

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.03.003

基于飞机壁板特征的扫描路径生成方法研究

赵安安¹, 王洲涛², 汪俊³

(1. 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 西安 710089;

2. 南京航空航天大学计算机科学与技术学院, 南京 211106; 3. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

摘要:为解决航空制造业数字化测量过程中复杂零部件不能完整测量的问题,提出了一种基于特征识别的飞机零部件扫描路径生成方法。对于一个飞机零部件的数字模型,本文的目标是对其中存在的槽特征、筋特征给出若干条扫描路径,使持有扫描仪的机械臂能沿此路径对该零部件的各类特征进行完整精细地扫描。本文采用区域分割的方法对各类特征进行分割和提取。考虑到槽、筋等特征中不易被扫描到的区域均为和扫描方向近似垂直特征面,在对模型进行区域分割之后,将这些特征面进行提取,作为后续处理的基础。扫描路径的规划主要是通过分析提取出的特征面来进行的:将每个特征面投影到一个二维平面内,并在二维空间内对该特征面生成一条合适的扫描路径,将该路径投影返回三维后,对其沿着一定角度进行偏置,得到了最终的三维扫描路径。实验结果显示,本文提出的方法能够准确地生成飞机零部件数字模型的扫描路径,适用于航空制造业的实际数字化测量过程。

关键词:飞机零部件;数字化测量;槽特征;筋特征;扫描路径

中图分类号:V262.3⁺5

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2021)03-0344-06

Scanning Path Generation Based on Aircraft Panel Features

ZHAO An'an¹, WANG Zhoutao², WANG Jun³

(1. AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, China; 2. College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China; 3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In the aviation manufacturing industry, complex aircraft components can hardly be completely measured in the digital measurement process. This paper proposes a scanning path generation method based on feature recognition. For the digital model of an aircraft component, based on its slot and rib features, we aim at providing several scanning paths for the scanner holder, i.e., a robotic arm, to finely and completely scan features. We segment and extract the surfaces of aircraft components into parts based on the region segmentation method. Considering that the surfaces of hard-to-scan areas, i.e., slots and ribs, are usually approximately perpendicular to the scanning direction, the parts that satisfy the perpendicular criterion are gathered as a basis for subsequent processing among the surface of parts after segmentation. By analyzing the extracted features of these surfaces, we plan the scan path as follow: Each surface is projected into a two-dimensional plane, and a suitable scanning path is generated; After projecting the path back into three dimensions, it is adjusted along a specific angle to generate the final scanning path. The experimental results demonstrate that the proposed method can accurately generate the scanning path, which is practical for digital measurement in the aviation manufacturing industry.

Key words: aircraft component; digital measurement; slot feature; rib feature; scanning path

基金项目:江苏省杰出青年基金(BK20190016)资助项目;航空科学基金(2019ZE052008)资助项目。

收稿日期:2021-04-21; **修订日期:**2021-05-03

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

引用格式:赵安安,王洲涛,汪俊.基于飞机壁板特征的扫描路径生成方法研究[J].南京航空航天大学学报,2021,53(3):344-349. ZHAO An'an, WANG Zhoutao, WANG Jun. Scanning path generation based on aircraft panel features[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(3):344-349.

在现代制造业中,数字化制造技术已经成为支撑现在工业发展的重要推动力量^[1-5]。在航空航天领域中,目前已经完成生产开发的高端飞机型号中,无一不采用了先进的数字化技术辅助飞机制造的各项工艺程序。进入21世纪以后,计算机辅助技术进一步发展。数字化与信息化的浪潮在各个行业都实现了创新性发展。特别是在航空航天领域中,国内外研究机构投入了大量资源、人员开展数字化制造相关先进技术研究。其中,数字化测量技术是目前在航空航天制造流程中,应用最为广泛,实用价值高的一项技术之一^[6-12]。

