

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.001

基于激光雷达的农田环境点云采集系统设计

季宇寒 徐弘祯 张漫 李世超 曹如月 李寒

(中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室,北京 100083)

摘要: 设计了基于激光雷达的农田环境点云采集系统,可实现农田环境点云与农机位置姿态的稳定、可靠采集;设计了多传感器数据的采集软件,可实现准确、一致的全局点云数据获取。系统以拖拉机为移动载体,由点云数据采集模块、车体位姿采集模块和数据融合模块组成。其中,点云数据采集模块可获取周边环境点云数据,并解决近距离盲区问题;车体位姿采集模块可实时获取农机位置和姿态信息;数据融合模块可接收并融合环境点云数据与车体位姿数据,进而获取位姿补偿后的点云数据。系统实现了各传感器数据的在线采集、时间同步与空间配准,以及数据的实时显示与存储。在农田环境下进行点云采集试验,结果表明,采集系统具有良好的户外工作稳定性,在线典型丢帧率不超过1%,离线典型丢帧率不超过0.47%,能够满足农田点云数据采集的要求。为分析系统采集点云数据质量,将经过位姿补偿的点云与原始点云分别进行直通滤波地面点滤除,结果表明,位姿补偿后的点云经滤波后仅包含少量地面点云,可作为农机自主导航避障的可靠数据。

关键词: 点云采集系统;障碍物检测;激光雷达

中图分类号: TP23; S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)S0-0001-07

Design of Point Cloud Acquisition System for Farmland Environment Based on LiDAR

JI Yuhan XU Hongzhen ZHANG Man LI Shichao CAO Ruyue LI Han

(Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Accurate perception in farmland environment is the premise to realize the obstacle avoiding in autonomous navigation for agricultural machinery. Stable and reliable environmental data acquisition system is the necessary condition for accurate perception. A point cloud acquisition system was designed for farmland environment based on LiDAR, which can realize the stable and reliable acquisition of farmland environment point cloud and the position and attitude of agricultural machinery. A multi-sensor data acquisition software was designed, which can achieve accurate and consistent global point cloud data acquisition. The system was composed of point cloud data acquisition module, vehicle position and posture acquisition module and data fusion module with tractor as mobile carrier. Among them, point cloud data acquisition module can acquire the point cloud data of surrounding environment and solve the problem of close blind area; vehicle position and posture acquisition module can acquire real-time agricultural machinery position and posture information; data fusion module can receive and integrate the environmental point cloud data and vehicle position and posture data, and then obtain the point cloud data after compensation. The system realized online collection of sensor data, time synchronization, spatial registration, data real-time display and storage. Point cloud acquisition experiments under farmland environment were carried out. The results showed that the acquisition system had good outdoor working stability. The online typical frame loss rate was not larger than 1%, while the offline typical frame loss rate was not larger than 0.47%, which can meet the requirements of farmland point cloud data acquisition. In order to analyze the data quality of point cloud collected by the system, the ground point clouds were filtered by straight-pass filtering respectively by using the point cloud after compensation and

收稿日期: 2019-04-21 修回日期: 2019-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(31571570)和国家重点研发计划项目(2017YFD0700400-2017YFD0700403)

作者简介: 季宇寒(1992—),男,博士生,主要从事农机激光避障系统研究,E-mail: jyh@cau.edu.cn

通信作者: 张漫(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事精细农业及其支持技术研究,E-mail: cauzm@cau.edu.cn

the original point cloud. The results showed that the point cloud after compensation contained only a small amount of ground point cloud after filtering, which can be used as reliable data for obstacle avoidance in autonomous navigation of agricultural machinery.

Key words: point cloud acquisition system; obstacle detection; light detection and ranging

0 引言

农机自动导航系统可以有效减轻农机操作人员的劳动强度,提高作业精度与作业效率。因此,农机导航的相关研究主要集中在提高导航精度、优化作业路径、加强远程监控等方面。近年来,随着无人地面车辆(Unmanned ground vehicle, UGV)技术的高速发展,自主移动机器人^[1-5]、无人驾驶汽车^[6-11]等关键技术逐步成熟,自主导航避障成为农机导航研究的新方向^[12-14]。

