

文章编号:1007-9432(2017)04-0617-06

# 基于栅格法的智能挖掘机地面建模研究

赵宏强<sup>1,2</sup>, 边国敏<sup>1</sup>, 罗 刚<sup>1</sup>, 黄翠翠<sup>1</sup>

(1. 中南大学 高性能复杂制造国家重点实验室, 长沙 410083;

2. 湖南山河智能机械股份有限公司 国家级企业技术中心, 长沙 410100)

**摘 要:**为了实现挖掘机智能化作业,以山河智能 SWE230 挖掘机为研究平台,提出了一种基于激光传感器的地面地形建模方法,采用栅格法的极坐标和直角坐标的变换关系对地面环境进行建模。在构建地形的基础上搜索挖掘对象的边界点,并采用 RANSAC 随机采样一致性算法估计挖掘深度和斜面倾斜度。在已知挖掘范围的基础上,采用聚类分割算法来确定挖掘策略。试验表明以上方法能够有效的测量挖掘对象并确定挖掘策略。

**关键词:**智能挖掘机;随机采样一致性;激光扫描;地形建模;聚类分割

**中图分类号:**TP391;TD42 **文献标识码:**A **DOI:**10.16355/j.cnki.issn1007-9432tyut.2017.04.019

## Terrestrial Modeling of Intelligent Excavator Based on Grid Method

ZHAO Hongqiang<sup>1,2</sup>, BIAN Guomin<sup>1</sup>, LUO Gang<sup>1</sup>, HUANG Cuicui<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing,  
Central South University, Changsha 410083, China;

2. Sunward Intelligence Equipment Co., Ltd., National Enterprise R&D Center, Changsha 410100, China)

**Abstract:** In order to achieve excavator intelligence operations, we proposed a terrestrial modeling method based on laser sensor on the excavator Sunward SWE230. The transformation of polar coordinates and Cartesian coordinate in grid method was used to build the terrestrial model. The model searches mining object boundary and use the RANSAC (random sample consensus) algorithm to estimate the depth of excavation and the inclination of slope, and use cluster segmentation algorithm to determine the mining strategy on the basis of the known range of the excavation. Experiments show that this method can effectively measure mining objects and determine mining strategy.

**Key words:** intelligent excavator; random sample consensus; laser scanning; terrain modeling; cluster segmentation

随着计算机技术的发展,机械智能化成为一种趋势,作为工程机械的代表,挖掘机正在逐步实现智能化作业<sup>[1-2]</sup>。环境特征提取在移动机器人上的应用已经非常广泛,而二维激光传感器较视觉传感器具有更高的实时性,主要应用于对其进行定位与导航<sup>[3]</sup>。但是,在国内,这项技术在工程机械上的应用较少。

目前国内智能挖掘机的研究主要在挖掘机轨迹控制和在特定环境下的轨迹规划方面,其控制精度在小型挖掘机上已经达到 100 mm<sup>[4-5]</sup>,但是在视觉方面很少有研究,无法对挖掘工作对象进行自主测量、挖掘点定位及导航。

在移动机器人的轨迹规划中,经常采用栅格法

收稿日期:2016-06-17

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划项目(2013BAF07B02)

通讯作者:赵宏强(1969—),男,副教授,主要从事液压传动与控制,工程机械机电液一体化的研究,(E-mail)zhaohq@sina.com

引文格式:赵宏强,边国敏,罗刚,等.基于栅格法的智能挖掘机地面建模研究[J].太原理工大学学报,2017,48(4):617-622.

