

胡炼、刘海龙、何杰,等. 智能除草机器人研究现状与展望 [J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(1): 34-42.
HU Lian, LIU Hailong, HE Jie, et al. Research progress and prospect of intelligent weeding robot[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023, 44(1): 34-42.

特约综述

智能除草机器人研究现状与展望

胡 炼^{1,2}✉, 刘海龙¹, 何 杰^{1,2}✉, 陈高隆¹, 王志敏¹, 王晨阳¹

(1 南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广东 广州 510642; 2 广东省农业人工智能
重点实验室/华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642)

摘要: 杂草控制是农业生产中必然面临的重要问题, 随着机器人技术、自动化技术融入农业生产, 各类除草机器人应运而生, 有效地减少了化学药剂对环境的污染。本文综述了除草机器人的智能感知技术、机器人平台和除草装置 3 个部分的研究现状, 分析了作物行与杂草识别技术、除草机器人平台结构和机械除草装置智能化控制方式等存在的不足, 并从智能化感知、精准化除草、高效化作业和智慧化管理等 4 个方面对智能除草机器人的未来发展趋势进行了展望。

关键词: 智慧农业; 除草机器人; 智能感知; 机器人平台; 除草装置

中图分类号: S124.15

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2023)01-0034-09

Research progress and prospect of intelligent weeding robot

HU Lian^{1,2}✉, LIU Hailong¹, HE Jie^{1,2}✉, CHEN Gaolong¹, WANG Zhimin¹, WANG Chenyang¹

(1 Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, Guangzhou 510642, China; 2 Guangdong Provincial Key Laboratory of Agricultural Artificial Intelligence/
College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Weed control is an important issue that must be faced in agricultural production. With the integration of robotics and automation technology into agricultural production, various weeding robots emerge as the times require, effectively reducing the pollution of chemicals to the environment. In this paper, the research status of intelligent sensing technology, robot platform and weeding device of weeding robot are reviewed, and the shortcomings of crop row and weed identification technology, structure of weeding robot platform and intelligent control method of mechanical weeding device are analyzed. The future development trend of intelligent weeding robot is prospected from four aspects of intelligent perception, precise weeding, efficient operation and intelligent management.

Key words: Smart agriculture; Weeding robot; Intelligent perception; Robot platform; Weeding device

在农业生产活动中, 杂草问题不可避免, 直接 1 430 种 (变种), 分布广、发生量大。每年由于杂草
或间接地影响着农业生产^[1]。我国有田园杂草 危害造成作物产量损失约 10%, 粮食减产达 6 000 万 t,

收稿日期: 2022-03-28 网络首发时间: 2022-06-11 16:39:20

首发网址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20220610.1630.002.html>

作者简介: 胡 炼, 青年教授, 博士, 主要从事智能农机装备和无人农场研究, E-mail: lianhu@scau.edu.cn; 通信作者:
何 杰, 实验师, 博士, 主要从事农业机械导航和无人农场研究, E-mail: hooget@scau.edu.cn

基金项目: 广东省科技计划 (2021B1212040009); 佛山市科技创新项目 (2120001008424); 国家现代农业技术体系 (CARS-13)

经济损失达 2 200 亿元。由此可见, 解决杂草问题刻不容缓。随着我国农业技术的发展和对外除草技术的引进、改良, 新的除草方法陆续出现, 主要包括化学除草和非化学除草 2 大类^[2]。目前以化学除草为主, 然而弊端已逐渐显现: 其一, 农田长期过量使用除草剂造成土壤农药残留和积累; 其二, 过度使用化学除草剂造成了全球环境污染^[3], 进而危害人体、动物健康; 其三, 加快了有抗性杂草的群落更替, 杂草抗药性增强。化学除草方法难以满足我国现代农业生产的需求, 不利于我国农业可持续发展^[4]。为避免化学除草剂带来的危害, 非化学除草方法中的机械除草得到研究和应用推广^[5]。近年来, 人工智能、智能感知、机器人技术不断融入农业生产, 智能除草机器人应运而生, 推动着机械除草技术(主要涉及智能感知、作物与杂草识别、运动平台以及除草装置控制等技术^[6])向自动化、智能化方向转型升级。智能除草机器人能够有效地减少劳动成本, 提高生产效率, 减少环境污染^[7-9]。随着智慧农业发展, 无人农场开始建设实践, 农业机器人将会是无人农场必不可少的智能装备。本文从智能感知技术、除草机器人平台和机械除草装置 3 个方面介绍了智能除草机器人关键技术的研究现状, 并对智能除草机器人的未来发展趋势进行了展望, 以期 为智能除草机器人的研究提供借鉴。

1 智能感知技术

基于多源信息融合的智能感知是机器人支撑技术之一, 可综合分析环境和作业对象的类别与属性, 达到智能感知的目的。机械除草的作业要求是在不损伤作物的同时去除杂草, 因此, 智能感知技术主要通过作物行识别技术和杂草识别技术区分作物和杂草。

1.1 作物行识别技术

精准农业的除草、施肥、施药作业离不开作物行准确识别定位技术。图像处理技术具有识别准确性高、成本较低、处理速度快、鲁棒性较强等优点, 已逐渐成为精准农业中作物行提取的重要技术^[10]。根据农田环境特征, 作物行识别主要可分为旱地作物行识别和水田作物行识别。