精确的数字化测量系统,能够为飞机的外形检测、装配干涉分析等,提供高质量的数字模型。近些年来,随着测量设备与技术的进步,传统的接触式测量已经被光学测量所取代。光学测量凭借着非接触、数据采集量巨大等优点,在航空航天制造领域中,越来越多被应用于零部件尺寸的测量、整机质量分析、数字化装配以及辅助加工制造中^[13-18]。为了实现飞机泊位系统的高效与精确,王春彦等^[13]建立了基于双振镜的激光扫描系统。通过采用去噪、精简等优化技术,对激光扫描数据进行分析,提高了扫描数据的质量。冯上朝等^[14]对激光扫描仪采集的飞机点云数据,采用对齐、精简等预处理手段,提高了后续飞机建模的处理效率。李栋等^[15]基于激光扫描数据,提取飞机蒙皮的下陷特征点。杨角龙等^[16]针对飞机蒙皮修配量问题,基于扫描线点云,提出了一种修配量提取方法。该方法精度极高,满足了飞机实际装配过程中的需求。为了快速准确地对飞机表面孔进行检测与加工,石循磊等^[17]提出了一种基于线激光数据的飞机表面铤窝孔参数提取方法。并且,该方法对于粗糙的曲面也具有鲁棒性。赵庆辉等^[18]重点分析了手持式三维激光扫描仪在大飞机装配中的偏差问题,为飞机机身内部装配的偏差检测提供了一种实用的方法。

然而,现有的三维激光扫描系统在扫描复杂零部件时,容易出现扫描不完整的问题,进一步影响后续的加工制造^[19-21]。对于一个待扫描的飞机零部件,其表面的槽特征,筋特征在模型的粗测量阶段不易被扫描到。图1展示了两种不易被扫描的飞机表面特征。为了克服上述问题,在粗测量阶段后,需要对带扫描零件执行一次精细化扫描。在精细化扫描阶段,对其中存在的槽特征、筋特征给出若干条扫描路径,使持有扫描仪的机械臂能沿此路径对该零部件的各类特征进行完整精细地扫描。

本文提出一种基于特征识别的飞机零部件扫描路径生成方法。针对上述存在的各类槽特征、筋特征,生成完整的扫描路径,并使机械臂沿着生成

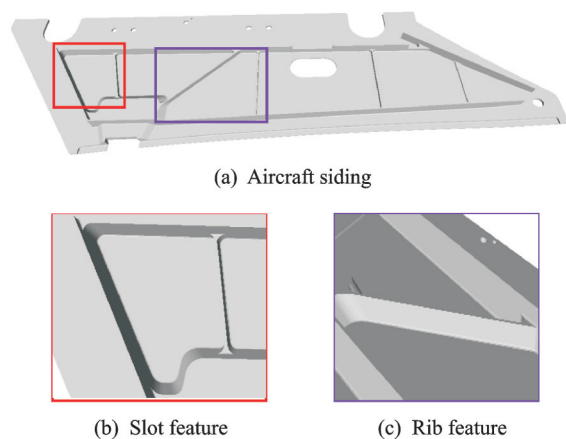


图1 飞机壁板的两种常见表面特征

Fig.1 Two surface features of aircraft siding

的路径实现自动化扫描与测量。扫描路径的生成,主要通过特征面的提取实现。首先将每个特征面投影到二维平面中,在二维空间中对该特征面规划出一条合适的扫描路径。待二维空间路径生成后,将其投影回三维空间。再对其进行一定角度的偏置,得到最终规划的三维扫描路径。

1 算法流程

在航空制造业数字化测量过程中,复杂零部件存在特征不能完整测量的问题。为了进一步精确扫描,获得待扫描部件的细致特征,提出了一种飞机零部件扫描路径生成方法。针对飞机零部件上存在的各类槽特征、筋特征给出完整的扫描路径,并结合机械臂实现自动化扫描与测量。

对于一个飞机零部件数字模型,本文的目标是对其中存在的槽特征、筋特征给出若干条扫描路径,使持有扫描仪的机械臂能沿此路径对该零部件的各类特征进行完整精细地扫描。这类特征往往在模型的粗测量阶段不易被扫描到,如筋特征的侧面、槽特征四壁的侧壁等。本文采用区域分割的方法对各类特征进行分割和提取。考虑到槽、筋等特征中不易被扫描到的区域均为和扫描方向近似垂直特征面,在对模型进行区域分割之后,将这些特征面进行提取,作为后续处理的基础。

