doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S2.020

基于激光雷达导航的玉米喷药机器人设计与试验

班　超　迟瑞娟　黄修炼　董乃昔　苏　童　孙晓光
（中国农业大学工学院，北京 100083）

摘要：针对现有玉米喷药机器人存在转向响应慢、作物行检测方法以及跟踪控制器稳定性差等问题，设计一种基于激光雷达导航系统的四轮驱动、差速转向式线控底盘喷药机器人。首先设计机器人整机结构，根据工作原理对关键部件进行设计。提出一种基于3D激光雷达的作物行检测方法，经过点云预处理和地面点云滤波得到机器人前方的作物点云，根据点云在横向坐标轴的分布数量划分不同的作物行，并利用分段几何中心拟合作物行中心线。同时，设计一个双输入单输出的模糊控制器，以作物行中心线获取的偏航角和横向偏差为输入，利用49条模糊规则和Mamdani法进行模糊推理，再通过重心法将输出量解模糊为线控底盘两侧车轮轮速差。在苗期玉米田进行机器人行驶性能试验和导航性能试验。试验结果表明，机器人能够爬越坡度20°以下斜坡，差速原地转向360°时几何中心位置平均偏差为7.66 cm，具有足够的驱动力和较好的转向灵活性；激光雷达检测三叶期和小喇叭口期的玉米作物行时，平均误差角分别为0.93°和0.85°，平均检测时间为0.031 s，据此确定的定位信息具有较高的精度且满足实时性；通过定位信息和模糊控制器跟踪作物行时，机器人平均跟踪误差为0.061 m，标准差为0.038 m，能够满足苗期玉米田的自动导航需求。

关键词：喷药机器人；差速转向；激光雷达；作物行检测；模糊控制
中图分类号：S232.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2024)S2-0200-10

Design and Experiment of Corn-spraying Robot with LiDAR Navigation

BAN Chao　CHI Ruijuan　HUANG Xiulian　DONG Naixi　SU Tong　SUN Xiaoguang
(*College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of slow steering response, crop row detection methods, and poor stability of tracking controllers in existing sprayers, a four-wheel-drive, differential-steering spraying robot was designed based on a light detection and ranging (LiDAR) navigation system. The whole structure of the robot was firstly designed, and the key components were designed according to the working principle. Then a crop row detection method based on 3D LiDAR was proposed. This method involved obtaining the crop point cloud in front of the robot through point cloud preprocessing and ground point cloud filtering. Subsequently, different crop rows were identified by analyzing the distribution of point cloud data across the transverse coordinate axes. The centerlines of the crop rows were then determined by fitting segmented geometric centers. Meanwhile, a dual-input single-output fuzzy controller was designed to use the yaw angle and lateral deviation obtained from the centerlines of the crop rows as inputs. The controller performed fuzzy inference by using 49 fuzzy rules and the Mamdani method. The outputs were then defuzzified into the differential wheel speeds for the wheels on both sides of the wire-controlled chassis by using the center-of-gravity method. Finally, the robot driving performance test and navigation performance test were conducted in the seeding cornfield. The results showed that the robot can successfully climb slopes over 20°, and the average deviation of the geometric center was 7.66 cm when performing a turn at differential speed. This indicated that the robot possessed adequate driving force and excellent steering flexibility. When LiDAR detected corn crop rows at the three-leaf stage and the small trumpet stage, the average error angles were 0.93° and 0.85°, respectively, with an average running time of 0.031 s. Utilizing this localization information, the robot achieved an average tracking error of 0.061 m with a standard deviation of 0.038 m when navigating the crop rows through the fuzzy control algorithm. This level of accuracy can meet the requirements for automatic navigation in corn fields during the seedling stage.

Key words: spraying robot; differential steering; LiDAR; crop row detection; fuzzy control

收稿日期：2024－07－19　修回日期：2024－09－10
基金项目：国家自然科学基金项目(52172396)
作者简介：班超(1996－)，男，博士生，主要从事农业机器人导航技术研究，E-mail: banchao@cau.edu.cn
通信作者：迟瑞娟(1969－)，女，副教授，博士生导师，主要从事农业机械智能控制技术研究，E-mai: chiruijuan@cau.edu.cn

0　引言

玉米苗期喷洒农药是防治病虫害和抑制杂草生长的重要手段，有利于提高农作物产量和质量[1]。目前主要采用背负式喷药器喷洒农药，存在作业效率低、农药喷洒不均匀等问题，而且农药中的有害物质会对身体产生严重危害[2-3]。随着信息技术与机器人技术快速发展，具有自主作业能力的喷药机器人逐渐成为减少人力投入并提高农业生产效率的重要工具，其中自动导航系统是其关键技术。

自动导航系统通常包括定位技术和跟踪控制技术两方面，定位技术用于确定机器人位置，而跟踪控制技术根据定位信息使机器人自动行驶。根据定位技术可将大田机器人自动导航系统分为4类：全球卫星导航系统（Global navigation satellite system，GNSS）、惯性导航系统（Inertial navigation system，INS）、视觉导航系统以及激光雷达导航系统[4-8]。GNSS和INS因其定位技术属于全局定位，更适用于已标注路径的农田，且性能容易受到卫星信号、地磁状态和路径标注精度的影响[9-10]。玉米等大田作物通常按行播种，因此可以通过视觉传感器或激光雷达检测作物行以获取相对定位信息。与基于全局定位的导航系统相比，视觉导航系统和激光雷达导航系统具有部署灵活和避免压苗等优势。由于视觉传感器具有色彩信息丰富和成本低等特点，基于视觉的作物行检测方法已在图像预处理[11-13]、特征提取[14-18]和中心线拟合[19-20]等方面得到了显著进展。然而，视觉传感器容易受到自然光照的影响，无法全天候地为农业机器人提供准确、鲁棒的定位信息。而激光雷达具有不受自然光照强度影响的优势。刘路等[21]基于K-means聚类算法估算玉米点云中心点作为主干区域点，再利用玉米作物成行种植特性引入置信区间去除主干区域离群的聚类点，最终解析出玉米作物行中心线，平均用时为2 s。ZHANG等[22]对点云进行水平条带划分后，利用改进的K-means算法和上一水平条带的候选点提取特征点，最后利用最小二乘法拟合出作物行中心线。REISER等[23]使用欧氏聚类法获取玉米几何中心，再利用初始植株位置和固定植株间距来迭代搜索最佳聚类。以上方法用于苗期玉米时，存在运行时间长或鲁棒性差等不足，难以满足机器人实际作业需求。