对环境建模,通过所建模型来寻找最佳路径<sup>[6-7]</sup>。智能化挖掘机在轨迹规划过程中,找出最优路径非常重要,因此必须对挖掘环境进行合适的建模。通过建模来确定作业目标与挖掘机之间的距离和方位,并由此计算铲斗与作业目标之间的相对位置关系,以此作为铲斗运动控制的重要参数<sup>[8-10]</sup>。

## 1 激光扫描工作原理

三维激光扫描技术进行挖掘工作对象测绘时,扫描设备的二极管会发射出激光信号,并通过棱镜直接射向测绘目标,并接收返还的激光信号。通过信号发射和返还的时间差,测量出发射点与被测物体的具体距离,然后不断的变换位置和角度,得到被测对象的空间立体坐标(如图 1 所示),以便对工作对象各项数据进行全面分析。利用三维激光扫描技术对工作对象进行测绘不需要光源,可以在黑暗中作业,使工作对象的测绘更加方便。

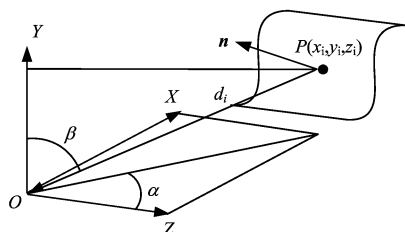


图 1 激光传感器工作原理  
Fig. 1 Principle of laser sensor

对现实物体表面进行三维信息的采集是三维重建的首要步骤,也是实现实物模型向数字化模型转换的基础。随着获取技术的日渐成熟,三维点云数据作为一种新兴的数据形式,已经渗透到人们生产和生活中。在数字化现实过程中,点云数据可以精确地反应物体表面的几何性质和物体的三维空间信息,拥有二维图像所无法比拟的优势。通过扫描设备获取的点云是仅包含三维坐标的、无明显拓扑关系的、紊乱的数据,所以,要通过搜索每个点的局部领域,重建点云拓扑关系,然后据空间拓扑关系估算点云的法向、曲率等几何特征,为后续点云处理做好准备。

## 2 系统方案设计

在正常工况下,挖掘机通常工作顺序为挖土、回转和卸土,因此,本文利用回转操作对挖掘对象进行实时扫描以获得工作对象的点云数据。以山河自主研发的 SWE230 中型挖掘机为实验平台,如图 2 所示,在挖掘机驾驶室外部顶端安装激光传感器以便实现双向的工作对象扫描,同时在挖掘机上还

装有角度编码器和拉线传感器用于反馈挖掘机姿态参数,驾驶室内安装有控制柜用来进行点云处理。本文采用德国 SICK 公司的 LMS111 室外型激光传感器作为点云获取装置,扫描角度间隔为  $0.5^\circ$ ,扫描半径为 10 m,扫描频率为 50 Hz。

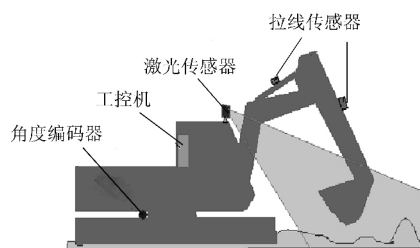


图 2 智能挖掘机视觉系统方案  
Fig. 2 Intelligent excavator vision system program

激光传感器返回扫描面上物体的距离数据和对应的扫描角度,回转编码器返回扫描时对应的回转角度。建立坐标系如图 3 所示,过挖掘机回转中心交地面于原点  $O$ ,挖掘机正前方为  $Z$  轴正方向,驾驶室左侧方向为  $X$  轴正方向,上方为  $Y$  轴正方向,建立  $XYZ$  三维坐标系。激光传感器的扫描范围为  $Y$  轴负半轴顺时针旋转  $180^\circ$  到  $Y$  轴正半轴。

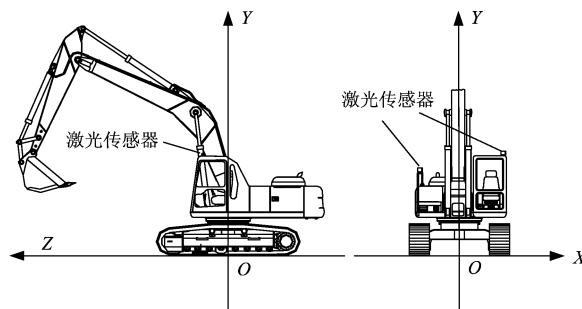


图 3 视觉系统坐标系示意图  
Fig. 3 Coordinate system's schematic diagram of the visual system

