

航空发动机外形点云特征分割的训练集构建

文思扬,周来水,闫杰琼,胡少乾
(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:在航空发动机外形重建过程中,需要将外形点云数据进行分割,获得更小、连贯、具有相同属性点的点云片段,以利于之后点云数据的分类提取。设计一种用于航空发动机外形特征点云分割的深度学习训练数据集的构建方法;分析航空发动机外形的特点,将理论模型与实测数据相结合,构建包含航空发动机外形特征点云数据的训练集。训练集中包括根据航空发动机外形典型特征设计的理论模型离散点云及实际扫描的外形点云数据。

关键词:逆向工程;航空发动机;点云分割;深度学习;训练集

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)05-0081-04

Construction of Training Dataset for Aeroengine Shape Point Cloud Feature Segmentation

WEN Siyang, ZHOU Laishui, YAN Jieqiong, HU Shaoqian

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In the process of aeroengine shape reconstruction, the shape point cloud data needs to be segmented into smaller and coherent point groups with the same attributes to facilitate subsequent point cloud data classification and extraction. A method for constructing a deep learning training dataset for segmentation of aeroengine shape feature point cloud is designed. The characteristics of the aeroengine shape is analyzed, and by combination of the theoretical model with the measured data, a point cloud training dataset containing the aeroengine shape characteristics is constructed, which includes the discrete point cloud of theoretical model designed according to the typical characteristics of the aeroengine shape and the actual scanned shape point cloud data.

Keywords: reverse engineering; aeroengine; point cloud segmentation; deep learning; training dataset

0 引言

在逆向工程领域,三维激光扫描仪获取的实物外形点云数据被广泛使用^[1]。而在使用逆向工程思路对航空发动机外形三维模型重建的过程中,需要将外形点云数据进行分割,获得更小、连贯、具有相同属性点的点云片段,以利于之后点云数据的分类,从而针对性地对点云片段进行重建。而由于传统的点云分割法,如曲面生长算法^[2-4]、聚类分割算法^[5-6]、扫描线算法^[7-8]等存在一定的局限性,不能很好地将航空发动机外形特征分割出来。而深度学习方法通过提供训练集,对神经网络进行训练,可以获取训练点云数据中的点云局部特征及点云的几何信息,从而对点云数据进行分类,进而较好地完成航空发动机外形点云分割的任务。

利用深度学习进行点云数据分割,需要有大量的点云数据组成数据集,供神经网络进行训练学习。一般的网络所使用的训练集,如 ModelNet40^[9]、ShapeNet^[10]等,其中的三维模型仅为简单的几何模型,使用这样的训练集进行学习,会影响网络对航空发动机外形特征分割结果的精度。为了解决这个问题,本文提出一种生成含航空发动机

外形典型特征点云数据集的方法。通过对航空发动机外形进行观察研究,分析航空发动机的外形特点及其所包含的特征,并进行分类。然后使用UG软件制作出一系列具有航空发动机外形代表性特征的三维理论模型并生成点云,并将其与扫描的航空发动机外形实测数据融合。将这些点云数据按照设置的分类标准进行特征标注,最终制作成带标签的航空发动机外形点云数据集。

1 航空发动机外形特征三维理论模型构建

1.1 航空发动机的外形特征分析

由于功能需要航空发动机的外形设计要求与标准非常复杂。其中,航空发动机的机匣是航空发动机最重要的零件之一,具有航空发动机最明显的外形特征。它作为整个发动机的基座,也是航空发动机的最主要受力零件,有着较为复杂的外形结构。不同型号的发动机机匣有所不同,但这些机匣都主要由圆筒形或圆锥形的壳体和支板组成。而其余种类的外形特征,大部分附着在机匣之上。图1所示为两台实际航空发动机的外形特征照片。

基金项目:国家自然科学基金项目(52075258)