1.1.1 旱地作物行识别 20 世纪后期, 国外已提出一整套视觉计算的理论^[11-12]。随后, Reid 等^[13]使用阈值分割和贝叶斯分类器成功实现棉花与土壤的图像分割。Fontaine 等^[14]采用 Hough 变换算法成功提取农田图像里的直线信息。Gée 等^[15]将图像利用双 Hough 变换算法提取作物行的消失点, 并以消失

点在 Hough 空间中的表示来标识各作物行对应的直线。李茗萱等^[16]提出了一种 SF 算法, 用 2G-R-B 算法分割原始小麦图片的目标, 用最大类间方差法提取目标, 经过膨胀、腐蚀、滤波, 提取作物行信息。翟志强等^[17]采用基于 Census 变换算法检测双目视觉图像中棉苗行特征角点, 提取绿色棉苗行特征, 拟合作物行中心线, 结果表明, 在非地头区域, 棉苗行中心线的正确识别率大于 92%。陈子文等^[18]针对生菜和绿甘菜提出利用自动 Hough 变换累加阈值的方法提取蔬菜作物行中心线, 结果表明, 在田间和温室中作物行的识别准确率分别为 86.7% 和 93.3%。孟笑天^[10]通过改变 RGB 结构模型中绿色分量的比重, 提出了改进的超绿法灰度化图像处理算法, 改进 K 均值聚类算法与最小二乘法, 使拟合苗期玉米苗带的识别精度达 93%。罗晨晖^[19]改进了双信息融合的植株作物行识别方法, 利用 Kinect 获取目标植株信息, 转换为 HSI 颜色模型, 利用采样一致性配准 (Sample consensus initial alignment, SAC-IA) 方法找到变换关系进行粗配准, 再使用迭代最近点 (Iterative closest point, ICP) 算法与 S 分量图精确配准, 通过粒子群优化 (Particle swarm optimization, PSO) 算法循环优化得到聚类中心, 最后使用最小二乘法拟合路径, 实现作物行识别。

1.1.2 水田作物行识别 水田主要种植水稻及其他水生作物, 水田农作物尤以水稻为主, 展开的相关研究多围绕于水稻。Choi 等^[20]通过 K-means 聚类分析算法、线性回归的方法识别出作物行, 结果表明机器人可跟随水稻识别导线行进, 角度偏差小于 1°。曾勇等^[21]提出一种结合傅里叶变换进行膨胀和腐蚀的方法, 提取秧苗列轮廓, 改良逆投影变换, 得到实际田间水稻苗列位置, 对苗列中心线识别与提取导航基准线的准确率为 95.2%。王姗姗等^[22]提出一种基于特征点邻域 Hough 变换的水稻秧苗行检测方法, 结果表明, 测试集秧苗行平均识别准确率达到 92%。黄小刚^[23]提出一种水田除草机器人秧苗识别算法, 根据秧苗的 S 分量较背景明显的特性, 在 HSI 颜色空间中分离出目标区域。采用 K-means 算法、聚类分析和 Hough 变换法拟合水稻秧苗特征点, 得到导航中心线。贺静等^[24-25]提出了一种基于贝叶斯决策理论和鲁棒回归最小二乘法的水稻行视觉检测方法, 基于多传感器融合准确识别出水稻行, 实现农机跟踪水稻行导航, 减少了田间管理机械对水稻的碾压。

可见, 旱地和水田作物行识别算法相似, 但水田环境更加复杂。一是水田中倒像和镜像效应严重,

稻草、浮萍、蓝藻等的颜色特征难以分辨，而自然风又导致相邻稻行重叠，水稻行信息不明显^[25]；二是水田硬底层不平，水田作业机具位姿变化频繁，导致水稻行信息易断行、倾斜和重叠^[26-27]。因此，水田作物行识别算法应具有更强的适应性和鲁棒性，甚至需要采用多传感器融合方法以提高识别精度。

1.2 杂草识别技术

1.2.1 传统图像处理技术 快速准确识别出不同种类杂草和农作物是实现自动化精准除草作业的必要条件，是解决杂草防治问题的关键^[28-29]。随着计算机技术、网络技术以及视觉技术的发展，快速精准的机器视觉技术在杂草识别上的应用越来越广泛，显著提高了除草机械的作业能力，为精准除草方式的自动化、智能化发展提供了技术保证^[30]。

传统图像处理技术对杂草检测时，通过提取图像颜色、形状、纹理等特征进行杂草识别^[31]，需要手动设计特征，且高度依赖图像采集方法、预处理方法和特征提取的质量^[32]。Arroyo 等^[33]用实时学习的方法对苗、草图像进行特征提取，将直方图数据作为 K -邻近 (K -Nearest neighbor, K -NN) 算法的输入，从而达到对图像分割时阈值的自适应性。王佳玉等^[34]通过 MATLAB 的图像处理技术分割判定杂草，无人机田间杂草取样，利用绿色植物与周边环境的不同分离植物与环境，通过分割与降噪得到只剩杂草的图像，为除草机器智能化奠定基础。吴兰兰等^[35]提出了基于视觉注意模型的苗期油菜杂草图像检测方法，在不同检测背景下提高了杂草识别的准确率，处理结果如图 1 所示。苗中华等^[36]基于图像处理多算法融合的田间杂草检测方法，通过设置颜色空间阈值分割土壤背景，采用面积阈值、模板匹配和饱和度阈值 3 种方法对作物和杂草进行分类，大豆田间试验结果 (图 2) 表明，杂草识别精度达 98.21%。王璨等^[37]以 2~5 叶苗期玉米及杂草为对象，建立融合高度特征与单目图像特征的支持向量机 (Support vector machine, SVM) 识别模型，

