

基于三维激光点云曲率突变的航空发动机 进气道异物检测方法

武星¹, 李兴达¹, 汤凯¹, 李扬志¹, 张航璞¹, 陈中文²

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016;

2. 国营芜湖机械厂 航电部, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 为了解决目前人工巡检航空发动机进气道时存在的准确性差、效率较低等问题, 提出一种基于三维激光点云曲率突变的进气道异物检测方法; 设计一种基于体素网络的点云数据压缩方法, 计算压缩点云数据在进气道深度方向上的曲率变化; 利用迭代阈值法计算分割曲率突变点云的动态阈值, 通过阈值分割识别曲率突变的异物点云; 采用区域生长法将离散的异物点云聚类分割为整体的异物目标; 参考航空发动机进气道实物搭建了进气道模拟件测试环境, 对3种不同尺寸的异物进行了检测定位, 异物识别准确率达到95.4%, 异物定位精度达到1.46 cm, 实验结果验证了该方法的准确性与高效性。

关键词: 异物检测; 点云压缩; 目标分割; 迭代阈值法; 区域生长法

Method for Detecting Foreign Objects in the Intake Duct of a Three-Dimensional LaserPoint Cloud Aircraft Engine Based on Curvature Mutation

WU Xing¹, LI Xingda¹, TANG Kai¹, LI Yangzhi¹, ZHANG Hangying¹, CHEN Zhongwen²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of

Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Avionics Department, State-operated Wuhu Machinery Plant, Wuhu 241000, China)

Abstract: In order to solve the problems of low accuracy and efficiency in manual inspection of aircraft engine intake ducts, a foreign object detection method based on curvature mutation of three-dimensional laser point cloud is proposed for intake ducts. A voxel network-based point cloud data compression method is designed, and the curvature change of the compressed point cloud data is calculated in the depth direction of the inlet. The iterative threshold method is used to calculate the dynamic threshold for segmenting the point cloud of curvature mutation, and the point cloud of foreign object is then identified by means of threshold segmentation for curvature mutation. The region growth method is used to cluster the discrete point cloud of foreign object into the whole foreign object. An analog test environment is constructed for the intake duct of aircraft engine, in which three different sizes of foreign objects are detected and located. The recognition rate for foreign object reaches 95.4%, and the locating accuracy for foreign object reaches 1.46 cm. The experimental results verify the accuracy and efficiency of the method.

Keywords: foreign object detection; point cloud compression; object segmentation; iterative threshold method; regional growth method

0 引言

动力系统是维持飞机正常飞行的关键系统, 而进气道是支撑保护航空发动机的重要结构部件。在飞机高空飞行期间, 航空发动机不可避免地暴露在极为复杂恶劣的工作环境当中, 进气道中可能会出现异物侵入、叶片疲劳损伤、管壁变形、铆钉脱落等问题, 对飞机飞行造成较严重的安全隐患^[1-2]。

为了保障飞机的安全飞行, 在飞机起飞前、降落后必

须对航空发动机及其进气道进行全面细致的巡检排查。目前, 人工巡检仍是航空发动机进气道巡检的主要作业方式^[3], 依靠工作人员身穿不带有任何附加物的专用工作服进入空间狭小的进气道中, 通过人工目视检查或使用便携式检测设备, 结合巡检人员的工作经验判断进气道是否存在状态异常。这种作业方式不仅工作效率低、劳动强度高, 而且巡检准确率基本取决于巡检人员的工作经验和主观判断, 容易导致误检漏检等情况。

收稿日期: 2023-12-12; 修回日期: 2023-12-27。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52475521, 61973154); 国防基础科研计划重点项目(JCKY2022209B001); 江苏高校“青蓝工程”优秀青年骨干教师项目(2022)。

作者简介: 武星(1982-), 男, 博士, 研究员。

引用格式: 武星, 李兴达, 汤凯, 等. 基于三维激光点云曲率突变的航空发动机进气道异物检测方法[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(12): 67-72, 80.

