

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.03.009

基于三维点云处理的整流蒙皮修配量提取技术

杜坤鹏¹, 梁青霄¹, 周杞鑫¹, 和晓歌², 刘元朋², 汪俊²

(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: 在飞机翼身对接过程中, 需要在翼身对接处的外表面覆盖整流蒙皮, 以维持飞机的气动外形。为了确保在装配整流蒙皮时, 蒙皮间的配合间隙满足设计要求, 需要精确修配其加工余量, 故本文提出了一种基于三维点云处理的飞机蒙皮修配量提取技术。首先对扫描的机翼机身对接数据进行预处理获取关键点; 然后对关键点和模型蒙皮数据计算直方图特征描述子, 寻找相似的描述符; 最后使用霍夫投票算法和迭代最近点算法匹配模型蒙皮和翼身对接数据。在提取修配量时, 先检测翼身对接处机翼、机身蒙皮边界线和粗加工蒙皮的端面边界线; 然后把机翼、机身蒙皮边界线投影到粗加工的蒙皮上, 计算与其端面边界线的距离, 最终提取蒙皮修配量。该方法实现了对整流蒙皮的自动化配准和修配, 极大地减轻了人力、物力、耗时等问题, 对实际飞机装配有较高的应用价值。

关键词: 点云特征提取; 霍夫投票算法; 点云配准; 点云网格化; 蒙皮修配

中图分类号: V262.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2021)03-0388-07

Extraction Technology of Rectifying Skin Repair Allowance Based on 3D Point Cloud Processing

DU Kunpeng¹, LIANG Qingxiao¹, ZHOU Qixin¹, HE Xiaoge², LIU Yuanpeng², WANG Jun²

(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: In the process of aircraft wing-body docking, the outer surface of the wing-body butt joint needs to be covered with a rectifying skin to maintain the aerodynamic shape of the aircraft. In order to ensure that the gap of the rectifying skin can meet the design requirements, it is necessary to accurately repair the allowance. Therefore, we propose a technology to extract aircraft skin repair allowance based on 3D point cloud processing. Firstly, the scanned wing-body docking data are preprocessed to obtain the key points. Then the histogram feature descriptors are calculated for the key points and model skinning data to find similar descriptors. Finally, the Hough voting algorithm and the iterative closest point algorithm are used to match the data of the model skin and the wing-body docking. When the repair allowance is extracted, the boundary lines of the wing and fuselage skin at the wing body and the end face of the rough skin joint are first detected. Then the boundary lines of the wing and fuselage skin are projected onto the rough skin to calculate its distance from the boundary lines. Hence, the final repair allowance of skin is extracted. This method realizes the automatic registration and repair of the rectifying skin, which greatly reduces the problems of manpower, material resources, and time consumption, and has high application value for actual aircraft assembly.

Key words: point cloud feature extraction; Hough voting algorithm; point cloud registration; point cloud meshing; skin repair

收稿日期: 2020-10-09; 修订日期: 2021-04-16

通信作者: 汪俊, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: wjun@nuaa.edu.cn。

引用格式: 杜坤鹏, 梁青霄, 周杞鑫, 等. 基于三维点云处理的整流蒙皮修配量提取技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(3): 388-394. DU Kunpeng, LIANG Qingxiao, ZHOU Qixin, et al. Extraction technology of rectifying skin repair allowance based on 3D point cloud processing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(3): 388-394.

飞机翼身对接装配是总装配的重要组成部分。当完成飞机翼身对接后,需要在它的外表面覆盖整流蒙皮。整流蒙皮的位置如图1黄色标注区域所示,它能在飞机高速飞行时起到整流作用。飞机蒙皮的制造不仅有外形精确度和机械性能指标的要求,对其安装精度也有着严格要求^[1-3]。