在获取到相对定位信息的基础上，机器人需要具备灵活的转向方式和稳定的作物行跟踪控制方法，以快速地调整位姿，避免行驶过程中对作物苗造成损伤。农业机器人转向形式包括阿卡曼转向、差速转向和独立轮转向，差速转向比阿卡曼转向的响应更快，且比独立轮转向具有更简单的控制方式。基于不同转向方式的运动学原理，常见的跟踪控制方法包括PID控制[24-25]、模糊控制[26-27]、神经网络控制等[28]。赖汉荣等[15]以视觉导航系统为基础，针对阿克曼转向原理的玉米除草机器人提出了基于PID算法的转向角决策方法及控制模型。GUYONNEAU等[29]在仿真环境中建立了基于激光雷达感知和模糊控制器的农业机器人导航系统。然而，目前玉米喷药机器人在跟踪作物行方面存在转向响应慢和跟踪控制稳定性差等问题，控制算法与激光雷达检测作物行方法的协调性有待提高。

针对苗期玉米田无人化喷药需求和现有导航系统存在的不足，本文设计一种基于激光雷达检测作物行、模糊控制算法跟踪控制的四轮驱动、差速转向式线控底盘喷药机器人。

1　喷药机器人整机结构与工作原理

1.1　整机结构

我国玉米种植行距通常为0.5~0.6 m，喷药机器人进入玉米田作业时，需要跨作物行行驶且不能损伤作物。为了保证机器人能够在不平坦农田灵活移动并精准喷洒农药，设计机器人整体结构如图1所示，主体为四轮驱动、差速转向式线控底盘，通过车架安装激光雷达导航系统、喷药系统和电控系统硬件。具体地，线控底盘由轮毂电机、橡胶车轮、支腿和车架组成，整机尺寸为1.2 m×0.8 m×1.2 m，最小离地间隙为0.6 m，各支腿内部具有一个电动推杆和一个回形截面滑套，能够使车架高度提升0.25 m，保证机器人作业时具有足够的离地间隙；喷药系统包括药液箱、喷药泵、喷头、喷臂及位置（高度、角度）调节电动推杆，喷臂有效作业幅宽为3 m，作业高度为0.4 ~ 0.8 m，分散安装的8个喷头能够同时对5行以上玉米苗喷洒农药；激光雷达安装在机器人前方，高度约1.1 m，向下倾斜角约15°，以充分利用激光线束对机器人前方环境进行扫描。此外，机器人安装GNSS/INS导航板卡和卫星信号天线，以评估本文激光雷达导航系统性能。整机由锂电池（48 V/ 60 A·h）供电，具有6 h以上的续航时间。

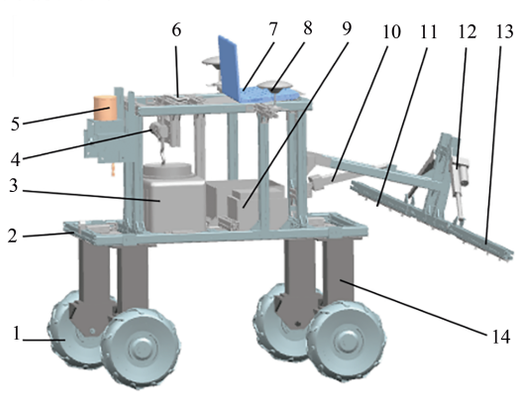


图1　整机结构三维模型

Fig. 1　3D model of whole robot

1. 轮毂电机及橡胶轮　2. 车架　3. 药液箱　4. 喷药泵　5. 激光雷达　6. GNSS/INS导航板卡　7. 便携式计算机　8. 卫星信号天线　9. 锂电池　10. 高度调节电动推杆　11. 喷头　12. 角度调节电动推杆　13. 喷臂　14. 支腿

1.2 工作原理

喷药机器人工作原理如图2所示，激光雷达导航系统根据农田环境向电控系统传输线控底盘的跟踪运动指令，进而使喷药系统向玉米苗喷洒农药，其中激光雷达导航系统由激光雷达定位和跟踪控制2个环节组成。通过32线激光雷达(RS-LiDAR-32，速腾聚创公司)检测作物行并提取定位信息，再利用模糊控制算法进行跟踪控制。在上位机(便携式计算机)中进行激光雷达导航系统数据处理过程，在下位机中实现线控底盘的运动指令。激光雷达与上位机通过UDP协议通信，而上位机与下位机通过RS232协议通信。

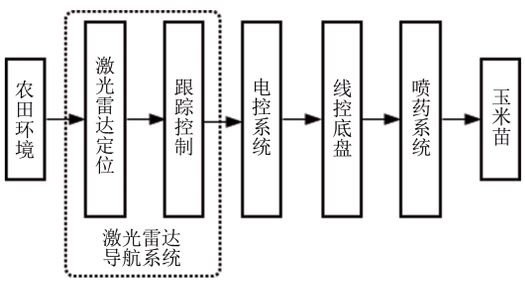


图2 喷药机器人工作原理

Fig. 2 Operating principle of spraying robot

2 关键部件设计

2.1 驱动轮

在田间行驶时，机器人线控底盘驱动轮需要提供足够的驱动力，以克服行驶阻力。机器人通常匀速运动，且受风面积较小，因此本文忽略加速阻力和空气阻力，仅针对滚动阻力和坡度阻力进行分析和轮毂电机选型。机器人受到的行驶阻力为

$$F_\Psi = F_f + F_i = fmg\cos\alpha + mg\sin\alpha \tag{1}$$

式中 F_Ψ——行驶阻力，N

F_f——滚动阻力，N

F_i——坡度阻力，N

f——滚动阻力系数，取0.15[30]

m——整机质量，kg

g——重力加速度，m/s^2

α——路面坡度，(°)

不同玉米田土壤含水率、颗粒度和黏度等条件各不相同，因此以较复杂的行驶条件设定以下计算参数：整机满载质量150 kg、作业速度1 m/s、坡度20°。经计算，机器人行驶阻力F_Ψ为707 N，则4个车轮总驱动力必须大于该值。单个车轮驱动力为

$$F_t = \frac{T_t}{r} = \frac{9\,550P}{n_m r} \tag{2}$$

其中

$$n_m = \frac{30v}{\pi r} \tag{3}$$

式中 F_t——车轮驱动力，N

T_t——电机额定转矩，N·m

r——驱动轮半径，m

P——电机额定功率，kW

n_m——电机转速，r/min

v——喷药机器人运动速度，m/s

选择音旭驱动公司生产的无刷有齿外转子轮毂电机，其具有转速低、扭矩大、故障率低和运转噪声小等优点，主要参数如表1所示。轮毂电机外部装有外径为0.38 m、宽度为0.13 m的充气橡胶轮胎。根据式(2)、(3)计算出单个车轮驱动力为251 N，4轮总驱动力为1 004 N，大于行驶阻力707 N，因此，所选轮毂电机既能保证机器人在转场行驶时具有较高的速度，也能够满足植保作业速度要求(3~5 km/h)。