为了破解上述难题,有必要将机器视觉检测技术应用航空发动机进气道巡检作业,减小巡检人员主观经验的影响,增强对进气道内部细小瑕疵或微小异物的识别能力,实现检测结果的量化处理,保证前端检测装置与后端检测数据库的实时数据同步,为后续故障诊断与隐患排除打下良好的技术基础。进一步,融合移动机器人技术,采用适合航空发动机进气道内部结构的移动机器人底盘,搭载用于进气道状态监测与异物巡检的视觉、激光等各类传感器,研制航空发动机进气道巡检机器人,朝进气道智能化巡检方向发展。

进气道环境感知与异物识别,是实现进气道智能化巡检的关键技术之一。针对如何对异物进行检测这一问题,林玉兵等人^[4]提出一种基于灰度图像处理 and 点云聚类的方法,分别采用 OTSU 方法和 DBSCAN 密度聚类方法将异物点云从背景中提取并进行分割。蔚增岩等人^[5]借助 kd-tree 检测不同物体的 VFH 特征值的差异性,从而实现对不同物体的检测。朱韵琳等人^[6]使用 ICP 方法将扫描得到的激光点云进行配准,并通过背景差分法实现异物检测。林鹏飞等人^[7]使用动态阈值背景差分法将经过三维重构后的扫描区域与标准背景模板进行对比,检测是否有异物存在。Ruder 等人^[8]通过激光雷达对检测环境进行三维重建,并使用卡尔曼滤波算法判断是否存在异物。

在发动机进气道的真实环境中,可能存在异物种类繁多且事先无法预知异物的特征^[9],建立神经网络所需的样本集也较为困难。并且,巡检机器人的检测装置受到传感器视野和量程的限制,只能采用逐步进给十分段检测的巡检模式,在不同巡检点位置获取的进气道数据仅是整体结构的子集。由于检测装置的传感器测量误差、巡检机器人的进给定位误差、进气道结构本身的形状变化,巡检机器人准确获取当前巡检点位置所对应的标准进气道背景模板具有诸多困难^[10]。

因此,本文提出一种基于动态阈值和点云聚类的航空发动机进气道异物检测方法。使用 RealSense L515 深度相机作为检测设备,不依赖标准进气道背景模板,而是通过异物点云数据空间特征分析、基于体素网络的点云数据压缩、基于曲率动态阈值的异物点云提取、基于区域生长法的异物点云分割等关键方法的研究开发,实现航空发动机进气道的异物检测定位。

1 进气道异物检测定位算法

1.1 进气道异物在点云数据中的空间特征分析

通过对实际的航空发动机进气道点云数据进行观察总结可知,如图 1 所示,进气道整体形状基本呈流线型,在沿着进气道深度方向上具有明显的平滑性特征,即在沿着进气道深度方向上,处于同一深度截面线上的点云与进气道中心之间的距离呈现均值连续变化的特征,进气道点云在沿着进气道深度方向上曲率的整体变化趋势较为平滑,不存在曲率突变的位置。

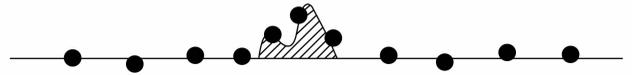


图 1 进气道深度方向上的截面点云结构形态

而当进气道当中存在冰块、铆钉、石子等异物时,进气道点云信息的空间特征就会发生一定的变化,在异物位置处的点云信息在沿着进气道深度方向上的曲率与正常进气道点云的曲率相比明显增大,此处的曲率变化趋势发生突变,破坏了进气道点云信息原有的平滑性特征。因此,基于异物对进气道点云信息造成的影响,对进气道点云的整体形状特征的曲率变化情况进行研究分析,可以通过点云曲率的大小,区分异物点云与进气道点云,从而实现对进气道内部异物的检测^[11]。