扫描路径的生成主要是通过分析提取出的特征面来进行的:将每个特征面投影到一个二维平面内,并在二维空间内对该特征面规划出一条合适的扫描路径,将该路径投影返回三维后,对其沿着一定角度进行偏置,就得到了最终规划的三维扫描路径。

具体流程如图2所示,从结果可视化图可知该方法能够有效识别出飞机零部件的特征细节,并依据特征形状准确地给出扫描路径。

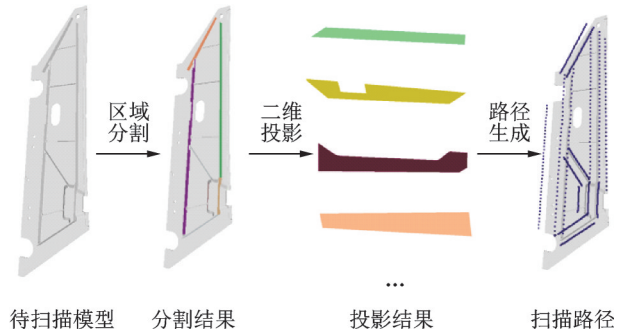


图2 方法流程图

Fig.2 Method flow chart

1.1 区域分割算法

在机械臂代替人工进行飞机零部件扫描的过程中,对于较复杂的模型扫描难度往往体现在零件特征扫描不完整上。这些特征诸如筋特征的侧面、槽特征四壁的侧壁等,想要从一个固定的角度进行全部扫描是比较困难的。本文的思想是先将此类特征进行识别,然后对其扫描路径单独进行规划。本节提出基于区域分割的特征提取方法实现第一步的目的。

考虑几乎所有机械臂难以一次扫描到的区域都是由于该区域的法向量和扫描仪入射角度近乎垂直,所以先将整个零件用区域分割算法将每一个面分割出来,然后从中提取出法向量和扫描入射角度垂直的“侧面”。在本文中,将这些“侧面”称为特征面。此外,为了方便描述,定义粗扫描阶段零件朝向扫描仪的方向为零件的基向量,而特征面就是法矢和基向量近似垂直的面。

区域分割算法基于模型三角面片的生长和融合,使分割出来的每一个区域内所有三角面片法向量之间的最大夹角小于设定的阈值。输入待扫描的模型和设定的夹角阈值,对其中所有的边进行遍历,计算和边相邻的两个三角面片的二面角,在此过程中为每一个面赋值上一个区域编号,表示该面所属的区域。当计算每一个边所对应的二面角时,根据它和设定阈值的大小比较结果,可以得到如下两种情况:如果二面角不超过阈值,说明左右两个面片分属不同的区域,这时只需给它们表示上不同的区域编号;如果二面角比阈值大,就要考虑是否将左右两个面片所代表的区域进行融合。融合的方法是计算这两个区域内面片法矢夹角的最大值,对比最大值和阈值之间的关系,如果最大值小于阈值,就将两区域融合,赋值上相同的区域编号。如图3所示。其中,不同面片之间的法矢夹角计算定义为

$$\sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N CA(p_n, q_m) \quad (1)$$

式中:CA(•)为两个不同面片的法矢夹角计算函

数; p_n 、 q_m 分别为不同区域中的面片。

当所有的边遍历结束时,模型中所有的面片均已赋值上区域编号,最终完成区域分割,其中每一个区域内所有的面片两两之间的夹角均不超过设定的阈值。

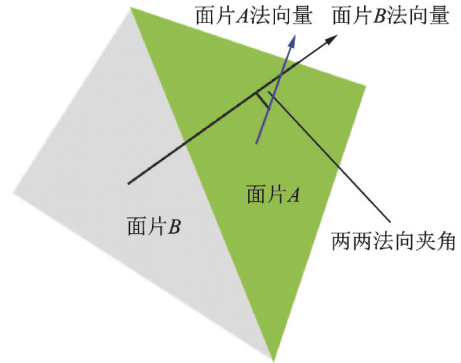


图3 面片法矢夹角示意图

Fig.3 Angle between the normal vectors of the patch

为了找出零件模型中所有的特征并进行提取,即找出和基向量近似垂直的特征面,计算每一块分割出的区域的平均法矢,如果一个区域的平均法矢和基向量近似垂直,即两者的夹角大于一定的角度,就可以将这个区域作为一个特征进行提取。提取出的特征作为下一步进行扫描路径规划的基础。