表1 轮毂电机主要参数

Tab. 1 Main parameters of hub motor

参数	数值
额定电压/V	48
额定功率/W	500
额定扭矩/(N·m)	30
额定转速/(r·min^{-1})	130
质量/kg	6.0
极对数	10

2.2 喷药系统

喷药系统基本工作原理为：喷药泵从药液箱中吸取药液并进行加压，然后通过喷头将农药喷洒在玉米苗上，喷头高度可通过电动推杆调节。喷药泵作为喷药系统的动力源，是提高农药雾化效果的关键。选择普兰迪公司生产的电动隔膜泵(图3a)，其额定电压为12 V，最大功率为60 W，最大输出压力为0.8 MPa，垂直吸程为1.5 m，最大扬程为60 m。选用电动推杆(图3b)的额定电压均为24 V，高度调节电动推杆的运动行程为0.2 m，最大推力为2 000 N；角度调节电动推杆的运动行程为0.15 m，最大推力为1 000 N。当机器人完成喷药任务时，电动推杆可将喷臂折叠至机器人顶部。折叠状态喷臂如图3c所示，能够减小机器人最大宽度，从而防止在转场过程中损伤农作物。



(a) 喷药泵 (b) 电动推杆 (c) 喷臂

图3 喷药系统关键部件

Fig. 3 Key components of spraying system

2.3 电控系统硬件电路及软件设计

电控系统包括控制器(下位机)、轮毂电机驱动器、电磁继电器、L298N电机驱动器和水位预警传感器，整体硬件组成及信号框架如图4所示。控制器选用STM32F407，其通过轮毂电机驱动器实现线控底盘驱动

轮的运动，该驱动器配有转速线、方向线、刹车线和霍尔线，其中转速线根据控制器脉宽调制（Pulse width modulation，PWM）信号调节轮毂电机转速；方向线和刹车线根据控制器I/O口的电平信号控制轮毂电机改变旋转方向或紧急制动；霍尔线用于将电机内部检测转速的霍尔信号传递到控制器的中断口。

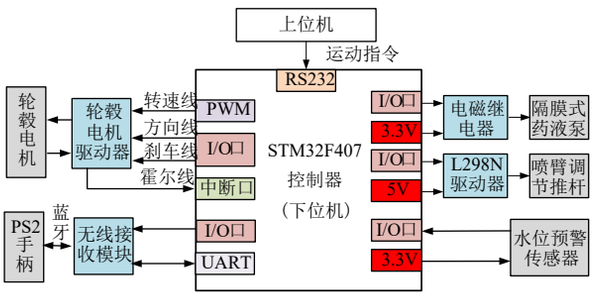


图4　电控系统硬件组成及信号框架

Fig. 4　Hardware composition and signaling framework of electronic control system

控制器通过电磁继电器和L298N电机驱动器分别控制喷药泵和电动推杆的工作。水位预警传感器安装在药液箱外部，当药液箱内液面高度低于阈值时向控制器发送预警信号。此外，控制器加装了无线接收模块，用于接收PS2手柄的按键信号，以便在突发状况下人工临时接管机器人。

基于以上工作原理，在Keil μVision5环境开发控制器软件，整体流程如图5所示。开始工作时，控制器首先对其内部时钟、I/O口电平和串口通讯等进行初始化。当检测到农药量充足时，控制器启动喷药泵并展开喷臂，使喷药系统开始工作。然后更新上位机发布的运动指令，通过PWM信号调节驱动轮转速。当药液量少于阈值时，控制器使机器人返回补充药液。另外，控制器可以根据PS2手柄的按键信号控制机器人线控底盘和喷药系统，以实现人工远程控制。

3　玉米作物行激光雷达检测

作物行检测是获取农业机器人相对定位信息的重要方式。激光雷达不受自然光照的影响，且3D激光雷达比2D激光雷达具有更高的分辨率，因此提出一种基于3D激光雷达的苗期玉米作物行检测方法，该方法主要由3步组成：点云预处理、地面点云滤波和作物行中心线拟合。

3.1　点云预处理

3D激光雷达扫描的原始点云包括玉米苗、地面和杂草等大量数据。为了更加准确、快速地检测玉米作物行，对点云进行安装角度校准、直通滤波和体素滤波预处理。激光雷达向下倾斜安装导致点云不能准确反映地面和玉米苗高度，即地平面会向上倾斜，如图6a所示。将全部点云沿横向坐标轴进行旋转校正，旋转角度根据安装激光雷达时的标定结果确定。与校正前点云相比，经过旋转校正后的点云能够更准确反映玉米苗高度和位置，即地面（橙色）更接近于水平状态，如图6b所示。

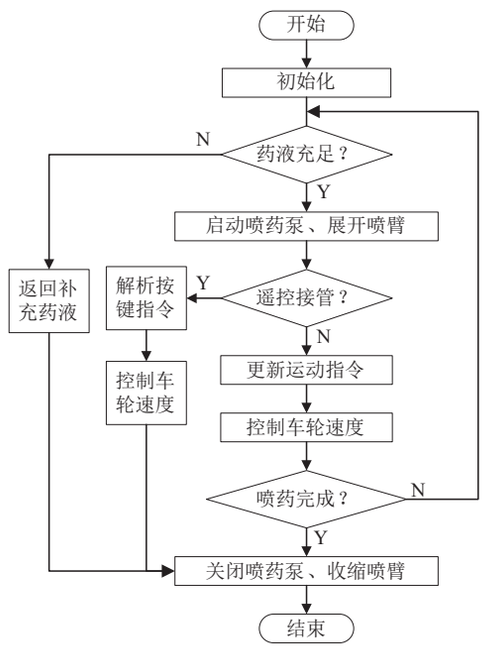
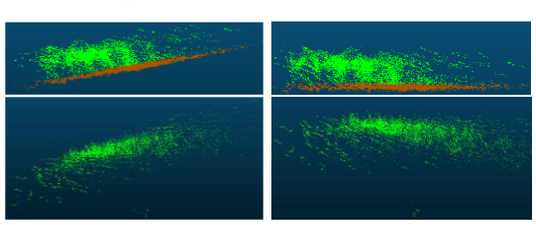


图5　控制器软件流程图

Fig. 5　Controller software flowchart



（a）校正前　　（b）校正后

图6　点云校正结果

Fig. 6　Result of point cloud correction

所选激光雷达的最远有效扫描距离为150 m，大量远距离点是无关数据，因此通过直通滤波器剔除激光雷达前方10 m×5 m区域外的点云数据。最后，对区域内点云使用体素滤波，体素边长设定为0.02 m。如图7所示，经过体素滤波后的点云密度明显下降，但是点云轮廓保持不变。经统计，点云数量缩减至60%左右，有助于加快后续点云处理速度。

