

# 智能农业除草机器人研究现状与趋势分析

兰天<sup>1</sup>, 李端玲<sup>1</sup>, 张忠海<sup>2</sup>, 于功敬<sup>2</sup>, 金勋俊<sup>3</sup>

(1. 北京邮电大学 自动化学院, 北京 100876; 2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041;  
3. 陕西科技大学 机电工程学院, 西安 710021)

**摘要:** 智能农业除草机器人融合了环境分析、路径导航、视觉识别和运动控制等多种技术, 是应用于精准农业中除草作业的智能机器人系统, 作为农业机械化研究的热点备受国内外学者关注; 对除草机器人的国内外研究现状进行了梳理, 进一步分析了除草机器人的特点与优势; 总结了除草机器人系统控制、移动导航和机器视觉等关键技术的研究进展, 指出关键技术的发展前景与空间; 结合除草机器人的技术研究特点与市场环境分析了其未来发展趋势; 针对目前除草机器人存在的问题提出解决思路与研究方法, 为除草机器人智能化、自动化和集成化发展研究提供理论参考。

**关键词:** 农业; 除草机器人; 智能控制; 移动导航; 机器视觉

## Analysis on Research Status and Trend of Intelligent Agricultural Weeding Robot

Lan Tian<sup>1</sup>, Li Duanling<sup>1</sup>, Zhang Zhonghai<sup>2</sup>, Yu Gongjing<sup>2</sup>, Jin Xunjun<sup>3</sup>

(1. School of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;  
2. Beijing Aerospace Measurement & Control Corporation Co., Ltd., Beijing 100041, China;  
3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology,  
Xi'an 710021, China)

**Abstract:** Intelligent agricultural weeding robot is an intelligent robot system integrating multiple technologies such as environmental analysis, path navigation, visual recognition and motion control for weeding operations in precision agriculture, which is a research hotspot of agricultural mechanization with increasing attentions from scholars at home and abroad. The research status of weeding robot at home and abroad is reviewed, and the characteristics and advantages of weeding robot are further analyzed. The research progress of key technologies such as system control, mobile navigation and machine vision of weeding robot is summarized, and the development prospects and space of key technologies are pointed out. Combining the technical research characteristics and market environment of weeding robot, the future development trend is analyzed. In view of the current problems of weeding robot, solutions and research methods are proposed, which provides a theoretical reference for the development of weeding robot towards intelligence, automation and integration.

**Keywords:** agriculture; weeding robot; intelligent control; mobile navigation; machine vision

## 0 引言

农作物受杂草影响汲取不到充足的光照与养分, 并且产生病虫害的风险加剧, 导致产量与营养价值会有所下降。全球现已发现约 3 000 种杂草, 其中超过六成会影响作物产量<sup>[1]</sup>。我国农田杂草近 1 500 种, 其中近 10% 的杂草对作物具有重度危害。我国杂草面积高达近  $1 \times 10^5$  km<sup>2</sup>, 造成各类粮食和其他作物损失超过 5 000 kt<sup>[2]</sup>。因此, 杂草已成为影响作物收成和质量的重要限制因素。

手工除草和喷施除草剂是主要的传统除草方式, 在现代农业中具有一定的局限性。其中, 人工除草耗费大量劳

动力和成本, 但效果非常有限, 近 35% 的杂草会被误判或遗漏<sup>[3]</sup>。而大量使用除草剂虽然对杂草生长有一定的抑制作用, 但同时也造成了严重的环境污染, 并且杂草的抗药性问题随着农药的广泛使用愈加严重。为减少农药使用, 许多国家和地区制定了农药使用相关法律法规。生活水平的提高使人们更加注重食品安全, 这进一步降低了除草剂使用的可持续性。因此, 传统的除草方式已不符合精准农业的发展要求。

基于精准作业技术的除草机器人具有较高的自动化程度, 能够提高除草剂使用效率, 减少用量, 从长远角度看

收稿日期: 2020-10-07; 修回日期: 2020-11-02。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51775052), 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JM-181), “十三五”自主创新预研项目(YI20003)。

作者简介: 兰天(1997-), 男, 黑龙江兰西县人, 硕士研究生, 主要从事机构学与机器人学方向的研究。

通讯作者: 李端玲(1974-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事机构学与机器人学方向的研究。

引用格式: 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.

