

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.03.009

一种基于实测点云数据的壁板类零件修配加工路径计算方法

陈勇刚¹, 张 沅², 杨 力¹, 骆迎昕¹, 郭越人¹

(1. 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 西安 710089; 2. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

摘要: 针对飞机壁板类零件采用修配法装配过程中需要精确获取修配加工路径的问题, 提出一种基于实测点云数据的壁板类零件修配加工路径计算方法。首先设计一种基于法线差的特征点检测算法提取参考壁板的初始特征点。然后建立迭代收缩优化模型对初始特征点进行收缩优化, 得到参考壁板的准确特征点。最后根据工装定位孔特征进行配准, 将参考壁板的特征点映射到待修配壁板上, 并将映射后的特征点按照一定顺序进行连接, 得到待修配壁板的修配加工路径, 按照修配路径进行加工, 获得壁板装配配合边界。实验表明, 该方法能够精确提取待修配壁板修配加工路径, 并且经过加工验证, 壁板试验件对缝间隙获得小于 1.2 mm 的实际效果。

关键词: 壁板修配; 实测点云; 加工路径; 点云配准

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2023)03-0444-08

A Repairing Method of Wall Plate Parts Based on Measured Point Cloud

CHEN Yonggang¹, ZHANG Yuan², YANG Li¹, LUO Yingxin¹, GUO Yueren¹

(1. AVIC Xi'an Aircraft Industry(GROUP)Company LTD., Xi'an 710089, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Since the manufacturing process of aircraft panel parts requires accurately extracting the machining allowance, this paper proposes a repair method of panel parts based on the measured point cloud data. First, a feature point detection algorithm based on normal difference is designed to extract the initial feature points of the reference panels. Second, the iterative shrinkage optimization model is established to perform shrinkage optimization on the initial feature points to obtain the final feature points of the reference panels. Finally, registration is performed according to the tooling positioning holes, and after the feature points of the reference panel are mapped to the panel to be repaired, feature points are connected in a certain order to obtain the processing path of the panel to be repaired. Processing is carried out according to the repairing path and the gap of the panels is detected after the assemble. Experimental result show that this method can accurately extract the processing path of the panel to be repaired, and after processing verification, and the gap between the wall panels is less than 1.2 mm.

Key words: repairing methods of panel parts; measured point cloud; processing path; point cloud registration

壁板类零件是飞机上一类重要的零件, 广泛应用于飞机的蒙皮、舱门和起落架舱口盖等部件中^[1]。这类零件尺寸大、刚度小, 在装配过程中容易产生变形, 导致最终装配容易发生干涉或者间

隙, 从而影响飞机的装配精度^[2-3]。国内各大主机厂针对这种问题仍然采用传统的人工划线修配方式解决, 这种方式需要反复修配、试装, 装配效率和装配精度难以保证^[4]。近年来随着数字化测量技

收稿日期: 2022-11-17; 修订日期: 2023-02-17

通信作者: 陈勇刚, 男, 研究员级高级工程师, E-mail: scsrr11@163.com。

引用格式: 陈勇刚, 张沅, 杨力, 等. 一种基于实测点云数据的壁板类零件修配加工路径计算方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(3): 444-451. CHEN Yonggang, ZHANG Yuan, YANG Li, et al. A repairing method of wall plate parts based on measured point cloud[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(3): 444-451.