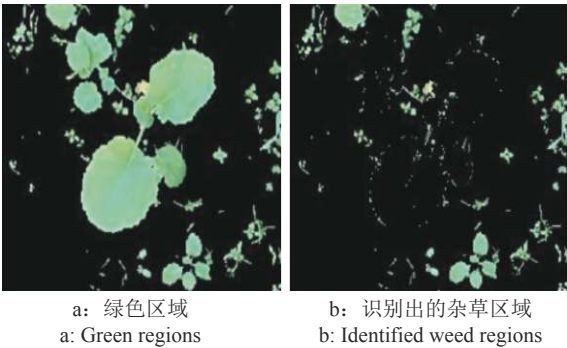


图 1 油菜地的杂草图像检测
Fig. 1 Image detection of weeds in rape field



红点为杂草
Red dots are weeds
图 2 大豆田杂草定位图
Fig. 2 Location map of weeds in soybean field

测试结果表明，杂草识别准确率为 98.33%。

1.2.2 深度学习 随着计算机硬件成本降低以及 CPU 计算能力提高，需要大量数据运算的深度学习逐渐拓展到农业领域，深度学习方法提取的杂草特征比手动提取特征更有效。Tiwari 等^[38]基于深度学习的方法在杂草识别与分类方面获得了良好的效果。彭明霞等^[39]融合特征金字塔网络 (Feature pyramid networks, FPN) 的快速的基于区域的卷积神经网络 (Faster reigion-based convolutional neural networks, Faster R-CNN)，提出在复杂背景下高效识别棉田杂草方法，检测效果较好。Dos Santos Ferreira 等^[40]采用 Caffe Net 架构训练神经网络，在杂草检测方面的准确率达到到了 97%。乔永亮等^[41]提出了一种基于多光谱图像和 SVM 的杂草识别新方法，通过多光谱成像仪获得玉米与杂草图像，采用红外辐射-红色 (Infrared radiation-red, IR-R) 的多光谱融合技术、形态学处理以及主成分分析，建立模型识别杂草，杂草识别率达到 85%。尚建伟等^[42]针对复杂背景下甜菜田杂草检测，改进 Unet 网络技术，设计图像分割网络 Res-Unet，采用 Resnet50 网络代替 Unet 主干网络，解决复杂背景下农作物与杂草区域提取困难、小植株检测效果差、分割边缘震荡和变形等问题，结果表明使用 Res-Unet 模型的平均交并比为 82.25%，平均像素准确率为 98.67%。

在深度学习算法中，通过卷积神经网络 (Convolutional neural network, CNN) 可提取杂草的多尺度和多维空间语义特征信息，提高杂草识别准

准确率^[43]。孙俊等^[44]针对作物与杂草的识别, 提出了空洞卷积结合全局池化的优化方法, 优化后的 Alex Net 模型, 克服了模型参数大、特征尺度单一的问题, 获得了较好的识别效果。徐艳蕾等^[45]改进 Xception 模型, 采用指数线性单位 (Exponential linear unit, ELU) 作为模型的激活函数, 通过训练得到最佳的、基于轻量卷积网络的杂草识别模型, 以 8 类杂草及苗期玉米为研究对象, 平均测试识别准确率达 98.63%。朱熠^[46]以玉米苗期为试验对象, 基于深度学习方法, 对 Faster R-CNN 模型中的网络候选框 (Region proposal network, RPN) 结构进行调整, 得到最优检测模型, 从而区分玉米幼苗与杂草, 用于株间除草作业, 为机械除草装置的精准控制提供了准确目标定位。

机器学习算法对不同类型的作物与杂草进行高精度分类存在一定困难, 而采用 CNN 能有效避免传统机器视觉方法中特征提取过程带来的主观性, 提高杂草识别精度, 且深度学习能够自动提取图像的深层特征, 具有更强的表征能力和独特的网络特征结构, 因此深度学习在杂草识别领域成为新的研究热点^[47-50]。

2 除草机器人平台

不同的作物和作业环境均会影响除草机器人在田间的除草效率。普适性的除草机器人应具有良好的行走通过性能^[51-52], 除草机器人平台多种多样, 常见的机器人平台包括轮式、履带式、足式和复合式。

2.1 轮式除草机器人平台

轮式农业机器人结构简单、易控制、行走灵活, 受到国内外研究者青睐, 也是目前研究最多的农业机器人, 其优点主要包括成本低、负载能力大、驱动和控制方式简单、行进速度快以及平稳性较好等^[53]。罗锡文等^[54]研发了多功能机器人移动平台, 张春龙等^[55]研发了高地隙锄草机器人平台, 樊正强^[56]搭建了农业机器人移动平台 Agri Rover01, 并提出了扩展阿克曼转向策略的移动平台协调运动控制。Bakker 等^[57]设计了一款除草机器人, 该平台结构为四轮转向和驱动, 利用全球导航定位系统来确定移动平台的路径位置 (图 3)。于鑫等^[58]设计了一种可以适应非结构化地形的主动万向轮式农用全方位移动平台, 并通过运动仿真验证了其可行性。王瑞丰^[59]构建了水稻田大跨度埂上行走装置, 试验样机 (图 4) 无需进入水田, 可在田埂上实现直线行走作业。

