

# 一种基于轮廓特征约束的飞机蒙皮配准方法

靳宇婷, 张益华, 崔海华\*, 翟鹏, 胡广露

南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016

**摘要** 飞机蒙皮表面平缓、光滑、特征少, 在使用迭代最近点进行数模配准时会产生错位、局部最小值等问题, 因此提出了一种基于轮廓约束的蒙皮点云配准方法。首先定义一种新的三维轮廓  $C\kappa$  特征点描述方法, 并基于距离约束对初始  $C\kappa$  特征点进行聚类 and 过滤, 实现对蒙皮点云特征的精确描述。其次, 基于距离的快速点特征直方图 (FPFH-d) 特征相似度约束, 寻找点云和数模特征点的对应点对, 实现蒙皮轮廓的初始配准。最终基于迭代最近点算法, 融合  $C\kappa$  特征描述的轮廓约束, 实现蒙皮的精配准。利用斯坦福公共数据库点云对算法的速度和精度进行测试, 与点快速直方图算法 (FPFH-SAC-IA) 相比, 初始配准精度分别提高了 48.47% 和 77.29%, 速度分别提高了 70.35% 和 97.08%, 证明了  $C\kappa$  特征点提取算法的普适性和有效性。基于以上算法, 对飞机蒙皮测量数据进行实验验证, 配准准确度达到了 100%, 在  $12\text{ m}^3$  范围内全局误差优于 3.5 mm。该方法有效解决了蒙皮配准时的错位和局部最小值问题。

**关键词** 测量; 飞机蒙皮; 点云配准;  $C\kappa$  特征点; 轮廓约束

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0312001

## An Aircraft Skin Registration Method Based on Contour Feature Constraint

Jin Yuting, Zhang Yihua, Cui Haihua\*, Zhai Peng, Hu Guanglu

*College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China*

**Abstract** When the iterative closest point (ICP) is used for model registration of the aircraft skin surface, problems such as dislocation and local minimum value will appear since the surface is flat and smooth and has few features. For this reason, a registration method of skin point clouds based on contour constraints was proposed. Firstly, a new description method of  $C\kappa$  feature points for a three-dimensional contour was defined, and the initial  $C\kappa$  feature points were clustered and filtered based on the distance constraint, realizing the accurate feature description of skin point clouds. Secondly, on the basis of the similarity constraint of fast point feature histogram based on distance (FPFH-d) features, the corresponding point pairs of point clouds and model feature points were found to achieve the initial registration of the skin contour. Finally, according to the ICP algorithm, the contour constraints of  $C\kappa$  feature description were fused for the precise registration of the skin. Furthermore, the speed and accuracy of the new algorithm were tested by the point clouds from the Stanford public database. In comparison with the fast point feature histograms-sample consensus initial alignment (FPFH-SAC-IA), the initial registration accuracy of the proposed algorithm is improved by 48.47% and 77.29%, respectively, and the speed is increased by 70.35% and 97.08%, respectively, which proves the universality and effectiveness of the extraction algorithm of  $C\kappa$  feature points. In addition, based on the proposed algorithm, we conduct experiments to verify the measurement data of aircraft skin and the results demonstrate that the registration accuracy reaches 100% and the global error is better

收稿日期: 2020-07-22; 修回日期: 2020-08-19; 录用日期: 2020-09-08

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2006100, 2019YFB1707500)、江苏省自然科学基金(BK20191280)、中央高校基本科研业务费(NS2020030)

\* E-mail: cuihh@nuaa.edu.cn

than 3.5 mm in the range of 12 m<sup>3</sup>. In conclusion, the method proposed in this paper can effectively solve the problems of dislocation and local minimum value during skin registration.

**Key words** measurement; aircraft skin; point cloud registration;  $C_k$  feature point; contour constraint

**OCIS codes** 120.4640; 150.1135

## 1 引言

飞机蒙皮零件是飞机气动外形的重要组成部分,具有尺寸大、易变形的特点。蒙皮类零件的加工质量直接影响飞机的整体装配精度,其精确检测对于飞机制造具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。将数字化测量得到的点云数据和理论数模进行坐标统一,并基于最优几何位置关系进行偏差分析,可实现对蒙皮变形量的描述。由于零部件上没有可靠的定位基准,因此加工余量和误差大小的评价依赖于配准结果<sup>[3]</sup>,综上,研究蒙皮点云与模型的精确配准至关重要。

点云配准的核心问题即求解两片点云之间的刚性变换矩阵。对于这一问题,最经典的算法是 Besl 等<sup>[4]</sup>提出的迭代最近点(ICP)算法及其改进算法<sup>[5-7]</sup>。但当点云的初始位置相差较大,或点云自身特征不明显时,容易出现局部最小值。针对这一问题,国内外学者做了大量的相关工作。最常见的做法是在 ICP 精确配准前,对点云进行初始配准,以提供较好的初值。常用的初始变换可大致分为三类:1)人为设定标签点进行配准<sup>[8]</sup>;2)基于投票法则的配准方法<sup>[9]</sup>;3)基于局部特征的配准方法<sup>[10-13]</sup>。其中广泛应用的是利用局部特征配准的方法<sup>[14-15]</sup>。Steder 等<sup>[16]</sup>提出法向对齐径向特征(NARF)算法,利用点的位置区分点的重要度,达到找出特征点及匹配的目的,但该方法对于内部特征不明显的点云

匹配效果不好;Tombari 等<sup>[17]</sup>提出方向特征直方图算法(SHOT),该方法描述性强,但复杂度高,计算效率低;Rusu 等<sup>[18]</sup>提出点特征直方图(PFH)、快速点特征直方图(FPFH),以及基于该特征的采样一致性配准算法,以下简称 FPFH-SAC-IA,该方法描述性强、特征维度低,但耗时较长。针对蒙皮配准问题,石庆兰<sup>[19]</sup>提出定位约束模型对齐法,解决了蒙皮带孔的约束配准问题;谭高山<sup>[3]</sup>提出了自适应动态加权配准方法,解决了区域精度要求不同的蒙皮配准问题;但以上方法都需要蒙皮上有高精度特征进行约束。