术的迅猛发展以及现代飞行器对于制造装配精度要求的不断提高,数字化测量技术已经成为促进飞机智能化装配快速发展的关键因素和重要力量^[5-7]。

目前国内外许多学者基于数字化测量技术,对飞机各类零件的加工余量提取及零部件装配精度检测进行了广泛的研究^[8-10]。文献[11-13]首先针对涡轮叶片加工过程进行加工余量的提取,基于三维测量获取的点云数据进行逆向重建并将其与理论模型进行配准,计算零件的加工余量,但是这种方法灵活性差,自动化程度低。后来的研究主要针对工件定位、轮廓误差进行研究^[14-16]。Jones等^[17]针对工件轮廓误差进行研究,利用启发式算法来解决非线性优化问题,但是由于需要计算对应点的定向距离进行约束,耗时大,算法效率较低。Sun等^[18]从加工余量提取精度方面考虑,不断地提高配准算法的精度,从而实现工件关键表面加工余量的精确提取。Li等^[19]提出一种点云数据由粗到精的加工余量提取方法。Tao等^[20]在特征提取的基础上进一步进行优化,首先通过快速点特征直方图(Fast point feature histograms, FPFH)^[21]来提取点云数据中的关键特征进行粗配准,然后基于随机采样一致性(Random sample consensus, RANSAC)^[22]算法对粗配准进一步进行优化,最终得到加工余量。Gao等^[23]也提出分步策略来解决工件加工余量提取,首先通过对参考数模进行采样,针对实测点云与数模采样点云进行粗配准,然后引入优化算法来进一步实现精配准,其中优化算法主要考虑包络约束,定位基准和加工余量的分配,该方法能够较为精确地提取工件的加工余量。文献[24]提出一种对称分配策略对航空发动机整体叶盘加工余量进行优化。王辉等^[25]针对飞机零件中薄壁异形、非圆结构件壁厚不均匀和加工误差等问题提出了一种工件加工余量数值分析方法,该方法以零件/毛坯三维模型匹配对准为核心,并以某型薄壁零件的加工为例验证该方法的有效性。杨角龙等^[26]基于点云数据的扫描线特征来对蒙皮加工余量进行提取,但该方法提取的特征点易受到扫描方向、单条扫描线质量等因素影响,从而影响加工余量提取的精度。

上述方法主要基于点云数据与理论模型的配准,通过满足不同的约束条件达到配准效果,这类方法主要适用于零件各处加工余量均匀分布的情况,但壁板类零件加工余量一般只分布于窄端面,并且加工余量一般非均匀分布,这类方法并不适用。因此,本文提出一种基于点云数据

的壁板类零件修配方法,首先获取装配状态下的参考壁板和待修配壁板的实测点云数据,通过法线差提取参考壁板边界初始特征点。为解决初始特征点冗余问题,提出一种迭代收缩优化模型对初始特征点进行优化,得到参考壁板最终特征点。然后将参考壁板最终特征点映射到待修配壁板上,得到待修配壁板的修配路径,按照修配路径进行加工,检测最终的壁板对缝间隙是否满足装配要求。

1 方法概述

问题描述:飞机壁板类零件装配过程中,由三维扫描设备分别获取保状工装上的待修配壁板和装配状态下的参考壁板的实测点云数据,分别为 $P'=\{p'_1, p'_2, p'_3, \dots, p'_m\}$, $P=\{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$,其中 m, n 分别为两片点云中数据点的个数。本文方法旨在通过提取参考壁板的边缘特征并将其映射到待修配壁板上,得到待修配壁板的加工路径,然后按照获取的加工路径对待修配壁板进行加工,从而实现修配的目的,具体流程如图1所示。首先获取装配状态下参考壁板和保形工装上的待修配壁板的实测点云数据如图1(a)所示,基于参考壁板点云数据提取边界特征点如图1(b)所示,然后将参考壁板的边界特征点映射到待修配壁板上从而获取待修配壁板的修配量及修配路径如图1(c)所示,根据修配路径对待修配壁板进行加工,并重新测量两块壁板间隙验证修配方法的有效性如图1(d)所示。

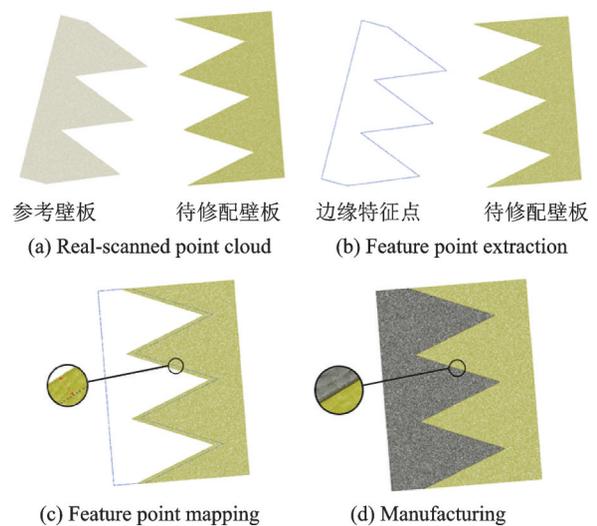


图1 本文方法流程图

Fig.1 Pipeline of our method

1.1 基于法线差的初始特征点检测

确定点云每个点法线问题可以简化为估计过该点与点云表面相切的平面法线问题,因此估计点

云每个点的法线问题就变成了在一定邻域范围内估计最小二乘平面拟合问题, Hoppe等^[27]首先在表面重建中提出了主成分分析法。主成分分析法将 n 维特征映射到 k 维上, 从原始空间中顺序地找出一组相互正交的坐标轴, 最终简化为对一个协方差矩阵的特征向量和特征值的分析。对于获取的参考壁板点云数据 $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$, n 是点云中数据点的个数。计算每个点 p_i 在 δ 邻域内的协方差矩阵 C_i 为

$$C_i = \frac{1}{k} \sum_{j \in \Omega_i} (p_j - \bar{p}_i)(p_j - \bar{p}_i)^T \quad (1)$$