3.2　地面点云滤波

经过预处理的点云仍包含大量地面点，对作物行检测造成严重干扰。为了滤除地面点，首先将点云以尺寸1 m×1 m划分点云区域，并提取每个区域中点云最高点与最低点，进而计算高度阈值h_z为

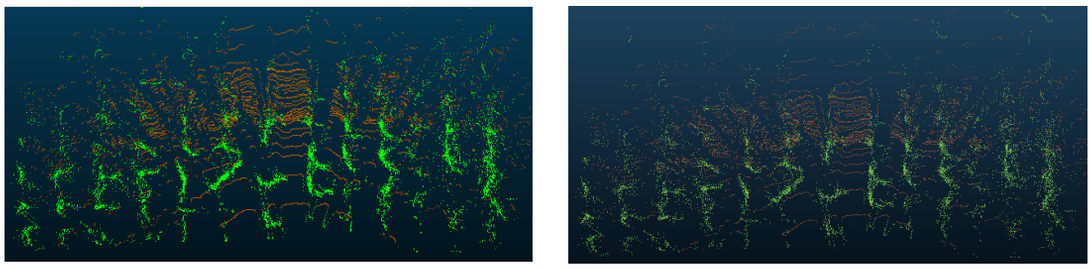
$$h_z = \sum_i^n \frac{z_{\max}^i - z_{\min}^i}{4n} \tag{4}$$

式中　$z_{\max}^i$——区域i中最高点Z坐标，m

$z_{\min}^i$——区域i中最低点Z坐标，m

n——区域划分数量

滤除Z坐标小于阈值h_z的所有点，包括大量地面点



(a) 体素滤波前　　(b) 体素滤波后

图7　体素滤波结果

Fig. 7　Results of voxel filter

和少量玉米茎秆点，结果如图8所示。损失茎秆点数量占比极小，不会对作物行检测造成影响。

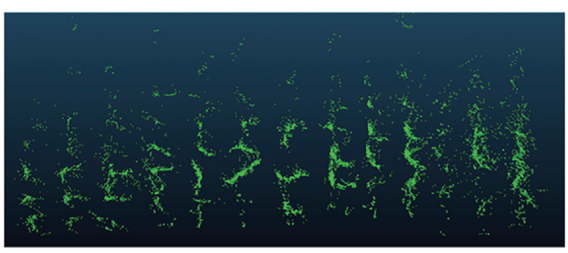


图8　地面点云滤波结果

Fig. 8　Results of ground point cloud filtering

3.3　作物行中心线拟合

作物行中心线提供的相对定位信息不仅可用于机器人自动导航，还能为精准喷药提供数据支持[31]。对于本文玉米喷药机器人，喷臂有效作业幅宽为3 m，能够覆盖常规种植行距的5行玉米苗，因此主要检测并拟合机器人前方及左右两侧各2条作物行中心线。首先利用直通滤波器进一步缩小点云范围，保留横向X轴坐标在−2~2 m范围内的点。由于保留的点云不包含地面，作物行上的点云数量明显多于行间位置。统计点云在X轴上的分布，统计间距为0.05 m，结果如图9所示。为了应对作物行倾斜角较大的场景，将点云根据纵向Y轴坐标均分为两部分后分别进行数量统计，然后根据局部数量极小值将植物点云划分到不同作物行，再将两部分属于相同作物行的点云合并在一起。

将每行玉米点云沿Y轴方向划分为10个区域，分别计算各区域内点云的几何中心作为特征点，并采用随机采样一致性算法对各行特征点进行直线拟合，得到每行玉米作物行中心线为

$$x = k_c y + d_c \tag{5}$$

式中　k_c——直线斜率

d_c——直线在X轴截距，m

作物行中心线拟合结果如图10所示，5条作物行中心线不完全平行。作物行中心线能够提供机器人相对定位信息(偏航角和横向偏差)是跟踪控制的基础。为了向跟踪控制环节提供更稳定的定位信息，以5条作物行中心线共同确定偏航角，即

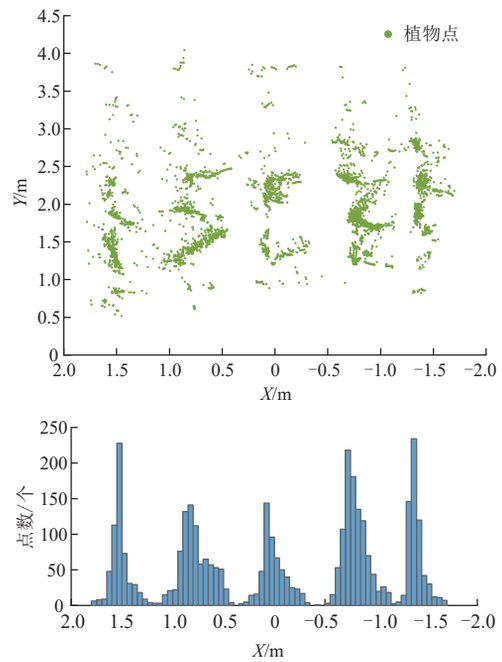


图9　植物点云纵向划分示意图

Fig. 9　Schematic of longitudinal division of plant point cloud

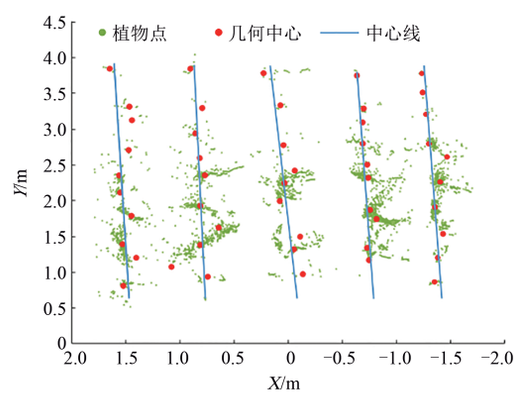


图10　作物行中心线拟合结果

Fig. 10　Results of crop row centerline fitting

$$\Delta\theta = \frac{1}{5}\sum_{i=1}^{5}\arctan(1/k_{i,c}) \tag{6}$$

式中　$k_{i,c}$——第i条作物行中心线斜率

根据机器人正前方作物行中心线确定横向偏差为

$$\Delta d = k_c y_p + d_c \tag{7}$$

式中　y_p——前视距离，m

4　基于模糊控制的作物行跟踪

激光雷达检测玉米作物行的结果提供机器人相对定位信息：偏航角和横向偏差。为了根据相对定位信息快速、稳定地调整机器人位置，进而实现自动跟踪作物行完成喷药作业，本文对线控底盘的运动学模型进行分析，并设计定位信息为输入量、轮速差为输出量的模糊控制器。

4.1　运动学模型

喷药机器人采用四轮独立驱动、差速转向的线控底盘，其运动学模型如图11所示，图中点O_1为旋转中心，R为机器人旋转半径，B为轮距，L为轴距。为了简化模型，作出以下假设：①同侧车轮的转速始终保持同步，且在转向过程中保持匀速。②整机结构对称分布，转向中心与几何中心重合。③4个车轮与接地点处的地面摩擦因数始终相同，且忽略转向过程中的载荷偏移现象。