假设激光传感器安装时激光发射点在该坐标系中的坐标为  $(x_0, y_0, z_0)$ ,则激光发射点与坐标系原点的连线在  $X-Z$  平面的投影与  $Z$  轴正向的夹角为  $\alpha = \arctan(x_0/z_0)$ 。假设激光传感器在某时刻扫描到某点,点到激光传感器的距离为  $r$ ,扫描角度为  $\theta$ ,挖掘机的回转角度为  $\varphi$ ,则该点在  $XYZ$  坐标系中对应的坐标如式(1)所示。

$$\begin{cases} x = r \sin(\theta) \sin(\varphi) + (\sqrt{x_0^2 + z_0^2}) \sin(\varphi + \alpha); \\ z = r \sin(\theta) \cos(\varphi) + (\sqrt{x_0^2 + z_0^2}) \cos(\varphi + \alpha); \\ y = r \cos(\theta) + y_0. \end{cases} \quad (1)$$

## 3 点云预处理和工作对象特征提取

### 3.1 滤波降噪

挖掘机部分工作对象点云如图 4 所示,在获取点

云数据时,由于设备精度、操作者经验、环境等因素,以及电磁波衍射特性、被测物体表面性质变化等带来的影响,点云中不可避免地出现一些噪声点。而且由于视线遮挡,障碍物等因素,点云中会出现一些离群点。因此需要滤波降噪对点云预处理<sup>[11-15]</sup>。

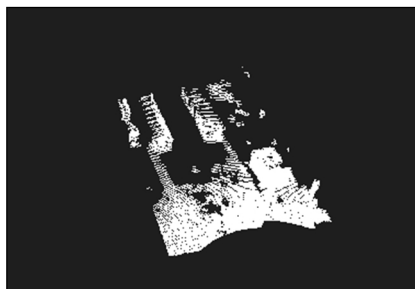


图4 挖掘机工作对象点云

Fig. 4 Excavator's working object point cloud

### 3.1.1 点云下采样

通过输入的点云数据创建一个三维体素栅格,然后在每个体素内用体素中所有点的重心来近似代替体素中其他点,这样该体素内所有点就用一个重心点最终表示,从而减少了点的数量,并同时保持点云的形状特征,通过实验,选取合适的栅格为4 cm×4 cm×4 cm,图5(a)为滤波前,图5(b)为滤波后。

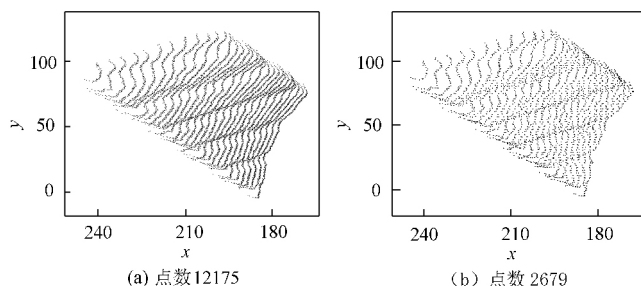


图5 点云下采样结果

Fig. 5 Result of point cloud down sampling

### 3.1.2 移除离群点

根据点云库 PCL 中 StatisticalOutlierRemoval 滤波器,本文设置在进行统计时考虑查询点邻近点数,即  $k$  值为 20,对每个点的  $k$  领域进行统计分析,计算每个点到它的所有临近点的平均距离如式(2)所示。设置判断是否为离群点的阈值为 0.5 m,当点到所有临近点的平均距离大于 0.5 m 时,定义为离群点,并从数据集中去除掉。

$$\bar{d}_0 = \frac{\sum_{i=0}^k \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}}{k} \quad (2)$$