式中: $\bar{p}_i = \frac{1}{k} \sum_{j \in \Omega_i} p_j$, p_j 为 p_i 在 δ 邻域半径内的邻域点, \bar{p}_i 为点 p_i 在 δ 邻域的重心坐标。求解协方差矩阵 C_i 的特征值, 最小特征值对应的特征向量为点 p_i 的法向量 n_i 。对每个点进行遍历, 从而得到点云 P 法向量场 $N = \{n_1, n_2, n_3, \dots, n_n\}$ 。

根据获取的点云法向量场 N 计算每个点的法线 n_i 在一定邻域半径内与所有邻域点法线 n_j 的最小内积 ϵ_i 为

$$\epsilon_i = \min_j (n_i^T n_j) \quad (2)$$

选择合适的阈值 θ , $\epsilon_i < \theta$ 的点作为初始特征点。

本文选择使用一定邻域半径内的法线差作为提取初始特征点的原因如下: 点云法线是点云数据一项重要的几何信息, 广泛地应用与点云模型重建、特征点检测和点云数据的渲染。点云法线的估计常常考虑点云的邻域信息, 在非特征区域点云法线方向的变化一般是平缓的, 如图2(a)所示, 而在特征区域法线的方向变化明显, 如图2(b)所示, 因此定义法线差能够有效地检测特征区域的点。法

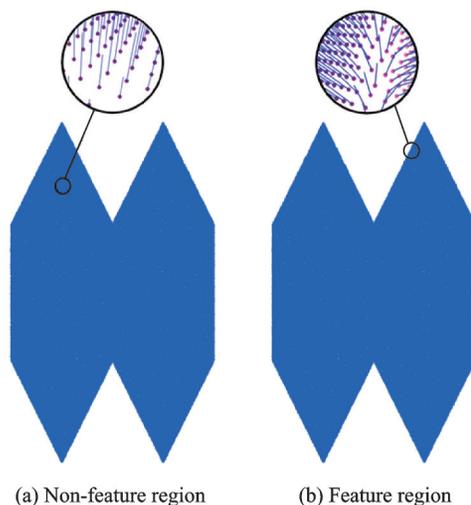


图2 法线差提取示意图

Fig.2 Schematic diagram of normal difference extraction

线差阈值的取值和点云特征尺度密切相关, 特征尺度越明显, 阈值相应的也增大。为确保能够清晰地将所有特征区域的点识别出来, 法线差阈值应当保证能识别壁板零件装配相关的特征点。图3为初始特征点提取示意图。

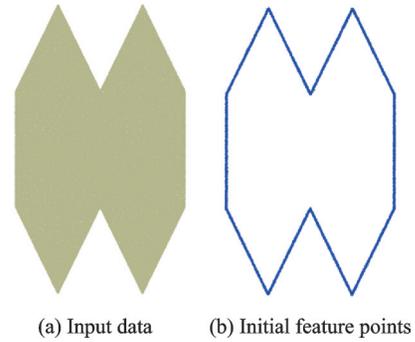


图3 初始特征点提取示意图

Fig.3 Schematic diagram of initial feature point extraction

1.2 特征点优化

基于法线差提取的初始特征点仍然存在很多冗余数据, 将这些初始特征点映射到待修配锯齿壁板上并不能很好地确定待修配锯齿壁板的加工路径, 因此需要对初始特征点进一步优化处理, 得到不含冗余数据并且能够精确表征参考锯齿壁板边缘轮廓特征的特征点。本文针对初始特征点提出优化模型为

$$\arg \min \sum_{i=1}^n \sum_{p_j \in \Omega_i} (\| (p_i - p_j)^T n_i \|_2^2 + \| (p_i - p_j)^T n_j \|_2^2) \quad (3)$$