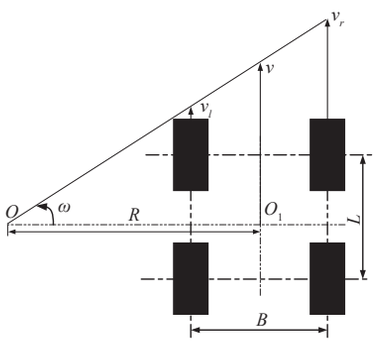


图11　差速转向的运动学模型

Fig. 11　Kinematic model of differential steering

设左、右两侧车轮转速分别为v_l、v_r，则机器人旋转中心O_1处理论速度v为

$$v = \frac{v_l + v_r}{2} \tag{8}$$

机器人旋转角速度ω为

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{v_l}{R - B/2} = \frac{v_r}{R + B/2} \tag{9}$$

联立式(8)、(9)得到机器人运动状态：①当v_l=v_r时，机器人做直线运动。②当v_l=−v_r时，机器人绕几何中心O_1原地旋转。③当v_l和v_r不满足上述条件时，机器人向速度较低的一侧转弯，转向中心为O，转弯半径为

$$R = \frac{B\left(v_l + v_r\right)}{2\left(v_r - v_l\right)} \tag{10}$$

4.2　模糊控制器设计

由于农田地面不平坦且土壤松软，机器人跟踪作物行行驶时容易偏离作物行。因此，基于线控底盘的差速转向运动学原理设计一种模糊控制器，以提高控制精度和响应速度，从而避免车轮对玉米苗造成损伤。模糊控制器以激光雷达检测的相对定位信息（偏航角$\Delta\theta$和横向偏差Δd）为输入量，以左右车轮速度差Δv作为输出量。该控制器工作原理如图12所示，包括模糊化、规则库、模糊推理和解模糊4部分。

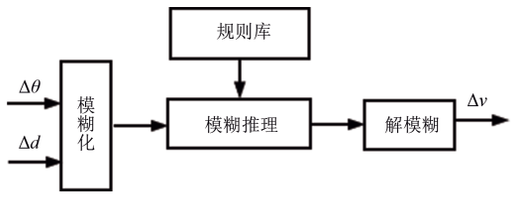


图12　模糊控制框图

Fig. 12　Fuzzy control block diagram

将精确数字量转换为模糊量的过程称为模糊化，其一般方法是将数字量离散化为模糊集。根据机器人在玉米田中的行驶条件，确定横向偏差Δd基本论域为[−20 cm，20 cm]，偏航角$\Delta\theta$基本论域为[−10°，10°]。输出变量Δv的基本论域依据轮毂电机特性和机器人运动学原理设定为[−2 m/s，2 m/s]。为了保证控制器性能，通常选择7个词汇作为模糊集模糊量，分别为：负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(Z)、正小(PS)、正中(PM)和正大(PB)。考虑到三角形隶属度函数灵敏度较高且数学运算较简单，$\Delta\theta$、Δd和Δv均采用三角形隶属度函数建立模糊集，如图13所示。

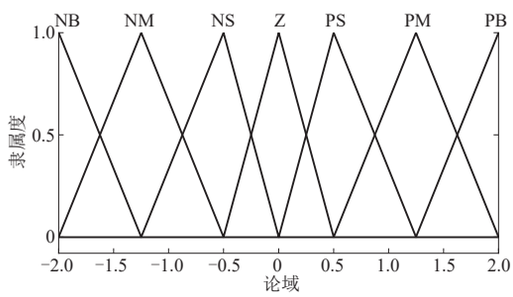


图13　隶属度函数

Fig. 13　Membership functions

规则库是模糊控制器的逻辑推理规则，通常是对机器人操作经验的总结。对于双输入单输出的模糊控制器，描述模糊推理规则语句为

If（$\Delta\theta$ is M）and（Δd is N）then（Δv is C）

其中，M、N、C分别为偏航角、横向偏差、速度差模糊词。

根据喷药机器人遥控操作经验，建立49条控制规则，如表2所示。

表2　规则库

Tab. 2　Rules library

$\Delta\theta$	Δd						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PS	NM	NB	NB
NM	PB	PM	PM	PS	NM	NM	NB
NS	PM	PM	PS	PS	NS	NM	NM
Z	PM	PS	PS	Z	NS	NS	NM
PS	PM	PM	PS	NS	NS	NM	NM
PM	PB	PM	PM	NS	NM	NM	NB
PB	PB	PB	PM	NS	NM	NB	NB

模糊推理采用Mamdani法，应用Matlab绘制出模糊控制的输出曲面，如图14所示。模糊量不能直接控制电机轮速差，因此采用重心法将输出变量Δv解模糊为精

确数字量，以便下位机调整车轮转速PWM信号。

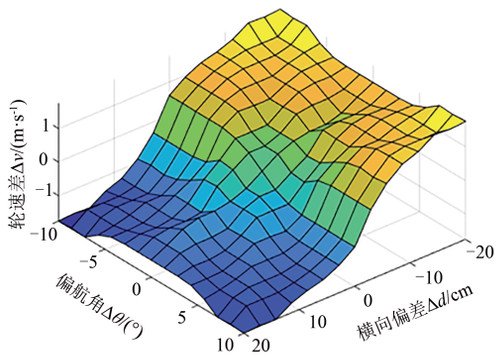


图14 模糊控制输出曲面

Fig. 14 Fuzzy control output surface

5 田间试验

为验证喷药机器人在玉米田间的性能，于2023年5月—2024年8月，在中国农业大学上庄实验站进行机器人行驶性能试验和导航性能试验。其中，机器人行驶性能试验包括爬坡能力试验和差速转向性能试验，而导航性能试验包括作物行检测试验和作物行跟踪试验。

5.1 机器人行驶性能试验

5.1.1 爬坡能力试验

爬坡能力用于评估机器人动力性和稳定性，试验现场如图15所示。根据玉米田常见坡度，人工堆积角约为10°、15°和20°的3个斜坡，角度通过GNSS/INS导航板卡（A1-3L，北云科技公司）获取的俯仰角测量。试验时，机器人药液箱装满药液（水），车轮初始稳定转速为120 r/min，记录各组试验中机器人车轮最低稳定转速，如表3所示。