## 3.2 地面模型建立

### 3.2.1 挖掘参数

地形扫描范围,由于 SWE230 挖掘机动臂,斗

杆和铲斗伸直后挖掘最远距离为 10 m, SWE230 工作范围的主要技术参数如表 1 所示。

表1 SWE230 挖掘机作业范围参数

Table 1 SWE230 excavator's operating range parameters

最大挖掘高度	9.6 m
最大卸料高度	6.7 m
最大挖掘深度	6.7 m
8 英尺水平面挖掘深度	6.5 m
最大垂直挖掘深度	5.9 m
最大挖掘半径	10 m
最大停机面挖掘距离	9.8 m
最小回转半径	3.7 m

根据上述参数设定激光传感器在水平地面测量的最远距离为 10 m,如图 6 所示,人眼的视觉范围约为 120°,因此设定挖掘机回转角度为 120°。

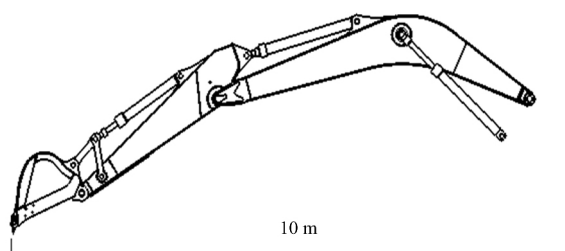


图6 挖掘机动臂最大挖掘半径

Fig. 6 Maximum of distance of excavation

### 3.2.2 栅格法

常用的环境建模方法有:可视图法,栅格法和自由空间法,本文采用在直角坐标系下的栅格法。栅格法在坐标位置搜索、计算多边形形状面积等方面比较有效,易于信息共享。采用尺寸相同的栅格对挖掘机二维工作空间进行划分,栅格大小以挖掘机铲斗一次挖掘最大土方量的二分之一来定,由于挖掘机最大挖掘半径为 10 m,挖掘机履带前段到挖掘机中心距离为 2.5 m,因此设定栅格显示界面宽度范围为-3~3 m,高度范围为 2.5~12.5 m。结合实际工况以及挖掘机挖掘最大高度和深度,设定挖掘高度为 3 m,挖掘深度为 3 m。栅格高度信息表示如图 7 所示:

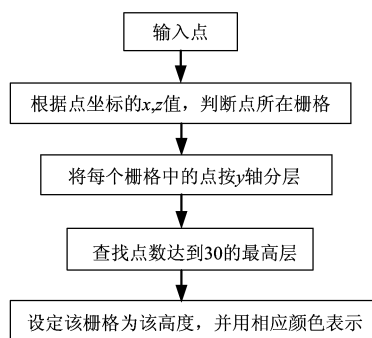


图7 栅格高度表示流程

Fig. 7 Flow chart of the set of grid height

点云栅格效果图,如图 8 所示,右图为原始点云投影,左图为栅格化效果。

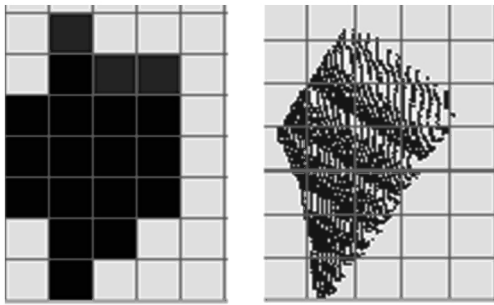


图 8 点云栅格效果

Fig. 8 Result of the point cloud represented by grid

### 3.3 挖掘对象特征提取与测量

#### 3.3.1 边界提取

边界提取为测量挖掘宽度提供依据,并可以检测与要求宽度误差大小。

1) 通过直通滤波器,对  $y$  维度实行简单的滤波。选取平行于  $xz$  平面的一个面,与  $y$  轴的截距设定为预定挖掘深度的二分之一。去掉平面以下的点,保留上方的点。

2) 将过滤后保留的内点投影在  $y=0$  的平面上,并以  $x=0$  为界将点云分为左右两部分。

3) 将  $z$  轴从 250~1 250 cm 平分为 1 000 等分,每一份为 10 cm,判断点云中每个点的  $z$  坐标的范围,在  $x>0$  部分,筛选出每等分内  $z$  值最小的点,为左边界点。在  $y<0$  部分,筛选出每等分内  $z$  值最大的点为右边界点,如图 9 所示。