能够减轻劳动强度,减少作业成本,减轻环境污染,改善土壤结构,提高作物质量,有利于提高农业的自动化程度,促进可持续发展。

在物联网与人工智能等技术快速发展的背景下,智能农业装备的研制面对新的机遇与挑战,除草机器人未来将会更加精巧与智能。

## 1 除草机器人研究现状

除草机器人的研究始于 20 世纪 60 年代,于 20 世纪 90 年代得到广泛研究。农业中机器视觉技术的定位和识别应用价值逐渐被挖掘,其自身也得到快速发展,进而基于机器视觉的除草机器人技术随之进步完善。当前,智能除草机器人的研发具有商品化、信息化和全球化的特点,技术革新投入逐渐加大,致力于提供全套系统化的综合解决方案。

### 1.1 国外研究现状

美国加州大学戴维斯分校的 Lee 等设计了一种精确喷施除草机器人<sup>[4]</sup>,该机器人基于以耕作机为平台的机器视觉系统,如图 1 所示。该系统采用贝叶斯分离函数识别植物叶片形态来区分作物和杂草,经处理器运算后将杂草位置信息传送给精确喷施控制器,经驱动器使指定喷施执行器动作,完成除草剂喷施工作。

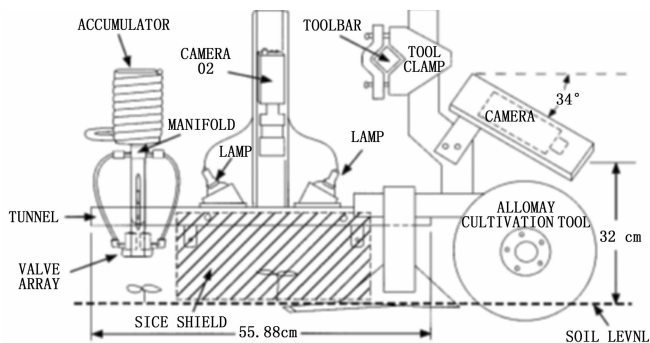


图 1 加州大学戴维斯分校除草机器人控制系统

瑞典哈尔姆斯塔德大学制造了如图 2 所示的除草机器人<sup>[5]</sup>。机器人具有通过直流伺服电机控制的阿克曼转向机构,可以实现车体的顺畅转弯。该机器人配备了黑白与彩色两个摄像机,其中黑白摄像机用于识别作物边界特征,使机器人沿边界行进作业;彩色摄像机的作用是识别区分作物与杂草。经农田试验可得到导航误差不超过 2 cm。

丹麦奥尔胡斯大学农业研究所研究了 HortiBot 除草机器人<sup>[6]</sup>,如图 3 所示。该机器人可以在成熟农田中定位杂草,并且其结构特征能够避开附近作物而不造成损伤。机器人基于相应算法根据形状信息识别杂草,其田间作业实验说明,该机器人对杂草的选择性消除可以节省 70% 的除草剂用量。

美国伊利诺伊大学开发了车轮能够防滑转向的四轮除草机器人<sup>[7]</sup>,如图 4 所示。除草机器人的机械臂具有 5 个自由度,其动作由 C++ 程序通过电机 PWM 进行控制。该机



图 2 瑞典哈尔姆斯塔德大学除草机器人



图 3 HortiBot 除草机器人

器人的工作方式为先由割草刀片割杂草,再经喷药装置于切口处喷施除草剂。对一种杂草进行实验表明,除草剂用量为 21.89~56.18 mg 时,超过 90% 的杂草在第 6 天有所反应,并在 10 天后死亡。

