

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.005

基于信息融合的农业自主车辆障碍物检测方法

薛金林 董淑娴 范博文

(南京农业大学工学院, 南京 210031)

摘要: 针对单一传感器在智能车辆环境感知中的局限性,提出一种基于摄像机与激光雷达信息融合的农业自主车辆前方障碍物检测方法。对单目摄像机获取的图像进行基于 Ft(Frequency-tuned)算法的显著性检测,并生成显著图。同时对激光雷达反射点进行基于数据关联性评估的聚类分析,确定障碍物数量、边界与位置等先验信息。然后以激光雷达坐标相对应的图像像素坐标为种子点,由种子点激活经过处理的显著图,基于受限区域生长实现障碍物区域分割。试验结果表明,基于 Ft 算法的图像显著性检测具有更好的边缘检测效果,基于种子点的受限区域生长法可以有效地进行障碍物分割。在机器视觉的基础上融入激光雷达数据,可以更好地排除非障碍物的干扰,实现了障碍物的完整检出。

关键词: 农业自主车辆; 障碍物检测; 信息融合; 显著性分析; 区域生长法

中图分类号: S232.3; TP242.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)S0-0029-06

Detection of Obstacles Based on Information Fusion for Autonomous Agricultural Vehicles

XUE Jinlin DONG Shuxian FAN Bowen

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: Aiming at the limitations of single sensor in environment perception for intelligent vehicles, a method of detecting obstacles based on information fusion from camera and laser radar was proposed for autonomous agricultural vehicles. For the images captured from monocular camera, significance detection was carried out by using Ft algorithm and the significance images were generated. Meanwhile, cluster analysis based on data correlation assessment was conducted for reflection data points from laser radar to determine the priori information such as the number, boundary and location of obstacles. Then the pixel points corresponding to the laser radar data points were regarded as the seed points, and the significance images generated were activated by the seed points. Lastly, the region segmentation based on the region growth method was implemented to obstacles. The experimental results showed that the image significance detection based on Ft algorithm had a better edge detection effect, and the region growth method based on the seed points can effectively segment the obstacles. The information fusion of machine vision and laser radar can better eliminate the interference of non-obstacles and achieve the complete detection of obstacles.

Key words: autonomous agricultural vehicle; obstacle detection; information fusion; significance analysis; region growth method

0 引言

农业机器人车辆在田间驾驶与作业时,必须能实时正确地进行障碍物检测,因此障碍物检测是农业车辆自主导航技术的重要组成部分^[1-2]。在自主

式移动机器人应用中,障碍物检测方法主要包括视觉检测、激光雷达检测、超声波检测、红外检测、接近觉检测以及声纳测距检测^[3-5],视觉检测及其其他方式组合检测则是更为理想的检测方式^[6]。

MUHLBAUER 等^[7]利用迭代最近点算法对图

收稿日期: 2018-07-15 修回日期: 2018-08-20

基金项目: 江苏省科技计划项目(BK20151436)和江苏高校“青蓝工程”项目

作者简介: 薛金林(1974—),男,教授,博士,主要从事农业车辆测控技术和智能化研究,E-mail: xuejinlin@njau.edu.cn

像数据的角点和雷达点数据进行匹配,实现两者的标定融合,但该算法需要进一步优化。CHAVEZ-GARCIA^[8]根据单线激光雷达获取的位置和尺寸信息,通过梯度直方图算法对图像提取目标特征,然后运用DS(Dempster/Shافر)证据理论把两者信息融合,实现对目标的多特征检测,但是,这种区域生成算法难度较大。PREMEDIA等^[9]对激光雷达数据进行采样,与图像数据结合生成深度图,在此基础上利用梯度直方图进行行人检测,提高了检测的准确性,但花费的时间较长,不利于障碍物的实时性检测。REN等^[10]对图像检测的目标区域进行特征提取、分类、位置调整,并通过神经网络大大提高了图像检测的准确率,缩短了检测时间,然而,因其受光照条件等干扰,部分图像会出现漏检现象。曲昭伟等^[11]从雷达数据选取行人点簇,并将其深度信息映射到图像上,对此区域提取梯度直方图特征,利用支持向量机分类获取行人目标。但是,需要对每一块区域进行提取特征,消耗的时间与区域数量成正比,无法满足实时性。姬长英等^[12]提出基于点云图的栅格化表示和密度补偿算法,利用设置有效空间将点云投影获取障碍物距离和尺寸信息,在不同场景下进行精度测试和距离检测,验证了算法的稳定性和准确性,但其试验采用的是先拍摄后处理数据的方式,不能满足实时性要求。