2.2 履带式除草机器人平台

履带式农业机器人与地面接触面积大, 下陷深



图 3 瓦赫宁根大学的除草机器人
Fig. 3 Weeding robot from Wageningen University

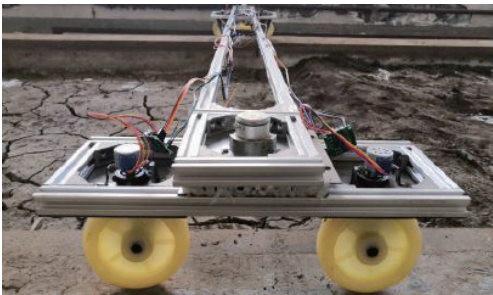


图 4 水稻田大跨度行走装置
Fig. 4 Long-span walking device in paddy field

度低, 平稳性能较高, 适宜在松软、泥泞的田间作业, 但存在转向不灵活、运动过程易受空间限制的问题。顾宝兴等^[60]研制了一种农用履带式智能移动平台, 能够实现田间自主导航, 且具有一定的开放性, 可满足农田多种智能化作业的要求。王子健等^[61]设计的除草机采用履带式行走机构和新型双轴式除草作业头机构, 通过变速箱可以根据田间实际情况调节整机移动速度, 底盘行走最优速度为 0.5 m/s。日本发明了一种小型水田机器人, 质量仅 3.8 kg, 可以使用小型蓄电池供电。英国 Ibex Automation 公司为农民开发了履带式自主农业机器人系统 (图 5), 可用于草原的自主精确杂草检测



图 5 Ibex Automation 履带机器人
Fig. 5 Ibex Automation crawler robot

和水肥喷洒。

2.3 足式除草机器人平台

足式农业机器人落脚点离散,对复杂农田环境的适应能力和避障的能力很强,跨沟壑、过田埂作业是其强项^[62];但足式机器人行进速度慢、负载能力弱、平稳性差,行走过程保持重心平衡难度相当大。昆明理工大学的卢衷正等^[63-64]研究了一种四足除草机器人,四足行走结构的每条腿拥有 3 个旋转自由度,分别位于侧摆、髋关节和膝关节,为四足除草机器人物理样机的研制提供参考。张良安等^[65]设计的电驱四足激光除草机器人采用一种动力学尺度综合方法,在给定的目标轨迹上,针对腿部关节驱动力矩进行优化,最终得到 1 组最优腿部杆长,使其完成目标轨迹的驱动力矩和功耗最小,提高了续航能力,如图 6 所示。国内赛为智能研发生产的 SIWILL 四足激光除草机器人,采用电机驱动,其腿部采用外肘内膝对称式布局,环境适应力强,可灵活适应平地、斜坡、草地等各种地形。Amer等^[66]研制了一款名为 Agri Bot 的多功能除草机器人(图 7),6 条机械腿由伺服器控制,具有稳定性好、地形适应性强等优势。



图 6 四足机器人
Fig. 6 Quadruped robot

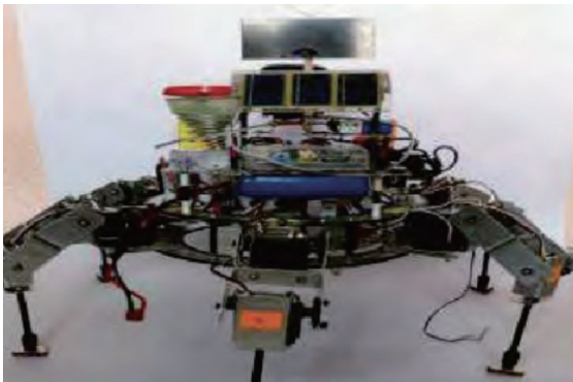


图 7 Agri Bot 多功能除草机器人
Fig. 7 Agri Bot multifunctional weeding robot

2.4 复合式除草机器人平台

复合式机器人包括轮履复合式、轮足复合式、履足复合式等。复合机器人移动能力和承载能力都较强,并且对复杂地形具有较好的适应性,可满足较大难度的作业需求。李峙峰^[67]设计了一种新型的轮履式复合底盘,可以在轮胎与履带 2 种方式之间切换,集履带式底盘高通过性与轮式底盘高机动性于一体,使其在复杂环境中的工作更加方便快捷,弥补了传统底盘的缺陷,解决了目前履带式工程机械转场效率低的问题。陶春鸣^[68]将轮式车辆的转向机构与履带式车辆的行走装置相结合,设计了一种水田履带轮式施药机(图 8),使其既具有较小的转向半径,又具有较低的接地比压。苏磊等^[69]设计了一种轮足式越障机器人(图 9),采用头部连杆机构辅助越障,Adams 越障运动仿真结果表明,轮足式复合结构移动机器人越障能力好,综合性能高。法国第六大学研制了轮足混合式移动机器人,足部末端安装有驱动轮,可以在不平坦的路面行走和越障^[70]。



