法选择点到对应点切平面的距离代替传统 ICP 算法中对应点对之间的欧氏距离来构造误差目标函数,相比传统 ICP 算法,该算法更能体现点云的空间结构,迭代收敛速度更快,其计算式如下:

$$E(T) = \min \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \| (Tp_i - q_i) \cdot n_i \|^2 \right], \quad (10)$$

式中,  $T$  为变换矩阵,  $p_i$ 、 $q_i$  分别表示源点云与目标点云中的对应点,  $n_i$  表示  $q_i$  对应点的法向量。图 4 为两种算法的原理示意图。

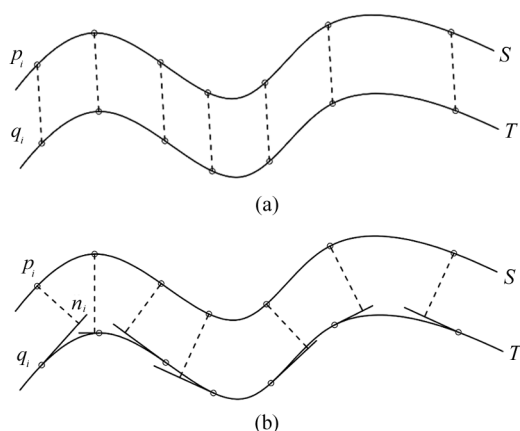


图 4 点到点 ICP 与点到平面 ICP 原理:

(a) 点到点 ICP; (b) 点到平面 ICP

Fig. 4 Point-to-point ICP and point-to-plane ICP principles:

(a) Point-to-point ICP; (b) Point to plane ICP

### 1.3.2 法向量夹角阈值法

利用法向量夹角剔除错误对应点对,提高点云配准精度,算法的基本步骤如下:

1) 首先利用协方差分析法<sup>[16]</sup>计算点云法向量,并将其单位化;

2) 计算对应点对的法向量夹角,设定阈值  $\alpha$ ,若法向量夹角大于阈值  $\alpha$ ,则认为是错误对应点对,反之则是正确的对应点对。

## 2 实验验证与对比分析

本文实验的硬件环境为 Intel(R) Core(TM) i5-4210U CPU @1.70 GHz 2.40 GHz 处理器,8.00 GB 内存;系统环境为 64 位 win10 操作系统;软件环境为 Visual Studio2019,开源点云库 PCL1.11.1。

### 2.1 点云噪声实验

为了验证本文提出方法的抗噪性,以斯坦福大学不同角度下的 bunny000 和 bunny045 点云模型为对象,并为两组点云分别添加均值为 0,标准差为

1 mm 和 2 mm 的高斯噪声。配准结果如图 5 和图 6 所示。

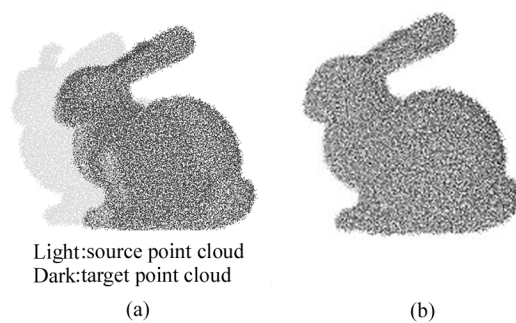


图 5 在均值为 0,标准差为 1 mm 的噪声下的配准结果:

(a) 初始位置; (b) 配准结果

Fig. 5 Alignment results under noise with a mean of 0 and standard deviation of 1 mm:

(a) Initial location; (b) Registration result

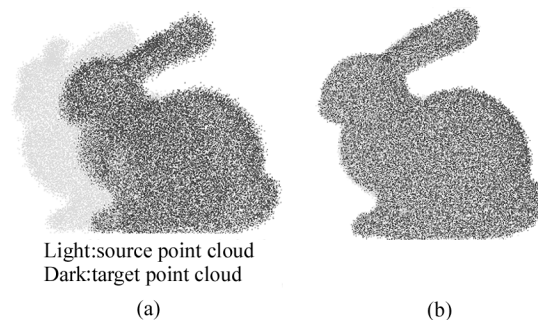


图 6 在均值为 0,标准差为 2 mm 的噪声下的配准结果:

(a) 初始位置; (b) 配准结果

Fig. 6 Alignment results under noise with a mean of 0 and standard deviation of 2 mm:

(a) Initial location; (b) Registration result

在具有一定噪声的非理想环境下,两个不同视角的点云基本重合,说明本文提出的方法对噪声点云具有一定的鲁棒性。

### 2.2 零件点云实验

为验证本文提出方法的合理性和优越性,以常见的复杂机械零件叶片和车门把手为对象,与传统 ICP 算法、SAC-IA + ICP 算法一起进行测量点云配准实验并进行对比分析,并以均方根误差 (root mean square error, RMSE) 衡量配准精度,其计算式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \hat{X}_i)^2}, \quad (11)$$