图15 爬坡能力试验现场

Fig. 15 Climbing test site

表3 爬坡能力试验结果

Tab. 3 Results of climbing test

序号	坡度角/(°)	坡度/%	最低稳定转速/(r·min⁻¹)
1	10	17.63	98
2	15	26.79	67
3	20	36.40	24

由表3可知，随着坡度角增加，机器人驱动轮最低稳定转速逐步降低。特别是在坡度20°试验时，坡度阻力使车轮最低转速降为24 r/min，但机器人仍能够从坡下农田行驶到坡上机耕道，没有发生倾覆现象。因此，机器人可以爬越20°以下斜坡，表现出较好的爬坡能力。这表明其驱动力和稳定性满足田间作业的一般工况要求。

5.1.2 差速转向性能试验

差速转向性能直接影响喷药机器人位姿调整能力。通过机器人原地转向的几何中心位置偏差量来评估其转向性能。试验现场如图16所示，首先在机器人静止状态下分别连接两组对角车轮的接地点，两直线的交点即机器人几何中心点O_1。随后调整轮速差使机器人原地转向360°，以相同的方式得到几何中心点O_1'。最后通过钢尺测量机器人原地转向的几何中心位置偏差。

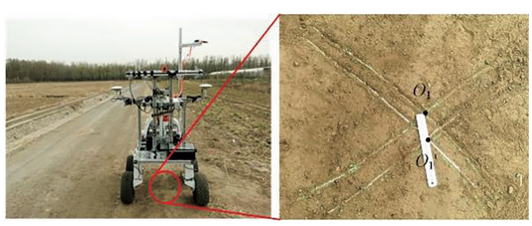


图16 转向性能试验现场

Fig. 16 Steering performance test site

为了使试验结果更加准确，重复5次试验。机器人在差速转向360°的过程中，几何中心位置偏差分别为7.80、8.40、6.50、7.40、8.20 cm，平均值为7.66 cm。而机器人在跟踪作物行行驶过程中所需的差速转向角很小，因此其转向性能可以满足作物行跟踪要求。

5.2 导航性能试验

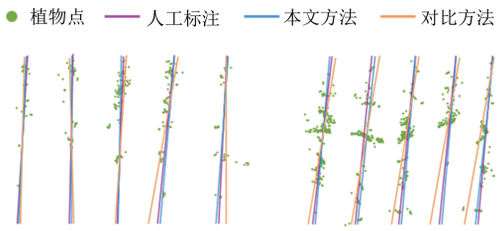
5.2.1 作物行检测

作物行检测精度影响机器人导航性能。玉米三叶期和小喇叭口期是喷洒农药的关键时期，因此选取2个时期各50帧点云测试作物行检测精度。在测试时，以人工标注直线作为真值，将本文方法与对比方法[32]分别进行作物行检测，使用平均误差角$\bar{\theta}$与平均运行时间$\bar{T}$作为评价指标。运行方法的便携式计算机具有Intel i5-13500H型CPU和16 GB内存。

将2种检测方法的结果与人工标注值进行对比，结果如图17所示。与三叶期玉米苗相比，小喇叭口期玉米植株更高、冠层更宽，因此植物点数量更多。对于2个时期玉米苗，本文方法比对比方法[32]检测的作物行中心线更加接近人工标注值。

统计所有点云检测结果如表4所示，对于不同生长时期的苗期玉米，本文方法均具有较高的检测精度，比对比方法[32]平均误差角小2.07°~2.74°，故确定的相对定位信息更有利于机器人跟踪控制。在计算效率方面，本文方法平均运行时间比对比方法[32]短0.012 s，且平均运

行时间比激光雷达采集点云的周期(0.1 s)短，因此本文作物行检测方法满足实时性要求。



(a) 三叶期　　(b) 小喇叭口期

图 17　作物行检测结果对比

Fig. 17　Comparison of crop row detection results

表 4　作物行检测试验的结果

Tab. 4　Results of crop row detection test

生长时期	本文方法		对比方法	
	$\bar{\theta}$/(°)	$\bar{T}$/s	$\bar{\theta}$/(°)	$\bar{T}$/s
三叶期	0.93	0.031	3.67	0.043
小喇叭口期	0.85	0.031	2.92	0.043

5.2.2　作物行跟踪

为了测试激光雷达导航系统综合性能，随机选取苗期玉米田进行 6 次作物行跟踪试验。试验现场如图 18 所示，玉米苗高度约 25 cm，农田地面土壤松软且具有少量杂草，机器人行驶速度为 0.5 m/s，同时利用 GNSS/INS 板卡以频率 1 Hz 记录机器人运动位置。行驶结束后，通过 GNSS/INS 板卡打点的方式获取机器人期望轨迹。

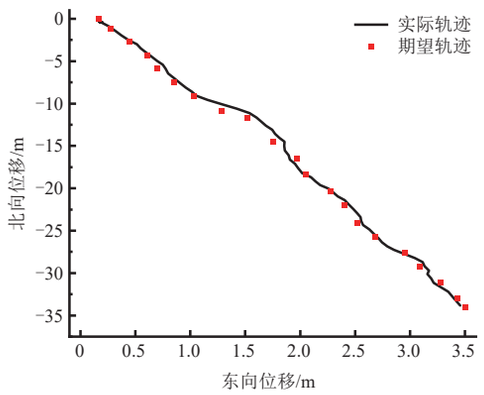


图 18　作物行跟踪试验现场

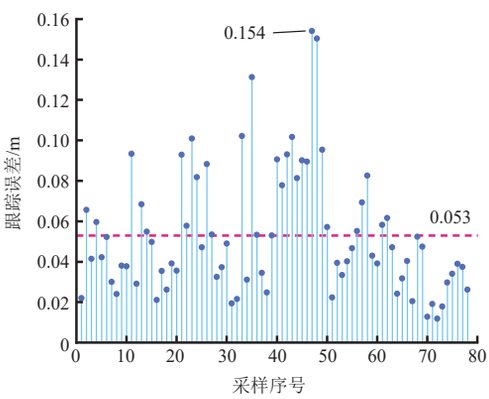
Fig. 18　Test site for crop row tracking

将 GNSS/INS 导航板卡记录的经纬度坐标投影到东北天(ENU)坐标系，其中一次试验结果如图 19 所示。期望轨迹显示作物行不是纯直线，这符合人工播种的普遍现象。在激光雷达检测作物行与模糊控制器共同作用下，机器人实际轨迹与期望轨迹接近，跟踪误差在作物行弯曲处较大，最大值为 0.154 m，平均值为 0.053 m。

6 次作物行跟踪试验结果如表 5 所示，激光雷达导航系统跟踪作物行平均误差为 0.061 m，标准差为 0.038 m。试验结果表明，激光雷达导航系统能够使玉米喷药机器人高精度地自动行驶。



(a) 作物行跟踪轨迹



(b) 跟踪误差

图 19　单次跟踪试验结果

Fig. 19　Single tracking test results

表 5　作物行跟踪试验结果

Tab. 5　Crop row tracking test results　　m

序号	平均误差	标准差	最大误差
1	0.053	0.031	0.154
2	0.069	0.043	0.185
3	0.056	0.041	0.165
4	0.071	0.040	0.165
5	0.062	0.041	0.165
6	0.053	0.030	0.163
平均值	0.061	0.038	