蒙皮数据表面平缓、光滑、特征少,在没有定位孔等精确约束的条件下配准结果容易陷入局部最优。鉴于此,本文提出了一种基于轮廓约束的配准算法:首先提取测量数据中的蒙皮轮廓,对轮廓进行特征点提取,基于所提取的特征点实现轮廓的初始匹配;再利用 ICP 算法实现轮廓的精确配准;最后利用轮廓约束实现蒙皮的配准。在应用公共数据集和蒙皮数据集对本文算法进行验证后,发现配准精度和配准效率得到了较大的提升,有效解决了配准时的错位和局部最小值问题。

## 2 飞机蒙皮配准方法概述

本文的蒙皮测量数据与理论模型的配准过程如图 1 所示。首先采用数字化组合式测量方法<sup>[19]</sup>,获

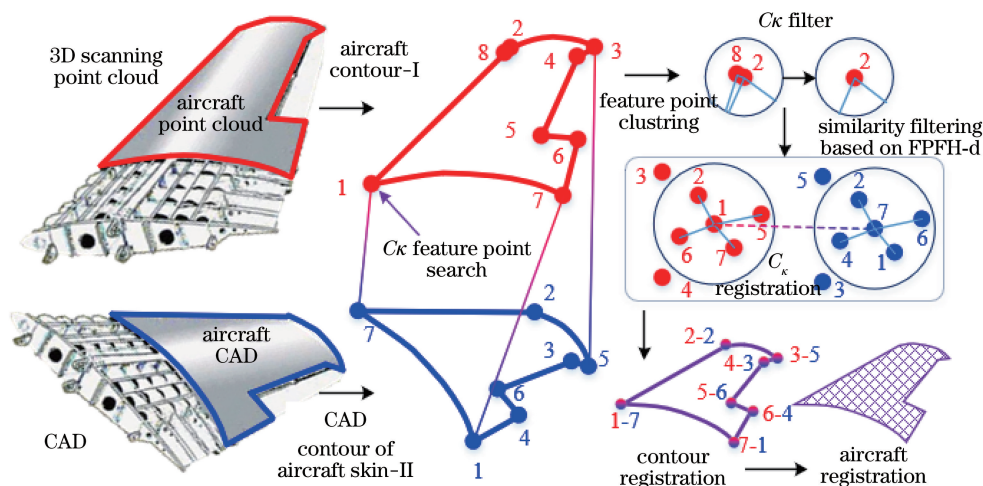


图 1 飞机蒙皮配准过程

Fig. 1 Process of aircraft skin registration

取飞机蒙皮表面数据。由于飞机蒙皮尺寸大、表面光滑、曲率特征少,在检测过程中进行数据配准时会出现严重的错位情况。为了解决这个问题,提出了一种基于轮廓约束的配准算法,即先筛选轮廓上的  $C\kappa$  特征点,利用欧氏距离聚类,提取不同区域的特征点,再利用基于距离的快速点特征直方图(FPFH-d)选取对应点,利用奇异值分解(SVD)法求解粗配准矩阵,最后利用 ICP 算法完成匹配,最后将配准完成的测量数据与理论数模进行比对分析,得到整体均方根(RMS)误差。

### 3 特征点的定义和描述

#### 3.1 $C\kappa$ 特征点的提取

点云的邻域特征主要有邻域点的数量、邻域点的质心、点的法向和曲率。蒙皮轮廓线是由离散点构成的三维曲线框。对于轮廓线而言,角点是其非常重要的特征。角点与轮廓上其他点最大的区别是曲率的波动增大。针对角点的特性,可利用曲率变化将角点与其他特征点进行区分。 $C\kappa$  特征点选取的原理表述如下。

1) 利用主成分分析法<sup>[20]</sup>估计点云中离散点的法线和曲率,利用点云中某个离散点  $P_a$  周围特定数量的  $n$  个三维点构建邻域点的协方差矩阵表示为

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\mathbf{p}_i - \bar{\mathbf{p}})(\mathbf{p}_i - \bar{\mathbf{p}})^T, \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{p}_i$  为  $P_a$  邻域范围内第  $i$  个点的三维坐标;  $\bar{\mathbf{p}}$  为邻域点的重心坐标;  $n$  为邻域点的个数,在实际计算中,  $n$  根据局部点云密度确定。

2) 设  $\lambda (i=1, 2, 3)$  和  $\mathbf{u}_i (i=1, 2, 3)$  分别为协方差矩阵  $C$  的特征值与对应的特征向量。则  $P_a$  点的

曲率为

$$\rho = \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2}. \quad (2)$$

3) 计算邻域  $k$  内各点的曲率均方差  $\kappa_i$  为

$$\kappa_i = E(\rho) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\rho_i - \bar{\rho})^2. \quad (3)$$

由(3)式可知,由于  $E(\rho)$  是对邻近点的点云曲率变化的描述,当  $P_i$  点与  $P_a$  邻域内点相对位置不变时,  $\kappa_i$  值不变,因此利用邻域曲率均方差进行离散点描述的方法具有旋转不变性。对蒙皮轮廓线所有点计算  $\kappa$  值。根据蒙皮结构特点,平滑的边缘轮廓点曲率均方差较小,  $\kappa$  值趋于 0; 而在角点区域曲率均方差较大,即  $\kappa$  值较大。对于特定的蒙皮构件,其角点数量已知为  $f_0$ 。在特征点提取过程中,为确定所处理的蒙皮轮廓上实际角点特征区域数量  $f$ , 首先对  $\kappa$  值进行降序排列,初步设定该轮廓包含特征点的数量阈值  $\epsilon = f_0$ , 然后选取前  $\epsilon$  个特征点作为初始轮廓特征点。由于同一角点区域内,特征点分布密集造成同一角点的特征描述差异,使得初始阈值的设定不能完全覆盖所有角点特征区域,本文进一步增加特征点数量阈值  $\epsilon = \epsilon + 1$ 。每次阈值增加后计算角点特征区域数量  $f$ , 直到获得稳定的角点区域数量,然后采用基于距离的聚类方法确定最终的角点数量。聚类过程见 3.2 节。