式中: $\| (p_i - p_j)^T n_i \|_2$ 为邻域点 p_j 到 p_i 切平面距离, $\| (p_i - p_j)^T n_j \|_2$ 为点 p_i 到邻域点 p_j 切平面的距离, Ω_i 为点 p_i 的邻域点集。式中第1项能够约束邻域点 p_j 不断地向点 p_i 切平面移动, 第2项能够约束点 p_i 不断向邻域点 p_j 切平面移动, 如图4所示。但是上

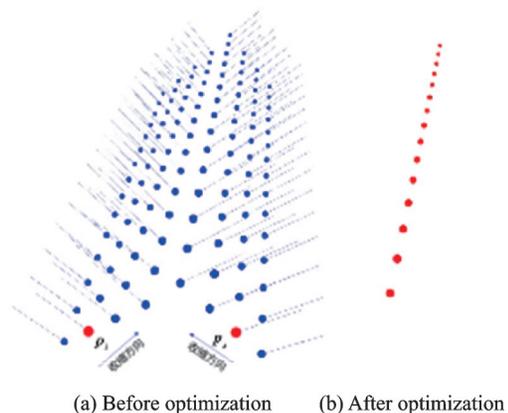


图4 收缩优化示意图

Fig.4 Schematic diagram of shrinkage optimization

述优化模型对于角点位置容易产生过度收缩,为了避免这种情况,加入式(4)所示的平衡项。

$$\gamma \sum_{i=1} \sum_{p_i' \in \Omega \setminus \{p_i\}} \frac{1}{\sigma_i \left\| (p_i - p_i') - (p_i - p_i') n_i n_i' \right\|_2^2} \quad (4)$$

式中: γ 为平衡因子; Ω 为点 p_i 的邻域点集;

$$F(p_i) = \operatorname{argmin}_{p_i} \sum_{i=1} \sum_{p_j \in \Omega} \left(\left\| (p_i - p_j)^T n_i \right\|_2^2 + \left\| (p_i - p_j)^T n_j \right\|_2^2 \right) +$$

$$\gamma \sum_{i=1} \sum_{p_i' \in \Omega \setminus \{p_i\}} \frac{1}{\sigma_i \left\| (p_i - p_i') - (p_i - p_i') n_i n_i' \right\|_2^2} \quad (5)$$

当点 p_i 与 p_i' 距离很近并趋于零时,上述优化模型趋于无穷大。因此,能够约束角点位置避免产生过度收缩。

$$\begin{aligned} \nabla F = \frac{dF(p_i)}{dp_i} = & 2 \sum_{i=1} \sum_{p_j \in \Omega} \left[(p_i - p_j)^T n_i n_i^T + (p_i - p_j)^T n_j n_j^T \right] + \\ & \gamma \sum_{i=1} \sum_{p_i' \in \Omega \setminus \{p_i\}} \frac{-2(1 - n_i n_i') \left[(p_i - p_i') - (p_i - p_i') n_i n_i' \right]}{\sigma_i \left\| (p_i - p_i') - (p_i - p_i') n_i n_i' \right\|_2^4} p_{i,\text{new}} = p_i - \alpha \nabla F(p_i) \quad (6) \end{aligned}$$

式中: ∇F 为目标函数对点 p_i 处的梯度; α 为迭代步长; $p_{i,\text{new}}$ 为 p_i 经过迭代之后的坐标值,通过设置合理的迭代步长和迭代次数,将冗余的特征点收敛到特征位置,如图5所示。迭代步长的选择应当考虑目标函数的收敛性,因为当步长太大,目标函数将发散。若迭代步长取得太小,则收敛速度慢,需要迭代很多次才能迭代到全局最优的位置,从而影响整体算法的效率。迭代步长可以先选一个较小的值开始,然后不断地加上一个常量,观察迭代步长对于目标函数的收敛性影响,如果增大到某个值时目标函数发散,便不再增大,取这些值的中值作为最终迭代步长。迭代次数的选择与迭代步长密切相关,一般可以选的稍微大些,确保目标函数能够收敛到最优解。