1.2 简化区域分割算法

在1.1节中所述的区域分割算法,能有效地保证所分割出的每一块区域内所有三角面片之间的夹角都严格小于一定的阈值,从直观上看,如果阈值设定较小,这些区域就会足够“平坦”。但是,在算法过程中对于区域是否能融合的判断却是十分耗时的,其时间复杂度为指数级,这使得该算法不能接受较为复杂的模型。于是,根据飞机零部件模型的实际特点,提出一种简化的替代策略作为更为通用的区域分割算法,这将会在大幅减少时间复杂度的同时,适应大部分模型的扫描。

实际的飞机零部件数字模型大多为CAD模型,这些模型边缘明显,曲面较少。根据这个特点对1.1节算法中区域融合的过程简化如下:当一个边所对应的二面角大于阈值时,即将两个三角片赋值同一个区域编号。这种做法能省去计算两个区域面片法矢最大夹角的计算,从而大幅度降低时间复杂度。虽然这种做法降低了算法区域分割的能力,但是针对零部件模型来说,却不会明显降低实际应用的效果。因此,通常采用简化的区域分割算法作为整个方法的第一步。而1.1节中提出的方法作为可选项处理较为特殊的模型,如一些曲面较多,区域间夹角较小的模型。算法流程伪代码如下:

输入:数字模型 $E = \{e_0, e_1, \dots, e_i\}_{i=0}^I$, 阈值 T

输出:区域分割后的数字模型 $S =$

Begin:

For $i \leftarrow 0$ to I do:

$s'_i, s''_i \in e_i;$

If $A(s'_i, s''_i) < T:$

Continue;

Else:

$s_j \leftarrow C(s'_i, s''_i);$

End For

End

其中, $A(\bullet)$ 用于计算两个面片的二面角, $C(\bullet)$ 用于融合两个可以合并的面片区域。在数字模型 $E = \{e_0, e_1, \dots, e_i\}_{i=0}^I$ 中, e_i 为三角网格数字模型中的一条边, s'_i 和 s''_i 表示边 e_i 两侧的区域。执行区域分割后的数字模型为 $S = \{s_0, s_1, \dots, s_j\}_{j=0}^J$, s_j 表示分割后的区域。

1.3 二维投影与路径生成

特征面是扫描路径规划的实施对象,特征面的提取有利于对其扫描路径进行单独规划,生成更符合特征形状的扫描路径。本节中,将介绍提出的扫描路径生成算法。

三维世界有着更高的自由度和更大的信息量,而提取出的特征面可以视为三维世界中的二维平面,这意味着在三维中直接进行扫描路径规划会更为复杂。为此,算法的第一步是将特征面投影到一个规范的二维局部坐标系,在此坐标系下,特征面的二维包围盒的长边和宽边分别与两坐标轴平行。

主成分分析(Principal component analysis, PCA)是一种统计方法,经常用于数据空间的降维,它能够分析数据存在的相关性,并转化为一组线性不相关的变量,称为主成分。对于点云数据,主成分分析常用来计算点云的包围盒,其直接输出的主成分对应包围盒不同边的方向向量。算法将PCA直接应用于确定特征面局部坐标系:将特征面数据中的面片角点视为点云数据作为输入,利用PCA分析其主成分,得到两个二维方向向量,单位化后即可作为局部坐标系的两个坐标轴,并将所有点的平均坐标作为原点,其过程可以表达为

$$T = CP = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & \dots & x_n \\ y_1 & \dots & y_n \\ z_1 & \dots & z_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: T 为降维后的二维坐标, C 为两个二维方向向量, P 为原始的点云坐标。