#### 3.2 基于距离聚类的特征点过滤

由于轮廓边缘离散点较近,邻域内各点曲率均方差相差不大,提取出的特征点容易出现聚集现象,造成后续 SVD 法求解旋转平移矩阵时特征点对的错误描述。因此对提取出的特征点依据欧氏距离进行聚类。特征点滤除示意图如图 2 所示。

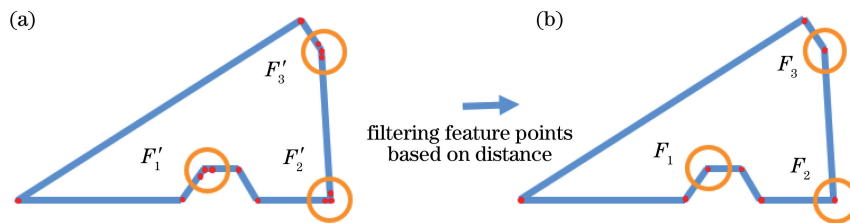


图 2 基于欧氏距离的特征点聚类

Fig. 2 Feature points clustering based on Euclidean distance

特征点聚类与  $C\kappa$  特征点确定的过程如下。

1) 在 3.1 节计算出的特征点集  $\mathbf{P}$  中选取一种种子点  $\mathbf{p}_1$ , 利用  $k$ -d 树搜索  $\mathbf{p}_1$  一定邻域内的  $n$  个点, 存储为一个区域点集  $(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_n)$ ;

2) 在  $(\mathbf{P} \setminus \mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_n)$  中选取种子点  $\mathbf{p}_{n+1}$ , 继续步骤 1。其中“ $\setminus$ ”表示从  $\mathbf{P}$  中去除区域点集;

3) 当区域点集不再增加时,认为聚类完成;

4) 在每个区域点集中选取  $\kappa$  值最大的点作为该区域  $C\kappa$  特征点。

欧氏距离在一定阈值内的特征点表征同一特征区域。为确定在每一角点区域只有一个  $C\kappa$  特征点作为该区域的特征描述,设置仅在这一特征区域中

选择  $\kappa$  值最大的点作为这一区域的特征点。如图 2(a)所示,  $F'_i (i=1, 2, 3)$  为该特征区域中的  $C\kappa$  特征点集, 经过距离聚类过滤后, 如图 2(b)所示, 该特征区域中的  $C\kappa$  特征点集  $F_i (i=1, 2, 3)$  只有一个  $C\kappa$  特征点代表该特征区域。

### 3.3 FPFH-d 特征点描述子及特征点相似度计算

快速点特征直方图描述算法是一种应用较广的三维特征描述算法<sup>[17]</sup>, 但是对于稀疏或离散特征点

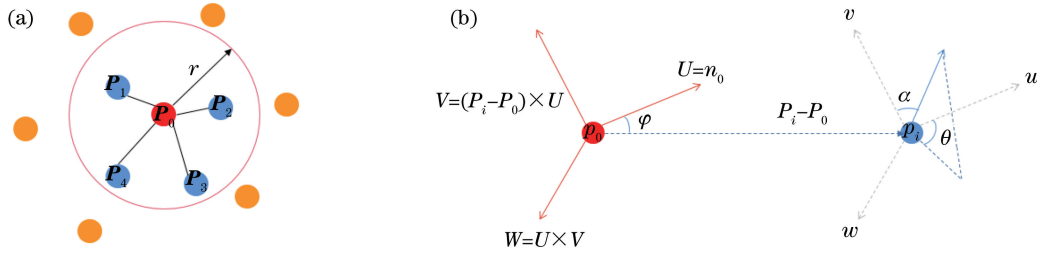


图 3 FPFH 局部坐标系的建立。(a)  $P_0$  的影响域;(b)局部坐标系

Fig. 3 Establishment of FPFH local coordinate system. (a) Influence domain of  $P_0$ ; (b) local coordinate system

设  $P_0$  和邻域内的点构成一个点集  $P_k$ , 选取  $P_0$ 、 $P_i$  为  $P_k$  中的任意一对点, 计算其法向量  $n_0$ 、 $n_i$ , 建立局部坐标系, 过程如图 3(b)所示。

$$U = n_0, \quad (4)$$

$$V = \frac{(P_i - P_0) \times U}{\|P_i - P_0\|_2}, \quad (5)$$

$$W = U \times V. \quad (6)$$

根据该局部坐标系, 使用一组角度对  $n_0$  和  $n_i$  之间的偏差进行描述, 表示为

$$\alpha_i = \mathbf{v}n_i, \quad (7)$$

$$\varphi_i = \mathbf{u} \frac{(p_i - p_0)}{\|p_i - p_0\|_2}, \quad (8)$$

$$\theta_i = \arctan(\mathbf{W}n_i, \mathbf{U}n_i). \quad (9)$$

在 FPFH 特征点描述方法的基础上加入距离特征, 即每个点与其余特征点的欧氏距离  $d_i (i=1, 2, 3, \dots)$  表示为

$$d_i = \|P_i - P_0\|_2. \quad (10)$$

每两个特征点产生如下四维向量, 记为  $T_i = (d_i, \alpha_i, \varphi_i, \theta_i)$ 。  $P_0$  的描述矩阵定义为其与邻域内所有特征点描述向量的组合  $T = (T_1, T_2, \dots, T_k)$ 。将该描述矩阵简化为  $T = (\tau, B)$ , 其中,  $\tau = (d_1, d_2, \dots, d_k)^T$ ,  $B = (b_1, b_2, \dots, b_k)$ 。那么, 该描述矩阵的第一列为距离描述向量, 后三列为角度描述矩阵。