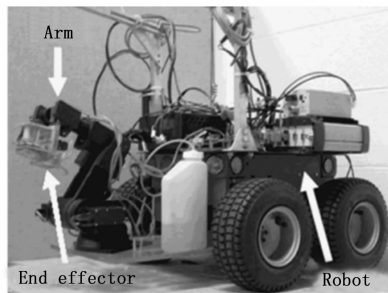


图 4 美国伊利诺伊大学除草机器人

荷兰瓦格宁根大学的 Bakker 研制了一款柴油发动、四轮独立转向的除草机器人<sup>[8]</sup>,如图 5 所示。该机器人借助 DGPS 和机器视觉导航,可识别作物行位置并沿其直线行驶。同时,机器人基于机器视觉获取杂草特征予以区分。根据甜菜田的实验结果,除草机器人的导航精度为 $\pm 25$  mm。

西班牙塞维利亚大学和美国加利福尼亚大学联合设计制作了 co-robot 除草机器人<sup>[9]</sup>,如图 6 所示。co-robot 通过对比预置的株距信息和实际监测值来控制除草执行器动作,除需偶尔人工订正测量偏离值,其余作业阶段均自动化推进。经实验验证,co-robot 相对于人工除草可节省 57.5% 的劳动成本。由于 co-robot 传感器单一,其具有成本低廉且操作简单的优势。

德国 Deepfield Robotics 公司研发了具有“decision tree



图 5 荷兰瓦格宁根大学除草机器人



图 8 AgBot II 除草机器人

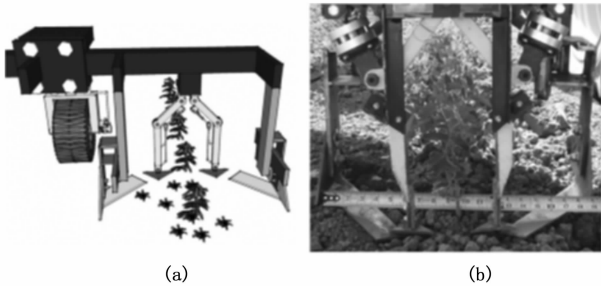


图 6 co-robot 除草机器人

learning”学习机制的 Bonirob 除草机器人<sup>[10]</sup>, 如图 7 所示。研究人员前期通过向 Bonirob 展示大量标记为“good”的作物图片和标记为“bad”的杂草图片对其进行训练, Bonirob 储存信息后会对比实际植物叶片外观特征进行判断除草。随着作业次数的增加, Bonirob 的作业准确率也会逐渐提高, Bonirob 在胡萝卜栽培试验基地除草率高达 90%。此外, Bonirob 还能完成播种和监测农作物生长等复杂繁琐工作。



图 7 Bonirob 除草机器人

澳大利亚昆士兰科技大学研究了采用模块化设计的 Ag-Bot II 除草机器人<sup>[11]</sup>, 如图 8 所示。机器人主要结构包括平台和除草模块, 其中除草模块包括割草和喷药 2 个功能模块, 且可互相替换。AgBot II 当自身驱动电量临近耗尽时, 可以自行移动到最近的充电桩利用太阳能进行充电。AgBot II 搭载杂草分类与决策处理高速系统, 能够识别新型杂草并选择合适的除草方法。

挪威科技大学的 Utstumo 等设计了 Adigo 除草机器人<sup>[12]</sup>, 如图 9 所示。Adigo 车体轮型采用 3 轮形式, 基于机

器视觉对胡萝卜作物行进行定靶喷药除草。Adigo 配备 28 个喷嘴, 每次按需滴注单个除草剂液滴, 分辨率为 0.8 m/s, 横向工作范围为 168 mm。研究证明该种滴注方法能够减少 73%~95% 的除草剂, 符合精准农业的发展要求。