1.2 异物检测方法流程

对于航空发动机进气道中的异物检测与定位,本文提出了一种基于曲率突变的三维视觉点云处理方法,总体流程如图 2 所示。首先通过深度相机获取进气道内部的点云信息,并使用直通滤波和高斯滤波对点云信息进行预处理,去除三维点云信息中的噪声点与误差点。点云预处理完成后,为了加速后续的计算流程以及便于点云数据的存储,使用基于体素特征融合的方法对点云进行压缩,根据深度相机进行数据采集时在水平方向上的最大视场角与垂直方向上的最大视场角与设定的角度分辨率将深度相机的数据检测区域划分为若干数量的体素网格,并通过计算点云的水平角度和垂直角度确定该点云对应的体素网格,将点云分配到对应的体素网格中,点云分配完成后对每个体素网格中的所有点云进行平均化计算得到压缩后的点云数据,去除体素网格中原有的点云并利用压缩后的点云数据创建新的点云从而完成点云压缩。点云压缩完成后,以点云坐标为依据,确定每个点云对应的进气道深度截面线的位置,并将位于同一进气道深度截面线上的点云进行排序,同时计算每个点云在进气道深度方向上的曲率,并通过迭代阈值法计算动态阈值将进气道点云与异物点云进行区分。最后使用区域生长法对提取出的异物点云进行聚类分割,并将每一组点云簇进行平均化计算,得到每一个异物在相机坐标系下的位置信息,然后利用相机标定时获取的外参从而将异物在相机坐标系中的位置信息经过坐标转换得到异物在世界坐标系下的位置信息。

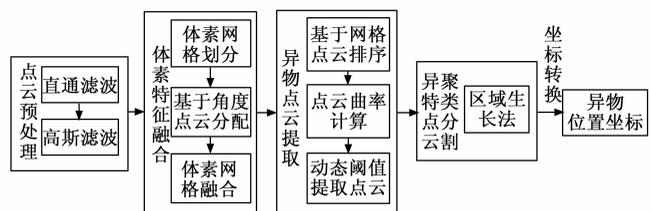


图 2 异物检测定位总体流程

1.3 点云预处理

一般由于设备自身的问题、设备运行时的场景等因素

的影响, 深度相机获取到的激光点云信息往往会含有一部分噪声点, 这通常来说是不可避免的。点云信息当中存在的噪声点会导致对于点云形状特征的计算出现误差, 从而影响后续异物检测分割算法的实现, 因此必须采取一定的方法消除点云信息中的噪声点与误差点, 本文中采取的点云预处理方法为直通滤波和高斯滤波。

1.3.1 点云直通滤波

为了确保采集到的点云信息能够完整地表示出场景物体的形状特征, 一般通过激光采集设备扫描得到的点云数据的规模较大, 而在某些应用场景中, 需要使用到的点云信息往往会集中于某一特定的感兴趣区域当中, 此区域之外的点云信息可以判断为无效点云。比如在自动驾驶应用场景中, 需要重点关注的点云信息是车辆、行人、障碍物等物体的点云, 地面点云等点云数据往往不需要处理, 此时可以通过选择适当的阈值可以方便快捷地实现去除无效点云的目的。

与之类似, 在本文的应用场景当中, 需要实现的效果为去除点云数据当中进气道点云以外的噪声点与误差点, 由于在整体的点云采集过程中, 深度相机始终保持在进气道的中心位置, 因此与相机之间的距离超过进气道最大横截面边长的一半的点云数据就可以被判断为无效点, 同样可以使用一个距离阈值去除噪声点。

通过深度相机采集点云后, 设原始点云数据为 $P = \{p_0, p_1, \dots, p_n\}$, 其中 $p_i = (x_i, y_i, z_i)$, 当坐标点与深度相机之间的距离过大时判断为无效点。其计算公式如下:

$$z_i > h_{\text{dist}} \quad (1)$$

其中: h_{dist} 为设定的距离阈值。

1.3.2 点云高斯滤波

在理想情况下, 通过深度相机采集得到的正常未被异物侵入的进气道管壁点云在沿着进气道深度方向上的截面形状应当近似为一段平滑的线条, 曲率呈等间隔平稳变化, 无突变位置, 而实际场景中, 由于深度相机本身的测量误差, 会导致采集到的点云数据坐标点的浮动范围超出预期, 与实际的进气道截面形状有较大的差别, 如所示。因此, 本文使用高斯滤波对点云数据的结构形态进行一定的平滑处理。