第一作者简介:文思扬(1995—),男,湖南株洲人,硕士研究生,研究方向为数字化设计与制造。

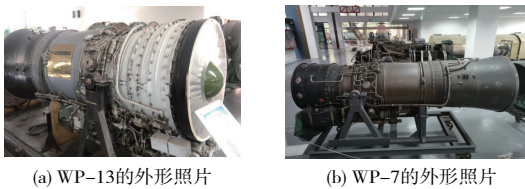


图1 实际发动机的外形图片

对实际的航空发动机外形机匣特征进行分析,可以总结出航空发动机外形主要特征为机匣壁、安装边、加强筋、螺栓、凸台、管路、孔洞等,如图2所示。

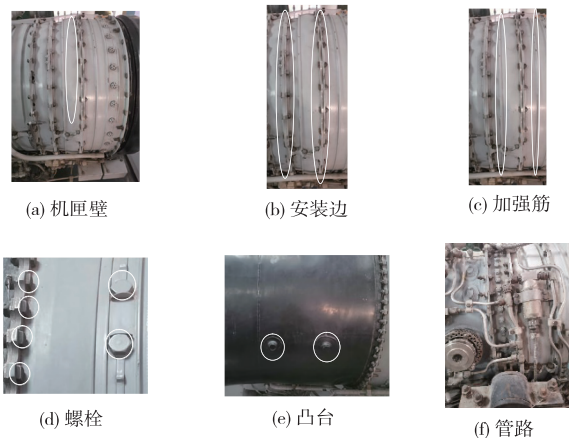


图2 航空发动机外形主要特征

1.2 航空发动机外形特征三维理论模型数据构建

构建的航空发动机外形点云深度学习数据集,需要保证数据本身具有代表性、丰富性、准确性、均衡性和真实性。为实现这些要求,可以首先根据上文所总结的航空发动机所具有的外形特征,构建出足够数量的、包含航空发动机外形特征的三维理论模型。本文通过UG软件生成所需的理论模型,并针对其中的特征设置可调参数,使得这些模型可以在生成后进行相应的调整,以满足不同的训练集设计需求。本文所使用的UG版本为UG NX12.0。

根据获得的实际航空发动机外形图片和其他参考信息,通过UG软件进行含航空发动机外形特征的、等比例的各个三维理论模型的构建,如图3所示。

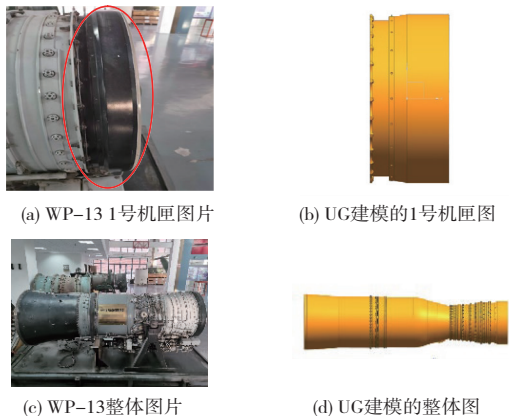


图3 航空发动机外形几何特征建模

为了满足数据集所需的数据量,可以使用UG中的部件族功能,根据所建立的第一个三维模型,生成许多基于该模型的模型族群。对该三维模型各个特征的尺寸参数进行自定义,还可以对后续生成的模型进行修改和控制,从而生成大量不同的、含航空发动机外形特征的三维模型。首先建立一个根部件模型,如图4所示。



图4 一个部件族根部件的模型图

从图4中可以看到,该理论模型具有螺栓、凸台、安装边和加强筋这些典型特征。接下来分别将控制这些特征的尺寸进行定义,方便后续识别与修改。部件族功能对这些尺寸的控制使用了一个外部链接的Excel尺寸表,可根据之前自定义的尺寸名称,对部件族群中的每一个部件族成员进行参数修改。特征尺寸定义的示意图如图5所示。