图 9 Adigo 除草机器人

日本津山工业高等专门学校的 Sori 等开发了一款稻田除草机器人<sup>[13]</sup>, 如图 10 所示。除草机器人通过电容式触摸传感器输出电压值的变化检测水稻位置, 并通过方向传感器实现全方位运动。除草机器人能在不伤害水稻植株的同时在水田中搅起水土阻碍杂草光合作用, 进而完成除草工作。



图 10 日本稻田除草机器人

## 1.2 国内研究现状

南京林业大学的陈勇等研制了一款直接施药除草机器人<sup>[14-16]</sup>, 如图 11 所示。研究人员先后对除草机器人开展了基于机器视觉的自动导航, 基于色彩的特征识别和基于模糊控制的导航控制等研究, 制作了除草机器人试验样机。该机器人实现除草的方式为机械割草后于切口处喷施除草剂。根据试验结果, 该方法相对于常规方法可节省 85% 的

除草剂，能够节省成本，减少污染。



图 11 南京林业大学除草机器人

江苏大学对棉花除草的形态学特征提取识别开展了研究<sup>[17]</sup>，试验所采用的除草机器人如图 12 所示。除草机器人系统主要包括车体平台、喷药装置和视觉识别系统，车体平台配备了梁结构减震以维持车身稳定，喷药装置采用汽油发动机驱动，识别系统自带光源。基于精确喷施除草机器人，研究人员研究了外界因素对识别的影响以及阈值法识别等问题。

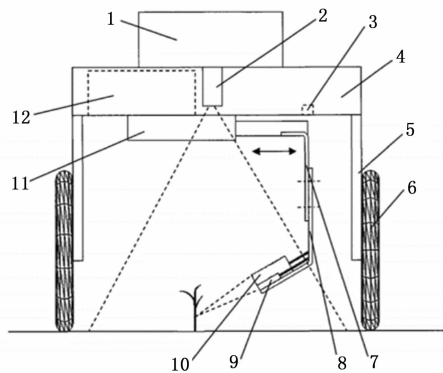


图 12 江苏大学除草机器人

江苏大学的刘继展等发明了一种激光除草机器人<sup>[18]</sup>，其功能实现基于热效应原理，如图 13 所示。该除草机器人的主要功能模块为 AGV、齿轮齿条模组、激光除草执行器、视觉系统和控制系统。视觉系统兼顾导航和识别杂草位置的功能，控制系统接收杂草位置信息后控制齿轮齿条模组移动，进而通过透镜聚焦光线烧死杂草。

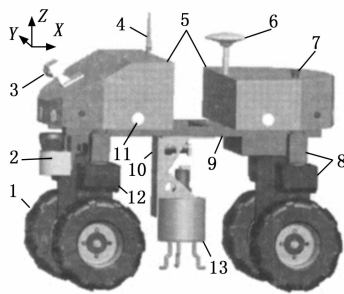
中国农业大学的张春龙设计了四轮驱动及独立转向，除草装置为 3 指手爪形式的智能除草机器人<sup>[19]</sup>，如图 14 所示。该机器人系统主要包含视觉系统、导航定位系统、AGV、除草执行器及其升降结构。除草机器人作业时除草装置的两个固定指持续除草，另一个机动指根据作物与杂草位置信息实时调整位姿精准除草。

北京林业大学的吴健等设计了应用于苗圃的自动可视除草机器人<sup>[20]</sup>，如图 15 所示。该机器人的机械系统由履带式底盘、2 自由度机械臂和铲状刀头形式的除草执行器组成。除草机器人作业通过 CCD 传感器采集图像，经图像处理模块的模式识别算法识别杂草，将信息传送至驱动器使



1 控制系统；2 主视觉系统；3 行程开关；4 车体；5 车架；6 车轮；7 上连接板；8 下连接板；9 从视觉系统；10 聚焦透镜；11 齿轮齿条机构；12 电池组

图 13 激光除草机器人



1 车轮；2 激光雷达；3 CCD 摄像机；4 天线；5 车厢；6 GPS；7 急停按钮；8 转臂机构；9 车体；10 机械手升降系统；11 超声雷达；12 传动部件；13 锄草机械手