准确的农田环境感知是实现农机自主导航避障的前提^[15-16],稳定、可靠的环境数据采集系统是准确感知的必要条件。在传感器选择上,RGB/RGB-D相机信息丰富,但受光线、阴影等影响较大,且农田环境特征点稀少;毫米波雷达穿透性好,但其发出的电磁脉冲在小尺寸障碍处会发生绕射,无法准确检测;超声波阵列成本低廉,但测距精度较低,方向性差,且受气温影响;激光雷达(Light detection and ranging, LiDAR)精度高、速度快、数据量大,且不易受外界环境干扰^[17-18]。因此,绝大多数农机自主导航避障系统均选择LiDAR作为环境感知传感器^[19-25]。以上研究多基于二维LiDAR,仅可获取二维平面点云数据,无法完整感知农田等非结构化环境中的丰富信息。三维LiDAR通过多层扫描线同时测距,可获取三维立体点云数据,实现农田环境的高质量感知。

本文搭建装配三维LiDAR的农田环境采集系统,获取周边环境点云数据,并搭配二维LiDAR消除近距离盲区;同时,使用全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)与航姿参考系统(Attitude and heading reference system, AHRS)分别获取系统自身的位置与姿态信息,补偿农田不平整造成的GNSS定位与点云数据偏差,以提高点云数据的准确性和一致性。

1 材料与方法

1.1 采集系统设计

在拖拉机上搭建点云采集系统,完成系统功能模块、传感器安装结构、传感器与数据融合终端间的通信及供电通路设计,为数据采集提供了稳定、可靠的硬件条件。

1.1.1 功能模块

点云采集系统以拖拉机为移动载体,由点云数据采集模块、车体位姿采集模块和数据融合模块组成,如图1所示。



图1 点云采集系统功能模块

Fig. 1 Function module of point cloud acquisition system

点云数据采集模块可获取多角度、多层次的环境点云信息。其中,安装于车体顶部的Velodyne HDL-32型三维LiDAR,可获取车体周围水平360°,竖直32层的立体点云数据,可提供丰富的环境信息;安装于车体前端的Hokuyo UTM-30LX-EW型二维LiDAR,可获取车体前方水平270°的平面点云数据,消除三维LiDAR在车体前方的近距离盲区。具体参数如表1所示。

表1 传感器主要参数

Tab. 1 Main parameters of sensors

传感器	主要参数
三维 LiDAR (HDL-32 型)	距离:100 m 精度:±2 cm 扫描帧频率:5~20 Hz 视场:水平360°、垂直41.33° 分辨率:水平0.1°~0.4°、垂直1.33°
二维 LiDAR (UTM-30LX-EW 型)	距离:30 m 精度:±0.5 cm 扫描帧频率:40 Hz 视场:水平270° 分辨率:水平0.25°
GNSS (P3-DT 型)	卫星:GPS、BDS、GLONASS、 Galileo、SBAS、QZSS RTK 精度:水平0.8 cm 垂直1.5 cm
AHRS (MTi-300 型)	横滚角(RMS):静态0.2°、动态0.3° 俯仰角(RMS):静态0.2°、动态0.3° 航向角(RMS):1.0°

车体位姿采集模块可获取车体准确的绝对位置

与相对姿态信息。其中,华测 P3-DT 型 GNSS 移动站通过与基站自主差分,可获取车顶天线的厘米级精度定位数据;安装于车顶中央的 Xsens MTi-300 型 AHRS 可获取车体相对初始姿态的横滚角、俯仰角、航向角信息。具体参数如表 1 所示。

数据融合模块可接收并融合环境点云数据与车体位姿数据,进而获取位姿补偿后的点云数据。其中,车载移动工作站可实现数据的时间同步与空间配准,补偿环境点云数据由于车体位姿变化产生的误差,提高点云数据一致性;以太网交换机提供稳定的网络数据通路。

1.1.2 安装结构

为保证采集系统在不平整农田环境中安全、可靠工作,且位姿采集模块获取的位姿变化可代表点云采集模块点云数据的坐标系运动,各传感器均需要与车体进行稳固的刚体连接。本文以雷沃欧豹 M904-D 型拖拉机为平台,设计了适配的传感器安装结构,由顶端结构和前端结构组成,如图 2 所示。