为了保证整流蒙皮的安装精度,蒙皮间的间隙量是不容忽视的。然而,由于蒙皮属于薄壁零件,加工过程中易产生变形。按照理论外形进行加工,将导致整流蒙皮难以按理想间隙量安装于翼身对接连接处。对此,在制造蒙皮时通常留有一定余量,随后根据实际安装尺寸修配余量,达到精确安装的目的^[4]。传统方法采用手工比对、划线、修配、再比对的方法逐渐修配余量,手工劳动强度大且精度难以得到有效保证。对于某型号飞机的整流蒙皮修配任务,一块1.2 m整流蒙皮的精确修配长达3 d,严重阻碍了后续总装任务的按时推进,对飞机的脉动式生产线造成不可估计的影响。为了提高整流蒙皮修配的效率,本文提出一种基于三维点云处理的修配量提取技术,能够快速精确地提取整流蒙皮的修配余量。



图1 整流蒙皮位置示意

Fig.1 Illustration of the location of rectifying-air skin

针对蒙皮修配余量的精确提取和加工,国内外学者展开了一系列研究。Bozich提出了一种零部件加工余量分析和工艺优化的精密数控加工技术^[5],实现了零部件的精准加工。目前,波音等著名航空公司已经在相关零部件的生产制造中投入了应用。刘垒等对飞机蒙皮的变形工艺参数使用有限元分析进行优化,利用相关软件生成数控加工代码,并进行了生产性试验和分析,最终获得了合格的零件^[6]。王辉等针对高速飞行器中存在的加工偏差、蒙皮异形等问题,提出了一种工件加工余量数值分析方法。通过结果表明,该方法在加工精度等方面有着较大的技术优势^[7]。

为了计算蒙皮修配余量,需要根据蒙皮的实际外形点云数据提取蒙皮的边界特征,边界特征的提取精度将直接影响构建物体外形轮廓的质量。文献[8]通过计算邻近点的主曲率并进行特征检测的方

法得到边界点;文献[9]先把点云数据进行三角网格化,然后再计算三角形顶点的曲率和法矢,最后把曲率极值点作为特征点;文献[10]把曲率或法向量的异常点视作特征点,它的集合即为边界区域;文献[11]使用高斯曲率提取特征点;文献[12]通过求出曲率极值点的近似平均,并将其作为边界点。

本文提出了一种基于三维点云处理的蒙皮修配量技术,实现了翼身对接点云与模型蒙皮点云的配准,并提取了蒙皮的修配余量。在蒙皮配准方法中:首先对扫描的翼身对接点云进行预处理,并获得关键点集;其次分别对关键点集和模型蒙皮点云计算直方图特征描述子,从而得到关键点集和模型蒙皮点云相关联的描述符;然后对翼身对接点云与模型蒙皮点云使用聚类和霍夫投票算法,从而获得粗配准的局部点云;最后使用迭代最近点(Iterative closest point, ICP)优化算法,最终获得精配准的结果。为了实现蒙皮的修配余量,首先分别提取精配准后的翼身对接点云机翼、机身蒙皮边界线和模型蒙皮的边界线;其次把机翼、机身蒙皮边界线投影到模型蒙皮上,计算模型蒙皮上投影线到边界线的欧式距离,最终确定精确蒙皮修配量。

1 三维点云处理的蒙皮修配量技术的原理

飞机蒙皮在装配过程中需要多块整流蒙皮互相配合,从而完整覆盖翼身对接处,因此对于一块整流蒙皮,其四周都需要进行修配,从而保证蒙皮间的配合间隙在允许误差范围内。目前飞机主机厂主要采用的方法为人工根据蒙皮外形进行手工试配,没有销钉、螺钉等定位基准,其依据为每一块蒙皮都具有独特的外形,在安装过程中可调整的幅度较小。基于此,本文同样考虑整流蒙皮的外形特点,提出采用点云局部特征的方向直方图特征(Signature of histogram of orientation, SHOT)描述符进行蒙皮和翼身对接处的粗配准,利用外形特点约束每一个蒙皮的位置和姿态;然后根据本文提出的算法精确提取修配量,依据修配量完成整流蒙皮的修配。

本文选取配准后的其中一块翼身对接蒙皮为模板,粗加工的蒙皮需切除余量即蒙皮的修配量,从而实现整流蒙皮的精确装配。整体流程图如图2所示。

1.1 数据预处理

本文将采用三维激光扫描仪对机翼机身对接外表面进行扫描,以获取场景点云数据集 Q 。由于翼身对接的外表面需要覆盖整流蒙皮,其中包括多块蒙皮,本文以其中一块蒙皮点云 $Q_i(i=$