图 14 中国农业大学除草机器人

执行器动作。该机器人空间尺寸较小，在苗圃环境作业优势明显，能够大幅度提升苗圃生产效率。

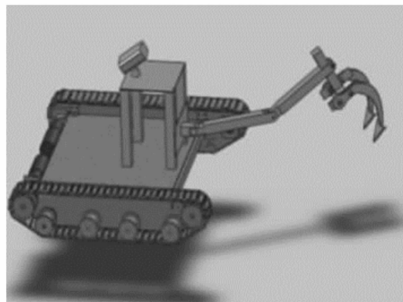


图 15 苗圃除草机器人

华南理工大学的夏欢提出了一种水田踩踏式除草机器人结构<sup>[21]</sup>，如图 16 所示。该机器人采用履带式底盘结构，在行走过程中即可实现对杂草的踩踏与铲除。此外，机器人驶过处产生的浑浊泥可抑制杂草的光合作用并破坏其生长环境。除草机器人可通过辅助支撑机构和跨越式移动机构完成跨越作物换行的动作。对极端环境的分析模拟和实

地试验结果显示, 该除草机器人性能可靠。

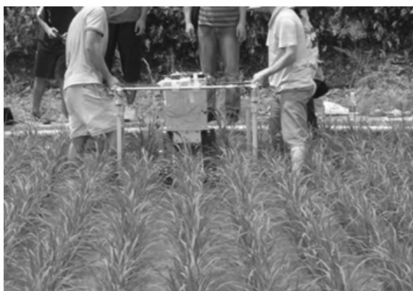


图 16 水田踩踏式除草机器人

兰州理工大学的贾耀文基于西北地区果园特点设计了一款果园避障除草机器人<sup>[22]</sup>, 如图 17 所示。该机器人的主要机械结构包括双侧避障机构、升降模组、转向装置、扶手机构和除草执行器等, 能够实现调整刀具位姿和作业幅宽的功能, 避免损害作物, 满足不同种植模式的果园作业需求。

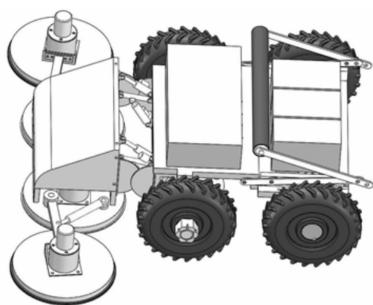


图 17 果园避障除草机器人

纵观国内外除草机器人的研究发展进程, 机械结构、除草方式、视觉算法和控制方法等研究热点取得了重要进展, 呈现出结构模块化、除草方式复合化、传感器融合化、控制智能化的特点。随着绿色农业、精准农业等新生产作业模式的推广以及智能高新技术的发展, 除草机器人的研究重点也将聚焦于系统的精准性、智能性和可持续性。

## 2 除草机器人关键技术研究进展

### 2.1 系统控制技术研究进展

机器人控制技术涉及领域众多, 是软硬件结合的系统工程。机器人控制技术发展至今已取得丰富成果, 形成了以智能控制技术为代表的体系。得益于智能控制技术与传统控制技术的良性配合, 智能机器人能够出色地完成各项工作。随着机器人智能化进程的高速发展, 控制技术呈现出智能化、自适应与云通信的发展特点。

当前流行的系统控制技术包括模糊控制、专家控制和分层控制等。模糊控制技术的机制是输入数据以模糊化的状态被处理, 而以明确的指令形式被输出执行。其主要组成部分为模糊转化端、数据库、模糊数据处理器和清晰化指令输出端, 数据经过系列化操作实现对机器人的智能控制。专家控制技术基于专家系统机制, 还包括一系列算法程序, 与传统控制技术协调配合能够大幅度提升控制系统性能。其突出功