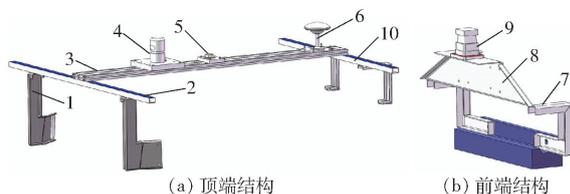


图2 传感器安装结构示意图

Fig. 2 Mounting structure diagram for sensors

1. 四角支撑架 2、10. 支撑杆 3. 纵向型材 4. 三维 LiDAR 及其安装底板 5. AHRS 及其安装底板 6. GNSS 天线及其安装铁板 7. 支撑架 8. 梯形梁 9. 二维 LiDAR 及其安装底板

由图 2a 可知,顶端结构采用四角支撑架与拖拉机钢架紧固,通过安装前后两根支撑杆,固定纵向高强度型材。三维 LiDAR、AHRS、GNSS 天线等分别安装于特制的安装底板,并与型材紧固,完成系统顶端各传感器的稳固安装。

由图 2b 可知,前端结构采用两侧支撑架与拖拉机前配重连接处紧固,通过安装梯形梁以避免安装位置与拖拉机前配重或机箱盖板等产生干涉。二维 LiDAR 安装于特制的安装底板,并与梯形梁紧固,完成系统前端传感器的稳固安装。

1.1.3 通信与供电设计

三维与二维 LiDAR 均通过以太网口输出数据,故使用以太网交换机与车载移动工作站桥接,并配置各 LiDAR 与工作站处于相同网络段,实现局域网通信。GNSS 移动站与 AHRS 均通过 RS232 串口输出数据,通过 RS232/USB 转换线缆与移动工作站的 USB 接口连接,实现串行通信。

点云采集系统的各传感器均可在 12 V 直流供

电下可靠工作。拖拉机车载电瓶可提供 12 V 直流电源,通过 12 V 稳压单元为各传感器供电。同时,12 V 稳压单元串联转 5 V 的降压单元,为以太网交换机供电。

点云采集系统的通信与供电通路如图 3 所示。

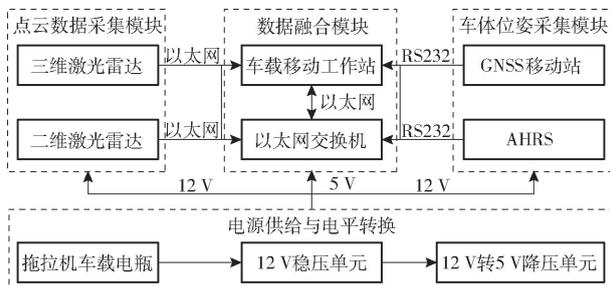


图3 点云采集系统通信与供电通路图

Fig. 3 Communication and power supply paths of point cloud acquisition system

1.2 采集软件开发

点云采集软件在 Visual Studio 2015 环境下,以 C++ 为编程语言开发,由传感器接口模块、时间同步模块、空间配准模块和数据显示存储模块 4 部分组成,各软件模块间的逻辑关系如图 4 所示。

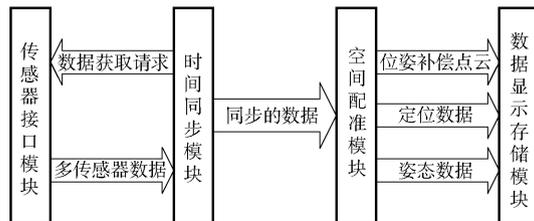


图4 点云采集软件模块的逻辑关系图

Fig. 4 Logic diagram of point cloud acquisition software modules

1.2.1 传感器接口模块

传感器接口模块根据各传感器输出方式,构建适配的接口实现数据获取。其中,三维 LiDAR 接口使用 PCAP 抓取并解析 UDP 网络包;二维 LiDAR 接口使用 SDK 请求并解析 TCP 网络包;GNSS 接口使用串口类接收并解析 ASCII 字符串;AHRS 接口使用串口类接收、解析并缓冲二进制数据。

1.2.2 时间同步模块

为保证各传感器数据具有较强的时间相关性,需控制采样频率与时序,使各传感器数据在同一时隙获取,即时间同步。时间同步需要传感器与采集软件共同配合实现。在传感器端,根据各传感器的采集频率范围,结合实际农田点云采集要求,统一各传感器同步采集频率为 5 Hz。其中,三维 LiDAR 与 GNSS 接收机采样频率设置为 5 Hz;二维 LiDAR 采用单步触发采样模式,由采集软件控制 5 Hz 触发;AHRS 设置采样频率 100 Hz,由采集软件进行中值