图 8 水田轮履式机具
Fig. 8 Wheel crawler in paddy field

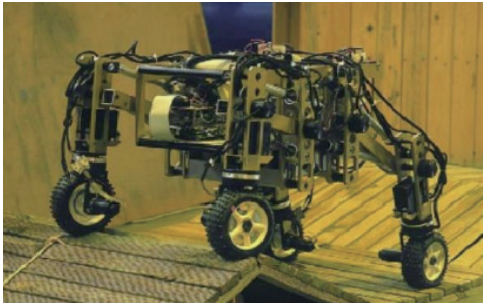


图 9 Hylos 轮腿复合式移动机器人
Fig. 9 Hylos wheel-leg compound mobile robot

目前田间作业机器人多以轮式为主,轮式机器人也是最早投入生产的。除草机器人平台行走于复杂环境的农田,需要考虑过田埂、作物行间行走、转向以及在松软泥泞的田间行进等问题^[71]。大型机械会压实田间土壤,造成土壤板结;复合型机器人平台拥有轮式平台的速度与平稳、足式的灵活以及履

带的越野能力。因此, 机器人平台主要趋于复合型与轻量化方向发展。

3 机械除草装置

除草机的末端执行机构是除草机械的重要组成部分, 直接关系到除草效果的好坏, 因此末端执行机构的研究对除草机械的发展具有重要意义。目前, 智能除草机具主要分 2 种: 一种是由大型拖拉机牵引的智能除草机具; 另一种是新兴的智能除草机器人。

3.1 牵引式除草装置

随着计算机技术与人工智能技术的发展, 人工智能与现代农业装备实现了技术上的融合, 利用传统农业装备拖拉机作为牵引平台, 搭配智能除草机具, 将传统农机进行改造升级, 大大提高了除草效率, 国内外相继开发了可避苗的智能除草部件。但是大型机具过于笨重, 容易对农田造成土壤板结等问题, 且机具成本较高, 能耗较大。

胡炼等^[72-76] 利用除草爪齿余摆运动原理设计了一种株间机械除草装置, 基于余摆运动设计了株间机械除草爪齿避苗控制算法, 采用机器视觉识别作物和作物行, 使除草爪齿避让作物植株并去除株间区域杂草, 同时通过作物行跟踪机构控制株间机械除草和跟随作物行, 实现了智能株间除草的目标。王刚等^[77] 设计了可定位和躲避玉米秧苗的行间梳齿式除草部件, 伺服电机反馈除草部件的旋转速率, 超声波速度传感器实时监测除草机前进速度, 除草部件转速与除草机的前进速率相配合, 平均除草率为 95.1%, 伤苗率仅为 1%。权龙哲等^[78] 设计了一种基于立式旋转机构的智能株间机械除草装置, 平均除草率为 89.57%, 伤苗率为 4.54%。Midtiby 等^[79] 设计了一款名为 Robovator 的除草机(图 10), 其末端执行装置为弹齿, 采用红外和近红外光检测苗株茎秆位置, 通过控制除草执行器弹齿

的运动轨迹完成除草和避开苗株的动作。Pérez-Ruiz 等^[80-81] 设计了一种末端锄刀的除草部件, 分布于植物两侧, 利用机器视觉技术检测苗株位置信息, 进而控制锄刀的运动轨迹, 达到除草的目的。Tillett 等^[82] 和 Dedousis^[83] 设计了一种缺口圆盘刀式末端执行装置的苗间除草机(图 11), 采用机器视觉系统采集农作物和苗株信息, 控制横移机构进行对刀, 通过旋转刀盘进行除草作业。



图 11 Garford 苗间除草机
Fig. 11 Garford weeder between seedlings

3.2 智能除草装置

随着机器人技术的发展, 机械臂系统逐渐在农业领域广泛应用。机械臂具有低功耗、高精度、高灵活性、高速度以及通用性强等特点。美国伊利诺伊大学 Jeon 等^[84] 开发了一款采用五自由度串联机械臂设计的精确除草机器人, 通过控制机械臂运动实现杂草精确清除, 除草率达 91%。南京林业大学郭伟斌等^[85] 设计了由本体、多关节串联机械臂、末端执行器及摄像头等组成的除草机器人, 通过视觉导航沿作物行自主行走, 识别出杂草后由多关节串联机械臂将高速旋转除草刀盘移动到目标杂草上切割杂草。瑞士的 EcoRobotix 机器人(图 12) 搭载太阳能板, 可自动工作, 机器人前端摄像头识别杂草后, 通过 Delta 机械手迅速、准确地对杂草定位并清除杂草。西班牙农业研究所开发的一款由



图 10 Robovator 除草机
Fig. 10 Robovator weeder



图 12 瑞士 EcoRobotix 机器人
Fig. 12 Swiss EcoRobotix robot

Delta 机械臂、视觉处理系统和高电压系统组成的应用于生菜地的智能除草机器人,通过视觉装置识别杂草,控制机械臂移动至杂草位置并释放高电压将杂草杀死,杂草识别率为 88%。