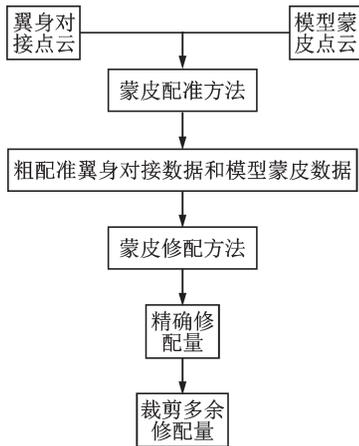


图2 总体技术路线

Fig.2 Overall technical pipeline

1, ..., 10)为例展开介绍。同样的,对粗加工的蒙皮进行扫描,获取目标蒙皮点云数据集 P 。在实验中,蒙皮扫描过程和加工过程都利用保型夹具,将蒙皮的状态统一为与蒙皮安装状态相同的装夹状态,这样既能够保证提取的修配量就是蒙皮安装时候需要修配的余量,又最大可能减少因蒙皮状态的切换带来变形产生的影响。

由于设备和外界的影响,在扫描过程中会产生噪点,这些噪点通常偏离物体本身。为了减小噪声对后续数据处理的影响,本文将先对扫描数据进行去噪。在这里先使用多面片协同滤波的方法对点云数据去噪^[13],除去无用的杂点,减少识别误差。为了减少计算量,均匀采样去噪后的数据集,在不改变物体外形轮廓形状的同时使得数据集中点云数量减少,获得关键点集合 q 。

1.2 整流蒙皮配准

三维点云配准的精确度,很大程度依赖于特征提取的结果。因此,本文提出新的特征提取算法。任取关键点集 q 中一点 q_i ,搜索其 K 个最近邻点,然后将这些点按照树结构进行重组^[14]。使用主成分分析算法对重组后的每个邻域点进行降维,得到该关键点的切平面。此时切平面有两个法线,在这里根据临近点的凸包方向确定最终的法线,即为该关键点的法线。

由于 q 中每个关键点 q_i 都需匹配蒙皮点云集 P 中最相近的点,因此本文采用直方图特征描述子^[15]寻找对应点对。具体地,以每个关键点为中心构造一个半径为 r 的球形区域,沿径向2次、方位8次、俯仰2次划分网格,最终得到32个空间区域。在每个空间区域计算落入该区域点的法线 n_q 和中心点法线 n_c 之间的夹角余弦

$$\cos \theta = n_q n_c \quad (1)$$

根据求解的余弦值对每个空间区域的点云进

行直方图统计,得到该点法线方向的直方图特征描述子。采样同样的方法计算蒙皮点云集 P 中每一点的法线和SHOT描述符。

利用 K 近邻树状结构搜索算法对输入关键点的描述符进行最近邻查找。在蒙皮点云 P 中搜索距离关键点 q_i 最佳匹配距离,在这里设置为欧式距离小于 $\eta = 0.25$ 的点。此时已获取到模型蒙皮数据 P 中与关键点 q_i 相似的特征点对。

遍历关键点集 q ,实现点云集 P 和 q 的粗配准。具体地,分别对目标蒙皮点云 P 和关键点集 q 中对应点对计算本地参考帧,使用霍夫投票算法得到粗配准的局部点云集^[16]。最后使用ICP算法实现对目标点云 P 与局部点云集的精配准。此时,翼身对接数据 Q 和粗加工蒙皮数据集 P 完成配准。

配准算法流程:

(1) 采集蒙皮信息,以获取目标点云集 P ;扫描翼身对接数据集(场景点云) Q 。

(2) 对扫描点云进行预处理,并获得关键点集 q 。

(3) 对每个关键点 q_i 和目标点云集中每个点计算法线方向的直方图特征描述子,从而获取相关联的描述符。

(4) 使用 K 近邻树状结构搜索算法,找到距离相似的描述符。

(5) 使用霍夫投票算法和聚类算法,获得 q 与 P 粗匹配的局部点云集。

(6) 使用ICP算法进行 P 与粗配准的局部点云集进行精配准。

1.3 边界线提取

整流蒙皮和翼身对接处的外表面完成配准后,接下来要完成粗加工蒙皮的修配。本文分别提取粗加工蒙皮的端面边界线和翼身对接外表面的机翼、机身蒙皮边界线。

任取翼身对接外表面数据 Q_i 中的一点 m_0 ,利用 K 邻近点搜索算法^[17]搜索 m_0 的 j 个邻近点,用加权主成分分析算法计算其法向量 $n = (a, b, c)$,其中 a, b, c 为三维坐标的分量,如图3所示,其中红色点是 m_0 的临近投影点。

投影基平面 (x, y, z) 可以由已知法向量 n 和 $m_0(x_0, y_0, z_0)$ 确定,公式如下

$$a(x - x_0) + b(y - y_0) + c(z - z_0) = 0 \quad (2)$$

把点 m_0 的邻近点 $M_j = (x_j, y_j, z_j)$ 投影至基平面上得到投影点 $m_j = (X_j, Y_j, Z_j)$, m_j 同时可以表示为

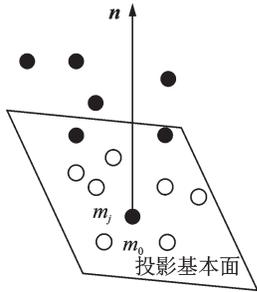


图 3 点 m_0 的法向量与邻近点

Fig.3 Normal vector of m_0 and its neighboring points

$$\left(\frac{x_j - X_j}{a}\right) + \left(\frac{y_j - Y_j}{b}\right) + \left(\frac{z_j - Z_j}{c}\right) = 0 \quad (3)$$

$$a(x_j - x_0) + b(y_j - y_0) + c(z_j - z_0) = 0 \quad (4)$$

求解式(2~4),可得

$$M_j = (x_j - x_0, y_j - y_0, z_j - z_0) \quad (5)$$

为了求解其方位角,在投影基平面上建立一个二维坐标系 (A_j, B_j) ,所有点的方位角可以通过

$$\tau_j = \arctan\left(\frac{B_j}{A_j}\right) \quad (6)$$

求解。

对 τ_j 排序得到方位角 T_j ,则排序后的相邻方位角差值为

$$\Delta T_j = T_j - T_{j-1} \quad (7)$$

如果 $\max(\Delta T_j) > \Delta T_{thr}$,则探测点 m_0 属于边界点。边界点 m_0 和平面上的点 m_1 在投影基平面的方位角如图 4 所示。其中 ΔT_{thr} 为阈值,遍历所有点即可确定机翼、机身蒙皮边界线。

同样地,蒙皮的端面边界线也通过以上方法求得。

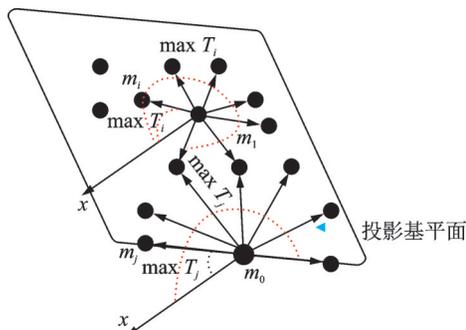


图 4 边界点在投影基平面的方位角

Fig.4 Azimuth of the boundary points on the projected base plane

1.4 提取修配量

本文把蒙皮数据和翼身对接外表面数据沿着指定的方向移动并旋转,然后把机翼、机身蒙皮边界线投影到粗加工蒙皮点云上得到投影线,通过计算粗加工蒙皮上投影线与端面边界线的距离从而

提取修配量。但是,由于本文采用的是点云数据,因此投影线也是点云数据,故无法直接计算其距离。因此,本文把投影线(点云数据)和边界线(点云数据)进行网格化。在这里,使用贪心三角化法对点云进行三角化,步骤如下:

(1) 将点云通过法线投影到二维坐标平面内。

(2) 对投影得到的点云在该平面内进行三角化,得到投影后点的拓扑关系。在平面三角化的过程中使用基于Delaunay三角剖分的空间区域增长算法。

(3) 依据该平面内投影点的拓扑连接关系就可以确定各三维点的拓扑链接,即网格。

点云通过以上步骤就得到了网格数据。接下来计算两条网格线的欧式距离,提取精确修配量。裁剪修配余量,完成整流蒙皮的修配。

2 实验与分析

为了验证所提出的整流蒙皮修配算法的有效性和准确性,根据某型号飞机翼身连接处和初始整流蒙皮的外形,在实验室内利用 Catia 三维造型软件设计了简易验证板,如图 5 所示。该验证板分为两部分,分别是模拟翼身连接处(图 5 上)和包含加工余量的初始整流蒙皮(图 5 下)(以下用翼身连接处和初始整流蒙皮分别指代),整流蒙皮验证板的实际长度为 964.6 mm。同时,在 Catia 内构造出真实的整流蒙皮外形,用于验证所提出算法的精确度。随后通过数控加工的手段制造验证板实物,材料为铝合金。采用 Creaform Metrascan 三维激光扫描仪分别对两部分验证板实物进行三维数据采集,获得实测点云数据。根据所提出的算法,利用 Visual Studio 2015 开发平台编写了相关程序,编程语言为 C++。实验计算机为 16G 内存、8 核 i7-8700K 处理器,系统为 Windows 10。