由于两片点云计算得到的特征点数不一定完全相同, 采取积分制描述两片点云特征点的相似度。记相似度得分为  $s$ , 若潜在对应特征点描述矩阵分

描述效果较弱。本文引入特征点距离约束, 提出了 FPFH-d。核心思想是通过参数化查询点云与近邻点的空间差异, 实现点云局部区域变化情况的准确描述。算法计算原理如图 3 所示。

假设被描述的点为  $P_0$ , 其邻域如图 3(a)所示, 中心点为被描述点  $P_0$ , 相邻点为  $P_0$  的  $k$  个邻域点, 圆圈表示以  $P_0$  为中心、 $r$  为半径的邻域。邻域内的点  $P_k$  与  $P_0$  相连, 组成一个离散点互连网络。

别为  $T_1 = (\tau_1, B_1), T_2 = (\tau_2, B_2)$ 。则

$$s = \begin{cases} s + 1, & \|\tau_{1i} - \tau_{2j}\| < \delta_1, \\ & i = 1, \dots, k_1, j = 1, \dots, k_2 \\ s + 2, & \|B_{1m} - B_{2n}\| < \delta_2, \\ & m, n = 1, \dots, k_1, j = 1, \dots, k_2 \end{cases}, \quad (11)$$

式中:  $k_1$  和  $k_2$  表示  $T_1$  和  $T_2$  的维数;  $\delta_1$  为距离特征的阈值;  $\delta_2$  为角度特征的阈值。统计每个特征点的得分, 得分大于分值阈值则认为是对应点。

## 4 基于 $C\kappa$ 特征点的点云配准

### 4.1 配准流程

点云配准的关键是确定两片点云的刚性变换矩阵。基于  $C\kappa$  特征点提取的点云配准算法分为初始配准和精确配准。其流程如图 4 所示。

首先, 利用数字化测量系统获取三维点云数据, 获得待配准点云  $P$ , 对应数模或另一视角点云作为参考点云  $Q$ 。当点云数据规模较大时, 采用适当的采样方法对点云进行下采样。

根据(1)~(3)式计算点云中每点的  $\kappa$  值, 选取合适的阈值提取出  $C\kappa$  特征点。根据欧氏距离对特征点进行聚类过滤, 得到能准确表达角点信息的特征点集  $F_j$ , 其中  $j=1, 2$  分别表示点云  $P$  和  $Q$  对应的特征点集。利用 FPFH-d 描述子描述特征点集  $F_j$ , 根据(11)式找到特征点集中的对应点集  $P_0$  和  $Q_0$ 。利用 SVD 法求解平移旋转矩阵使得下式最小。

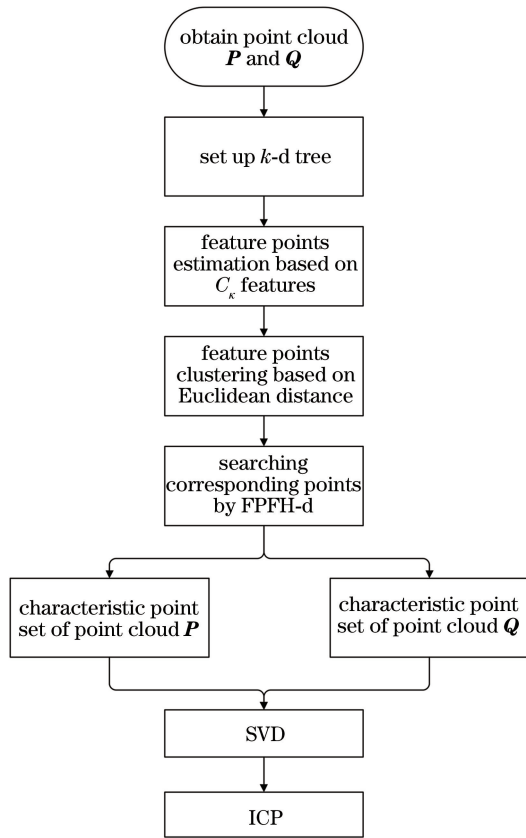


图 4 基于  $C_\kappa$  关键点提取的点云配准算法流程图  
Fig. 4 Flow chart of point cloud registration algorithm based on  $C_\kappa$  key point extraction

$$\sum_{i=1}^n \|RQ_i + t - P_i\|^2, \text{ where } R^T R = I. \quad (12)$$

令  $\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$ ,  $\bar{Q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i$ ,  $S = \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})(P_i - \bar{P})^T$ , 则  $S$  的 SVD 分解为  $(U, \Sigma, V)$ , 其中  $U^T S V = \Sigma$ , 那么平移旋转量为

$$R = V U^T, t = \bar{P} - R \bar{Q}. \quad (13)$$

最后, 利用 ICP 算法完成  $P$  和  $Q$  的精确配准。

#### 4.2 算法验证

为了证明  $C_\kappa$  特征点配准方法的普适性和有效性, 选用公共数据集 Bunny、Dragon 进行特征点提取实验, 特征点提取结果如图 5(b)、(c)、(e)、(f) 所示, 可以看出,  $C_\kappa$  特征点集既包括边缘部分也包括非边缘部分, 在曲率变化大的部分, 特征点比较密集, 能较好地表征真实形状。