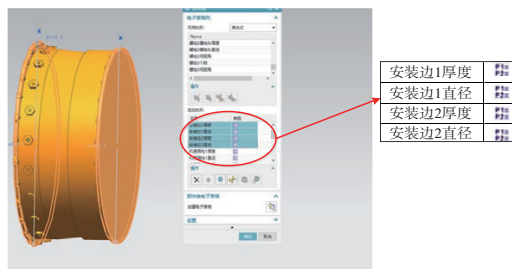


图5 部件族特征尺寸定义

生成部件族成员的数量,取决于所拥有的数据量。打开部件族成员的外部链接的Excel表格,如图6所示。增加部件族成员的编号,即可增加部件族成员的数量。而之前定义的每一个控制特征的尺寸都以单独一列进行表示,通过调整这些参数的设置,可以实现改变、调整生成的部件族成员模型的外形特征。

#	A	B	C	D	E	F	G	H
DEL_PART_NO	OS_PART_NAME	安装边1厚度	安装边1直径	安装边2厚度	安装边2直径	机匣圆角1厚度	机匣圆角1直径	
2	1	jixia1	10	690	10	660	7)	640
3	2	jixia2	10	690	10	660	7)	640
4	3	jixia3	10	690	10	660	7)	640
5	4	jixia4	10	690	10	660	7)	640
6	5	jixia5	10	690	10	660	7)	640
7	6	jixia6	10	690	10	660	7)	640
8	7	jixia7	10	690	10	660	7)	640
9	8	jixia8	10	690	10	660	7)	640
10	9	jixia9	10	690	10	660	7)	640
11	10	jixia10	10	690	10	660	7)	640
12	11	jixia11	10	690	10	660	7)	640
13	12	jixia12	10	690	10	660	7)	640
14	13	jixia13	10	690	10	660	7)	640
15	14	jixia14	10	690	10	660	7)	640
16	15	jixia15	10	690	10	660	7)	640
17	16	jixia16	10	690	10	660	7)	640
18	17	jixia17	10	690	10	660	7)	640
19	18	jixia18	10	690	10	660	7)	640
20	19	jixia19	10	690	10	660	7)	640
21	20	jixia20	10	690	10	660	7)	640
22	21	jixia21	10	690	10	660	7)	640
23	22	jixia22	10	690	10	660	7)	640
24	23	jixia23	10	690	10	660	7)	640
25	24	jixia24	10	690	10	660	7)	640
26	25	jixia25	10	690	10	660	7)	640
27	26	jixia26	10	690	10	660	7)	640
28	27	jixia27	10	690	10	660	7)	640
29	28	jixia28	10	690	10	660	7)	640
30	29	jixia29	10	690	10	660	7)	640

图6 部件族的控制表格

修改过参数的部件族成员模型如图7所示。通过对参数的修改,可以实现部件族成员的外形变化。可以从图7中看出,该成员模型中的螺栓个数变少,且其机匣长

度增加。根据之前所构建的不同根部件,可以生成更多含不同航空发动机外形特征的理论模型。

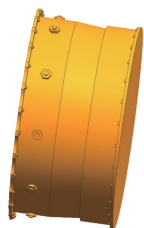


图7 部件族成员模型示意图

对于构建数据集来说,单个理论模型可以是一个机匣的整体外形,也可以是包含特征外形的局部。将这些局部模型作为根部件,可以增添数据集的丰富程度。其他含航空发动机外形典型特征的三维模型根部件模型图如图8所示。

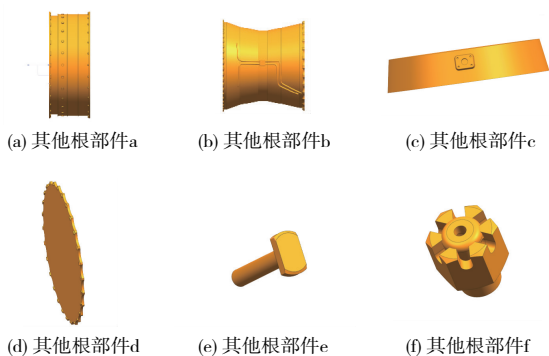


图8 其他含航空发动机外形典型特征的理论模型根部件模型图

2 航空发动机外形特征点云数据训练集的建立

为了制作训练集,需要将构建的理论模型转化为点云,并加上实际航空发动机外形的扫描点云数据,组成一个点云数据集;再制定一个分割标准并按照该标准对点云数据进行分割后标注;最后将所有点云文件组合成训练集文件h5。