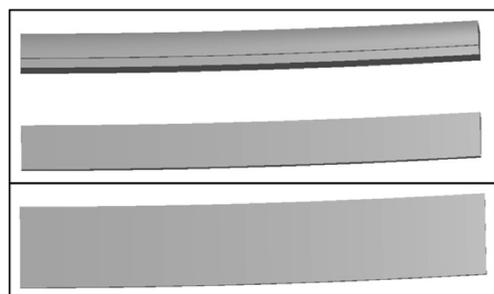


图 5 简易验证板外形

Fig.5 Shape of the verification board

采用 1.1 节所提出的点云预处理方法去除扫描数据的噪声。图 6 展示了对验证板原始测量数据进行三维点云数据去噪的结果。左边为原始测量数据,右边为去噪后的数据。

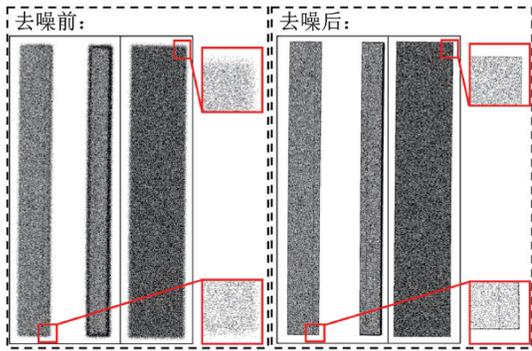


图6 点云数据去噪结果

Fig.6 Denoising result for point cloud

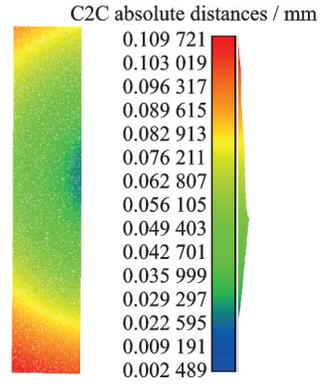


图8 匹配误差图

Fig.8 Matching error graph

为了清晰直观地展示算法各步骤运行的结果,可视化了核心算法运行的整个过程,如图7所示。

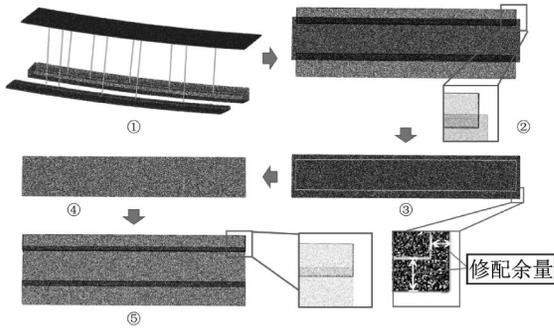


图7 算法运行的中间结果

Fig.7 Intermediate results of operations

图7中:①表示翼身连接处和初始整流蒙皮的配准过程。红色的点为检测到的关键点,绿色的线表示根据对关键点的特征描述子所匹配出来的正确对应关系。②表示翼身连接处和整流蒙皮的配准结果。图中可以明显看到两者的边界线。③表示根据计算出的边界线在整流蒙皮上得到的修配线(表示为绿色),其中黄色标注部分为计算得到的修配余量。④表示按照修配余量再加工后的整流蒙皮。⑤表示将修配后的蒙皮与翼身连接处装配在一起的结果,从放大细节可以看到,两者的数据准确地配准在了一起。由图7可知,所提出的算法在每一个子步骤上运行稳定且有效,取得了较为优越的结果。

为了进一步判断修配得到的整流蒙皮的精度,根据算法运行过程中翼身连接处和初始整流蒙皮的配准结果,将修配后的整流蒙皮转换到统一的坐标系下,同时在该统一坐标系下调用预先构造的真实整流蒙皮数据,分析它们的匹配误差。图8表示了匹配后的误差图。其中,C2C absolute distance表示点云间的绝对距离。显然,从整体上看所修配的整流蒙皮与预先构造的整流蒙皮具有较小的误

差。误差最大的部分为蒙皮上的两端,其值为0.109 mm;误差最小处仅为0.02 mm,说明本算法所获得的整流蒙皮具有令人满意的精度。另外,受工艺影响,蒙皮两端变形一般较为显著,对于配准效果更加敏感,微小的扰动可能导致较大的偏离。因此,本文算法在蒙皮两端的处理上稍有不足,但总体精度仍满足蒙皮修配要求。

表1列举了目前航空主机厂内仍在采用的手工划线打磨方法和本文算法运行的效率和精度。可见,本文算法减少了运行时间且提高了配准精度。值得说明的是,为了公平比较,手工划线打磨的时间是在本实验所用的简易验证板上进行的,打磨采用了专用的磨床,实验人员为经验丰富的操作员。表中79.2 min(25.7+53.5)表示本文所提出的算法的总时间为79.2 min,包括算法运行时间25.7 min和蒙皮打磨时间53.5 min。

表1 时间精度对比

Table 1 Comparisons of time and accuracy

方法	时间	精度/mm
手工	32 h	0.89
本文算法	79.2 min(25.7+53.5)	0.24

由于手工划线的方式无法直接在软件中与真实构造的整流蒙皮进行误差比对,本文通过将两种方法修配后的蒙皮加工出来与翼身连接验证板拼合,在蒙皮四周选取40个测试点(图9)以精密测量

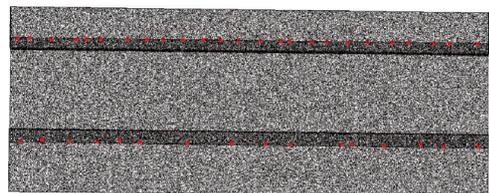


图9 40个测试点的位置示意

Fig.9 Schematic diagram of the location of forty test points

拼合的平均间隙,记录在表1中以评判整流蒙皮修配的准确性。从表中可以看出,所提出的算法无论在精度还是在效率上都取得了巨大的提高,体现出了极大的优越性。

3 结 论

本文提出了一种基于三维点云处理的飞机蒙皮修配量提取技术。首先对扫描的翼身对接外表面点云进行预处理并获取关键点集;然后分别对关键点集和模型蒙皮点云计算直方图特征描述子,寻找相似的描述符;最后使用霍夫投票算法和迭代最近点算法配准模型蒙皮点云和翼身对接外表面点云。在提取修配量时,先提取翼身对接处的机翼、机身蒙皮边界线和粗加工蒙皮的端面边界线;然后把机翼、机身蒙皮边界线投影到蒙皮上,计算投影线与端面边界线的距离,最终提取蒙皮修配量。根据修配量对粗加工的蒙皮进行修配,从而实现整流蒙皮装配。本文算法节省了整流蒙皮修配的时间,能够广泛应用于航空主机厂蒙皮修配相关任务中,具有很高的实用价值。