式中,  $N$  为对应点对数,  $X_i$  为欧式变换后对应点对之间的欧氏距离,  $\hat{X}_i$  为欧式距离的真值,完全配准后  $\hat{X}_i = 0$ 。

图 7 为叶片和车门把手的 ISS 关键点,表 1 为配准过程中的点云数量对比。

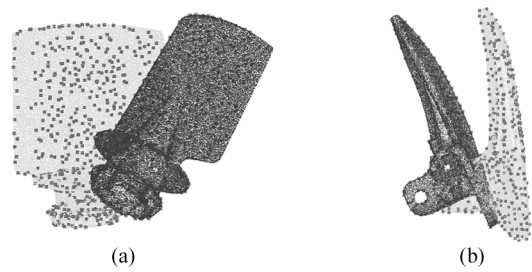


图 7 ISS 关键点:(a) 叶片;(b) 把手  
Fig. 7 ISS key points:(a) Blade;(b) Handle

配准结果如表 2 和图 8 所示。

从图 8 可以看出,3 种算法均完成了零件的点云

配准,但是由图8(b)的局部放大图可知,仅依靠传统 ICP 算法的配准效果并不好。结合表 2 具体数据分析可知,相比其他两种算法,本文提出的方法获得了更高的配准精度和配准效率。就配准精度而言,本文提出方法的 *RMSE* 相比其他两种算法分别平均减少了 80.46%、67.86%,原因在于粗配准为精配准提供了更好的初始位置,并且添加了法向量夹角约束,提高了对应点对的正确率,使配准精度进一步提高。就配准效率而言,本文提出方法的配准时间相比其他两种算法分别平均减少了 49.07%、16.97%,理论上在粗配准中计算 *FPFH* 特征会消耗大量的时间,但是本文进行了下采样预处理,并提取了 ISS 关键点,使计算时间大量缩减,加之迭代次数

表 1 点云数量对比

Tab. 1 Comparison of the number of point clouds

| Point cloud               | Blade              |                    | Handle             |                    |
|---------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                           | Source point cloud | Target point cloud | Source point cloud | Target point cloud |
| Original point cloud      | 59 935             | 56 938             | 40 070             | 38 066             |
| Downsampling point cloud  | 18 032             | 17 320             | 12 703             | 12 162             |
| Key points of point cloud | 783                | 752                | 559                | 514                |

表 2 3 种算法配准结果对比

Tab. 2 Results comparison of three registration algorithms

| Point cloud model | Traditional ICP |        | SAC-IA+ICP |        | Proposed method |        |
|-------------------|-----------------|--------|------------|--------|-----------------|--------|
|                   | Error/mm        | Time/s | Error/mm   | Time/s | Error/mm        | Time/s |
| Blade             | 0.531 66        | 105    | 0.286 15   | 49     | 0.105 99        | 36     |
| Handle            | 0.384 59        | 37     | 0.269 36   | 27     | 0.073 36        | 25     |

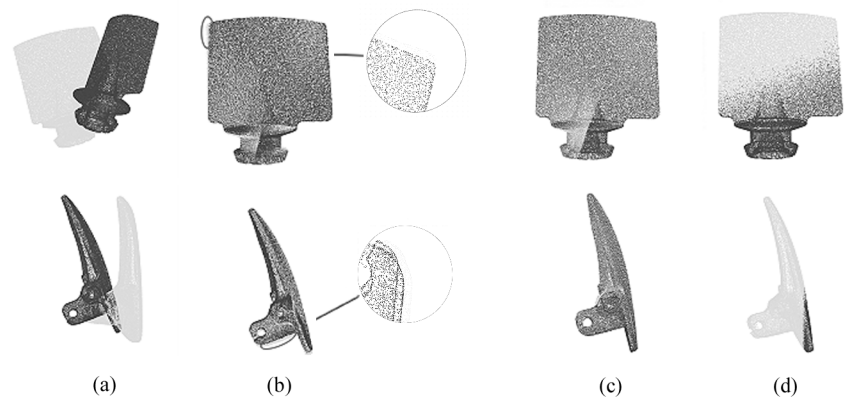


图 8 零件点云配准结果:(a) 初始位置;(b) 传统 ICP;(c) SAC-IA+传统 ICP;(d) 本文算法

Fig. 8 Part point cloud registration results:(a) Initial location;(b) Traditional ICP;  
(c) SAC-IA+Traditional ICP;(d) Algorithm of this paper