2.1 航空发动机外形特征点云数据集制作

本文使用UG制作的理论三维模型的文件后缀为.prt,先用UG将其另存为stl文件。然后,使用MeshLab打开这些stl文件。使用MeshLab内的点云采样功能,对每个stl文件进行均匀采样。采样时可以根据神经网络的需求,决定采样点云文件中点的个数、是否包含法向信息等点云文件信息。由于实际扫描的点云数据并不包含法向信息。所以本文采样时选择不添加法向信息。采样后,stl文件转化为xyz文件。该文件记录了每个点的坐标信息,每个点的三维坐标信息位于一行。

因为构建的理论点云数据必然与实际的航空发动机点云数据存在一些差别,本文在分割点云数据时集中添加了实际的航空发动机外形点云扫描数据,有利于后续提升分割的准确性和可靠性。本文所使用的航空发动机外形

点云数据,是使用Metro Scan对报废的实际发动机进行扫描而获得的,获得的外形扫描点云数据如图9所示。

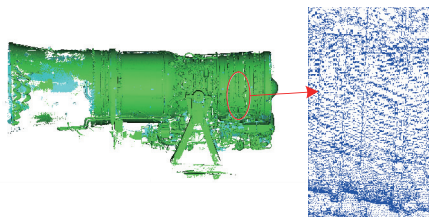


图9 实际航空发动机外形扫描点云数据图

同样,在获得该实际航空发动机外形整体扫描数据后,继续将其切割为包含一个或几个外形特征的点云片段,这样方便后续的分割与标注的数据处理。

2.2 航空发动机外形特征点云数据分割与标注

对已有的点云文件进行区域分割,并进行点云标注的主要流程为:1)制定分割标准;2)按制定好的标准对点云数据进行裁剪;3)对分割后的点云添加标签信息。一般的训练集制作主要采用软件或编程工具对点云文件进行手动标注。所以本文也采取手动标注的方法。

点云数据的分类标注标准也是根据网络设计的要求制定的。常用的分类逻辑是按组件结构特征进行分类,如是飞机点云就分别对机身、机翼和机尾进行标注。还有一种分类方法是将模型根据外形形状分成几种基础的形状类型组合,如平面、圆锥体、圆柱体、样条曲线/面等的组合,标注时进行形状的分类标注。

由于本文的目标是对航空发动机外形点云数据进行特征分割,所以按照航空发动机外形特征类型进行标注的。首先将点云数据按照之前总结的典型特征,将点云数据整体裁剪为机匣壳体、螺栓、安装边等特征点云片段,之后再打上对应的标签信息。本文设置的标签信息如表1所示。

表1 特征、标签信息设置

特征类型	标签信息
加强筋	1
机匣壳体	2
螺栓	3
安装边	4
凸台	5
管路	6

含航空发动机外形特征点云数据标注的示意图如图10所示。

表2展示了本文所构建数据集的整体详细情况。数据集总计点云数据文件1160个,其中机匣整体数据420个,特征局部数据740个。数据集包含了理论数据与实际扫描数据,整体数据与局部数据,体现了本文所构建数据集的丰富程度及可靠程度。

