

文章编号: 2095-2163(2021)11-0064-05

中图分类号: TP209

文献标志码: A

基于距离判断函数的钢轨扣件分割方法

宁业衍¹, 方宇¹, 杨皓¹, 杭观荣², 陶翰中¹, 张汝泉¹

(1 上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620; 2 上海空间推进研究所, 上海 201100)

摘要: 数字化检测技术的不断发展使得点云分割成为三维点云处理的热门研究方向。区域生长算法广泛应用于点云分割, 本文针对目前区域生长算法的局限性, 提出基于距离判断函数的点云分割算法。使用八叉树构建拓扑关系, 引入距离判断函数判断种子点的属性, 计算种子点到其切平面的法向距离, 将距离阈值作为依据划分平缓点和尖锐点; 根据种子点与邻域点法线夹角筛选邻域点, 合理设定曲率阈值, 确定区域生长准则。选取钢轨扣件为试验对象, 钢轨扣件是铁道线路关键连接件, 实现钢轨扣件的精确分割有利于优化特征提取。点云分割的试验表明, 基于距离判断函数的方法分割正确率增加 4.20%, 提高了钢轨扣件分割的稳定性和准确性。

关键词: 点云分割; 区域生长; 距离判断函数; 钢轨扣件

Precise point cloud segmentation method based on distance judgment function

NING Yeyan¹, FANG Yu¹, YANG Hao¹, HANG Guanrong², TAO Hanzhong¹, ZHANG Ruxiao¹

(1 School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2 Shanghai Institute of space propulsion, Shanghai 201100, China)

[Abstract] The continuous development of digital detection technology makes point cloud segmentation a popular research direction in 3D point cloud processing. The region growing algorithm is widely used in point cloud segmentation. Aiming at the limitations of the current region growing algorithm, a point cloud segmentation algorithm based on the distance judgment function is proposed. Use an octree to construct a topological relationship, introduce a distance judgment function to judge the attributes of the seed point, calculate the normal distance from the seed point to its tangent plane, and use the distance threshold as the basis to divide the flat point and the sharp point; according to the seed point and neighborhood point method The angle of the line screens the neighborhood points, sets the curvature threshold reasonably, and determines the region growth criterion. The rail fastener is selected as the test object. The rail fastener is the key connection part of the railway line. The accurate segmentation of the rail fastener is beneficial to optimize the feature extraction. The test of point cloud segmentation shows that the accuracy of segmentation based on the distance judgment function is increased by 4.20%, which improves the stability and accuracy of rail fastener segmentation.

[Key words] point cloud segmentation; region growth; distance judgment function; rail fasteners

0 引言

随着零件数字化检测技术的不断发展, 点云数据的易存储性和便捷性使其成为数字化检测技术的重要手段。钢轨扣件是铁道线路的关键连接件, 可有效阻止钢轨与轨枕的纵横向位置移动, 对于铁路车辆的安全行驶起到非常关键的作用。基于视觉处理的数字化检测是钢轨扣件的健康状态监测的前沿技术之一。陈华伟提出 Freeman 链码改进算法及特征对象提取算法, 结合二维 PCA 和最近距离分类法, 有效识别钢轨图像区域性缺陷^[1-2]; 欧阳运用嵌入标记信息的主体模型 WL_LDA 分布训练分类器, 降低漏检率与误检率^[3]; 张雨将不同方向的方位距离变换计算扣件各端部区域的骨架生长点, 准确识

别扣件形状^[4]; 张辉利用背景差分法对灰度进行预处理, 消除灰度分布不均的干扰, 提高钢轨缺陷分割对噪声的鲁棒性^[5]。

钢轨扣件的检测技术不断取得突破, 但针对钢轨扣件的特征提取仍存在可优化的地方^[6]。区域生长分割是实现特征提取的关键一环, 传统区域生长分割的粗糙化, 使得各个部件的点云数据无法精确提取, 影响钢轨扣件的质量判断。张强调整三角面片法向量方向, 对邻近法向量加权平均, 实现平面点云的分割^[7]; 王雅男使用点云数据主顶点与周围点一起构成连通点集, 改进点云表面的近邻点关系, 解决不规则形状物体点云分割^[8]; 李仁忠将曲率最小的点作为种子点, 减少分段的数量, 提高分割可靠性^[9]; 高天一选择点云数据内相同邻域的点与质心的距离作为判断