由于农用车辆作业环境是非结构化的,且采集的图像噪声多。为准确地检测出障碍物,本文提出一种基于激光雷达与机器视觉信息融合的障碍物检测与分割算法,首先对视觉图像进行预处理,选用Ft算法生成显著图,然后基于激光雷达数据点及其对应的图像像素进行聚类,进而形成种子点,最后基于受限区域生长法实现图像中障碍物的快速分割。

1 基于信息融合的障碍物检测算法

采用单目机器视觉可以很容易获取障碍物形状、大小、颜色等信息,但难以精准判断其是否会对农业车辆作业造成影响,也难获取较为准确的障碍物空间信息。而激光雷达的空间信息感知能力比机器视觉更灵敏、精确,但它缺乏对空间物体大小和形状的描述能力。将激光雷达传感器所获取的信息作为先验性信息,与视觉图像信息相融合,以期获得更好的农田环境障碍物信息检测结果。该算法的流程如图1所示。

先由单目摄像机获取农业车辆前方作业场景图像,再对该图像进行显著性检测并转换为灰度图像,生成显著图。同时使用单线式激光雷达对农业车辆前方作业场景进行扫描,得到雷达坐标图,并将相应

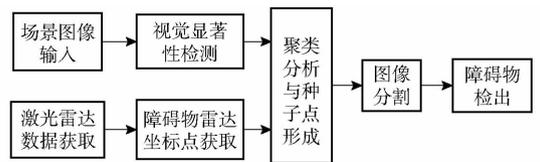


图1 基于信息融合的农业车辆障碍物检测算法
Fig. 1 Obstacle detection algorithm based on data fusion for agricultural vehicles

反射点融入场景图像中。对激光雷达各个反射点对应的图像像素进行聚类,当反射点对应的图像像素坐标差值小于一定的阈值且在场景图像中连续时,则表示这些反射点来自于同一物体,并将这些反射点对应的图像像素作为种子点。经过对激光雷达不同反射点简单地分类后,可得到障碍物数量、边界和位置等先验性信息。然后由种子点激活图像显著图。为进一步减少障碍物分割时的误差,若图像分割后某一疑似障碍物的区域中包含了激光雷达表示的障碍物信息,则该域中的像素取值255,即为白色;像素域不包含障碍物信息,则域中的像素取值0。这样,依据激光雷达的先验性信息剔除了图像中非障碍物区域的影响。

为将障碍物从显著图中分离出来,使用区域生长法进行图像处理^[13]。区域生长法可以将一幅图像快速地分为几个像素较为一致的区域,并且可以快速、准确地分离各个区域的边界,进而提取出所需要的图像信息。区域内像素性质的度量基本包含了灰度和颜色等信息,在没有先验性信息时可以用来分割内容较为复杂的图像。但是,当图像中存在很多小的具有像素特征的区域时,区域生长往往会由于图像中大量的局部小像素而造成过度分割,从而极大地降低图像处理效率。另外,在非结构化的农业作业环境中,在障碍物像素性质差异不明显的区域(如人的衣物与庄稼或地面相似时)不易找到区域边界。因此,依据激光雷达传感器提供的先验信息进行图像分割。在分割完成后,对分割后的图像进行腐蚀、膨胀等形态学操作以获得完整的像素连通域,得到障碍物区。