滤波。在采集软件端,时间同步模块设置 5 Hz 定时器,在每 200 ms 的时隙内,依次读取各传感器缓冲数据或触发数据采集。其中,三维 LiDAR 获取解析数据缓冲区的最新一帧点云数据;二维 LiDAR,触发 1 080 次单步采集指令,采集一帧全范围 270° 点云数据;GNSS 获取串口类缓冲区的最新一帧 ASCII 数据,获取经度、纬度和高程信息;AHRS 获取串口类缓冲区的最新 10 帧二进制数据,经过数制转换与中值滤波,获取横滚、俯仰和航向信息。

1.2.3 空间配准模块

采集系统获取的三维与二维 LiDAR 的点云数据,需要统一坐标。此外,车体的倾斜会造成 GNSS 定位误差与点云数据偏差,需要通过车体姿态信息进行误差补偿。空间配准模块补偿 GNSS 与点云数据的误差,并将点云数据全局化,具体流程如下:

(1) GNSS 经纬度转平面坐标

采集系统获取 GNSS 接收机输出的原始数据为 NMEA \$GPGGA 格式,包含经度、纬度、海拔信息,通过空间坐标转换、坐标基准转换、高斯投影正算等,可将经纬度坐标转换为北京 54 坐标系三度分带下的平面坐标。

(2) AHRS 姿态补偿 GNSS 定位

农田环境下土地不平整会导致车体倾斜,GNSS 天线位于车顶,距地面有一定高度,直接使用 GNSS 天线定位数据代表车体位置会产生定位误差。通过 AHRS 获取车体的横滚、俯仰、航向姿态,结合天线在车体坐标系相对位置,补偿由车体倾斜产生的 GNSS 定位误差,补偿公式为

$$\begin{cases} \Delta x = H \sin \theta \cos \psi - H \sin \varphi \sin \psi \\ \Delta y = H \sin \theta \sin \psi + H \sin \varphi \cos \psi \end{cases} \quad (1)$$

式中 H ——GNSS 天线高度

φ ——横滚角 θ ——俯仰角

ψ ——航向角

Δx ——X 轴方向偏移量

Δy ——Y 轴方向偏移量

(3) LiDAR 点云坐标系一致化

点云数据采集模块由三维与二维 LiDAR 组成,二者采集的点云数据坐标分别为以自身视点为原点的三维或二维坐标系,根据二者在空间中的相对位置,获取对应的 4×4 刚体变换矩阵,将二维 LiDAR 的二维点云数据进行维度提升并变换到三维坐标系,实现点云坐标系一致化。

(4) AHRS 姿态变换点云数据

经过一致化的 LiDAR 点云数据,同样受到车体倾斜的影响,需要经过三维姿态校正,实现点云坐标系与车体坐标系的统一。因此,再次利用 AHRS 的

横滚角、俯仰角、航向角信息,对点云数据进行坐标三维旋转变换,校正点云的三维姿态。欧拉角转换旋转矩阵为

$$\begin{aligned} R &= R_z(\psi)R_y(\theta)R_x(\varphi) = \\ &\begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \varphi \sin \theta \cos \psi - \cos \varphi \sin \psi & \cos \varphi \sin \theta \cos \psi + \sin \varphi \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \sin \varphi \sin \theta \sin \psi + \cos \varphi \cos \psi & \cos \varphi \sin \theta \sin \psi - \sin \varphi \cos \psi \\ -\sin \theta & \sin \varphi \cos \theta & \cos \varphi \cos \theta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 R ——旋转变换矩阵

$R_z(\psi)$ ——航向旋转矩阵

$R_y(\theta)$ ——俯仰旋转矩阵

$R_x(\varphi)$ ——横滚旋转矩阵

(5) LiDAR 点云坐标系全局化

经过三维姿态校正的 LiDAR 点云数据,已与车体坐标系完全对齐,但仍处于运动坐标系下。利用经过 AHRS 姿态补偿的平面坐标 (x, y) 与点云处理获得的 LiDAR 距地面高度 h ,得到点云数据坐标原点在局坐标系下的位置 (x, y, h) ,通过平移变换 t ,能够获得全局坐标系下的 LiDAR 点云坐标。