作者简介: 宁业衍(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 三维点云处理; 方宇(1974-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 智能装备与精密检测技术。

通讯作者: 方宇 Email: fangyu_hit@126.com

收稿日期: 2021-05-24

依据,减少错误关键点对分割结果的影响,结果相比于现有分割结果较为准确^[10];王希提出基于移动最小二乘法的切割方法,利用不同人体点云数据验证算法的可靠性^[11];王冲采用分配权重的方法动态调整平滑区域的大小处理点云数据噪声,对不同指向的法线进行分类^[12];Mohammed 提出基于区域增长和进化算法的分割方法,在进行细分前由最大熵的原理确定分类的数量^[13];Anh-Vu 创建自适应八叉树区域,输入点云的体素化表示以提取主要片段,并纳入基于语义的特征标准^[14];Nurunnabi 将主成分分析法(PCA)引入法线和曲率等多种特征,减小 PCA 对异常值的敏感性,增加区域生长分割鲁棒性^[15];Hong 根据表面法向量和主成分分析估计曲率差异,用多级样条曲线拟合方法填充物体表面实现分割^[16];Dong 使用正电子发射断层扫描(PET)信息自动定位种子点,将改进的超体素 3D 区域生长应用于分割^[17];Han 选择贪婪策略在网格单元中仔细选择种子点提高查找效率,检查并合并相邻平面克服过渡分割^[18]。

为了提高分割的准确性,本文通过设定距离判断函数判断种子点的属性,将数据点划分为平缓点和尖锐点,比较所选种子点与领域点的法向夹角,确定增长准则,利用合理的曲率阈值优化分割结果,使得分割结果更加稳定。

1 点云拓扑关系构建

点云庞大的数据量会影响计算机处理时间,需要对采样点构建局部邻域信息,加快检索速度。步骤如下:

(1)输入点云数据,使用如图 1 所示的八叉树(Octree)构建拓扑关系,根据点云数据的三维位置坐标信息极值构造最小包围盒(Bounding box),视为八叉树模型的根节点(Root node),依次递归细分 8 的幂次方得到子节点(Seed node),完成点云数据划分;

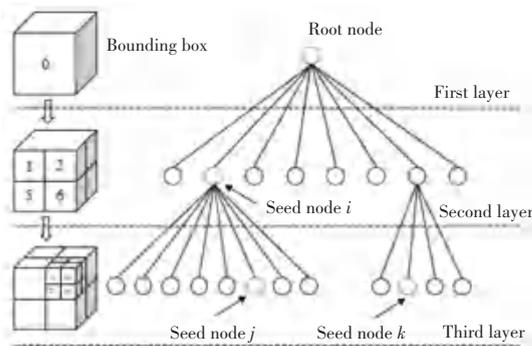


图 1 八叉树拓扑结构

Fig. 1 The topology of Octree

(2)选取采样点,建立 K 邻域信息,在八叉树包围盒划分最深处的叶子节点分配位掩码,根据邻域信息的统计分析和位操作选择数据点。

2 基于距离判断函数的点云分割方法

2.1 法向量调整

法向量具有无序性和不确定性,无法保证点云数据的全局方向一致性,对后续数据处理造成困难,需要对计算所得的法向量做方向一致性调整,保证点云数据中各个点的法向信息都能够指向同一个方向。使用最小生成树法对法向进行调整,假设所测得的点云数据法向量分别为 n_i 和 n_j ,当 $n_i \cdot n_j < 0$ 时,对方向矢量取反;当 $n_i \cdot n_j > 0$ 时,保持方向矢量的一致性,不发生改变。重复遍历所有点直至完成法向量方向调整,图 2 为雕像模型与桌子模型法向量方向调整前后效果对比。