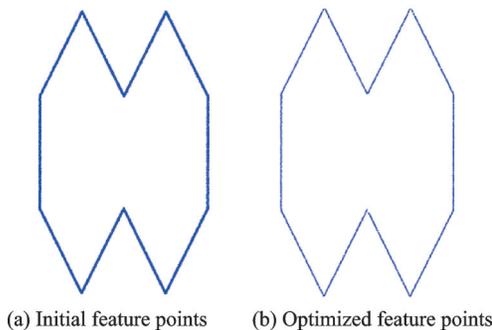


图5 收缩优化结果

Fig.5 Shrinkage optimization results

1.3 特征点的映射及加工路径生成

由于点云数据分两次进行测量得到,参考壁板

$\left\| (p_i - p_i') - (p_i - p_i') n_i n_i' \right\|$ 为点 p_i 到邻域其余点 p_i' 的切平面的投影长度; σ_i 为点 p_i 处的主方向,其中 $\sigma_i = \frac{\lambda_i^0}{\lambda_i^0 + \lambda_i^1 + \lambda_i^2}$, $\lambda_i^0 \geq \lambda_i^1 \geq \lambda_i^2$,分别为点 p_i 在一定邻域半径内协方差矩阵的特征值。

因此,最终的优化模型目标函数为

求解上述优化模型是非线性优化问题,本文采取梯度下降法进行求解,目标函数对 p_i 求梯度为

点云和待修配壁板点云不在同一个坐标系下。为了能够确定待修配壁板的加工路径,需要将参考壁板的特征点进行坐标变换,映射到待修配壁上,从而确定其加工路径。本文通过最小二乘法来拟合工装上的定位孔圆心,通过3个以上不在同一直线的工装定位孔在不同坐标系下的对应关系,便可以求得相应的变换矩阵。

在定位孔边缘处选取 n 个点,假设定位孔圆心为 o ,半径为 R ,利用最小二乘法构建如下目标函数

$$F(o, R) = \operatorname{argmin}_{o, R} \sum_{i=1}^n \left(\left\| o - q_i \right\|_2^2 - R^2 \right) \quad (7)$$

式中 q_i 为选取的定位孔边缘的点坐标。依次通过上述目标函数 $F(o, R)$ 求解各个圆心孔坐标,采用奇异值分解法(Singular value decomposition, SVD)来求解变换矩阵。假设参考壁板上的圆心定位孔为 o_i ,相对应的待修配壁板上的定位孔圆心为 o_i' ,其中 $i \geq 4$ 。构造SVD矩阵为

$$M = \sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})(o_i' - \bar{o}')^T \quad (8)$$

式中: M 为SVD矩阵; \bar{o} 为参考壁板定位孔圆心的重心坐标; \bar{o}' 为待修配壁板定位孔圆心的重心坐标。通过对 M 进行SVD分解,得到变换矩阵。将参考壁板特征点映射到待修配壁板如图6所示。

通过将上述映射之后的特征点依次连接便可生成待修配壁板的加工路径。

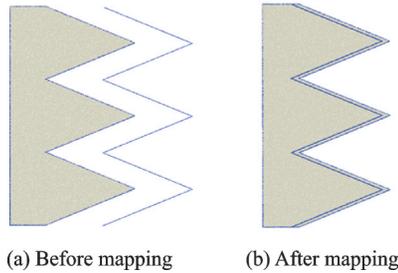


图6 特征点映射示意图

Fig.6 Schematic diagram of feature point mapping

2 实验分析与讨论

为了验证本文方法的有效性,对0.5 m和1 m壁板零件进行试验,采用MetraScan激光扫描仪设备获取点云数据,分别获取0.2 mm、0.4 mm、0.6 mm分辨率的点云数据进行试验。由于测量的范围较大,获取的点云数据量较大,并且含有一定噪声,因此对于本文方法具有一定的挑战性。

2.1 参数选择

本文参数的选择主要包括邻域半径 r 、法线差阈值 θ 、迭代步长 α 、迭代次数 n 。由于本文实验针对的是飞机壁板类零件,轮廓特征尺度基本不变,邻域半径和法线差阈值分别取为 $r=2.5\text{ mm}$, $\theta=15^\circ$ 。为了生动展示迭代步长 α 对于壁板特征和结果的影响,迭代步长和相应迭代次数的取值如表1所示,实验结果如图7所示。图7(a)为输入点云,从图7(b,c)中可以看出当迭代步长 α 较小时,在迭代次数给定的情况下没有收缩到最优位置;从图7(d)中不难看出,当迭代步长 α 取得较大时,不能收缩到目标函数的最优解;从图7(e,f)中可以看出,为了兼顾算法效率和最终收缩结果,迭代步长取0.012 5,同时通过实验验证,迭代次数可以相应的减小到100次。