高斯滤波是在点云预处理环节经常使用的一种滤波手段, 通过高斯滤波可以使点云数据的形状趋于平滑, 显著地去除点云中的高频噪声, 同时也会消除点云中的一些无关紧要的细节特征, 得到更加准确、更加清楚的点云信息。高斯滤波是一种线性平滑滤波器, 它利用了高斯函数的特性对图像和数据进行平滑处理, 其基本思想为, 对于点云数据中的每一个点云数据点, 在预先设定好大小的邻域中寻找一定数量的该点的邻居点, 并根据邻居点与该点之间的距离通过高斯函数计算出此邻居点对应的权重值, 最后将所有邻居点对应的数据进行加权平均, 并替换掉该点对应的数据, 从而达到使数据平滑化的效果。

高斯函数分布式如下:

$$G_o = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

1.4 点云数据压缩

通过深度相机获取的点云信息经过预处理之后, 点云中的大部分误差点和噪声点已经被去除或平滑化, 但剩余的点云规模仍然较大, 为了便于对点云数据进行储存以及加快后续的算法运算, 需要对点云数据进行压缩^[12]。

点云压缩的主要目的是减少点云信息中的数据量, 同时保留原点云的主要形状特征^[13], 在本文的研究场景中, 使用深度相机对进气道中的点云信息进行采集, 深度相机的扫描范围为以相机为顶点的对称锥形区域, 如图 3 所示。

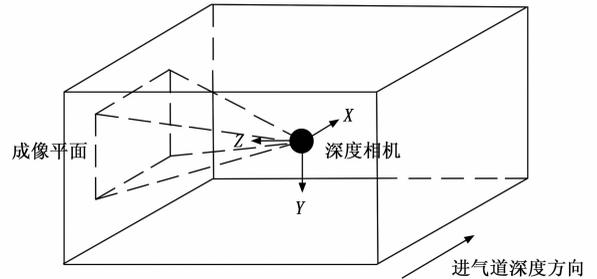


图 3 深度相机成像示意图

基于上述深度相机的扫描范围, 本文提出一种基于体素特征融合的点云压缩方法, 其具体步骤如下:

1) 对整体点云数据进行合理的体素网格划分, 每个体素网格中的点云数量若干, 每个点云都可以对应到一个体素网格中, 在本文中将根据深度相机在水平方向上的最大视场角与垂直方向上的最大视场角和设定好的角度分辨率对体素网格进行划分。由于航空发动机内部侵入的异物在通常情况下数量较少且体积较小, 同时进气道内部的空间范围较为空旷, 通过深度相机获取到的整体点云数据在 Z 轴方向上的距离跨度较小, 因此在点云数据的 Z 轴方向上不进行体素网格划分, 划分后每个体素网格的形状为四棱锥。对体素网格划分数量计算公式如下, 其中 n_{row} , n_{col} 分别为体素网格的行数和列数, T_{row} , T_{col} 分别为深度相机在 X 轴方向和 Y 轴方向上的最大视场角, t_{angle} 为划分体素网格所依据的角度分辨率:

$$n_{\text{row}} = T_{\text{row}} / t_{\text{angle}} \quad (3)$$

$$n_{\text{col}} = T_{\text{col}} / t_{\text{angle}} \quad (4)$$

体素网格划分完成的结果如图 4 所示。

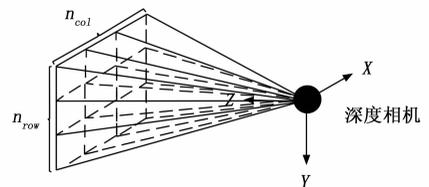


图 4 体素网格划分示意图

2) 遍历每一个点云, 分别计算坐标系原点与该点云之

间的连线在水平方向和垂直方向上与 Z 轴之间的夹角，并根据上述的角度分辨率计算该点对应的体素网格的位置，其计算公式如下，其中 row, col 分别为该点对应的体素网格的行数和列数：

$$angle_{row} = \arctan(x_i/z_i) \quad (5)$$

$$angle_{col} = \arctan(y_i/z_i) \quad (6)$$

$$row = (n_{row}/2) + (angle_{row}/t_{angle}) \quad (7)$$

$$col = (n_{col}/2) + (angle_{col}/t_{angle}) \quad (8)$$

计算完成后该点云对应的体素网格位置如图 5 所示。

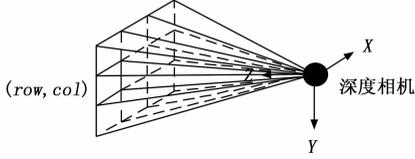


图 5 点云对应体素网格

3) 计算根据初始设定的角度分辨率 t_{angle} 进行划分后的包含点云的体素网格的平均点云密度 $\rho = N/m$ ，其中 m 为非空体素网格的数量。若密度与设定的点云密度阈值相差较大，则对角度分辨率进行调整，返回步骤 (2) 不断迭代直到满足要求。