6　结论

(1)设计了一种基于激光雷达导航的四轮驱动、差速转向式线控底盘喷药机器人，并对其关键部件进行设计。

(2)研究了激光雷达导航系统，提出了通过作物点云数量统计和分段几何中心拟合的作物行检测方法，并构建了基于线控底盘轮速差的双输入单输出模糊控制器。

(3)机器人行驶性能试验结果显示，机器人可爬越 20°以下斜坡，差速原地转向 360°时的几何中心位置平均偏差为 7.66 cm，具有足够的驱动力和较好的转向灵活性。

(4)激光雷达检测作物行试验结果显示,其在三叶期和小喇叭口期的平均误差角分别为0.93°和0.85°,平均检测时间为0.031 s,满足实时性要求。与对比方法相比,本文方法的平均误差角小2.07°~2.74°,平均运行时间短0.012 s。

(5)作物行跟踪试验结果表明,激光雷达导航系统的平均跟踪误差为0.061 m,标准差为0.038 m,表明激光雷达导航系统具有较高的精度,能够使本文机器人在苗期玉米田自动行驶。

参 考 文 献

[1] MESHRAM A T, VANALKAR A V, KALAMBE K B, et al. Pesticide spraying robot for precision agriculture: a categorical literature review and future trends[J]. Journal of Field Robotics, 2022, 39(2): 153 - 171.

[2] 闫全涛,李丽霞,邱权,等.小型移动式农业机器人研究现状及发展趋势[J].中国农机化学报,2019,40(5):178 - 186.
YAN Quantao, LI Lixia, QIU Quan, et al. Research status and development trends of small mobile agricultural robots [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(5): 178 - 186. (in Chinese)

[3] 何雄奎.中国精准施药技术和装备研究现状及发展建议[J].智慧农业(中英文), 2020, 2(1): 133 - 146.
HE Xiongkui. Research progress and developmental recommendations on precision spraying technology and equipment in China[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(1): 133 - 146. (in Chinese)

[4] 张漫,季宇寒,李世超,等.农业机械导航技术研究进展[J].农业机械学报, 2020, 51(4): 1 - 18.
ZHANG Man, JI Yuhan, LI Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(4):1 - 18. (in Chinese)

[5] BAN C, WANG L, CHI R, et al. A Camera-LiDAR-IMU fusion method for real-time extraction of navigation line between maize field rows [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 223: 109114.

[6] BAI Y, ZHANG B, XU N, et al. Vision-based navigation and guidance for agricultural autonomous vehicles and robots: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 205: 107584.

[7] 陈学庚,温浩军,张伟荣,等.农业机械与信息技术融合发展现状与方向[J].智慧农业(中英文), 2020, 2(4): 1 - 16.
CHEN Xuegeng, WEN Haojun, ZHANG Weirong, et al. Advnces and progress of agricultural machinery and sensing technology fusion [J]. Smart Agriculture, 2020, 2(4): 1 - 16. (in Chinese)

[8] SHI J, BAI Y, DIAO Z, et al. Row detection based navigation and guidance for agricultural robots and autonomous vehicles in row-crop fields: methods and applications[J]. Agronomy, 2023, 13(7): 1780.

[9] YAN B, WU G. Development and evaluation of a seed position mapping system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 190: 106446.

[10] 赵航,纪新春,陆一,等.面向车辆导航的多用户云端地磁匹配定位技术研究[J].传感技术学报, 2022, 35(6): 844 - 849.
ZHAO Hang, JI Xinchun, LU Yi, et al. Research on technology of geomagnetic-matching cloud positioning for multi-user vehicle navigation[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2022, 35(6): 844 - 849. (in Chinese)

[11] ZHAI Z, ZHU Z, DU Y, et al. Multi-crop-row detection algorithm based on binocular vision[J]. Biosystems engineering, 2016, 150: 89 - 103.

[12] 杨洋,张博立,查家翼,等.玉米行间导航线实时提取[J].农业工程学报, 2020, 36(12): 162 - 171.
YANG Yang, ZHANG Boli, ZHA Jiayi, et al. Real-time extraction of navigation line between corn rows [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(12): 162 - 171. (in Chinese)

[13] 孟笑天,徐艳蕾,王新东,等.基于改进K均值特征点聚类算法的作物行检测 [J].农机化研究, 2020, 42(8): 26 - 30.
MENG Xiaotian, XU Yanlei, WANG Xindong, et al. Crop line detection based on improved K-means feature point clustering algorithm [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(8): 26 - 30. (in Chinese)

[14] DIAO Z, GUO P, ZHANG B, et al. Navigation line extraction algorithm for corn spraying robot based on improved YOLOv8s network[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 212: 108049.

[15] 赖汉荣,张亚伟,张宾,等.玉米除草机器人视觉导航系统设计与试验 [J].农业工程学报, 2023, 39(1): 18 - 27.
LAI Hanrong, ZHANG Yawei, ZHANG Bin, et al. Design and experiment of the visual navigation system for a maize weeding robot[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(1): 18 - 27. (in Chinese)

[16] GUO Z, QUAN L, SUN D, et al. Efficient crop row detection using transformer-based parameter prediction[J]. Biosystems Engineering, 2024, 246: 13 - 25.

[17] GUERRERO J M, GUIJARRO M, MONTALVO M, et al. Automatic expert system based on images for accuracy crop row detection in maize fields[J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40(2): 656 - 664.

[18] 张硕,刘禹,熊坤,等.基于特征工程的大田作物行中心线识别方法 [J].农业机械学报, 2023, 54(增刊1): 18 - 26.
ZHANG Shuo, LIU Yu, XIONG Kun, et al. Center line detection of field crop rows based on feature engineering [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 18 - 26. (in Chinese)

[19] 李霞,苏筠皓,岳振超,等.基于中值点Hough变换玉米行检测的导航线提取方法 [J].农业工程学报, 2022, 38(5): 167 - 174.
LI Xia, SU Yunhao, YUE Zhenchao, et al. Extracting navigation line to detect the maize seedling line using median-point Hough transform[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(5): 167 - 174. (in Chinese)

[20] ZHANG X, LI X, ZHANG B, et al. Automated robust crop-row detection in maize fields based on position clustering algorithm and shortest path method[J]. Computers and electronics in agriculture, 2018, 154: 165 - 175.

[21] 刘路,潘艳娟,陈志健,等.高遮挡环境下玉米植保机器人作物行间导航研究 [J].农业机械学报, 2020, 51(10): 11 - 17.
LIU Lu, PAN Yanjuan, CHEN Zhijian, et al. Inter-rows navigation method for corn crop protection vehicles under high occlusion environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 11 - 17. (in Chinese)

[22] ZHANG S, MA Q, CHENG S, et al. Crop row detection in the middle and late periods of maize under sheltering based on solid state LiDAR[J]. Agriculture, 2022, 12(12): 2011.