4 展望

智能除草机器人是智能农机装备的重要组成部分,其研发与应用是大田农业生产管理环节的需要。智能除草机器人可以有效减少化学除草剂带来的污染,提高农作物产量和品质。随着信息、机器人和人工智能等技术的发展,智能除草机器人将是智慧农业的重要智能装备,是支撑实现无人农场必不可少的农业机器人。为加快智能除草机器人的研发与应用,建议今后可以从以下几方面开展深入研究:

1) 智能化感知。为实时、全面地了解农田环境,多传感器信息融合技术为除草机器人在各种复杂的农田环境中作业提供支撑。机器视觉、全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)、雷达等多种传感技术融合算法以及多学科交叉融合技术为除草机器人提供丰富的感知信息,在识别作物行和杂草的同时定位作物植株,以及感知作物生长长势、病虫害和成熟度等信息,为除草、施肥和喷药管理作业提供准确的信息。

2) 精准化除草。机械除草装置是智能除草机器人的重要组成部分,直接影响除草效果,除草装置将更多结合机器人技术、自动控制技术,形成高精度除草作业,株间和近株间区域的精准除草装置将是未来农田除草技术突破的重要方向。

3) 高效化作业。人工智能等技术的应用将提高除草作业质量与效率,使其向宽幅作业、群体智能作业和多功能作业发展。由智能拖拉机牵引的宽幅除草机逐步得到推广应用,如:基于视觉和 GNSS 等定位的行间和株间除草机;中小型除草机器人在交互操作性、自主性和人机协同方面的不断提升,多机器人协同作业在资源分配调度优化方面提高作业效率;同时,基于机器人平台,除草、播种、施肥和喷药等功能可通过快速更换作业机具来实现,开放式结构和兼容性控制可以提高工作效率,降低生产成本。

4) 智慧化决策。随着物联网、大数据和云计算等技术的融合应用,机器人除草作业将由云平台进行远程管控,不仅可以实现机器人作业远程监测和作业任务调度等功能,还可进行智慧化决策,如结合气候、降雨以及杂草生长特点,与农艺相结合,智能判断最优除草时间。

参考文献:

[1] 李江国, 刘占良, 张晋国, 等. 国内外田间机械除草技术研究现状[J]. 农机化研究, 2006, 28(10): 14-16.

[2] 李东升, 张莲洁, 盖志武, 等. 国内外除草技术研究现状[J]. 森林工程, 2002, 18(1): 17-18.

[3] ÅSTRAND B, BAERVELDT A J. An agricultural mobile robot with vision-based perception for mechanical weed control[J]. Autonomous Robots, 2002, 13(1): 21-35.

[4] BLASCO J, ALEIXOS N, ROGER J M, et al. AE-automation and emerging technologies: Robotic weed control using machine vision[J]. Biosystems Engineering, 2002, 83(2): 149-157.

[5] 陈浩, 杨亚莉. 保护性耕作模式下非化学除草技术的研究[J]. 农机化研究, 2011, 33(9): 241-244.

[6] 兰天, 李端玲, 张忠海, 等. 智能农业除草机器人研究现状与趋势分析[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(5): 1-7.

[7] 王海江. 农业机械智能化设计技术发展现状与展望[J]. 当代农机, 2021(4): 49-50.

[8] 高文英. 浅议现代农业机械智能化的应用与发展[J]. 南方农机, 2020, 51(11): 65.

[9] 王树才. 农业机器人的应用领域、特点及支撑技术[J]. 华中农业大学学报, 2005, 24(S1): 86-90.

[10] 孟笑天. 基于机器视觉的农田苗带识别技术研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2020.

[11] MARR D, HILDRETH E. Theory of edge detection[J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 1980, 207(1167): 187-217.

[12] LHUILLIER M, QUAN L. Robust dense matching using local and global geometric constraints[C]//2000 15th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'00). Barcelona: IEEE, 2000: 968-972.

[13] REID J F, SEARCY S W. An algorithm for computer vision sensing of a row crop guidance directrix[J]. Journal of Commercial Vehicles, 1991, 100: 93-105.

[14] FONTAINE V, CROWE T G. Development of line-detection algorithms for local positioning in densely seeded crops[J]. Canadian Society for Bioengineering, 2006, 48: 719-729.

[15] GÉE C, BOSSU J, JONES G, et al. Crop/weed discrimination in perspective agronomic images[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60(1): 49-59.

[16] 李茗萱, 张漫, 孟庆宽, 等. 基于扫描滤波的农机具视觉导航基准线快速检测方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 41-47.

[17] 翟志强, 朱忠祥, 杜岳峰, 等. 基于 Census 变换的双目视觉作物行识别方法[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 205-213.

[18] 陈子文, 李伟, 张文强, 等. 基于自动 Hough 变换累加阈值的蔬菜作物行提取方法研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 314-322.

[19] 罗晨晖. 多信息特征融合的作物行识别与路径规划研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.

[20] CHOI K H, HAN S K, HAN S H, et al. Morphology-based guidance line extraction for an autonomous weed-

ing robot in paddy fields[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 113: 266-274.

[21] 曾勇, 熊瑛, 向阳, 等. 基于机器视觉的田间水稻苗列识别算法的研究[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2018, 44(3): 320-325.