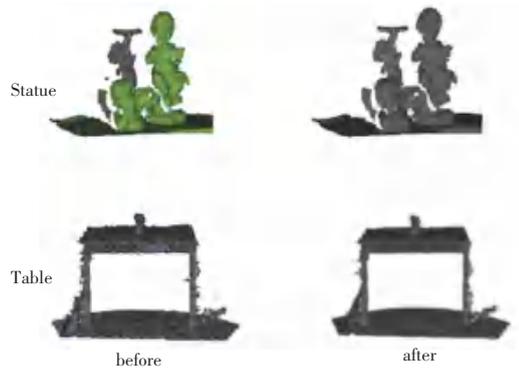


图 2 法向量调整对比

Fig. 2 The comparison of normal vector adjustment

2.2 距离判断函数与区域生长准则设定

阈值设定是区域增长中的关键参数,需要设定合理的阈值。在法线和曲率的基础上,引入距离判断函数,判断数据点所包含的特征信息,有效对数据点进行平缓点和尖锐点的判断,使得点云的分类更为准确。

(1)距离判断函数的设定:引入距离判断函数,如图 3 所示,计算从所选点到其切平面的法向距离,反映采样点局部区域的特征,将点云数据分为平缓点和尖锐点,使得点云数据的划分更具代表性,提高点云调整的效率。

设定数据点 p 为待重建曲面 M 的采样点集里任意一点, T_p 为 p 的 K 邻域拟合待重建曲面在此点的切平面,数据点 p 到其切平面 T_p 的距离判断函数(1)为:

$$d(p, T_p) = |(p - p_i) \times n_i| \quad (1)$$

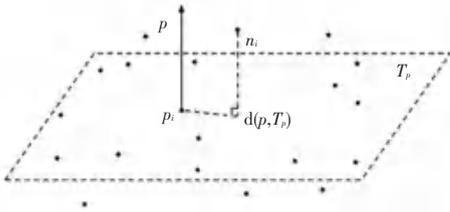


图3 法向量调整对比

Fig. 3 The comparison of normal vector adjustment

其中, p_i 为 K 邻域内所选近邻点中的最近点, n_i 为其切平面 T_p 的法向。设定距离阈值 d_m 为 0.1。若 $d \leq d_m$, 表示数据点所包含特征信息较少, 为平缓点; 若 $d > d_m$, 表示数据点所包含特征信息较多, 可作尖锐点处理。

(2) 聚类阈值的设定: 根据点云所包含的数据点数, 合理地设置点云聚类阈值, 筛选其中分割后的点数小于最小阈值的点。

(3) 法线夹角的设定: 根据法线向量, 获得近邻点法线与当前种子点法线之间的夹角, 并设定两点之间的法线偏差范围。当角度在指定的标准范围内时, 将添加该点作为种子点, 其中 \vec{n}_p 是当前种子点的法线向量, \vec{n}_i 代表所选近邻点中任意点的法线向量。法线角度的计算公式(2)为:

$$\alpha = \arccos \frac{\vec{n}_p \cdot \vec{n}_i}{|\vec{n}_p| |\vec{n}_i|} \quad (2)$$

综上, 得到用于三维点云分割的区域生长准则的算法流程图, 如图 4 所示。

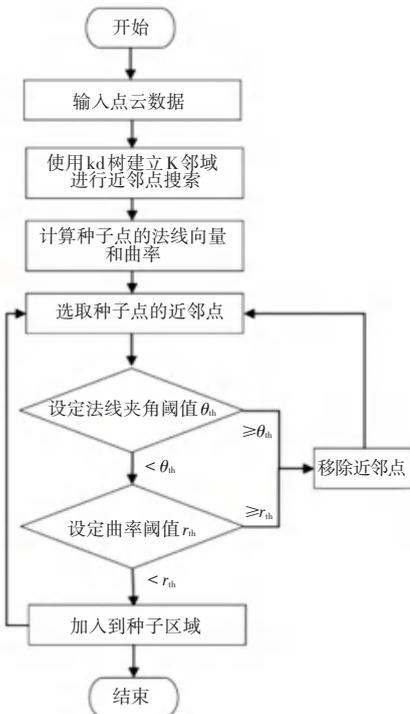


图4 区域生长准则流程

Fig. 4 The process of regional growth guidelines

(1) 设置一组空的种子点序列和聚类数组, 选好初始种子点并将其加入到种子点序列中, 搜索邻域点;