2 激光雷达坐标点的聚类

将障碍物的激光雷达点聚类是为了获取障碍物的状态,并判断不同时刻障碍物的关联性,从而查找出障碍物,并将障碍物分类。假设激光雷达在 t_0 时刻所测得的同一障碍上2个连续激光点在横坐标和纵坐标上的差值分别为 Δx_{pi} 、 Δy_{pi} , i 由0开始统计,当连续2个激光点横纵坐标的差值小于阈值 ζ_x 、 ζ_y 时,可将激光点视为在同一障碍物上,阈值 ζ_x 、 ζ_y 与障碍物距离正相关,距离越远,设定的阈值相对越

大。对激光点进行归类,设在图像范围内激光雷达扫描出的障碍物个数为 k ,则所有的障碍物组合一个障碍物集合

$$O(t_0) = \{O_1(t_0), O_2(t_0), \dots, O_{n-1}(t_0)\} \quad (1)$$

$$O_k(t_0) = \{D_{O_k}(t_0), Z_{O_k}(t_0), L_{O_k}(t_0)\} \quad (2)$$

$(k = 1, 2, \dots, n-1)$

式中 O_k ——集合区域中的一个障碍物

$D_{O_k}(t_0)$ ——障碍物 O_k 的当前状态(静止或运动)

$Z_{O_k}(t_0)$ ——障碍物 O_k 的质心

$L_{O_k}(t_0)$ ——障碍物 O_k 的置信区间

对于集合区域中的每一个障碍物 O_k ,其在激光雷达坐标系中极角范围为 $[\theta_{k,\min}, \theta_{k,\max}]$,相对应的障碍物距离范围为 $[d_{k,\min}, d_{k,\max}]$,那么对于同一个障碍物,其所有元素的极坐标均值为

$$\begin{cases} \bar{\theta}_k = \frac{\sum_{i=i(k)}^{i(k)+n(k)} \theta_i}{n(k)} \\ \bar{d}_k = \frac{\sum_{i=i(k)}^{i(k)+n(k)} d_i}{n(k)} \end{cases} \quad (3)$$

将极坐标转换为直角坐标,根据每一个障碍物所获得的均值和均方值,按照标准正态分布取可信度为95%,查正态分布表得 $u_{a/2} = 1.96^{[14]}$,可以算出置信区间为 (θ_s, θ_e) 。

将障碍物的激光雷达点聚类是为了查找障碍物,并将障碍物分类,而求取置信区间是为了获取障碍物的状态,并判断不同时刻障碍物的关联性^[15]。设激光雷达每间隔 t' 读取一次坐标,数据关联性评估函数为

$$A(O_k(t), O_k(t+t')) = k_f \frac{1}{F} + k_g \frac{1}{G} \quad (4)$$

其中

$$F = \|(\bar{x}_{O_k}(t), \bar{y}_{O_k}(t)), (\bar{x}_{O_k}(t+t'), \bar{y}_{O_k}(t+t'))\| \quad (5)$$

$$G = 1 - \frac{L_{O_k}(t) \cap L_{O_k}(t+t')}{L_{O_k}(t) \cup L_{O_k}(t+t')} \quad (6)$$

式中 k_f, k_g ——系数

$(\bar{x}_{O_k}, \bar{y}_{O_k})$ ——障碍物 O_k 的直角坐标

F ——障碍物 O_k 在 t 时刻与 $t+t'$ 时刻质心直角坐标间的距离

G ——障碍物 O_k 在2个时刻置信区间不相同的概率

由式(5)可知,对于静态障碍物,在时间 t' 内,障碍物的相对位置基本没有发生改变;对于不同的障碍物,其置信区间不会产生交集, F, G 都趋于1;对于同一个运动障碍物,其检测出距离与角度将有重叠的部分,且与静态障碍物差别较大。