能表现在目标对象监测方面, 专家系统能够根据监测结果实现指令输出。分层控制技术是基于三元论思想的优化手段, 系统由组织级、协调级和执行级构成。组织级用于完成任务的组织与分配工作, 再由协调级进一步提升任务的可执行性, 最后经执行级实现控制指令功能。李庆中等提出了移动机器人运动的模糊控制方法<sup>[23]</sup>, 实验表明该方法具有良好的快速性、准确性和鲁棒性。金立生等研究了导航神经网络控制器的设计方法<sup>[24]</sup>, 基于实际路径跟踪控制试验结果, 该方法设计出的控制器效果出色。郭伟斌等研究了除草机器人自主导航的模糊控制方法<sup>[25]</sup>, 对两种控制规则库的试验显示, 机器人在 42.2°弯道的行走准确率为 74.58%。经建峰等提出了多 AGV 分布式控制系统<sup>[26]</sup>, 根据实验结果, 该系统能够顺利完成工作且运行稳定。

机器人控制技术不断更迭进步, 极大地促进了机器人自动化的进程。与此同时, 随着高新技术不断涌入机器人领域, 机器人的发展对控制技术提出了更高的要求。受设备联动、远程监测和自主作业等需求的影响, 机器人控制技术将融合交叉智能技术, 不断改进优化。

### 2.2 导航定位技术研究进展

移动机器人一般具备定位与地图创建, 即时运算部署以及动作控制等功能, 是一个复合功能系统。自主导航机器人的导航方式主要基于电磁、光、声和图像等信息介质及其特性, 常用的导航方式包括: 电磁导航、光学导航、激光导航、超声波导航、视觉导航、惯性导航、GPS 导航和组合导航等。不同的导航方式各有优缺点, 根据实际工况条件选择合适的导航方式是导航定位技术研究的关键所在。

目前移动机器人的导航控制方法主要为主动方法和反应式方法, 前者基于分层递阶结构, 后者基于包容体系结构。研究人员后续对两种方法进行了改进与优化, 综合两种方法的优点, 同时避免其缺点。具有代表性的改进结构如包含低层反馈控制级和高层智能级的混合结构, 同时具备良好的实时性和优先的智能级。导航控制方法的人工智能典型应用包括神经网络和模糊逻辑, 模糊控制自身的鲁棒性和生理学的“感知—动作”表现在模拟驾驶思想中得到融合。

移动机器人的导航工作是基于机器人实时位姿状态与周围环境信息做出规划部署, 然后将控制驱动指令传送给硬件设备。当前, 移动机器人本体模型及其控制算法是导航定位技术的研究热点。陈艳等提出了一种组合导航定位方法<sup>[27]</sup>, 应用 GPS 和机器视觉获取和处理导航信息, 并采用 UKF 滤波器提高定位精度和稳定性。周俊等综合强化学习与模糊逻辑相关理论提出基于自主学习的视觉导航方法<sup>[28]</sup>, 该方法应用于轮式移动机器人的效果符合预期。丁巍等提出了一种 GPS 组合模糊控制导航系统<sup>[29]</sup>, 仿真结果显示该方法实现性好, 系统快速稳定。姚恒峰基于双目视觉设计导航控制算法<sup>[30]</sup>, 实验结果表明该系统导航偏移量较小。

当前, 为了使移动机器人能够正确判断部署, 需要更

精准地检测和表达被测对象的全貌。因此, 移动机器人向着多传感器信息融合的方向发展, 系统的兼容性和拓展性成为研究的关键指标。

### 2.3 机器视觉技术研究进展

机器视觉是在成像系统作用下, 通过计算机等硬件捕获、传送、运算、理解和输出光信号的一系列过程。机器视觉侧重将理论付诸工程实践, 通过自动抓取和处理关键画面信息来指导实体做出对应的反应。机器视觉采用无接触检测方式, 具有不伤害被测对象的突出优势。基于不同的视觉传感器, 机器视觉方法可以应用于不同的工作场景, 并且应用范围随着技术的发展不断扩大。