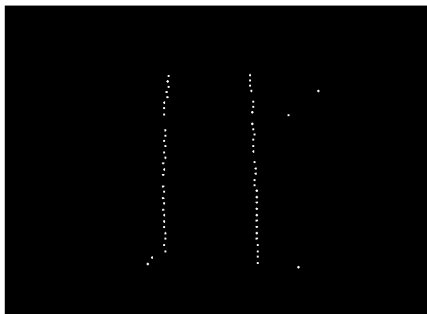


图 9 沟渠点云的边界提取

Fig. 9 Boundary extraction of ditch point cloud

4) 选取最小二乘法对边界点拟合,可以有效抑制奇异点带来的干扰,如图 10 所示。

#### 3.3.2 挖掘深度与坡度检测

在挖掘过程中,对挖掘深度和挖掘底面坡度检测非常重要,用来评估挖掘效果。这里采用随机采样一致性方法(RANSAC)估计平面模型参数来评估挖掘深度和坡度。

RANSAC 的原理是从样本中随机抽选出一个



图 10 沟渠边界显示

Fig. 10 Boundary display of ditch

样本子集,使用最小方差估计算法,对这个子集计算模型参数,然后计算所有样本点与该模型的偏差,再使用一个预先设定好的阈值与偏差比较,当偏差小于阈值时,该样本点属于模型内样本点,否则为模型外样本点,记录下当前的内点的个数,然后重复这一过程。每一次重复都记录当前最佳的模型参数,即是内点的个数最多。每次迭代的末尾都会计算一个迭代结束评判因子,据此决定是否迭代结束。迭代结束后,最佳模型参数就是最终的模型参数估计值。

建立平面模型如式(3)所示,其中  $a, c, d$  分别为平面方程的 3 个未知系数,平面法向量如式(4)所示。

$$ax + y + cz + d = 0. \quad (3)$$

$$\mathbf{N}_p = (a, 1, c). \quad (4)$$

一般地面倾角不会太大,以  $OY$  方向上的单位向量作为参考法向量,  $OY = (0, 1, 0)$ . 平面模型法向量  $\mathbf{N}_p$  与  $OY$  的夹角  $\beta$  如式(5)所示。

$$\beta = \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{a^2 + c^2 + 1}}\right). \quad (5)$$

平面模型任意一点  $(x_i, y_i, z_i)$  到水平面距离  $d_i$  如式(6)所示。

$$d_i = |ax_i + cz_i + d|. \quad (6)$$

根据实际情况设置角度最大阈值为  $15^\circ$ , 平面模型与  $OY$  轴垂直。求得平面模型参数,通过式(5)和式(6)就可求得地面倾角和粗略挖掘深度。

### 3.4 挖掘策略

在挖掘机平地工程中,或已经确定挖掘范围前提下,我们需要制定合适挖掘策略。通过观察手动实际挖掘过程,我们发现操作人员习惯把挖掘区域按聚集程度划分模块。因此我们采用聚类的方式对点云分割。

常用的点云分割算法有随机采样一致性算法、区域生长分割法等,随机采样一致性分割只能从特定的点云数据集中分割出一个模型,不适用于具有多个点云聚类的场景点云分割问题。区域生长分割

能够很好地分割出点云聚类,但算法的时间复杂度很大,不适用于实时场景。本文采用欧式聚类,它的聚类方式不分模型,而且聚类速度快<sup>[16-20]</sup>。

欧式聚类就是将距离在一定阈值内的点归为一类。其基本原理为:考察  $m$  个数据点,按照点与点之间的某种亲疏性质来划分聚类。欧式聚类分割定义的亲疏性质为欧式距离:

$$d(p_i, q_i) = \sqrt{\sum_{k=1}^n (p_{ik} - q_{ik})^2} \quad (7)$$

式中:  $p_i, q_i \in P$ ,  $P$  为点云集,如图 11 所示。

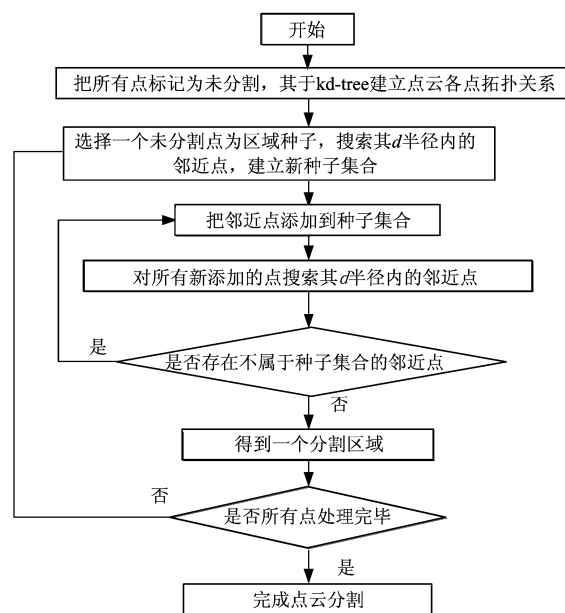


图 11 分割算法流程图

Fig. 11 Flow chart of segmentation algorithm

阈值  $d$  的选取非常重要,如果取一个非常小的值,那么一个实际的对象就会被分割为多个聚类;如果将值设置太高,那么多个对象就会被分割为一个聚类。通过实验,发现阈值取 20 cm 可以达到良好的聚类。同时栅格化中,要求每个格中点数最少为 30,才可认为是一个挖掘点,因此设置聚类需要的最

少点数为 30。

聚类后在模型中的显示,如图 12 所示,在实际的挖掘过程中,把每个需要挖掘的栅格的左上角坐标反馈回控制系统,挖掘顺序为从左向右,从下向上,按照聚类顺序施工。每个聚类也按照从左向右,从下向上,从高到低的顺序挖掘。

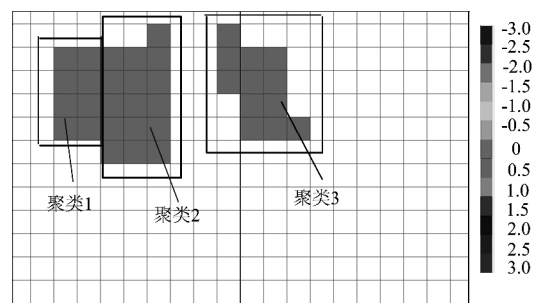


图 12 挖掘范围聚类结果

Fig. 12 Result of excavation range clustering

## 4 结束语

1) 根据栅格法原理并结合本项目的特点,由挖掘机一次挖掘最大土方量来确定栅格的大小,并通过每个栅格内点所在范围,定义栅格的高度,完成了环境建模工作。栅格法方便了坐标位置搜索,可以在考虑全局优化的基础上兼顾到较小的计算量。

2) 通过对点云下采样来精简点云,同时利用 Statistical Outlier Removal 滤波器来移除离群点;在进行凹槽挖掘中,通过直通滤波器分割点云,提取凹槽边界,并在二维界面中显示;采用随机采样一致性算法,提取凹槽地面平面信息,计算凹槽深度及地面的倾斜度;在平地或挖掘土堆过程中,进行聚类分割,对挖掘点聚类,每个聚类为一个挖掘区域。

3) 地面建模可以显示地面基本信息,提取挖掘对象特征信息,也为智能挖掘机轨迹规划提供了基础。

## 参考文献:

- [1] 王福斌,王福平,董永,等. 挖掘机器人视觉目标定位[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(4): 1362-1363.  
WANG Fubin, WANG Fuping, DONG Yong, et al. Target location for excavator robot based on vision[J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23(4): 1362-1363.
- [2] 杨丽. 智能化挖掘机自主作业过程目标识别及定位技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004.  
YANG Li. Research on object identification and orientation for autonomous truck loading of robotic excavator[D]. Changchun: Jilin University, 2004.
- [3] 霍光磊,赵立军,李瑞峰,等. 基于激光传感器的室内环境点线特征识别方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(S1): 171-174.  
HUO Guanglei, ZHAO Lijun, LI Ruifeng, et al. A novel method for point and segment identification of indoor environment based on laser radar[J]. J Huazhong Univ of Sci & Tech, 2013, 41(S1): 171-174.
- [4] 张大庆. 液压挖掘机工作装置运动控制系统的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.