[22] 王姗姗, 余山山, 张文毅, 等. 基于特征点邻域 Hough 变换的水稻秧苗行检测[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(10): 18-25.

[23] 黄小刚. 水田除草机器人视觉导航路径与参数获取方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.

[24] 贺静, 何杰, 罗锡文, 等. 基于多传感器融合的水稻行识别与跟踪导航研究[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(3): 18-26.

[25] HE J, ZANG Y, LUO X, et al. Visual detection of rice rows based on Bayesian decision theory and robust regression least squares method[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2021, 14(1): 199-206.

[26] ZHAO R M, HU L, LUO X W, et al. A novel approach for describing and classifying the unevenness of the bottom layer of paddy fields[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 162: 552-560.

[27] HU L, LIN C X, LUO X W, et al. Design and experiment on auto leveling control system of agricultural implements[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(8): 15-20.

[28] 李南. 基于机器视觉的锄草机器人快速作物识别方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.

[29] 侯雨. 基于图像处理的大豆杂草识别方法研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2020.

[30] 何迪. 美国、日本、德国农业信息化发展比较与经验借鉴[J]. *世界农业*, 2017(3): 164-170.

[31] SABZI S, ABBASPOUR-GILANDEH Y, ARRIBAS J I. An automatic visible-range video weed detection, segmentation and classification prototype in potato field[J]. *Heliyon*, 2020, 6(5): e3685.

[32] WU Z, CHEN Y, ZHAO B, et al. Review of weed detection methods based on computer vision[J]. *Sensors*, 2021, 21(11): 3647. doi: 10.3390/s21113647.

[33] ARROYO J, GUIJARRO M, PAJARES G. An instance-based learning approach for thresholding in crop images under different outdoor conditions[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 127: 669-679.

[34] 王佳玉, 刘立群, 常琴, 等. 基于农业图像处理的杂草分割[J]. *电脑知识与技术*, 2021, 17(17): 17-20.

[35] 吴兰兰, 徐恺, 熊利荣. 基于视觉注意模型的苗期油菜田间杂草检测[J]. *华中农业大学学报*, 2018, 37(2): 96-102.

[36] 苗中华, 余孝有, 徐美红, 等. 基于图像处理多算法融合的杂草检测方法 & 试验[J]. *智慧农业(中英文)*, 2020, 2(4): 103-115.

[37] 王璨, 李志伟. 利用融合高度与单目图像特征的支持向量机模型识别杂草[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(15): 165-174.

[38] TIWARI O, GOYAL V, KUMAR P, et al. An experimental set up for utilizing convolutional neural network in automated weed detection[C]//*Proceedings of the 2019 4th International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU)*. Ghaziabad, India: IEEE, 2019: 1-6.

[39] 彭明霞, 夏俊芳, 彭辉. 融合 FPN 的 Faster R-CNN 复杂背景下棉田杂草高效识别方法[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(20): 202-209.

[40] DOS SANTOS FERREIRA A, MATTE FREITAS D, GONÇALVES DA SILVA G, et al. Weed detection in soybean crops using ConvNets[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 143: 314-324.

[41] 乔永亮, 何东健, 赵川源, 等. 基于多光谱图像和 SVM 的玉米田间杂草识别[J]. *农机化研究*, 2013, 35(8): 30-34.

[42] 尚建伟, 蒋红海, 喻刚, 等. 基于深度学习的杂草识别系统[J]. *软件导刊*, 2020, 19(7): 127-130.

[43] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks[J]. *Communications of the ACM*, 2017, 60(6): 84-90.

[44] 孙俊, 何小飞, 谭文军, 等. 空洞卷积结合全局池化的卷积神经网络识别作物幼苗与杂草[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(11): 159-165.

[45] 徐艳蕾, 何润, 翟钰婷, 等. 基于轻量卷积网络的田间自然环境杂草识别方法[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2021, 51(6): 2304-2312.

[46] 朱熠. 面向株间除草的苗期作物识别与定位方法研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.

[47] 刘庆飞. 农业场景下卷积神经网络的应用研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2019.

[48] WANG A C, ZHANG W, WEI X H. A review on weed detection using ground-based machine vision and image processing techniques[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 158: 226-240.

[49] 邓向武, 齐龙, 马旭, 等. 基于多特征融合和深度置信网络的稻田苗期杂草识别[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(14): 165-172.

[50] YU J, SHARPE S M, SCHUMANN A W, et al. Detection of broadleaf weeds growing in turfgrass with convolutional neural networks[J]. *Pest Management Science*, 2019, 75(8): 2211-2218.

[51] 陈景帅. 农业机器人的主要应用领域和关键技术[J]. *电子技术与软件工程*, 2019(17): 90-91.

[52] 于文静. 我国将加快农业人工智能研发应用[J]. *当代农机*, 2020(2): 10.

[53] 朱磊磊, 陈军. 轮式移动机器人研究综述[J]. *机床与液压*, 2009, 37(8): 242-247.

[54] 罗锡文, 区颖刚, 赵祚喜, 等. 农用智能移动作业平台模型的研制[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(2): 83-85.

[55] 张春龙, 黄小龙, 耿长兴, 等. 智能锄草机器人系统设计与仿真[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(7): 196-199.