记图像处理障碍物分割为 j 个区域,每个区域像素坐标点的集合记为 M_j ,同一障碍物激光雷达坐标点的集合记为 C_k ,在图像中对应激光雷达坐标点集合 C_k 有图像像素域集合 D_k ,那么对于确实存在于图像中的障碍物 O_k ,必然存在障碍物 O_k 的激光雷达坐标点子集 D_k ,使得 $D_k \in M_j$,此时记该像素域为真;若不存在 $D_k \in M_j$,则记该像素域为假。

3 视觉显著性检测

3.1 图像去噪与特征提取

由于图像的生成容易受到天气、光线或者车辆自身运动震动的影响,输入时容易引入噪声,所以在生成显著图和图像分割之前必须先进行滤波处理^[16]。对输入的障碍物图像进行高斯滤波,分析图像中不同区域的纹理、颜色、频率强度以初步定位显著性物体所在的像素区域。

若定义图像为 $I(u, v)$,高斯滤波器为 $G(u, v, \sigma)$,则单个滤波器滤波过程可表示为

$$R(u, v, \sigma) = I(u, v) \otimes G(u, v, \sigma) \quad (7)$$

$$\text{其中} \quad G(u, v, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{u^2+v^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

为了充分提取障碍物的特征信息,并尽可能地描述清楚障碍物所在区域及其基本轮廓,在显著图计算之前应当最大限度地保留频域中的低频信息,并有选择的滤除一部分高频信息。这个过程可表示为

$$R(u, v, \sigma) = I(u, v, \sigma) \otimes [G(u, v, \sigma_1) - G(u, v, \sigma_2)] \quad (9)$$

高频与低频之间的带宽与 σ_1, σ_2 的比值 ρ 有关,一般 ρ 为1.6,以保证能准确地检测到障碍物的轮廓。

3.2 显著性检测

在高斯滤波实现图像去噪和特征提取后,需要对像素特征进行进一步计算以得到农田环境的显著图。自下而上的显著性算法有很多,其中较为典型的有基于图论(Graph-based visual saliency, Gbvs)的算法^[17]和频率协调(Ft)算法^[18]。Gbvs算法可以准确地捕捉到障碍物的位置,并依据障碍物的显著等级进行不同程度的高亮操作,且对背景有较好的抑制效果,但障碍物的轮廓描述不清,其高亮的边缘不能准确地描述障碍物的形状,可能给图像分割带来误差。Ft算法对背景的抑制效果并没有Gbvs算法的效果优,但该算法对障碍物轮廓的描述非常清楚,更有利于下一步对障碍物的分割与提取。因此,在本研究中选择Ft算法来实现作业环境的显著图生成。

Ft 算法将 RGB 图像转换至 Lab 图像空间后,利用中央-周边算子来分割图像中疑似障碍物的区域,其分类计算过程较为简单,可表示为

$$S(u, v) = \| I_{\mu} - I_{whc}(u, v) \| \quad (10)$$

式中 I_{μ} ——转换后 Lab 图像的像素平均值

I_{whc} ——高斯滤波后单个向量的特征值

式(10)可以计算图像中所有向量特征值与平均值之间的欧氏距离,可以平滑地高亮显示疑似障碍物的区域,并有利于下一步分割。

4 试验结果与分析

试验以农业智能装备实验室中的智能小车为平台(图2),智能小车搭载了 SICK 公司的 LMS291-S05 型激光雷达和双飞燕 PK-910H 型摄像机,其中激光雷达扫描频率为 75 Hz,扫描角度与解析度分别为 180° 与 0.25° ,最大扫描距离 80 m,而摄像机分辨率为 1 024 像素 \times 720 像素,焦距 4.0 mm,采样频率为 30 帧/s。在试验前,采用卡纳基梅隆大学 Unnikrishnan 与 Hebert 的方法^[19],对视觉传感器与激光雷达进行联合标定。

为了更全面地检验本文算法的可靠性,选择校园内不同背景类型、障碍物种类与障碍物数量的多个不同场景。首先进行 Gbvs 算法与 Ft 算法的显著性检测结果进行比较,如图 3 所示。根据图 3b 知,