农业作业环境和对象复杂多变, 且难以预测, 对机器视觉的算法和传感系统有着更高的要求。应用于农业作业的机器视觉系统一般具备的功能是视觉导航、识别定位和检测分类, 克服光线、角度和噪声等的影响进而精准识别是农业机器视觉研究的重点, 对于农业生产具有十分重要的意义。白敬等通过光谱分析对杂草识别进行了实验研究<sup>[31]</sup>, 建立的判别模型十分稳定且识别正确率高达 98.89%。王璨等在杂草识别研究中建立了融合高度与单目图像特征的 SVM 识别模型<sup>[32]</sup>, 经测试其平均识别准确率为 98.33%, 相对于非融合模型识别准确率提高了 5%。孙俊等建立了一种空洞卷积结合全局池化的卷积神经网络识别模型<sup>[33]</sup>, 平均测试识别准确率为 98.80%, 实际田间试验识别准确率为 75%, 一般环境下识别效果较好。

机器视觉是一门多学科融合, 技术积淀深厚且更迭快速的宽口径学科领域, 一经兴起即井喷式发展。研究人员不断综合与开发更加精准适用的模型与算法, 其应用范围也随之扩大, 同时影响与涉及更多元的研究领域, 已成为农业生产领域不可或缺的核心技术。

## 3 除草机器人发展趋势与研究展望

### 3.1 技术与市场特征

除草机器人是应用于特定农业环境, 采用多种技术实现指定除草工作的服务类移动机器人。其具备一般移动机器人的属性, 此外还具备以下特征:

1) 作业环境复杂。由于农作物生长环境复杂多变, 不仅受地形条件的约束, 还直接受季节和气候等自然条件的影响, 除草机器人的工作环境是非结构化和不可预估的。因此, 除草机器人需要具备良好的环境适应性, 基于作业工况的变化及时动态调整, 以确保按要求完成作业。

2) 操作对象多样。为了保证作业效率与成本, 除草机器人的作业对象非单一种类农作物, 并且农作物不同生长期的空间形态各异。因此, 除草机器人机械结构需具备针对不同株高和间距等特征调整底盘高度和轮距的功能, 实现模块化和可重构的功能。同时, 除草机器人系统算法应具备良好的数据训练与学习功能, 针对不同环境下的作物具备可靠的识别准确率。

3) 目标用户特定。除草机器人的终端目标用户是从事

农业劳动作业的非技术人员, 所以除草机器人应足够安全且操作简单, 以使用户快速上手与熟练操作使用, 并且后期还应提供售后与技术指导等服务。

4) 生产成本高昂。与工业机器人相比, 除草机器人由于需要适应复杂的工况, 具有更复杂的机械结构和控制系统, 因而需要花费较高的研制成本, 在市场中不具有价格优势。

### 3.2 发展趋势

除草机器人的发展方向应符合现代化精准农业的发展要求, 基于除草机器人自身技术与市场特征, 结合国内外研究现状及关键技术的研究进展, 可以将除草机器人的发展趋势概括如下:

1) 智能化与自动化。农田植物种类复杂多样, 人工难以向除草机器人提供全套植物数据信息。对未知种类的杂草, 除草机器人需根据现有的数据对其识别分类并学习, 同时将信息纳入数据库以供后续训练学习使用。除草机器人采用学习与作业同步进行的方式不断丰富数据库, 其识别准确率也随之提升。

2) 功能复合化。除草机器人集成了多种传感系统, 对各种传感系统写入不同的程序算法可以实现不同的特定功能。功能复合化的除草机器人能独立完成一系列农业生产工作, 提高作业效率, 减少设备成本, 符合农业集约化的发展要求。

3) 结构可替换与可重构。除草机器人的作业对象具有多元性, 不同种类的植株外形尺寸、种植密度和作业要求不同, 除草机器人需要针对不同对象替换相应功能模块以完成作业。可替换与可重构的设计形式使系统各功能模块相对独立, 互不影响, 有利于设备维护与降低成本。