(2) 根据距离判断函数判断种子点的属性, 计算所选种子点到其切平面的法向距离, 通过距离阈值将点云数据分为平缓点和尖锐点;

(3) 比较邻域点的法线与种子点的法线夹角, 小于平滑阈值的邻域点加入到当前区域;

(4) 筛选邻域点的曲率值, 小于曲率阈值的邻域点加入到种子点的序列中, 进行种子点邻域判断, 删除当前种子点, 利用新加入的种子点继续生长, 重复以上生长过程, 直到清空种子点序列;

(5) 最后, 利用曲率值从小到大排序, 顺序选择输入点集的点作为种子点加入到种子点序列中, 实现点云的分割。

3 试验及结果分析

3.1 试验平台及对象选取

试验对象选取铁道线路上广泛应用的钢轨扣件, 结构包括钢轨、螺旋道钉、轨距挡板、挡板座、橡胶垫板、轨枕等, 如图 5 所示。其主要作用是用于紧固钢轨和枕轨, 可有效阻止钢轨与轨枕的纵横向位置移动, 保障铁路车辆的安全行驶。

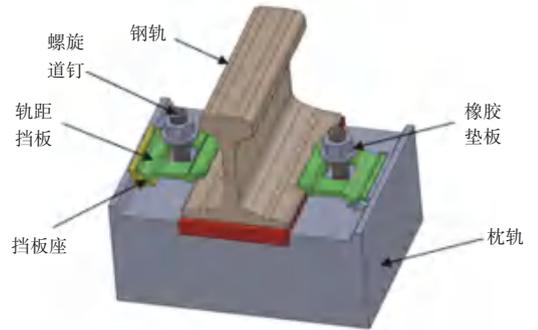


图5 钢轨扣件结构

Fig. 5 The structure of rail fastener

点云分割是根据空间、几何的特征对点云进行划分, 钢轨扣件组成结构完整且特征明显, 兼具大多数零件的形状特点, 选取钢轨扣件作为试验对象具有代表性, 易体现点云分割的效果及普适性。选取具有代表性的 WJ-8 型扣件、60 型铁轨扣件、WJ-7 型铁轨扣件, 结构如图 6 所示。

三维点云处理的数字化检测是钢轨扣件的健康状态监测的前沿技术之一, 但传统区域生长分割的粗糙化使得各个部件的点云数据无法精确提取, 影响钢轨扣件的质量判断。利用基于距离判断函数的

分割算法对钢轨扣件进行试验, 实现其关键部件的聚类分割, 进而检验本算法对点云数据进行精确获取的可能性, 通过点云簇数量统计为钢轨扣件状态监测提供科学依据, 有效保障铁路交通的运营安全。



图 6 三种钢轨扣件

Fig. 6 Three kinds of rail fasteners

3.2 区域生长分割试验及分析

区域生长分割算法的评价指标用统计点云簇聚类数量以及正确率、过分割率、及欠分割率来衡量, 为了定量分析改进的区域生长算法的有效性, 对钢轨扣件每个部件及其平面进行人工分割统计, 作为分割正确率的有效判断, 试验结果如图 7 所示, Test1 为传统区域生长分割算法效果, Test2 为改进区域生长分割算法效果。