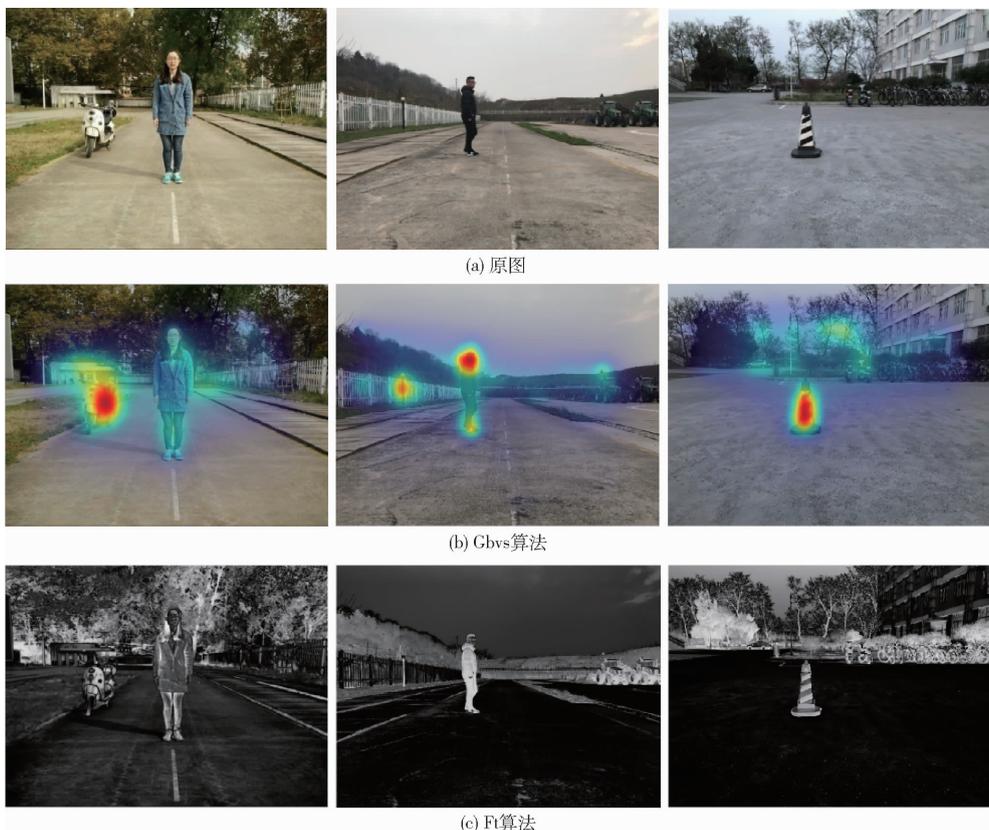


图3 视觉显著性检测结果

Fig.3 Results of visual significance test



图2 试验平台

Fig.2 Experimental platform

1. 单目摄像机 2. 激光雷达

Gbvs 算法可以准确地捕捉到所有障碍物的位置,并根据障碍物的显著等级进行不同亮度显示,但障碍物的轮廓描述不清,高度显示不能准确地描述障碍物形状,这将导致图像分割误差。而根据图 3c, Ft 算法对背景的抑制效果并没有 Gbvs 算法效果好,但对障碍物轮廓的描述更加清楚,有利于下一步对障碍物的分割与提取。这说明选择 Ft 算法来生成作业环境的显著图是合适的。