4) 体素网格划分完成并将每一个点云对应到正确的体素网格后，将每一个体素网格中的所有点云的坐标值进行平均化计算得到压缩后的点云数据，去除体素网格中原有的点云并利用压缩后的点云数据创建新的点云从而完成点云压缩。计算公式如下：

$$P(x_c, y_c, z_c) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i(x_i, y_i, z_i) \quad (9)$$

1.5 异物点云提取

深度相机获取的点云数据经过预处理和数据压缩后，此时进气道点云数据中依然同时存在异物点云和进气道点云，根据前文所述沿进气道深度方向上在异物位置处的点云存在曲率突变的空间形状特征，使用基于曲率突变的异物点云提取方法，对进气道中是否存在异物进行检测，其基本流程如下：

1) 将点云按照沿进气道深度方向的截面线进行排序，在本文的研究场景中，相机坐标系的 X 轴指向进气道深度方向，Y 轴与 Z 轴均指向进气道管壁，因此，将上述体素网格划分后的一行网格作为一条深度截面线所处的位置，以点云数据点的 Y 轴坐标确定其对应的网格行数从而将点云对应到不同的截面线上，以 X 轴坐标区分同一截面线上不同点云数据点的先后顺序，点云排序完成后的结果如图 6 所示。

2) 在本文的研究场景中，重点关注的是物体与进气道中心之间的距离是否发生突变，因此主要计算点云数据点的 Z 轴坐标值的曲率变化情况。曲率计算公式如下，其中 z_i 为当前点的 Z 轴坐标值， z_n 为当前点周围邻域点的 Z 轴坐标值：

$$diffz = \sum_{n=i-j}^{i-1} z_n + \sum_{n=i+1}^{i+j} z_n - 2 \cdot j \cdot z_i \quad (10)$$

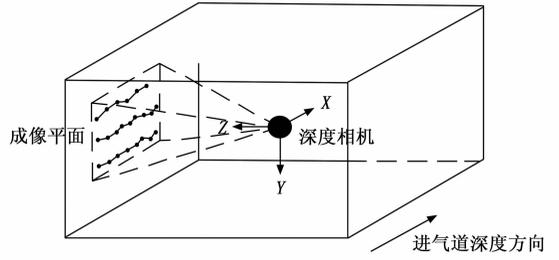


图 6 点云排序示意图

$$Z_{cur} = abs(diffz * 10) \quad (11)$$

3) 遍历所有点云数据点，将曲率超过设定阈值 h_{cur} 的点云判断为异物点云。

由于进气道形状并不固定，采用固定阈值对异物点云与进气道点云进行区分会造成过分割和欠分割的情况，导致异物点云提取方法的鲁棒性较差，使用动态阈值可以避免这一问题^[14]。本文采用迭代阈值法^[15]对区分异物点云与进气道点云的动态阈值进行计算，使其能够自适应地分割进气道点云与异物点云，算法处理流程如图 7 所示。

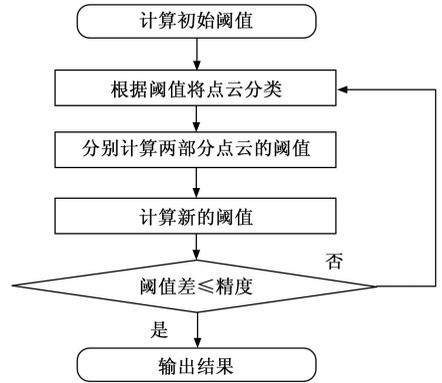


图 7 迭代阈值算法处理流程

1) 计算初始阈值 T_0 ，首先将全体点云曲率的平均值作为初始阈值，其计算公式如下：

$$T_0 = \frac{\sum_{i=1}^n Z_{curi}}{n} \quad (12)$$

2) 根据阈值 T_0 将点云分为 G_1 、 G_2 两部分， G_1 包含所有曲率小于等于 T_0 的点云， G_2 包含所有曲率大于 T_0 的点云。分别对 G_1 、 G_2 中所包含的点云曲率的平均值进行计算。其计算公式如下，其中 μ_1 、 μ_2 分别为属于 G_1 、 G_2 中的所有点云的曲率的平均值：