值得说明的是,受限于SHOT描述符的表达能力,对于复杂曲面外形的蒙皮,采用描述符引导的特征点匹配方法进行配准会导致出现较大的配准误差。因此,如何针对蒙皮零件的外形特点,构造稳定的点云特征描述符,并将其运用于蒙皮修配任务上,是未来研究的工作之一。

参考文献:

- [1] 张新娟,段雪锋.飞机蒙皮零件的柔性装夹及数控铣切技术[J].航空制造技术,2015(S1):42-44.
ZHANG Xinjuan, DUAN Xuefeng. Flexible clamping and CNC milling technology of aircraft skin[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(S1): 42-44.
- [2] 张吉法.飞机机翼纤维缠绕(FW)运动规律分析及控制系统研究[D].武汉:武汉理工大学,2002.
ZHANG Jifa. Research on the analysis of the motion law of aircraft wing filament winding (FW) and the control system[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2002.
- [3] 马张健.飞机蒙皮接缝信息自动提取技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2011.
MA Zhangjian. Research on automatic extraction technology of joint information of aircraft skin[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [4] 航空制造工程手册总编委会.航空制造工程手册——飞机装配[M].北京:航空工业出版社,2010.
- [5] BOZICH D. Quality measurement: In-line probing for process improvement[J]. Quality Magazine, 2006 (10): 1-2.
- [6] 刘垒,徐应强.飞机前缘蒙皮数字化精确拉形技术[J].南京航空航天大学学报,2012,44(1):79-82.
LIU Lei, XU Yingqiang. Numerical precise stretch forming for airplane leading-edge skin component[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(1): 79-82.
- [7] 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,2016,22(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, 22(6): 1456-1464.
- [8] YANG Y L, LAI Y K, HU S M, et al. Robust principal curvatures on multiple scales[C]//Proceedings of Eurographics Symposium on Geometry Processing. Cagliari, Sardinia, Italy: [s.n.], 2006: 223-226.
- [9] HUANG J B, MENQ C H. Automatic data segmentation for geometric feature extraction from unorganized 3-D coordinate points[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001, 17(3): 268-279.
- [10] WOO H, KANG E, WANG S, et al. A new segmentation method for point cloud data[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42 (2): 167-178.
- [11] 马骊溟,徐毅,李泽湘.基于高斯曲率极值点的散乱点云数据特征点提取[J].系统仿真学,2008,20 (9): 2341-2344.
MA Liming, XU Yi, LI Zexiang. Extracting feature points for scattered points based on Gauss curvature extreme point[J]. Journal of System Simulation,

- 2008, 20(9): 2341-2344.
- [12] 王瑶, 万毅. 一种利用近似平均曲率提取散乱点云模型特征点的快速算法[J]. 甘肃科技, 2010, 26(14): 13-15.
- WANG Yao, WAN Yi. Fast method for extracting feature points from scattered cloud points using approximate mean curvature[J]. Gansu Science and Technology, 2010, 26(14): 13-15.
- [13] CHEN Honghua, WEI Mingqiang, SUN Yangxing, et al. Multi-patch collaborative point cloud denoising via low-rank recovery with graph constraint[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2019. DOI:10.1109/TVCG.2019.2920817.
- [14] SALT I S, TOMBARI F, STEFANO L D. SHOT: Unique signatures of histograms for surface and texture description[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2014, 125: 251-264.
- [15] TOMBARI F, SALT I S, STEFANO L D. Unique signatures of histograms for local surface description[C]//Proceedings of European Conference on Computer Vision. Berlin: [s.n.], 2010: 356-369.
- [16] 陈西江, 章光, 花向红. 基于法向量夹角信息熵的点云简化算法[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 328-336.
- CHEN Xijiang, ZHANG Guang, HUA Xianghong. Point cloud simplification based on the information entropy of normal vector angle[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(8): 328-336.
- [17] BENTLEY Y L. Multidimensional binary search trees used for associative searching[J]. Communications of the ACM, 1975, 18(9): 509-517.

(编辑: 胥橙庭)