[56] 樊正强. 四驱农业机器人移动平台协调运动控制研

- 究[D]. 保定: 河北农业大学, 2018.
- [57] BAKKER T, VAN ASSELT K, BONTSEMA J, et al. Autonomous navigation using a robot platform in a sugar beet field[J]. *Biosystems Engineering*, 2011, 109(4): 357-368.
- [58] 于鑫, 孙裕晶, 赵伟程, 等. 基于非结构化环境的农用全方位移动平台的结构设计[J]. *内燃机与配件*, 2017(13): 1-3.
- [59] 王瑞丰. 水田大跨度埂上行走装置控制系统设计[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- [60] 顾宝兴, 姬长英, 王海青, 等. 农用开放式智能移动平台研制[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(4): 173-178.
- [61] 王子健, 高自成, 李立君, 等. 履带式双轴除草机的研制与试验[J]. *林业工程学报*, 2018, 3(4): 118-124.
- [62] 倪银堂, 陈贵江, 张超. 农业机器人移动平台的研究现状与趋势[J]. *南方农机*, 2018, 49(18): 5.
- [63] 卢衷正, 戈振扬, 丁巍. 四足除草机器人的 ADAMS 与 MATLAB 联合仿真[J]. *机械科学与技术*, 2016, 35(3): 375-380.
- [64] 卢衷正. 基于虚拟样机技术的四足除草机器人结构设计和仿真[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- [65] 张良安, 唐锴, 赵永杰, 等. 四足激光除草机器人腿部结构参数优化[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(2): 7-15.
- [66] AMER G, MUDASSIR S M M, MALIK M A. Design and operation of Wi-Fi agribot integrated integrated system[C]// 2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control. Piscataway: IEEE, 2015: 207-212.
- [67] 李峙峰. 轮履式复合底盘结构设计与研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [68] 陶春鸣. 水田履带轮式施药机设计与底盘试验[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- [69] 苏磊, 侯宇, 吴飞, 等. 轮足式机器人机构设计及越障性能分析[J]. *机械设计与制造*, 2016(8): 46-48.
- [70] GRAND C, BENAMAR F, PLUMET F. Motion kinematics analysis of wheeled-legged rover over 3D surface with posture adaptation[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2010, 45(3): 477-495.
- [71] 张铁中, 杨丽, 陈兵旗, 等. 农业机器人技术研究进展[J]. *中国科学: 信息科学*, 2010, 40(S1): 71-87.
- [72] 胡炼, 罗锡文, 严乙桢, 等. 基于爪齿余摆运动的株间机械除草装置研制与试验[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(14): 10-16.
- [73] 胡炼, 罗锡文, 曾山, 等. 基于机器视觉的株间机械除草装置的作物识别与定位方法[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(10): 12-18.
- [74] 胡炼, 林潮兴, 杨伟伟, 等. 基于智能相机控制的横摆式株间机械除草系统设计[J]. *湖南工业职业技术学院学报*, 2014, 14(4): 1-3.
- [75] 胡炼, 罗锡文, 张智刚, 等. 基于余摆运动的株间机械除草爪齿避苗控制算法[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(23): 12-18.
- [76] 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.
- [77] 王刚, 刘慧力, 贾洪雷, 等. 触碰定位式玉米行间除草装置的设计与试验[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2021, 51(4): 1518-1527.
- [78] 权龙哲, 王旗, 张景禹, 等. 立式旋转智能株间机械除草装置设计与试验[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(5): 582-588.
- [79] MIDTIBY H S, GISELSSON T M, JØRGENSEN R N. Estimating the plant stem emerging points (PSEPs) of sugar beets at early growth stages[J]. *Biosystems Engineering*, 2012, 111(1): 83-90.
- [80] PÉREZ-RUÍZ M, SLAUGHTER D C, GLIEVER C J, et al. Automatic GPS-based intra-row weed knife control system for transplanted row crops[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 80: 41-49.
- [81] PÉREZ-RUÍZ M, SLAUGHTER D C, FATHALLAH F A, et al. Co-robotic intra-row weed control system[J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 126: 45-55.
- [82] TILLETT N D, HAGUE T, GRUNDY A C, et al. Mechanical within-row weed control for transplanted crops using computer vision[J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 99(2): 171-178.
- [83] DEDOUSIS A. An investigation into the design of precision weeding mechanisms for inter or intra-row weed control[D]. Cranfield, Bedfordshire: Cranfield University, 2007.
- [84] JEON H Y, TIAN L F. Direct application end effector for a precise weed control robot[J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 104(4): 458-464.
- [85] 郭伟斌, 陈勇, 侯学贵, 等. 除草机器人机械臂的逆向求解与控制[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(4): 108-112.



胡炼, 男, 1984 年生, 博士, 华南农业大学青年教授, “十四五”国家重点研发计划项目负责人, 入选国家产业技术体系岗位科学家、中国科协首届“青年人才托举”工程、农业科研杰出人才培养计划和广州市“珠江科技新星”。主要从事智能农机装备和无人农场关键技术研究, 包括无人农场关键技术、农田精准平整技术与机具和机械除草机器人关键技术等。近年来在 SCI/EI 期刊发表论文 38 篇, 申请发明专利 42 项, 登记软件著作权 8 项。2020 年获中国农业机械学会青年科技奖。

【责任编辑 周志红, 李晓卉】