在确定了局部坐标系后,三维空间中的特征面就可以投影到二维平面中进行二维的路径规划,实现对问题的简化。

在二维路径下规划特征面的扫描路径,并不能单纯地将特征面包围盒的中线作为输出。对于规则的矩形特征面,这种方法是可行的,而当特征面形状不规则时,如圆弧形特征面,其扫描路径也应该是圆弧,这种简单的处理方式不再适用。为了让扫描路径依据不同特征面的形状生成,提出采样法提取扫描路径。具体过程如下:首先确定特征面包围盒,将其一条长边作为采样边进行等间距采样。然后将每一个采样点投影到另一条长边上,得到投影点,投影点和采样点的连线称为投影线,其宽度显然和包围盒的长边相等。每一条投影线都会和该特征面的边界至少形成两个交点,取所有交点中离该采样点最远的点和最近的点,计算它们的平均值,便得到其中一个扫描点。计算出所有扫描点,扫描点所连成的线就是该特征面二维下扫描路径规划的结果。

为了得到三维空间中的扫描路径,将每个特征面的二维扫描点映射回三维空间中,并将其沿着扫描方向进行一定距离的偏置,就得到了三维空间中的扫描路径。扫描方向和偏置距离均可根据实际应用时的机械臂和工作环境进行参数设置。

2 实验结果

为了验证所提出方法的有效性,本节采用飞机壁板数字模型进行实验。实验运行的硬件环境为内置英特尔 I7 8700 CPU, 16 GB 内存的台式计算机,使用 Visual Studio 2017 社区版运行与编辑算法代码。实验主要分为以下几个主要部分:首先,采用本文所提出的方法对飞机壁板特征生成扫描路径。接着,将飞机壁板模型生成的扫描路径与人工标定的扫描路径进行对比。根据路径上扫描点是否匹配,得到每个特征下总体的扫描精确度。并且,在实验中还通过记录算法生成整个飞机壁板数字模型的完整扫描路径的总体时间来评判算法的效率。

图4为飞机壁板筋特征的扫描路径生成结果图。图4(a)为待扫描的飞机壁板数字模型,针对其中的筋特征面(图4(b)),首先进行区域分割。图4(c)为区域分割的结果,其中蓝色部分即是筋特征面。黄色、绿色和灰色部分为其他非目标特征面。图4(d)中浮于筋特征面上的蓝色离散点,即为生成的扫描路径。从图中可以观察到,生成的扫描路径很好地覆盖了蓝色的筋特征面。并且分割出来的筋特征面也能够和其他特征面进行较好地地区分。

图5则是飞机壁板槽特征的扫描路径生成结果图。有区别于筋特征面,图5(c)中紫色和绿色的特征面即是分割出来的槽特征面,从图5(d)中可以观察到黑色的扫描路径点很好地覆盖了待扫描的特征面。本文所提出的方法在筋特征中的表现要