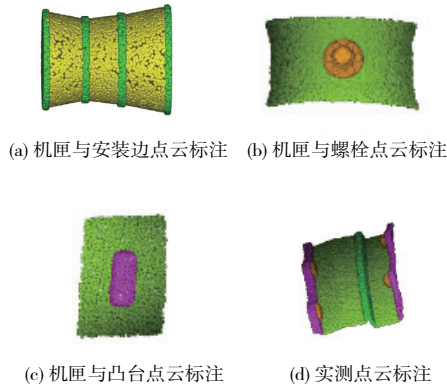


图 10 点云数据标注示意图

表 2 本文构建数据集的具体信息

特征类型	标签信息	数据个数
加强筋	1	560
机匣壳体	2	623
螺栓	6	1 483
安装边	3	940
凸台	3	384
管路	4	236

2.3 航空发动机外形特征点云数据训练集的制作

由于包括理论模型数据和实测数据的整个数据集的点云文件较多,为了提高网络读取数据的效率,可以将标注好的点云文件通过编程,整理合并为 h5 文件。h5 文件这种文件格式主要用于大规模数据的组织和存储。由于 h5 集合对数据对象的数量或大小没有限制,为数据量较大的深度学习领域提供了极大的帮助。

通过 VS 编程,将先前获得的理论模型点云数据和实测点云数据统一编辑成为 h5 文件。本章所制作的含航空发动机外形典型特征点云的 h5 文件里应该包含的信息有:所有点的 x, y, z 坐标以及每个点的标签信息,这些信息每个点一一对应地存储在 h5 文件内。本文使用的 VS 版本为 Visual Studio 2015。本文制作训练集的整体流程图如图 11 所示。

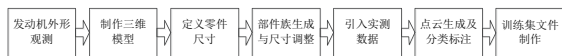


图 11 航空发动机外形点云数据训练集的制作流程图

3 结语

本文研究分析了航空发动机外形特点及其所具有的典型特征,提出了一种制作含航空发动机外形典型特征点云数据训练集的方法,通过制作包含这些典型特征的三维理论模型,转化为 stl 文件后通过 MeshLab 进行点云采样,并与扫描获得的实际航空发动机外形点云数据共同组成数据集。再对点云数据集按所设置的航空发动机外形特征分类标准进行特征点云标注,最后将这些理论模型对应每个标注好的点云文件转换编辑成神经网络所需的输入文件 h5,完成了适用于的航空发动机深度学习训练集的制作,为接下来利用深度学习进行点云数据分割做好了准备。

参考文献:

- [1] 邢宏文,刘思仁,邱磊,等. 基于点云数据的零件数字化检测技术研究[J]. 机械制造与自动化,2020,49(6):217-219.
- [2] BEN G. Segmentation of TIN-structured laser altimetry points clouds[C] // Symposium on Geospatial Theory, Processing and Application. [S.I.;s.n.],2002.
- [3] AZER M A,EL-KASSAS S M,HASSAN A W F,et al. A survey on trust and reputation schemes in ad hoc networks[C]//2008 Third International Conference on Availability, Reliability and Security. Barcelona,Spain: IEEE,2008:881-886.
- [4] LI R D, LI J, LIU P, et al. An objective trust management framework for mobile ad hoc networks[C]//2007 IEEE 65 th Vehicular Technology Conference - VTC2007 - Spring. Dublin, Ireland: IEEE,2007:56-60.
- [5] FILIN S. Surface clustering from airborne laser scanning data[J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, 2001, 34: 227-232.
- [6] BIOSCA J M, LERMA J L. Unsupervised robust planar segmentation of terrestrial laser scanner point clouds based on fuzzy clustering methods[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2008,63(1):84-98.
- [7] 孙玉星,黄松华,黄皓,等. 自治网络中信任信誉模型的安全现状研究[J]. 计算机科学,2009,36(4):5-11.
- [8] MEJIA M, PEÑA N, MUÑOZ J L, et al. A review of trust modeling in ad hoc networks[J]. Internet Research,2009,19(1):88-104.
- [9] WU Z R, SONG S R, KHOSLA A, et al. 3D ShapeNets: a deep representation for volumetric shapes[C]//2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Boston, MA, USA: IEEE,2015:1912-1920.
- [10] CHANG A X, FUNKHOUSER T, GUIBAS L, et al. ShapeNet: an information-rich 3D model repository[J/OL]. (2015-12-09) [2021-04-15] <https://arxiv.org/abs/1512.03012>.

收稿日期:2021-05-17