使用基于  $C_\kappa$  特征点的初始配准算法对 Bunny 和 Dragon 数据集进行初始配准, 初始配准结果如图 6(a) 和 (b) 所示, 配准误差分别为  $5.56434 \times 10^{-3}$  mm 和  $5.30784 \times 10^{-3}$  mm。单位空间内配准误差为  $0.201$  mm/m<sup>3</sup> 和  $0.25$  mm/m<sup>3</sup>。完成初始配准后, 再使用 ICP 精确配准, 最终完成基于  $C_\kappa$  特征点提取的配准算法, 精确配准结果如图 6(c) 和 (d) 所示, 配准误差分别为  $3.13203 \times 10^{-3}$  mm 和  $2.06983 \times 10^{-3}$  mm。

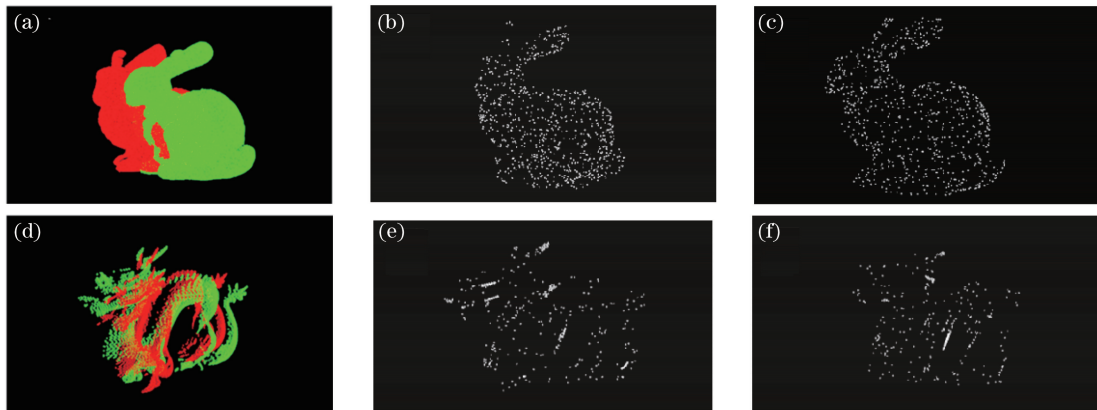


图 5 Bunny、Dragon 特征点提取结果。(a) Bunny 原始点云;(b) Bunny 视角 1 下特征点;(c) Bunny 视角 2 下特征点;(d) Dragon 原始点云;(e) Dragon 视角 1 下特征点;(f) Dragon 视角 2 下特征点

Fig. 5 Feature point extraction results of Bunny and Dragon. (a) Original point cloud of Bunny; (b) feature points of Bunny in view 1; (c) feature points of Bunny in view 2; (d) original point cloud of Dragon; (e) feature points of Dragon in view 1; (f) feature points of Dragon in view 2

为验证本文所提特征描述算子  $C_\kappa$  特征点在点云粗配准方面的优越性, 将其与经典的基于 FPFH-SAC-IA 配准算法的配准结果进行对比, 统计结果如表 1 所示。

在表 1 中, 时间提高的比率为利用本文描述子相对于利用 FPFH 描述子配准时间提高的程度。相比于 FPFH-SAC-IA 初始配准算法, 对于曲率特征明显的数据 Bunny 点云和 Dragon 点云, 初始配

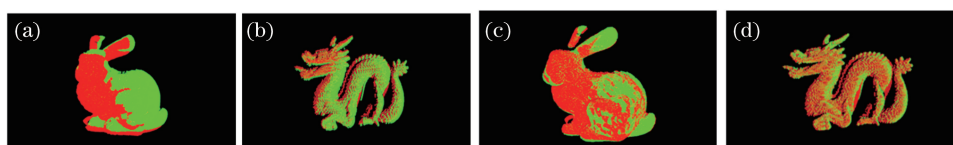


图 6 Bunny、Dragon 配准结果。(a) Bunny 初始配准结果;(b) Dragon 初始配准结果;  
(c) Bunny 精确配准结果;(d) Dragon 精确配准结果

Fig. 6 Registration results of Bunny and Dragon. (a) Initial registration result of Bunny; (b) initial registration result of Dragon; (c) accurate registration result of Bunny; (d) accurate registration result of Dragon

表 1 初始配准结果比较

Table 1 Comparison of initial registration results

Algorithm	Dataset	Time /ms	Improvement	Initial	Improvement	Error in unit
			ratio of time /%	registration error /( $10^{-2}$ mm)	ratio of accuracy registration /%	space / ( $\text{mm} \cdot \text{m}^{-3}$ )
FPFH-SAC-IA	Bunny1, Bunny2	342930	—	1.079862	—	0.388
$C\kappa$ -FPFH-SAC-IA	Bunny1, Bunny2	101679	70.35	0.556434	48.47	0.201
FPFH-SAC-IA	Dragon1, Dragon2	415410	—	2.336726	—	1.102
$C\kappa$ -FPFH-SAC-IA	Dragon1, Dragon2	12112	97.08	0.530784	77.29	0.250

准速度分别提高 70.35% 和 97.08%。对于 Bunny 点云,利用本文  $C\kappa$  特征点和 FPFH 特征的点云配准方法得到的初始配准误差分别为  $5.56434 \times 10^{-3}$  mm 和  $10.79862 \times 10^{-3}$  mm,初始配准精度提高 48.47%。单位空间内配准误差为  $0.201 \text{ mm/m}^3$  和  $0.388 \text{ mm/m}^3$ ,单位空间内配准精度提高 48.19%。同样地,对于 Dragon 点云,初始配准精度提高 77.29%,单位空间内配准精度提高 77.31%。相比于 FPFH-SAC-IA 算法,本文算法能够获得与精配准更接近的配准结果,是一种精确度较高的算法。由于  $C\kappa$  特征点融合了曲率信息,弥补了 FPFH 只有法向