1.2.4 数据显示存储模块

数据显示存储模块实现位姿补偿后点云的可视化,以及原始点云、位姿补偿后点云、GNSS 定位数据、AHRS 姿态数据的存储。其中,经过位姿补偿的点云数据通过基于 VTK 的窗口实现可视化,以 PCD 格式保存,原始点云数据以 PCAP 网络包格式存储;GNSS 定位数据包含经纬度高程、平面坐标和高度信息,以 txt 文本格式存储;AHRS 姿态数据包含横滚角、俯仰角、航向角信息,以 txt 文本格式存储。点云可视化界面如图 5 所示。

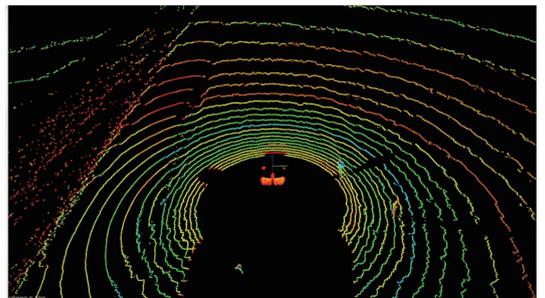


图 5 点云可视化界面

Fig. 5 Point cloud visualization interface

2 试验分析及讨论

2.1 点云采集系统性能分析

为测试点云采集系统的性能,在中国农业大学涿州实验站进行了农田环境点云采集试验。通过全天的农田点云数据采集,采集系统工作状态良好,未受到户外光线及土地沟坎等的干扰,具有良好的稳定性。

通过设计不同时间条件下相互独立的采集试验,将在线采集的点云数据帧数与理论获取帧数进行比较,获得在线丢帧率。同时,对 PCAP 文件进行离线解析,将离线解析的点云数据帧数与 PCAP 文件帧数进行比较,获取离线丢帧率。经测试,采集系统在线典型丢帧率不超过 1%,离线典型丢帧率不超过 0.47%,具体数据如表 2 所示。

表 2 点云采集系统在线采集/离线解析丢帧率

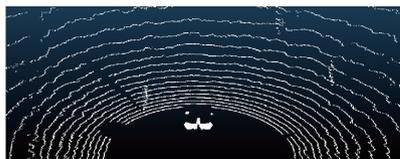
Tab.2 Frame loss rate of online collection/offline replay

采集状态	时间/ min	理论帧数/ 帧	实际帧数/ 帧	丢帧率/ %
在线	1	300	297	1.00
	2	600	595	0.83
	5	1 500	1 496	0.27
	10	3 000	2 987	0.43
	20	6 000	5 987	0.22
	30	9 000	8 948	0.58
	60	18 000	17 967	0.18
离线	1	296	295	0.34
	2	597	596	0.17
	5	1 495	1 489	0.40
	10	2 993	2 982	0.37
	20	5 999	5 993	0.10
	30	8 988	8 946	0.47
	60	18 000	17 942	0.32

试验结果表明,点云采集系统具有良好的工作稳定性与数据可靠性,能满足农田点云数据采集的性能要求。

2.2 采集点云数据质量分析

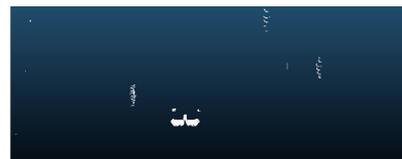
点云采集系统获取的点云数据,经过时间同步与空间配准,具有全局坐标一致性,有利于提高点云处理的准确性,降低了对算法鲁棒性的要求。本文



(a) 原始点云



(b) 原始点云直通滤波后的非地面点云



(c) 位姿补偿点云直通滤波后的非地面点云

图 7 点云地面点滤除效果对比

Fig.7 Result comparison of ground points removing

2.3 讨论

在点云采集系统方面,车体工作中产生的机械振动会在一定程度上影响 AHRS 精度,通过增加减震措施可提高精度。采集系统目前仅使用软件实现各传感器的时间同步,精度有限,通过基于 PPS 信号的 GNSS 授时硬同步可提高同步精度。在点云数据处理方面,采集系统软件可获取准确、一致点云数据。但在障碍物检测与识别的相关研究中,利用机器视觉图像与激光点云融合的方法,可充分利用二

设计不同的试验场景,以行人作为目标障碍物(图 6),并对采集的点云数据进行地面点滤波处理,结果如表 3 所示。



图 6 农田环境点云采集试验场景

Fig.6 Experimental scene of point cloud collection in farmland environment

表 3 不同预设试验场景下点云滤波数据帧数

Tab.3 Frame number of point cloud for filtering in different presupposed test scenarios