- ZHANG Daqing. Research on motion control of manipulator of hydraulic excavator[D]. Changsha: Central South University, 2006.
- [5] 赵鑫. 智能挖掘机轨迹控制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- ZHAO Xin. Trajectory control of new intelligent excavator[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [6] 黄耀. 基于栅格法的汽车路径规划[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- HUANG Yao. Path planning based on grid for automobile[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [7] YAMAMOTO H, MOTOKI M, SHAO H, et al. Development of the autonomous hydraulic excavator prototype using 3D information for motion planning and control[C] // System Integration (SII), 2010 IEEE/SICE International Symposium on. IEEE, 2010: 49-54.
- [8] 戴静兰. 海量点云预处理算法研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2006.
- DAI Jinglan. A research on preprocessing algorithms of mass point cloud[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2006.
- [9] BENTLEY J L. K-d trees for semidynamic point sets[C] // Proceedings of the sixth annual symposium on Computational geometry. ACM, 1990: 187-197.
- [10] 肖强. 地面无人车辆越野环境多要素合成可通行区域检测[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- XIAO Qiang. Multi-elements composed drivable area extraction for unmanned ground vehicles in field terrain[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [11] 马鼎, 李斌兵. 黄土沟壑区切沟植被的激光点云滤波及地形构建[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 162-171.
- MA Ding, LI Binbing. Vegetation filtering in gully region of loess plateau based on laser scanning point cloud's intensity attenuation model and its terrain construct[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(15): 162-171.
- [12] CONNOR M, KUMAR P. Fast construction of  $k$ -nearest neighbor graphs for point clouds[J]. Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on, 2010, 16(4): 599-608.
- [13] 闫帅, 邱崧, 刘锦高. 基于 PCL 的点云数据压缩研究[J]. 信息通讯, 2015(4): 5-7.
- YAN Shuai, QIU Song, LIU JinGao. Point cloud data compression based on PCL[J]. Information & Communications, 2015(4): 5-7.
- [14] 王增涛. 三维点云数据处理平台设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- WANG Zengtao. The design of a processing platform for 3D Point Clouds[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [15] MUNARO M, RUSU R, MENEGATTU E. 3D robot perception with point cloud library[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2016, 78: 97-99.
- [16] 杨斌杰, 鲁铁定. 点云数据特征点提取方法的比较[J]. 江西科学, 2015, 33(1): 10-14.
- YANG Binjie, LU Tieding. The comparison of point cloud data feature point extraction method[J]. Jiangxi Science, 2015, 33(1): 10-14.
- [17] 吴燕雄, 李峰, 等. 平滑度欧式聚类算法分割点云数据[J]. 测控技术, 2016, 35(3): 36-38.
- WU Yanxiong, LI Feng, et al. Point cloud segmentation using euclidean cluster extraction algorithm with the smoothness[J]. Measurement & Control Technology, 2016, 35(3): 36-38.
- [18] 喻亮, 李婷, 等. 基于多维欧氏空间相识度的激光点云分割方法[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(3): 31-36.
- YU Liang, LI Ting, ZHAN Qingming, et al. Segmentation of LiDAR point clouds based on similarity measures in multi-dimensional euclidean space[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2014, 26(3): 31-36.
- [19] WOO H, KANG E, WANG S, et al. A new segmentation method for point cloud data[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(2): 167-178.
- [20] 韩晓红, 胡彧.  $K$ -means 聚类算法的研究[J]. 太原理工大学学报, 2009, 40(3): 236-239.
- HAN Xiaohong, HU Yu. Research of  $K$ -means algorithm[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2009, 40(3): 236-239.

(编辑: 朱 倩)