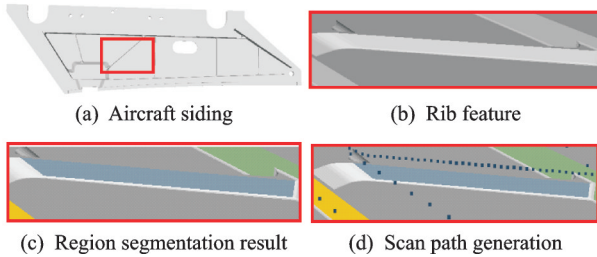


图4 筋特征扫描路径生成结果

Fig.4 Scan path generation result of rib feature

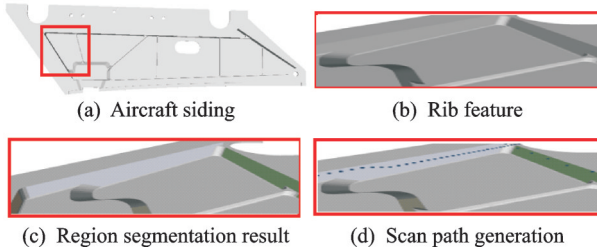


图5 槽特征扫描路径生成结果

Fig.5 Scan path generation result of slot feature

优于槽特征。槽特征在部分区域由于形状变化剧烈,如图6所示。导致区域分割算法难以分割出此类区域,分割算法失效,进一步导致生成的扫描路径失败。

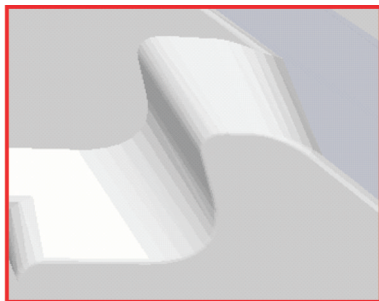


图6 分割失败的槽特征

Fig.6 Slot feature for failed segmentation

本文所提出的算法包含两种不同的区域分割算法,为了进一步分析二者之间在效率与精度上的差异,本节将飞机壁板的数字模型进行人工扫描路径标定,随后将人工标定的扫描路径与本文所提出算法生成的路径进行对比。当生成的扫描路径点与人工标注的扫描路径点位置的差值不超过10 cm的阈值,即表示此扫描点为正确预测点,反之亦然。此外,通过完整执行扫描流程所花费的时间,对比两种算法效率的差异。如表1所示,对于一个完整的飞机壁板数字模型,简化算法与完整算法的时间分别为14.4与128.4 s。在实际测量过程中,复杂的模型可以选择完整算法提升扫描精度,简易模型可以采用简化算法,提升扫描效率。

上述两个实验可以看出本文所提出的方法可以有效生成扫描路径,与人工标定的结果已经十分接近。表2展示了4个不同结构的数字模型,采用

表1 算法对比

Table 1 Algorithm comparison

算法	完整算法	简化算法
准确率/%	86	68
运行时间/s	128.4	14.4

表2 不同结构数字模型结果对比

Table 2 Comparison of different digital models

数字模型编号	运行时间/s	准确率/%
1	128.4	86
2	139.1	84
3	152.9	79
4	159.3	76

完整算法进行扫描路径生成的结果对比。为保证实验结果的有效性,表2中的所有结果均在相同的实验环境中测试5次,取均值为最终结果。4个数字模型结构从简单到复杂分别进行排序,1的结构最简单,4的结构最复杂。如表2所示,当模型的结构趋于复杂时,算法运行时间也会增加。分析原因,是因为在复杂的模型中,特征面数量增加,导致计算量增加。对于复杂的4号数字模型,本文的方法依旧能够在算法运行时间不显著增加的情况下,保持较高的准确率。

3 结 论

本文提出了一种基于飞机壁板特征的扫描路径生成方法,用于克服自动化扫描系统在扫描飞机复杂零部件时,部分扫描缺失的问题。针对槽、筋特征中不易被扫描到的区域均为和扫描方向近似垂直特征面,本文提出了两种版本的区域分割算法,分割出与基平面法向量垂直的特征平面。完整的区域分割算法执行时间较长,但是精度较高。简化的区域分割算法,执行时间较短,适用于简单模型的处理。在得到特征平面后,将特征平面进行二维投影。在二维空间中,生成对应特征面的扫描路径。最终,将扫描路径从二维映射回三维空间中,在进行一定的偏置后得到最终的扫描路径。可视化与量化评估的结果显示,本文所提出的方法,可以准确生成大部分区域的扫描路径。为飞机实际生产制造的自动化测量过程提供有效的支持。

参考文献:

- [1] 黄发,张中健,西福飞,等.航空发动机管路数字化制造及应用[J].燃气涡轮试验与研究,2020,33(4): 53-57. HUANG Fa, ZHANG Zhongjian, YOU Fufei, et al. Digital manufacturing and application of aero-engine pipeline[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2020,33(4): 53-57.
- [2] XIE Q, ZHANG Y, CAO X, et al. Part-in-whole