量信息的不足,因此本文算法不仅保证了配准精度,而且大大加快了配准速度,提高了配准效率。

## 5 飞机蒙皮数据配准实验

为验证本文算法对飞机蒙皮类数据配准的有效性,选用光学大视场高精度组合式测量<sup>[20-22]</sup>所得的蒙皮样件三维点云数据并进行去噪处理,使用处理后的点云数据来说明本文算法的配准过程。该点云数据包围盒大小约为  $12 \text{ m}^3$ 。将蒙皮的 CAD 数据离散为三维点云,作为参考点云,真实数据作为待配准点云,可视化结果如图 7 所示。

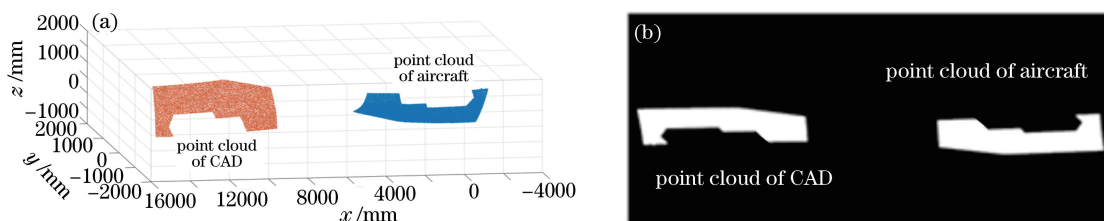


图 7 蒙皮点云与 CAD 点云。(a)点云的三维显示;(b)点云在软件中的三维显示

Fig. 7 Aircraft skin point cloud and CAD point cloud. (a) Three-dimensional display of point cloud;  
(b) three-dimensional display of point cloud in software

用文献[23]的方法提取蒙皮轮廓线,结果如图 8 所示。图 7(b)和图 8(b)为编程实现的软件系统界面,其中,图 7(b)为两片待配准的点云可视化显示,图 8(b)为图 7(b)对应的蒙皮轮廓线。为直观显示蒙皮数据的三维形态,在三维坐标系中绘制对应的显示结果,如图 7(a)和图 8(a)所示。

### 5.1 $C\kappa$ 特征点提取验证

首先,使用点云轮廓数据说明  $C\kappa$  特征点的阈

值设置准则。本文算法将提取  $\kappa$  值较大的点作为特征点,但提取特征点的个数,直接关系到轮廓配准的精度。设置不同的特征点提取个数,并将其进行聚类,得到其与特征区域个数  $f$  的变化曲线如图 9(a)所示。可以看出,当阈值  $\epsilon$  设为 17 时,特征区域数稳定为 8 个,因此设定阈值为 17。图 9(b)为阈值设为 17 时特征点的提取效果。

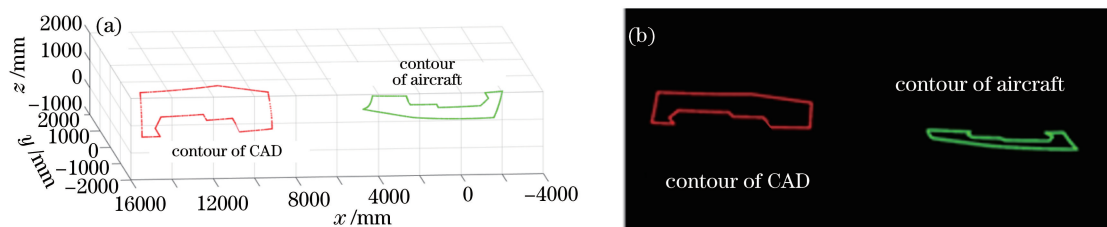


图 8 蒙皮轮廓线。(a)蒙皮轮廓线的三维显示;(b)蒙皮轮廓线在软件中的三维显示

Fig. 8 Contour of aircraft skin. (a) Three-dimensional display of skin contour; (b) three-dimensional display of skin contour in software

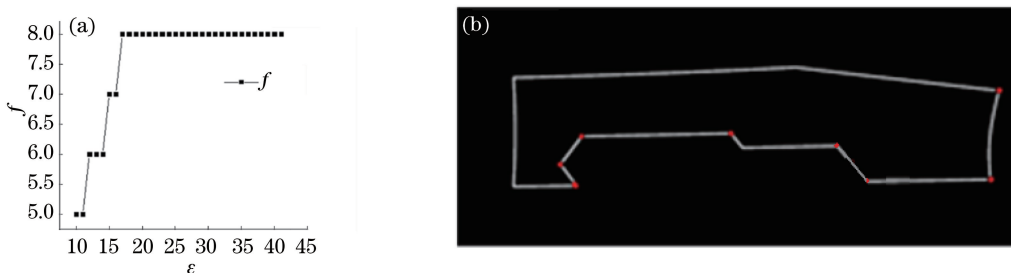


图 9 特征点选择。(a)阈值与特征区域个数曲线;(b)特征点提取效果

Fig. 9 Selection of feature point. (a) Curve between threshold and characteristic area number; (b) extraction effect of feature point

### 5.2 基于 $C_k$ 特征点的蒙皮配准

将本文算法应用于实测的飞机蒙皮样件数据配准,初始轮廓配准结果如图 10(a)所示。其中深色

表示蒙皮 CAD 数据的轮廓线,浅色表示蒙皮测量数据轮廓线。

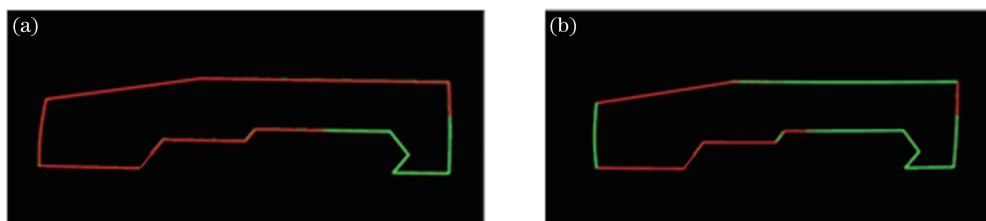


图 10 蒙皮轮廓配准结果。(a)初始配准结果;(b)精确配准结果

Fig. 10 Registration results of aircraft skin. (a) Initial registration result; (b) accurate registration result