$$\mu_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} Z_{curi}}{n_1} \quad (Z_{curi} \in G_1) \quad (13)$$

$$\mu_2 = \frac{\sum_{j=1}^{n_2} Z_{curj}}{n_2} \quad (Z_{curj} \in G_2) \quad (14)$$

3) 通过步骤 2) 中 G_1 、 G_2 两部分点云曲率的平均值 μ_1 、 μ_2 得到新的阈值 T_1 ，其计算公式如下：

$$T_1 = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2} \quad (15)$$

4) 若两次获得的阈值 T_0 和 T_1 之间的差值小于设定的精度阈值 ΔT , 将动态阈值确定为 T_1 , 并输出结果, 否则将 T_1 作为新的 T_0 返回步骤 2) 继续迭代运行。在本文中, 将精度 ΔT 设定为 0.001 m。

1.6 异物点云聚类分割

上文所述的异物点云提取方法可以将深度相机扫描范围内的所有异物的点云集合提取出来, 如果检测区域中的异物数量较多, 则使用合适的点云聚类分割方法将每个异物的点云进行区分是很有必要的。同时将每个异物的点云分割完成后, 还需要对每个异物进行定位, 这样从点云数据中提取出的异物点云才有实际应用价值。本文采用区域生长分割法对异物点云进行聚类分割。

区域生长分割法^[16]是从图像算法发展而来, 其基本思想是: 通过比较图像中每个像素点的灰度值、RGB 颜色值、纹理变化等属性是否满足要求, 从而筛选出图像中的种子点, 然后从某一个种子点出发, 搜索其周围设定好的邻域范围内是否存在其他满足筛选要求的像素点, 若存在则将此邻域点与当前种子点归为一类, 并以邻域点作为新的种子点进行迭代搜索, 直到没有能够归入该类的像素点存在, 一个聚类就划分完成, 然后以其他种子点继续进行迭代搜索, 直到图像中不存在种子点为止。

将区域生长分割法应用到三维点云数据点的聚类分割时^[17], 其主要任务仍然是寻找点云数据集中符合筛选要求的点云作为种子点, 并寻找其邻域内是否存在其他种子点, 具体处理流程如图 8 所示。

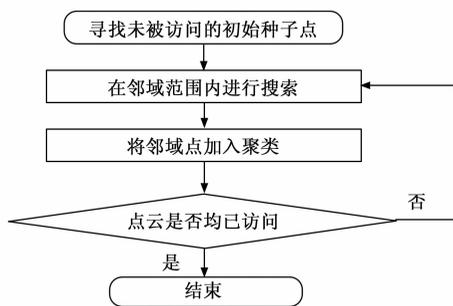


图 8 区域生长法处理流程

1) 选择种子点: 以上述异物点云提取方法中提取出的异物点云数据点作为种子点, 依次以每个未被访问的异物点云作为初始种子点进行计算。

2) 生长规则: 在当前种子点的邻域范围内进行搜索, 本文设定的邻域范围为半径为 5 mm 的球形区域, 判断是否存在其他被提取出的异物点, 若存在, 则加入同一聚类中, 并标记为已访问, 继续以当前邻域点为新的种子点进行迭代搜索, 如图 9 所示。

1) 终止生长规则: 若当前聚类中的每个异物点的邻域都搜索完毕, 不存在未被访问的其他异物点云, 则判断当前聚类已经分割完成, 继续以其他未被访问的异物点云作为初始种子点进行计算。