- point cloud registration for aircraft partial scan automated localization[J]. *Computer-Aided Design*, 2021(1): 103042.
- [3] LONG K, XIE Q, LU D, et al. Aircraft skin gap and flush measurement based on seam region extraction from 3D point cloud[J]. *Measurement*, 2021, 176: 109169.
- [4] XIE Q, LU D, HUANG A, et al. RRCNet: Rivet region classification network for rivet flush measurement based on 3D point cloud[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 70: 1-12.
- [5] DAI J, WEI M, XIE Q, et al. Aircraft seam feature extraction from 3D raw point cloud via hierarchical multi-structure fitting[J]. *Computer-Aided Design*, 2021, 130: 102945.
- [6] MEI Z, MAROPOULOS P G. Review of the application of flexible, measurement-assisted assembly technology in aircraft manufacturing[J]. *Journal of Engineering Manufacture*, 2014, 228(10): 1185-1197.
- [7] GUO F, ZOU F, LIU J, et al. Working mode in aircraft manufacturing based on digital coordination model[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 98(5): 1547-1571.
- [8] WANG Y, LIU Y, XIE Q, et al. Density-invariant registration of multiple scans for aircraft measurement[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 70: 1-15.
- [9] LIN X, CAO G, LI L, et al. Aircraft digital measuring technology of multi-sensor fusion [C]//Proceedings of 2013 IEEE 11th International Conference on Electronic Measurement & Instruments. [S. l.]: IEEE, 2013: 18-22.
- [10] HUNT E R, CAVIGELLI M, DAUGHTRY C S T, et al. Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status[J]. *Precision Agriculture*, 2005, 6(4): 359-378.
- [11] DENG Z, LI S, HUANG X. A flexible and cost-effective compensation method for leveling using large-scale coordinate measuring machines and its application in aircraft digital assembly[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(6): 065904.
- [12] MA Z, CHEN X. Fiber Bragg gratings sensors for aircraft wing shape measurement: Recent applications and technical analysis[J]. *Sensors*, 2019, 19(1): 55.
- [13] 王春彦, 邸金红. 飞机泊位系统中的激光扫描数据的处理[J]. *激光技术*, 2015, 39(3): 357-360.
- WANG Chunyan, DI Jinhong. Processing of laser scanning data in aircraft parking systems[J]. *Laser Technology*, 2015, 39(3): 357-360.
- [14] 冯上朝, 刘莎. 基于激光扫描的飞机点云预处理技术[J]. *计算机与数字工程*, 2018, 46(7): 1279-1283.
- FENG Shangchao, LIU Sha. Aircraft point cloud preprocessing technology based on laser scanning[J]. *Computer & Digital Engineering*, 2018, 46(7): 1279-1283.
- [15] 李栋, 李泷杲, 李琦, 等. 基于激光扫描的飞机蒙皮下陷特征点提取[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(9): 96-101.
- LI Dong, LI Shuanggao, LI Qi, et al. Feature points extraction of aircraft skin sag based on laser scanning[J]. *Aviation Manufacturing Technology*, 2018, 61(9): 96-101.
- [16] 杨角龙, 黄翔, 李泷杲, 等. 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]. *Aviation Manufacturing Technology*, 2019, 62(10): 73-77.
- [17] 石循磊, 杜坤鹏, 张继文, 等. 基于线激光扫描的飞机表面铆窝孔参数提取方法[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(8): 148-154.
- SHI Xunlei, DU Kunpeng, ZHANG Jiwen, et al. Method for extracting hole parameters of aircraft surface based on linear laser scanning[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(8): 148-154.
- [18] 赵庆辉, 何坤. 三维激光扫描技术在大飞机上的应用研究[J]. *科技与创新应用*, 2019(2): 1-4.
- ZHAO Qinghui, HE Kun. Research on the application of 3D laser scanning technology on large aircraft[J]. *Technology and Innovation Application*, 2019(2): 1-4.
- [19] 赵安安, 吴志鹏, 曹涛, 等. 基于局部不变性的航空C型梁配准方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2020, 52(3): 430-437.
- ZHAO An'an, WU Zhipeng, CAO Tao, et al. Aeronautical C-beam registration based on local invariance[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2020, 52(3): 430-437.
- [20] 汪俊, 李红卫. 飞机大尺寸自动化柔性测量技术研究进展[J]. *南京航空航天大学学报*, 2020, 52(3): 353-362.
- WANG Jun, LI Hongwei. Aircraft large-scale automation flexible measurement technology[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2020, 52(3): 353-362.
- [21] 梁楚萍, 印杰, 伍静, 等. 三维网格分割中聚类分析技术综述[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2020, 32(4): 680-692.
- LIANG Chuping, YIN Jie, WU Jing, et al. A survey of 3D mesh segmentation based on clustering analysis[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2020, 32(4): 680-692.