路面状态	农机状态	障碍物状态	点云帧数/帧
水泥地面	静止	静止	5 007
		运动	3 548
	运动	静止	3 961
		运动	5 285
农田地面	静止	静止	2 504
		运动	4 324
	运动	静止	3 029
		运动	2 996

对于未经位姿补偿的 LiDAR 原始点云(图 7a),进行垂直方向的直通滤波,获得非地面点云(图 7b)。可见,由于农田沟坎导致车体倾斜,会有较多地面点残留。通过位姿补偿,将点云变换到全局坐标系,地面点云在垂直方向具有较小波动范围,通过直通滤波,地面点云被基本滤除,且试验中预设的行人障碍物清晰可辨(图 7c)。

者优势,获得更好的障碍物分类结果,在后续研究中,采集系统可集成全景相机传感器,研究基于激光点云与彩色图像融合的障碍物检测与识别算法,实现农田障碍的在线检测与提取。

通过有针对性的改进,基于激光雷达的农田环境点云采集系统的性能还存在进一步的提升空间。

3 结论

(1) 搭建了基于激光雷达的农田环境点云采集

系统。系统采用功能模块化设计,通过点云数据采集模块获取了多角度、多层次的环境点云信息;通过车体位姿采集模块获取了车体准确的绝对位置与相对姿态信息;通过数据融合模块接收并融合环境点云数据与车体位姿数据,进而获取了位姿补偿后的点云数据。设计了稳定的安装结构和可靠的供电与数据通路,确保农田环境数据与车体位姿信息的有效获取。

(2)设计了基于 Visual Studio 2015 平台与 C++ 语言的采集软件,实现了数据采集终端与各传感器

间的稳定、可靠通信,可同步采集环境点云数据与车体位姿信息,并通过位姿补偿点云误差,获取准确、一致的全局点云数据。

(3)经点云采集系统性能分析,农田环境点云采集系统可在农田复杂环境下稳定可靠运行,在线丢帧率不超过 1%,离线丢帧率不超过 0.47%。经采集点云数据质量分析,经过位姿补偿的农田环境点云具有更好的准确性和一致性,可提高后续点云数据处理效果。

参 考 文 献

- [1] YUAN X, TANG X Y, XUE S K, et al. Obstacle detection based on image and laser points fusion for a small ground robot[C]// 2015 IEEE International Conference on Information and Automation. IEEE, 2015: 386 – 391.
- [2] 钱晓明,朱立群,楼佩煌,等. 基于位姿状态的全向运行型 AGV 路径跟踪优化控制方法[J]. 农业机械学报,2018,49(4): 20 – 26.
QIAN Xiaoming, ZHU Liqun, LOU Peihuang, et al. Optimal path tracking control method of omni-directional mobile AGV based on pose state[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 20 – 26. (in Chinese)
- [3] 谢永良,尹建军,余承超,等. 轮式 AGV 沿葡萄园垄道行驶避障导航算法与模拟试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 13 – 22.
XIE Yongliang, YIN Jianjun, YU Chengchao, et al. Obstacle avoidance navigation algorithm and analog experiment for wheeled AGV running along vineyard ridge road[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 13 – 22. (in Chinese)
- [4] 张顺顺. 基于激光雷达的农业自主车辆导航研究[D]. 南京:南京农业大学, 2014.
ZHANG Shunshun. Navigation of an agricultural autonomous vehicle based on laser radar[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [5] 姜丹,刘卉,邱权. 基于 Seekur 的农田机器人激光避障设计与仿真[J]. 农机化研究, 2015, 37(7): 151 – 155.
JIANG Dan, LIU Hui, QIU Quan. The design of farmland robot obstacle avoidance based on Seekur[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(7): 151 – 155. (in Chinese)
- [6] SHANG E, AN X, LI J, et al. A novel setup method of 3D LIDAR for negative obstacle detection in field environment[C]// Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2014 IEEE 17th International Conference on. IEEE, 2014: 1436 – 1441.
- [7] REJAS J I, SANCHEZ A, GLEZ-DE-RIVERA G, et al. Environment mapping using a 3D laser scanner for unmanned ground vehicles[J]. Microprocessors and Microsystems, 2015, 39(8): 939 – 949.
- [8] HATA A Y, WOLF D F. Feature detection for vehicle localization in urban environments using a multilayer LIDAR[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(2): 420 – 429.
- [9] 吴越,蓝伟,许大浦,等. 一种基于单线激光雷达的无人车辆导航避障系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(7): 1902 – 1907.
WU Yue, LAN Wei, XU Dapu, et al. Design of an obstacle avoidance system for navigation of unmanned vehicles with single-line laser radar[J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(7): 1902 – 1907. (in Chinese)
- [10] 崔佳超. 无人驾驶智能车在动态环境中的避障方法[D]. 西安:西安工业大学, 2015.
CUI Jiachao. The method on environment obstacle of unmanned intelligent vehicle in a dynamic environment[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2015. (in Chinese)
- [11] 唐威. 无人驾驶车基于双视觉系统的城市道路检测[D]. 大连:大连理工大学, 2012.
TANG Wei. Urban road detection for unmanned ground vehicles based on binocular vision system[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [12] 刘美辰. 农机作业障碍物检测与避障方法研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018.
LIU Meichen. Research on inspection and obstacle avoidance methods of agro-machinery obstructions[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)
- [13] HAN Shufeng, HE Yong, FANG Hui. Recent development in automatic guidance and autonomous vehicle for agriculture: a review[J]. Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.), 2018, 44(4): 381 – 391.
- [14] 薛金林,董淑娟,范博文. 基于信息融合的农业自主车辆障碍物检测方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 29 – 34.
XUE Jinlin, DONG Shuxian, FAN Bowen. Detection of obstacles based on information fusion for autonomous agricultural vehicles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 29 – 34. (in Chinese)
- [15] 张银,任国全,程子阳,等. 三维激光雷达在无人车环境感知中应用研究综述[J/OL]. 激光与光电子学进展, 2019,