从图 10(a)可看出,两条蒙皮轮廓线实现初步配准,对应点基本贴合。轮廓的初始配准 RMS 误差为 3.42428 mm。利用 ICP 进行精确配准,结果如图 10(b)所示,RMS 误差为 0.878388 mm。

将轮廓匹配变换矩阵应用于蒙皮点云数据,作为蒙皮精确配准的输入数据,进行进一步匹配。配准结果如图 11 所示,蒙皮整体配准后 RMS 误差为 3.43076 mm,考虑到蒙皮整体尺寸空间约为  $12 \text{ m}^3$ ,单位空间内配准误差仅为  $0.28 \text{ mm/m}^3$ ,表明两片蒙皮点云配准精度较高。

### 5.3 算法有效性验证

为了进一步验证本文算法在蒙皮类零件配准方面的优越性,利用 FPFH-SAC-IA、直接 ICP 算法、本文算法对同一蒙皮点云进行配准实验。对应的轮

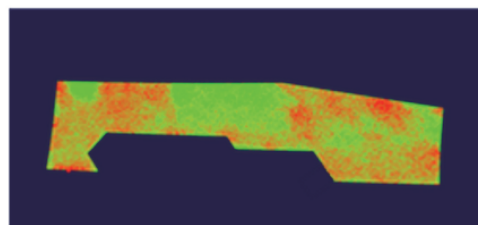


图 11 蒙皮整体配准结果

Fig. 11 Overall registration results of aircraft skin

廓配准结果如图 12(a)、(c)、(e)所示,可以发现,由于特征点描述方法差异,利用 FPFH 描述算子获得了错误的匹配点,导致整体轮廓配准错位,配准失败。同样,直接采用 ICP 算法进行轮廓配准产生了局部收敛的情况,如图 12(c)所示,两条轮廓产生交叉重叠,没有完全贴合,配准失败。而利用本文获得

的轮廓匹配点进行轮廓配准,保证了轮廓完全配准,配准成功[图 12(e)]。

同样,对于蒙皮点云数据进行实验,FPFH-SCA-IA、直接 ICP 算法同样产生局部收敛情况,即配准结果保证了局部点云距离最小,而没有达到全局点云配准误差最小值,如图 12(b)、(d)可知,配准

结果均没有获得全局最优,两片点云发生错位和交叉,配准失败。图 12(f)为基于图 12(e)的轮廓配准结果的整片点云配准结果,可以看出,本文算法配准结果如图 12(e)、(f)所示,本文算法可将蒙皮轮廓与蒙皮型面完全匹配,且 RMS 误差为 3.43076 mm,单位空间内配准误差仅为 0.28 mm/m<sup>3</sup>,配准精度较高。

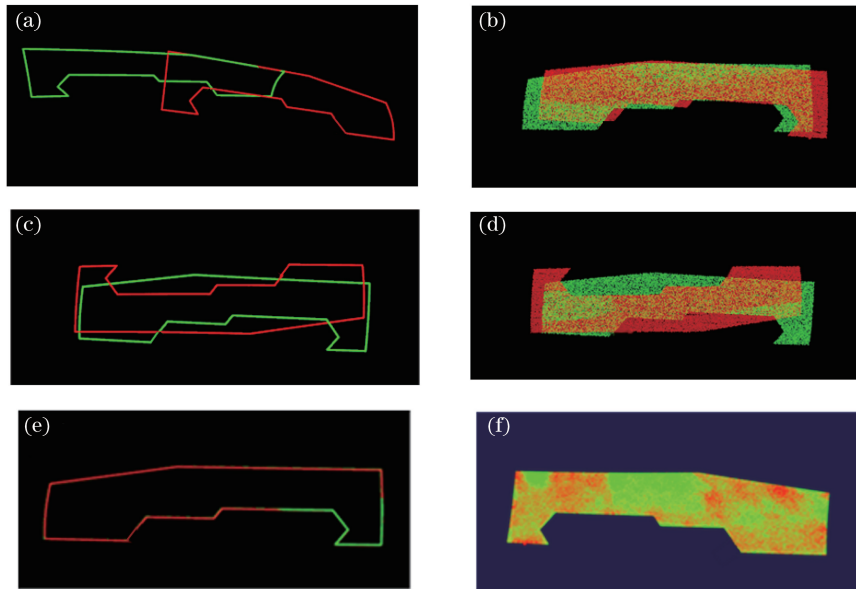


图 12 各方法配准结果对比。(a) FPFH-SAC-IA 配准轮廓效果;(b) FPFH-SAC-IA 配准整体效果;  
(c) ICP 配准轮廓效果;(d) ICP 配准整体效果;(e)本文算法配准轮廓效果;(f)本文算法配准整体效果

Fig. 12 Comparison of registration results of each method. (a) Registration contour effect of FPFH-SAC-IA algorithm;  
(b) overall effect of FPFH-SAC-IA algorithm;(c) registration contour effect of ICP algorithm;(d) overall effect of ICP algorithm;(e) registration contour effect of proposed algorithm; (f) overall effect of proposed algorithm