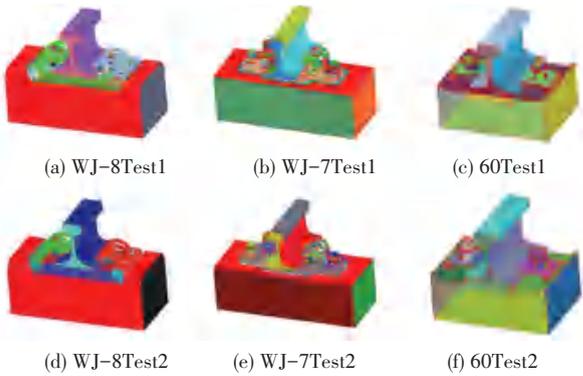


图 7 分割试验结果

Fig. 7 The effect of split test

表 1 为试验场景下点云分割性能对比, 以 60 型钢轨扣件为例, 多次试验分析得到最终的邻域数量设置为 150, 平滑阈值设置为 $\pi/60$, 曲率阈值设置为 0.1 时, 所生成的点云簇数量为 88, 接近人工分割统计结果, 保持了特征完整性。

表 1 分割性能对比

Tab. 1 Segmentation performance comparison

Test	邻域	平滑阈值	曲率阈值	点云簇
WJ-8Test1	100	$\pi/60$	0.1	148
WJ-8Test2	150	$\pi/60$	0.1	156
WJ-7Test1	150	$\pi/60$	0.1	137
WJ-7Test2	150	$\pi/60$	0.1	148
60Test1	150	$\pi/60$	0.1	84
60Test2	150	$\pi/60$	0.1	88

选取钢轨扣件上属于异型断面钢材且截面形状

复杂的轨距挡板, 对点云分割提出了较高要求, 发现传统区域生长分割算法分割轨距挡板时表面易堆叠, 点云簇数据分散, 对于起伏较大的截面在中间产生漏分割, 无法实现整体特征识别, 改进后的算法截面分割均匀性较好, 点云簇的数量集中, 对于起伏较大的表面也实现了流畅分割, 如图 8 所示。



图 8 轨距挡板分割

Fig. 8 The segmentation result of gauge baffle

以 60 型钢轨扣件为分析对象, 改进算法的分割正确率比原始算法高 4.20%, 提取质量更优, 欠分割率比原始算法降低 2.70%, 展现出更好的边界保留能力, 如图 9 所示。

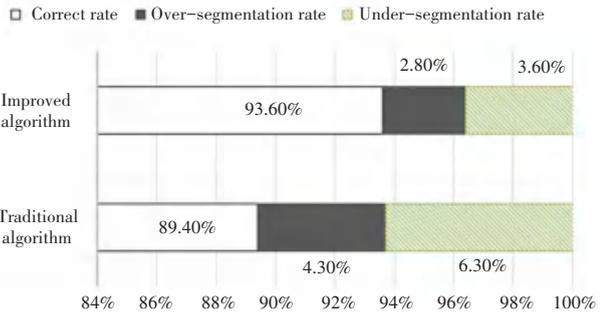


图 9 判断指标对比

Fig. 9 Judgment indicators comparison

与传统区域生长算法相比, 经过改进的算法边界划分明显, 不影响试验对象整体形状, 保留更多模型本身特征, 表明改进的区域生长算法效果显著, 在提高分割速度和准确率同时, 点云分割效果良好。

4 结束语

本文提出基于距离判断函数的精密点云分割方法, 将最小曲率点设置为种子节点, 减少点云簇总数, 改善分类结果质量, 结合法线角度划分点云区域增长准则的增长。60 型钢轨扣件试验结果表明, 相比于传统算法, 所改进的算法具有更好的稳定性和实时性, 且分割效果理想, 分割正确率比原始算法增加 4.20%, 欠分割率比原始算法降低 2.70%, 实现对钢轨扣件各个部件的准确分割, 实现分割精细化, 为下一步对钢轨扣件的质量判断提供分析依据。但文中的阈值参数有些尚需人工调参, 在如何达到良好分割效果的基础上实现自适应调参是下一步研究的方向。

(下转第 75 页)