2.2 可视化结果分析

为了验证本文方法的可行性、有效性,在Intel Core i7-9750、2.59GHz, RAM 16GB的PC机上,VS2015的开发平台下实现本文方法,并在0.5 m和1 m的参考壁板实测点云数据上进行特征提取实验,实验结果如图8,9所示。从图8,9中可以看出,

表1 迭代步长与迭代次数参数表

Table 1 Iteration step size and number of iterations parameter table

α	n
0.000 1	500
0.000 5	500
0.002 5	500
0.012 5	500
0.062 5	500

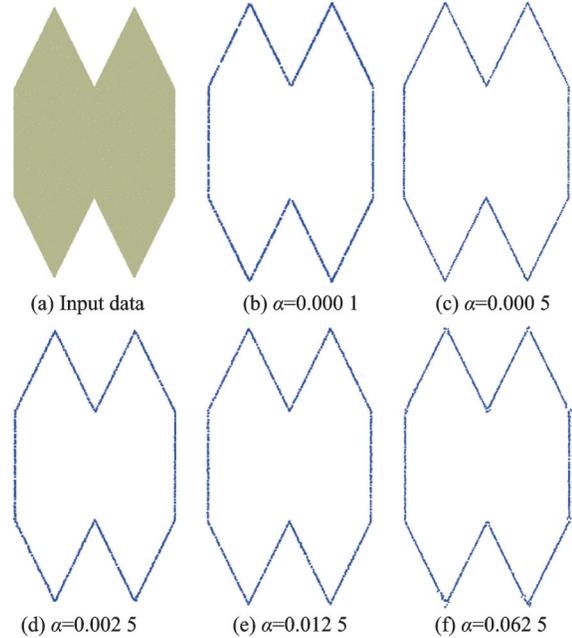


图7 不同迭代步长下优化的特征点效果图

Fig.7 Effect of optimized feature points with different iteration steps

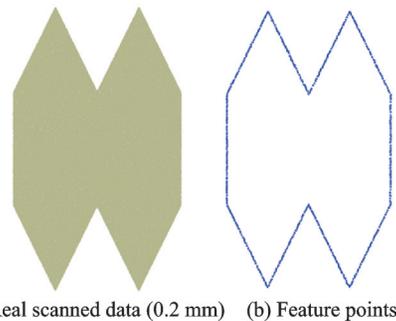


图8 0.5 m壁板/0.2 mm分辨率特征提取效果图

Fig.8 0.5 m wall plate / 0.2 mm resolution feature extraction effect



图9 1 m壁板/分辨率0.2 mm特征提取效果图

Fig.9 1 m wall plate/resolution 0.2 mm feature extraction effect

提取的特征点能够真实地反映壁板零件的边界特征。

2.3 实验结果定量分析

除了定性分析特征提取,本文还进行了特征提取的量化分析,并且对于最终修配量进行误差分析以及最终加工完成后的修配精度验证。

特征提取的量化分析主要是特征点提取的精度分析,特征点的精度定义为提取的特征点到真实

特征点的平均距离,其中真实特征点是通过专业软件人工标注的结果,精度分析结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出,当点云分辨率越高,特征点的提取精度越高,最优精度能够达到 0.154 mm。

表 2 特征点提取精度分析

Table 2 Feature point extraction accuracy analysis

分辨率/mm	0.2	0.4	0.6
壁板零件尺寸=0.5 m	0.166	0.196	0.298
壁板零件尺寸=1.0 m	0.154	0.181	0.303

最终修配路径的误差分析是通过计算所有特征点修配量的标准差来衡量,其中某个特征点的修配量为该点与该点所在加工路径的法线与待修配件边界交点的最小距离(参考图 1(c))。将待修配壁板按照修配路径铣削后,即将待修配壁板上的修配量去除后,将其装配至指定位置,然后测量其与参考壁板的装配对缝间隙,间隙值越接近

实际要求则所获取的配合边界的精度越高。将所有特征点随机等分成 10 份,以每份数据的平均修配量绘制的柱状图如图 10 所示。因为标准差可以代表数据的稳定性,当标准差越小,表示提取的修配量越稳定,修配路径的误差越小,反之亦然。由图 9 中数据计算出所有特征点修配量的标准差为 0.049 4。

修配的精度验证是将待修配壁板按照提取的修配路径进行加工,在加工完成之后检测壁板间的对缝间隙是否满足装配的精度要求。为了验证本文方法有效性并尽可能模拟飞机装配过程中壁板零件的干涉情况,利用 3D 打印技术,打印出两块干涉壁板零件如图 11(a) 所示,利用本文方法提取干涉量并进行修配,得到无干涉壁板零件如图 11(b) 所示。检测修配完成之后两块壁板零件的对缝间隙,间隙最大值小于 1.2 mm。