以上实验结果表明,针对蒙皮表面平滑、特征少的点云配准问题,传统的基于点云局部特征如法向量、拓扑结构等信息无法得到正确的全局配准结果,点云配准易发生错位和交叉,导致配准失败。本文提出的  $C_k$  特征描述算子,融合了法向量、轮廓曲率等信息,能够有效解决由于迭代最近点造成的局部最小值情况,有效实现飞机蒙皮等薄壁类零件与其数模的配准。但仍存在一定的局限性:噪声对本算法有一定的影响,在存在大量噪声的情况下配准结果可能出现偏差,对原始点云进行去噪处理后,配准效果良好。

## 6 结 论

为了解决飞机蒙皮外形测量检测问题过程中的配准错位情况,本文提出了一种以  $C_k$  特征点提取为基础,先对蒙皮轮廓进行匹配,再将蒙皮三维轮廓作为配准约束的配准方法。蒙皮表面平滑、特征少,此方法不仅解决了点云配准时出现的局部收敛问

题,还保证了配准精度和配准速度。作为一种通用的配准算法,该方法既可以用于一般点云配准,也可以用于其他特征少的航空零件检测,对于飞机装配和精密制造有很高的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Bao Y. Foundation of mirror milling technology of sheet for aircraft skin manufacturing [D]. Dalian: Dalian University of Technology of China, 2018: 1-2.  
鲍岩. 面向飞机蒙皮制造的薄板镜像铣削工艺基础 [D]. 大连:大连理工大学,2018:1-2.
- [2] Hu Y G, Sun A Q, Wang X P, et al. Research on application of aircraft skin digital manufacturing technology[J]. New Technology & New Process, 2014(8): 19-22.  
胡愈刚,孙安全,王晓平,等. 飞机蒙皮数字化制造技术应用研究[J]. 新技术新工艺,2014(8): 19-22.
- [3] Tan G S. Research on registration in aviation parts processing and inspection [D]. Nanjing: Nanjing



- University of Aeronautics and Astronautics of China, 2017:2-3.
- 谭高山. 航空零部件加工及检测中的配准问题研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2017:2-3.
- [4] Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3D shapes [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2): 239-256.
- [5] Zhang Z Y. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1994, 13(2): 119-152.
- [6] Dorai C, Wang G, Jain A K, et al. Registration and integration of multiple object views for 3D model construction [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(1): 83-89.
- [7] Wei S B, Wang S Q, Zhou C H, et al. An iterative closest point algorithm based on biunique correspondence of point clouds for 3D reconstruction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0515003.  
韦盛斌, 王少卿, 周常河, 等. 用于三维重建的点云单应性迭代最近点配准算法[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0515003.
- [8] Cheng L, Tong L H, Li M C, et al. Semi-automatic registration of airborne and terrestrial laser scanning data using building corner matching with boundaries as reliability check [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(12): 6260-6283.
- [9] Aiger D, Mitra N J, Cohen-Or D. 4-points congruent sets for robust pairwise surface registration[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 1-10.
- [10] Zhao F Q, Zhou M Q, Geng G H, et al. Rigid blocks matching method based on contour curves and feature regions[J]. *IET Computer Vision*, 2018, 12(1): 76-85.
- [11] Izumiya S, Nabarro A C, Sacramento A D J. Pseudo-spherical normal Darboux images of curves on a timelike surface in three dimensional Lorentz-Minkowski space [J]. *Journal of Geometry and Physics*, 2015, 97:105-118.
- [12] Huang J H, Wang Z, Gao J M, et al. High-precision registration of point clouds based on sphere feature constraints[J]. *Sensors*, 2016, 17(1): 72.
- [13] Jiang J, Cheng J, Chen X L. Registration for 3-D point cloud using angular-invariant feature [J]. *Neurocomputing*, 2009, 72(16/17/18):3839-3844.
- [14] Liu J, Bai D. 3D point cloud registration algorithm based on feature matching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1215005.  
刘剑, 白迪. 基于特征匹配的三维点云配准算法[J]. *光学学报*, 2018, 38(12): 1215005.
- [15] Zhang Z, Xu H L, Yin H. A fast point cloud registration algorithm based on key point selection [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 121002.  
张哲, 许宏丽, 尹辉. 一种基于关键点选择的快速点云配准算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 121002.
- [16] Steder B, Rusu R B, Konolige K, et al. Point feature extraction on 3D range scans taking into account object boundaries [C] // 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 9-13, 2011, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2011: 2601-2608.
- [17] Tombari F, Salti S, Stefano L. Unique signatures of histograms for local surface description [C] // *Computer Vision - ECCV 2010*, 2010: 356-369.
- [18] 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 Press, 2009: 3212-3217.
- [19] Shi Q L. Part-mould contact gap analysis and reforming design in digital inspection for aircraft sheet metal parts [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014: 25-27.  
石庆兰. 数字化测量下的钣金件贴模度分析与校形设计[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014: 25-27.
- [20] Jiang T, Cheng X, Cui H, et al. Combined shape measurement based on locating and tracking of an optical scanner [J]. *Journal of Instrumentation*, 2019, 14(01): P01006.
- [21] Jiang T, Cheng X S, Cui H H, et al. Dual-camera-based method for identification and location of scattered self-plugging rivets for robot grasping [J]. *Measurement*, 2019, 134:688-697.
- [22] Jiang T, Cheng X S, Cui H H, et al. Large field of view vision method for robot pose measurement based on zoom lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0815012.  
姜涛, 程筱胜, 崔海华, 等. 面向机器人位姿测量的大视场变焦测量方法[J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0815012.
- [23] Yu F X, Huang X, Li S G, et al. Aircraft skin boundary extraction based on scan line point cloud [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, 23(4): 701-707.  
余飞祥, 黄翔, 李泷泉, 等. 基于扫描线点云的飞机蒙皮边界特征提取[J]. *计算机集成制造系统*, 2017, 23(4): 701-707.