图 4 为对某个显著图只用区域生长方法进行图像分割再进行形态学操作的结果。由图可知,在非结构化的农业作业环境中,很难排除作业背景的干

扰,而基于特征的障碍物匹配算法难以实现实时性^[20],因此,在农业作业环境中,依据激光雷达等传

感器提供的先验性信息进行障碍物的检测是十分必要的。

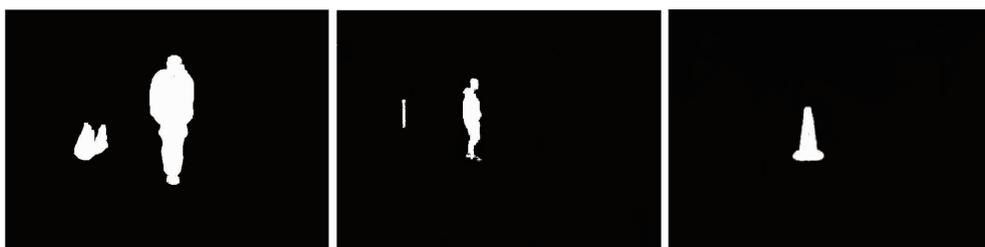


图4 某个图像分割结果

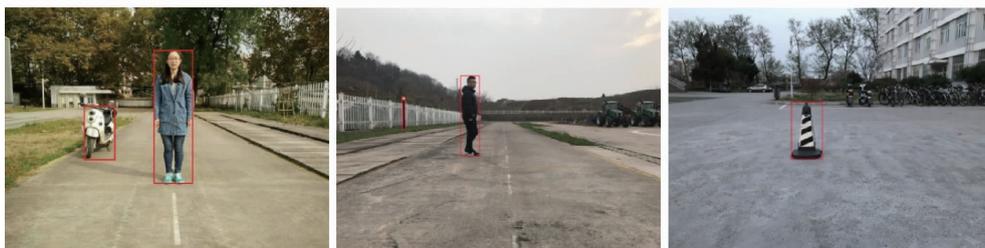
Fig. 4 Results of one image segmentation

图5是将激光雷达传感器提供的信息与视觉信息融合后的障碍物检测结果,与图3b和图3c相比较,在与激光雷达融合后的作业场景图中,成功地滤除了作业环境中复杂背景对障碍物检测的影

响,而路面裂缝、地面农作物等也不会对障碍物在图像中的分割造成干扰。试验表明,这种新的障碍物检测方法具有较好的鲁棒性和障碍物分割准确性。



(a) 障碍物分割结果



(b) 障碍物检测结果

图5 基于信息融合的障碍物检测结果

Fig. 5 Results of obstacle detection based on information fusion

5 结论

(1)基于 Ft 算法的图像显著性检测具有更好的边缘检测效果,而经数据关联性评估的激光雷达反射点进行聚类分析后,确定出基于激光雷达点的图像种子点的受限区域生长法可以有效地进行障碍物

分割。

(2)将机器视觉数据与激光雷达数据融合,一方面可以利用激光雷达弥补单目摄像机检测距离短的问题,另一方面又可以通过摄像机解决二维激光雷达覆盖范围不足问题,可以更好地排除非障碍物的干扰,实现了障碍物的完整检出。

参 考 文 献

- 何勇,蒋浩,方慧,等. 车辆智能障碍物检测方法及其农业应用研究进展[J]. 农业工程学报,2018,34(9):21-32.
HE Yong, JIANG Hao, FANG Hui, et al. Research progress of intelligent obstacle detection methods of vehicles and their application on agriculture[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 21-32. (in Chinese)
- NISSIMOV S, GOLDBERGER J, ALCHANATISI V. Obstacle detection in a greenhouse environment using the Kinect sensor[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2015, 113(C): 104-115.
- KISE M, ZHANG Q, NOGUCHI N. An obstacle identification algorithm for a laser range finder-based obstacle detector[J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(3): 1269-1278.
- GUO L, ZHANG Q, HAN S. Agricultural machinery safety alert system using ultrasonic sensors[J]. Journal of Agricultural Safety and Health, 2002, 8(4): 385-396.
- 张磊,王书茂,陈兵旗,等. 基于双目视觉的农田障碍物检测[J]. 中国农业大学学报,2007,12(4):70-74.