的减少,使本文方法的配准时间进一步减少。

### 3 结 论

本文提出了一种基于 ISS-FPFH 特征结合改进 ICP 的复杂机械零件测量点云配准方法。提出基于重心邻近点的体素滤波器,以重心邻近点而非重心代替每个体素内的所有点,解决点云预处理中原始体素滤波器无法保留零件点云表面细微特征的问题。采用基于 ISS-FPFH 特征的 SAC-IA 算法对点云进行粗配准,为两组点云提供一个合适的初始位置,降低传统 ICP 算法对初始位置的依赖性。提出结合法向量夹角约束的点到平面的 ICP 算法,减少迭代次数,剔除错误对应点对,提高传统 ICP 算法的精度和效率。以斯坦福大学的 bunny 点云模型为对象,验证了本文提出方法对噪声点云的鲁棒性。以常见的复杂机械零件叶片和车门把手为对象,将本文提出的方法与传统 ICP 算法和 SAC-IA+ICP 算法一起进行测量点云配准实验并进行对比分析。实验结果表明,本文方法相比于其他两种算法,配准精度和配准效率均有了大幅提升,可以满足大批量复杂机械零件三维非接触精密测量的需求。

### 参考文献:

- [1] HONG Z M, AI Q S, CHEN K. High precise 3D visual measurement based on fiber laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 0803011.  
洪梓铭, 艾青松, 陈昆. 基于光纤激光的高精度三维视觉测量技术[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(8): 0803011.
- [2] YANG L, YAN H Z, YAN T, et al. Research on measurement method of multi-circular arc symmetrical parts based on machine vision[J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(9): 1149-1154.  
杨林, 鄢红章, 晏涛, 等. 基于机器视觉的多圆弧对称零件测量方法研究[J]. *激光与红外*, 2021, 51(9): 1149-1154.
- [3] JI Y J, DU S Y, SONG Y, et al. Research on 3-D vision measurement technology based on line structured light rotating scanning and laser stripe repair[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(2): 20210894.  
纪运景, 杜思月, 宋旻, 等. 基于线结构光旋转扫描和光条纹修复的三维视觉测量技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(2): 20210894.
- [4] YAN W W, CHEN S, MU B Y, et al. Fringe segmentation algorithm based on improved U-Net network[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(12): 1215010.  
闫文伟, 陈帅, 穆宝岩, 等. 改进 U-Net 网络的光条纹分割算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(12): 1215010.
- [5] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2): 239-256.
- [6] ZHANG B, XIONG C B. Automatic point cloud registration based on voxel downsampling and key point extraction[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(4): 041008.  
张彬, 熊传兵. 基于体素下采样和关键点提取的点云自动配准[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(4): 041008.
- [7] WANG F, LIU R F, REN H W, et al. Multi-stage vehicle-mounted laser point cloud registration using road target features[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2020, 37(5): 496-502.  
王飞, 刘如飞, 任红伟, 等. 利用道路目标特征的多期车载激光点云配准[J]. *测绘科学技术学报*, 2020, 37(5): 496-502.
- [8] YAO M, ZHAO Z H, ZHAO M, et al. Internal defect detection of complex structural parts[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(10): 213-220.  
姚敏, 赵增浩, 赵敏, 等. 复杂结构件内部缺陷检测[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(10): 213-220.
- [9] SUN W X, WANG J, LIANG Z Y, et al. Accurate registration of laser point cloud based on normal feature constraint[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(7): 988-995.  
孙文潇, 王健, 梁周雁, 等. 法线特征约束的激光点云精确配准[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2020, 45(7): 988-995.
- [10] PAVLOV A L, OVCHINNIKOV G W V, DERBYSHEV D Y, et al. AA-ICP: iterative closest point with anderson acceleration[C]//2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 21-25, 2018, Brisbane, Australia. New York: IEEE, 2018: 3407-3412.
- [11] ZHU Q B, ZHANG M, LIU Z F, et al. Identification and counting method of potted kumquat fruits based on point cloud registration[J]. *Transactions of the Chinese Socie-*

- ty for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 209-216.
- 朱启兵, 张梦, 刘振方, 等. 基于点云配准的盆栽金桔果实识别与计数方法[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 209-216.
- [12] ZHONG Y. Intrinsic shape signatures: A shape descriptor for 3d object recognition[C]//2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops, September 27-October 4, 2009, Kyoto, Japan. New York: IEEE, 2009: 689-696.
- [13] RUSU R B, BLODOW N, BEETZ M. Fast point feature histograms (FPFH) for 3D registration[C]//2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 12-17, 2009, Kobe, Japan. New York: IEEE, 2009: 3212-3217.
- [14] 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, September 22-26, 2008, Nice, France. New York: IEEE, 2008: 3384-3391.
- [15] CHEN Y, MEDIONI G. Object modelling by registration of multiple range images[J]. Image and Vision Computing, 1992, 10(3): 145-155.
- [16] LU Q, LIN T T, LI P C, et al. Improved registration algorithm for spatial non-cooperative target point cloud clustering[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(9): 20200431.
- 卢祺, 林婷婷, 李程鹏, 等. 空间非合作目标点云聚类配准方法[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(9): 20200431.

#### 作者简介:

伍济钢 (1978—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事视觉测量方面的研究。