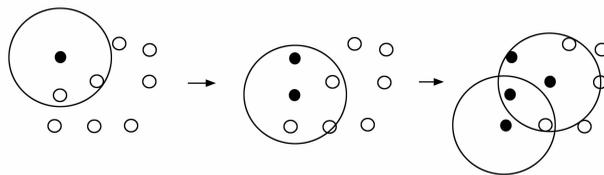


图 9 区域生长法原理

2) 算法结束: 当全部异物点云均已被访问时, 认为每个异物的点云均已分割完成, 发布分割完成后的点云数据。

异物点云聚类分割完成后, 需要计算出每个异物在世界坐标系中的坐标, 确定异物的位置需要两步, 首先得到异物在相机坐标系当中的坐标, 然后将相机坐标系下的坐标转换到世界坐标系当中。异物在相机坐标系中的坐标位置可以由分割出的异物点云的质心位置确定, 将每个异物点云聚类的全部点云数据点进行平均化计算得到异物点云质心坐标, 其计算公式如下:

$$P(x_c, y_c, z_c) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i(x_i, y_i, z_i) \quad (16)$$

通过相机的标定过程可以获得相机当前的外参, 即世界坐标系与相机坐标系这两个坐标系之间的转换矩阵, 使用转换矩阵可以将相机坐标系下的坐标转换到世界坐标系下, 其计算公式如下:

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = \mathbf{R} * \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} + \mathbf{P} \quad (17)$$

其中: \mathbf{R} 为旋转变换矩阵, \mathbf{P} 为平移变换矩阵。

2 实验与结果分析

为了验证前文所述的算法是否有效, 通过观察实际的航空发动机进气道, 在实验室搭建进气道模拟测试环境, 进气道模型的长宽高分别为 120×80×100 cm。在模型内壁上设置 3 个不同形状与尺寸的物体作为算法测试所使用的异物, 其中异物 1 的尺寸为 3×3×1 cm, 异物 2 的尺寸为 2×14×2 cm, 异物 3 的尺寸为 8×16×1.5 cm。

2.1 点云压缩实验

为了验证本文所述点云压缩方法的有效性, 使用深度相机对实验参照物体进行扫描, 并同时发布未经处理的原点云数据与经过压缩处理后的点云数据, 截取相同帧的点云数据进行对比。点云压缩效果如图 10 所示, 可以看到经过压缩后的点云数据其整体的形状特征得以保留。对图中的点云数据, 未压缩前的点云数量为 30 500, 点云密度为 99 094 个/m³, 压缩后点云数量为 6 742, 点云密度为 22 189 个/m³, 点云密度降低了约 77.6%, 压缩效果显著, 可极大地加快数据存储和后续的算法处理速度。

对于点云压缩后的精度损失, 使用豪斯多夫距离 (Hausdorff Distance) 进行度量^[18], 其计算公式如下:

$$H(A, B) = \max[h(A, B), h(B, A)] \quad (18)$$

其中: $h(A, B) = \max_i \min_j \| a_i - b_j \|$, $h(B, A) = \max_j \min_i \| b_j - a_i \|$ 。

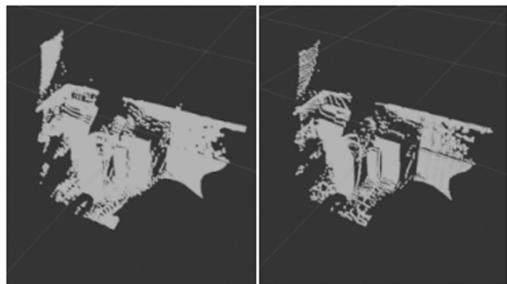


图 10 点云压缩效果

对上述原始点云数据集和压缩后的点云数据进行计算得到二者之间的豪斯多夫距离为 0.017 m，同时由于本文在对异物点云和进气道点云进行区分时主要依赖点云数据在 Z 轴方向上的曲率变化程度，因此重点关注点云数据压缩后在 Z 轴方向上的精度损失，原点云数据所占空间在相机坐标系 Z 轴方向上的距离为 0.508 m，压缩后的点云与原点云之间的距离误差为 3.3%，基本可满足大多数场景下的需求。