56(13):130001.

ZHANG Yin, REN Guoquan, CHENG Ziyang, et al. Review of the application of 3D LiDAR in the environmental perception of unmanned vehicles[J/OL]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019,56(13):130001. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20190125.1300.038.html>. (in Chinese)

- [16] 马佃波. 无人驾驶汽车环境感知技术综述[J]. *汽车与驾驶维修(维修版)*, 2017(5):122-123.
- [17] 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)
- [18] 王世峰, 戴祥, 徐宁, 等. 无人驾驶汽车环境感知技术综述[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2017,40(1):1-6. WANG Shifeng, DAI Xiang, XU Ning, et al. Overview on environment perception technology for unmanned ground vehicle[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2017,40(1):1-6. (in Chinese)
- [19] PERIU C F, MOHSENIMANESH A, LAGUË C, et al. Isolation of vibrations transmitted to a LiDAR sensor mounted on an agricultural vehicle to improve obstacle detection[J]. *Canadian Biosystems Engineering*, 2013, 55: 233-242.
- [20] OKSANEN T. Laser scanner based collision prevention system for autonomous agricultural tractor[J]. *Agronomy Research*, 2015, 13(1):167-172.
- [21] THANPATTRANON P, AHAMED T, TAKIGAWA T. Navigation of an autonomous tractor for a row-type tree plantation using a laser range finder—development of a point-to-go algorithm[J]. *Robotics*, 2015, 4(3):341-364.
- [22] 刘沛, 陈军, 张明颖. 基于激光导航的果园拖拉机自动控制系统[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(3): 196-199. LIU Pei, CHEN Jun, ZHANG Mingying. Automatic control system of orchard tractor based on laser navigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(3): 196-199. (in Chinese)
- [23] 苗峻齐. 基于激光扫描技术的农业机械导航避障系统研究[D]. 广州:华南农业大学, 2012. MIAO Junqi. Design of obstacle avoidance system for agricultural machinery navigation based on laser scanning[D]. Guangzhou:South China Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [24] 陈军, 蒋浩然, 刘沛, 等. 果园移动机器人曲线路径导航控制[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(4):179-182,187. CHEN Jun, JIANG Haoran, LIU Pei, et al. Navigation control for orchard mobile robot in curve path[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(4):179-182,187. (in Chinese)
- [25] 袁文涛, 刘卉, 胡书鹏. 面向自动驾驶拖拉机的农田障碍物识别研究[J]. *农机化研究*, 2018, 40(10): 247-251. YUAN Wentao, LIU Hui, HU Shupeng. Farmland obstacle identification for automatic navigation tractor[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2018, 40(10): 247-251. (in Chinese)