[23] REISER D, VÁZQUEZ-ARELLANO M, PARAFOROS D S, et al. Iterative individual plant clustering in maize with assembled 2D LiDAR data[J]. Computers in Industry, 2018, 99: 42 - 52.

[24] 丁幼春，何志博，夏中州，等. 小型履带式油菜播种机导航免疫PID控制器设计[J]. 农业工程学报，2019，35(7)：12－20.
DING Youchun，HE Zhibo，XIA Zhongzhou，et al. Design of navigation immune controller of small crawler-type rape seeder[J]. Transactions of the CSAE，2019，35(7)：12－20.(in Chinese)
[25] 胡炼，罗锡文，张智刚，等. 株间除草装置横向偏移量识别与作物行跟踪控制[J]. 农业工程学报，2013，29(14)：8－14.
HU Lian，LUO Xiwen，ZHANG Zhigang，et al. Side-shift offset identification and control of crop row tracking for intra-row mechanical weeding[J]. Transactions of the CSAE，2013，29(14)：8－14.(in Chinese)
[26] 焦俊，陈靖，乔焰，等. 直流电机驱动农用履带机器人轨迹跟踪自适应滑模控制[J]. 农业工程学报，2018，34(4)：64－70.
JIAO Jun，CHEN Jing，QIAO Yan，et al. Adaptive sliding mode control of trajectory tracking based on DC motor drive for agricultural tracked robot[J]. Transactions of the CSAE，2018，34(4)：64－70.(in Chinese)
[27] 唐小涛，陶建峰，李志腾，等. 自动导航插秧机路径跟踪系统稳定性模糊控制优化方法[J]. 农业机械学报，2018，49(1)：29－34.
TANG Xiaotao，TAO Jianfeng，LI Zhiteng，et al. Fuzzy control optimization method for stability of path tracking system of automatic transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(1)：29－34.(in Chinese)
[28] 翟丽，孙逢春，谷中丽. 电子差速履带车辆转向转矩神经网络PID控制[J]. 农业机械学报，2009，40(2)：1－5，31.
ZHAI Li，SUN Fengchun，GU Zhongli. Neural networks PID control of steering torque for electronic differential tracked vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2009，40(2)：1－5，31.(in Chinese)
[29] GUYONNEAU R，MERCIER F，OLIVEIRA F G. LiDAR-only crop navigation for symmetrical robot[J]. Sensors，2022，22：8918.
[30] 候志伟. 轮式果园作业平台性能分析与仿真[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2016.
HOU Zhiwei. Performance analysis and simulation of wheel rochard work platform[D]. Yanglin：Northwest A&F University，2016.(in Chinese)
[31] 韩长杰，郑康，赵学观，等. 大田甘蓝作物行识别与对行喷雾控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(6)：89－101.
HAN Changjie，ZHENG Kang，ZHAO Xueguan，et al. Design and experiment of row identification and row-oriented spray control system for field cabbage crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(6)：89－101.(in Chinese)
[32] BIGLIA A，ZAMAN S，GAY P，et al. 3D point cloud density-based segmentation for vine rows detection and localisation[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2022，199：107166.

(上接第144页)

[25] 王梓藤. 四旋翼无人机驱动器闭环对姿态稳定性影响的研究[D]. 银川：宁夏大学，2016.
WANG Ziteng. Research on the impact of closed-loop actuators on the attitude stability of quad rotor unmanned aerial vehicles[D]. Yinchuan：Ningxia University，2016.(in Chinese)
[26] 申珊颖. 斜十字四旋翼飞行器实验建模与控制技术研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2013.
SHEN Shanying. Experimental modeling and control technology research of the skewed cross quad rotor unmanned aerial vehicle[D]. Nanjing：Nanjing University of Aeronautics and Astronautics，2013.(in Chinese)
[27] CHEN G，LI Z，ZHANG Z，et al. An improved ACO algorithm optimized fuzzy PID controller for load frequency control in multi area interconnected power systems[J]. IEEE Access，2019，8：6429－6447.
[28] 姬帅生. 农用无人机云台关键技术研究[D]. 杭州：浙江大学，2020.
JI Shuaisheng. Research on key technologies of gimbals for agricultural unmanned aerial vehicles[D]. Hangzhou：Zhejiang University，2020.(in Chinese)
[29] 杨飞，刘刚，刘寅，等. 基于机器视觉的农机具自动导航系统[C]//中国农业工程学会2011年学术年会论文集，2011.
[30] 张漫，季宇寒，李世超，等. 农业机械导航技术研究进展[J]. 农业机械学报，2020，51(4)：1－18.
ZHANG Man，JI Yuhan，LI Shichao，et al. Research progress on agricultural machinery navigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(4)：1－18.(in Chinese)
[31] 李健. 基于模糊PID的无人水下机器人运动控制研究[D]. 大连：大连理工大学，2016.
LI Jian. Research on the motion control of unmanned underwater robots based on fuzzy PID[D]. Dalian：Dalian University of Technology，2016.(in Chinese)
[32] 孙铭. 基于模糊PID控制的供热系统优化研究[D]. 长春：吉林化工学院，2022.
SUN Ming. Optimization study of heating system based on fuzzy PID control[D]. Changchun：Jilin Chemical Industry College，2022.(in Chinese)
[33] CHEN P Y，CHEN G Y. The design of a TLD and fuzzy-PID controller based on the autonomous tracking system for quad rotor drones[J]. Intelligent Automation & Soft Computing，2020，26(3)：25－27.
[34] 齐文超，李彦明，张锦辉，等. 丘陵山地拖拉机车身调平双闭环模糊PID控制方法[J]. 农业机械学报，2019，50(10)：17－23，34.
QI Wenchao，LI Yanming，ZHANG Jinhui，et al. Dual closed-loop fuzzy PID control method for leveling of tractor body in hilly and mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50(10)：17－23，34.(in Chinese)
[35] 张雪飞，袁鹏，谭俊哲，等. 基于模糊PID的无人帆船航向控制方法[J]. 中国舰船研究，2019，14(6)：15－21.
ZHANG Xuefei，YUAN Peng，TAN Junzhe，et al. Course control method for unmanned sailboat based on fuzzy PID[J]. Chinese Journal of Ship Research，2019，14(6)：15－21.(in Chinese)
[36] 随何虎. 巡检四旋翼无人机的自主飞行研究及应用[D]. 武汉：武汉理工大学，2018.
SUI Hehu. Research and application of autonomous flight for patrol quad rotor unmanned aerial vehicles[D]. Wuhan：Wuhan University of Technology，2018.(in Chinese)