2.2 异物检测实验

为了验证本文所述异物检测方法的有效性，在异物点云提取环节，本文分别采用迭代阈值法和最大类间方差法(OTSU 法)^[19]计算动态阈值进行提取性能对比；在异物点云聚类分割环节，本文分别采用区域生长法和 DBSCAN 密度聚类方法聚类^[20]对异物点云进行分割性能对比，通过实验结果对比分析从而选择准确高效的异物识别方法。针对进气道模型内壁上布置的 3 个异物，如图 11 所示，使用深度相机采集 300 帧点云数据，采用上述的 4 种方法配置方案，对异物进行点云提取、聚类分割和位置计算，详细实验结果如表 1~3 所示。

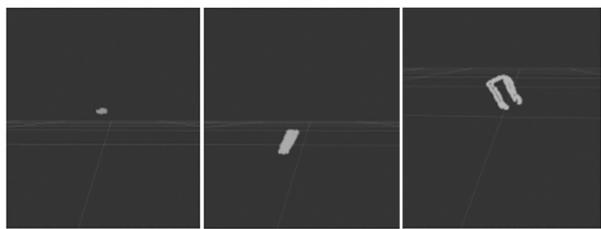


图 11 异物检测效果

表 1 异物 1 检测结果分析

使用方法	异物识别准确率 /%	异物检测距离平均误差 /cm	运行时间 /ms
迭代阈值法+区域生长法	98.7	0.63	44.9
迭代阈值法+DBSCAN 密度聚类法	94.3	0.89	57.7
OTSU 法+区域生长法	99.1	0.60	69.4
OTSU 法+DBSCAN 密度聚类法	94.1	0.94	82.2

表 2 异物 2 检测结果分析

使用方法	异物识别准确率 /%	异物检测距离平均误差 /cm	运行时间 /ms
迭代阈值法+区域生长法	95.7	1.82	53.4
迭代阈值法+DBSCAN 密度聚类法	92.6	2.06	64.8
OTSU 法+区域生长法	95.3	1.91	81.4
OTSU 法+DBSCAN 密度聚类法	92.1	2.13	94.3

表 3 异物 3 检测结果分析

使用方法	异物识别准确率 /%	异物检测距离平均误差 /cm	运行时间 /ms
迭代阈值法+区域生长法	91.9	1.94	70.5
迭代阈值法+DBSCAN 密度聚类法	88.7	2.23	84.6
OTSU 法+区域生长法	91.0	2.07	96.7
OTSU 法+DBSCAN 密度聚类法	89.3	2.19	107.1

由上述进气道模型的实验数据可知，迭代阈值法与 OTSU 法在异物识别准确率和距离误差上基本相同，但迭代阈值法的算法运行效率要优于 OTSU 法；相比于 DBSCAN 密度聚类法，区域生长法在异物识别准确率、距离误差和算法运行效率方面都具有更好的性能，因此选择迭代阈值法和区域生长法作为异物检测的核心方法。实验结果表明，本文所提方法的异物识别准确率达到 95.4%，异物定位精度达到 1.46 cm，相对于其他方法配置方案具有更好的性能。

3 结束语

本文提出一种基于三维激光点云曲率突变的进气道异物检测方法，包括异物点云数据空间特征分析、基于体素网络的点云数据压缩、基于曲率动态阈值的异物点云提取、基于区域生长法的异物点云分割。搭建了进气道模拟测试环境，对 3 种不同尺寸的异物进行了检测定位，实验结果验证了本文所提方法的准确性与高效性，为航空发动机进气道智能化巡检打下了较好的技术基础。

参考文献:

[1] 徐志刚, 陈荣, 李权, 等. 某型飞机进气道在噪声环境中的振动疲劳分析 [J]. 装备环境工程, 2011, 84: 100-103.
 [2] 张朝晖, 喻星星, 康健中, 等. 飞机进气道关键区域铆钉检测技术 [C] //中国航空学会航空维修工程专业分会. 航空装备维修技术及应用研讨会论文集. 海山实业发展总公司; 长沙航空职业技术学院, 2015: 361-365.
 [3] 李政. 飞机常见结构原位超声无损检测技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
 [4] 林玉兵. 三维激光雷达图像在铁路异物侵限检测中的应用研究 [D]. 北京: 北方工业大学, 2018.

(下转第 80 页)