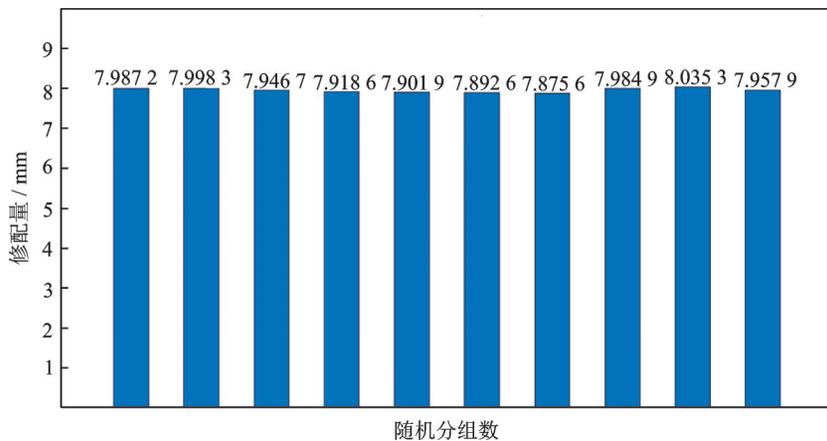


图 10 修配量柱状图

Fig.10 Repairing volume histogram



(a) Before manufacturing (b) After manufacturing

图 11 壁板修配前后对比图

Fig.11 Wall panel comparison before and after repairing

3 结 论

本文提出了一种基于点云数据的飞机壁板类零件修配方法,针对参考壁板的实测点云数据,经过法线差提取初始特征点。然后建立迭代收缩模型,对初始特征点进行优化,生成最终特

征点。将最终特征点映射到待修配壁板上,得到修配路径。最后对待修配壁板进行加工,验证该方法的修配精度。本文方法能够快速准确地确定待修配壁板的加工路径,经过加工实验验证,壁板对缝间隙小于 1.2 mm。该方法对于提高飞机装配精度,降低工人工作强度,缩短飞机装配周期具有重要意义。

在实际修配过程中,提高扫描仪分辨率,避免扫描过程中的抖动,以获得高质量无噪声点云,已达到获得更准确的特征点同时提高拟合配准特征的精度;还可以在算法线差之前先对点云数据进行法向滤波,使处于同一拟合平面上的点云法线方向趋于一致,以提高特征点与非特征点法线差的差异,提高特征点获取精度。

参考文献:

- [1] 王建华, 欧阳佳, 陈文亮. 飞机柔性装配工装关键技术及发展趋势[J]. 航空制造技术, 2013, 56(17): 49-52.
WANG Jianhua, OUYANG Jia, CHEN Wenliang. Key technology and development of flexible assembly tool for aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(17): 49-52.
- [2] 王亮, 李东升, 刘凤贵, 等. 飞机壁板类组件数字化装配柔性工装技术及应用[J]. 航空制造技术, 2010, 53(10): 58-61.
WANG Liang, LI Dongsheng, LIU Fenggui, et al. Flexible tooling technology and application for digital assembly of aircraft panel component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(10): 58-61.
- [3] 郭洪杰. 大型飞机柔性装配技术[J]. 航空制造技术, 2010, 53(18): 52-54.
GUO Hongjie. Flexible assembly technology for large commercial aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(18): 52-54.
- [4] 王仲奇, 王赢, 郭飞燕, 等. 壁板组件柔性装配工装技术[J]. 航空制造技术, 2013, 56(12): 44-47.
WANG Zhongqi, WANG Ying, GUO Feiyan, et al. Tooling technology of flexible assembly for panel component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(12): 44-47.
- [5] 张旭. 飞机大部件对接装配过程中的干涉检测技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
ZHANG Xu. Interference detection technique for aircraft components assembly[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [6] 宋利康, 朱永国, 刘春锋, 等. 大飞机数字化装配关键技术及其应用[J]. 航空制造技术, 2016, 59(5): 32-35, 51.
SONG Likang, ZHU Yongguo, LIU Chunfeng, et al. Key technology research and engineering application for large aircraft digital assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(5): 32-35, 51.
- [7] 张开富. 飞机装配过程数字化测量技术[J]. 航空制造技术, 2016, 59(10): 34-40.
ZHANG Kaifu. Digital measuring technique in aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(10): 34-40.
- [8] WANG H, ZHOU M X, ZHENG W Z, et al. 3D machining allowance analysis method for the large thin-walled aerospace component[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2017, 18(3): 399-406.
- [9] LI W, SONG P. A modified ICP algorithm based on dynamic adjustment factor for registration of point cloud and CAD model[J]. Pattern Recognition Letters, 2015, 65: 88-94.
- [10] CHEN Y Z, CHEN W F, LIANG R J, et al. Machining allowance optimal distribution of thin-walled structure based on deformation control[J]. Applied Mechanics and Materials, 2017, 868: 158-165.
- [11] GAO J, FOLKES J, YILMAZ O, et al. Investigation of a 3D non-contact measurement based blade repair integration system[J]. Aircraft Engineering & Aerospace Technology, 2005, 77(1): 34-41.
- [12] GELFAND N, MITRA N J, GUIBAS L J, et al. Robust global registration[C]// Proceedings of Eurographics Symposium on Geometry Processing. Geneva: The Eurographics Association, 2005.
- [13] OGUZHAN Y, GINDY N, GAO J. A repair and overhaul methodology for aeroengine components[J]. Robotics & Computer Integrated Manufacturing, 2010, 26(2): 190-201.
- [14] ZHU L M, XIONG Z H, DING H, et al. A distance function based approach for localization and profile error evaluation of complex surface[J]. Journal of Manufacturing & Engineering, 2004, 126(3): 542-554.
- [15] ZHU L M, LUO H G, DING H. Optimal design of measurement point layout for workpiece localization[J]. Journal of Manufacturing & Engineering, 2009, 131(1): 123-136.
- [16] YILMAZ O, NOBLE D, GINDY N N Z, et al. A study of turbomachinery components machining and repairing methodologies[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2005, 77(6): 455-466.
- [17] JONES J, MCNUTT P, TOSI R, et al. Remanufacture of turbine blades by laser cladding, machining and in-process scanning in a single machine[C]// Proceedings of the 23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium—An Additive Manufacturing Conference. Austin, USA: University of Texas, 2012: 821-827.
- [18] SUN Y W, XU J T, GUO D M, et al. A unified localization approach for machining allowance optimization of complex curved surfaces[J]. Precision Engineering, 2009, 33(4): 516-523.
- [19] LI X, LI W, JIANG H, et al. Automatic evaluation of machining allowance of precision castings based on plane features from 3D point cloud[J]. Computers in

- Industry, 2013, 64(9): 1129-1137.
- [20] TAO P Y, MUSTAFA S K, YANG G, et al. Robot work cell calibration and error compensation [M]. London: Springer, 2015.
- [21] BOGDAN R R, BLODOW N, BEETZ M. Fast point feature histograms (FPFH) for 3D registration [C]//Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation.[S.l.]: IEEE, 2009.
- [22] SCHNABEL R, WAHL R, KLEIN R. Efficient RANSAC for point-cloud shape detection[J]. Computer Graphics Forum, 2007, 26(2): 214-226.
- [23] GAO Y, DU Z, LI M, et al. An automated approach for machining allowance evaluation of casting parts[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2019, 32(11): 1-10.
- [24] YING Z, DINGHUA Z, BAOHAI W. An approach for machining allowance optimization of complex parts with integrated structure[J]. Journal of Computational Design & Engineering, 2015, 2(4): 248-252.
- [25] 王辉,周明星,郑维珍,等.高速飞行器薄壁异形零件加工余量的数字化分析与优化[J].计算机集成制造系统, 2016(6): 1456-1464.
- WANG Hui, ZHOU Mingxing, ZHENG Weizhen, et al. Machining allowance analysis and optimization of irregular shaped component in high speed aero-vehicle [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016(6): 1456-1464.
- [26] 杨角龙,黄翔,李沈杲.基于扫描线点云的飞机蒙皮修配量提取方法[J].航空制造技术, 2019, 62(10): 73-77.
- YANG Jiaolong, HUANG Xiang, LI Shuanggao, et al. Method for extracting repair amount of skin seam based on scan line point cloud[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(10): 73-77.
- [27] HOPPE H, DEROSE T, DUCHAMP T, et al. Surface reconstruction from unorganized points[J]. ACM Siggraph Computer Graphics, 1992, 26(2): 71-78.

(编辑:陈珺)