- ZHANG Lei, WANG Shumao, CHEN Bingqi, et al. Detection of obstacles in farmland based on binocular vision[J]. Journal of China Agricultural University, 2007, 12(4):70-74. (in Chinese)
- 6 赵一兵, 王荣本, 李琳辉, 等. 基于多传感器信息的前方障碍物检测[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(26): 174-177. ZHAO Yibing, WANG Rongben, LI Linhui, et al. Approach of obstacle detection based on laser sensor and single camera[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(26): 174-177. (in Chinese)
- 7 MUHLBAUER Q, KUHNLENZ K, BUSS M. Fusing laser and vision data with a genetic ICP algorithm[C]// Proceedings of the 2008 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, 2008: 1844-1849.
- 8 CHAVEZ-GARCIA R O. Multiple sensor fusion for detection, classification and tracking of moving objects in driving environments [D]. Ricardo Omar CHAVEZ GARCIA: Université De Grenoble, 2014.
- 9 PREMEIDA C, NUES U. Fusing LIDAR, camera and semantic information: a context-based approach for pedestrian detection [J]. International Journal of Robotics Research, 2013, 32(3): 371-384.
- 10 REN S, HE K, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: towards real time object detection with region proposal networks [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2017, 39(6): 1137-1149.
- 11 曲昭伟, 魏福祿, 魏巍, 等. 雷达与视觉信息融合的行人检测方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2013, 43(5): 1230-1234. QU Zhaowei, WEI Fulu, WEI Wei, et al. Pedestrian detection by radar vision data fusion [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2013, 43(5): 1230-1234. (in Chinese)
- 12 姬长英, 沈子尧, 顾宝兴, 等. 基于点云图的农业导航中障碍物检测方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 173-179. JI Changying, SHEN Ziyao, GU Baoxing, et al. Obstacle detection based on point clouds in application of agriculture navigation [J]. Transactions of the CAAE, 2015, 31(7): 173-179. (in Chinese)
- 13 孔俊, 王佳男, 谷文祥, 等. 基于区域的自动种子区域生长法的彩色图像分割算法[J]. 东北师范大学学报(自然科学版), 2008, 40(4): 47-51. KONG Jun, WANG Jia'nan, GU Wenxiang, et al. Automatic SRG based region for color image segmentation [J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2008, 40(4): 47-51. (in Chinese)
- 14 孙道德. 概率论与数理统计: 经管[M]. 北京: 人民教育出版社, 2006.
- 15 蔡自兴, 肖正, 于金霞. 基于激光雷达的动态障碍物实时检测[J]. 控制工程, 2008, 15(2): 200-203. CAI Zixing, XIAO Zheng, YU Jinxia. Real-time detection of dynamic obstacles based on laser radar [J]. Control Engineering of China, 2008, 15(2): 200-203. (in Chinese)
- 16 韩永华, 汪亚明, 康锋, 等. 基于小波多分辨率分解的农田障碍物检测[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 215-221. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130637&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.037. HAN Yonghua, WANG Yaming, KANG Feng, et al. Detection of obstacles in farmland based on wavelet multi-resolution transform[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 215-221. (in Chinese)
- 17 HAREL J, KOCH C, PERONA P. Graph-based visual saliency[C]// International Conference on Neural Information Processing Systems, 2006: 545-552.
- 18 ACHANTA R, HEMAMI S, ESTRADA F, et al. Frequency-tuned salient region detection[C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2009: 1597-1604.
- 19 RANJITH U, MARTIAI H. Fast extrinsic calibration of a laser rangefinder to a camera[EB/OL][2018-07-01] <https://www.ri.cmu.edu/publications/fast-extrinsic-calibration-of-a-laser-rangefinder-to-a-camera/>.
- 20 杨恒. 基于特征点匹配的障碍物检测算法的研究与实现[D]. 沈阳: 东北大学, 2009. YANG Heng. Research & implementation of obstacle detection algorithm based on feature points matching [D]. Shenyang: Northeastern University, 2009. (in Chinese)