4) 硬件联动配合。除草机器人的硬件设备在特定功能方面日趋完善, 但仍不能满足复杂作业要求。采用多种硬件相互配合工作能更好地发挥各设备的优势, 充分提高设备使用效率, 开发硬件的更多功能, 全面高效完成多种复杂工作。

5) 技术交叉融合。现代农业的发展离不开人工智能、物联网、大数据和云计算等高新技术, 除草机器人可以借助高新技术打破传统技术壁垒, 进一步提高农业生产质量与效率, 推动农业智能化进程。

### 3.3 研究展望

当前, 围绕除草机器人的研究已大量开展, 并取得了一定的成果, 但尚未转化投入大规模商业化生产与实际应用。除草机器人视觉系统与算法技术壁垒仍是制约识别性能的主要因素, 图像识别响应慢, 复杂环境下成功识别率低。电动除草机器人续航时间短, 不具备足够的动力性能, 运动匹配控制难度较大。此外, 除草机器人研发与生产成本高, 通用性较低, 复杂工况下性能难以保证, 与传统农具相比性价比不突出。除草机器人的技术研发与商业推广都面临着巨大挑战。

针对除草机器人存在的问题, 结合国内外除草机器人的研究现状与进展, 归纳研究思路与方法建议对应解决。进一步优化视觉系统的工作流程与速度, 加大对算法研究的投入力度, 融合多种传感器技术, 提高全场景识别准确率。创新开发除草机器人的机械结构, 应用新型材料和可重构结构使除草机器人具备良好的运动学、动力学性能和复合化功能。促进除草机器人研究融合当前高新技术, 交叉运用新兴学科技术, 提高除草机器人的自动化和智能化程度。

#### 4 结束语

采用除草机器人除草是使作物免受杂草侵害的有效办法, 对于保证作物产量和食品安全具有重要意义。同时, 除草机器人除草方式相对于传统除草方式有着突出的优势, 有利于环境与经济的协调可持续发展。国内外围绕除草机器人开展了大量研究与实验, 内容涵盖系统控制、导航定位和机器视觉等领域。目前围绕除草机器人各领域的研究取得了一定的进展与成果, 但仍面临识别性能不稳定、动作及其控制不精准、智能性和功能性不足以及研究成果难以落地转化等问题。未来的研究应遵从发展趋势, 交叉融合多种高新技术, 协调联动硬件设备, 注重结构的可重构性, 推动除草机器人向智能化、自动化和功能复合化方向发展。

#### 参考文献:

[1] 张文莉, 陈树人, 褚德宏. 除草机器人研究现状与趋势 [J]. 农业装备技术, 2015 (2): 6-10.

[2] 中华人民共和国农业部. 中国农业统计资料 (2016) [M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.

[3] Slaughter D C, Giles D K, Downey D. Autonomous robotic weed control systems: a review [J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2008, 61 (1): 63-78.

[4] Lee W S, Slaughter D C, Giles D K. Robotic weed control system for tomatoes [J]. Precision Agriculture, 1999, 1 (1): 95-113.

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

[6] 张寄尘. 丹麦: 研制出农田除草机器人 [J]. 农村, 农业, 农民, 2004 (7): 46.

[7] Hong Y J, Lei F T. Direct application end effector for a precise weed control robot [J]. Biosystems Engineering, 2009, 104 (4): 458-464.

[8] Bakker T. An autonomous robot for weed control: design, navigation and control [D]. Wageningen: Wageningen University, 2009.

[9] Pérez-Ruiz M, Slaughter D C, Fathallah F A, et al. Co-robotic intra-row weed control system [J]. Biosystems Engineering, 2014, 126: 45-55.

[10] Lottes P, Horferlin M, Sander S, et al. Effective vision-based classification for separating sugar beets and weeds for precision farming [J]. Journal of Field Robotics, 2017, 34 (6): 1160-1178.

[11] Hall D, Dayoub F, Kulk J, et al. Towards unsupervised weed scouting for agricultural robotics [A]. IEEE International Conference on Robotics & Automation [C]. IEEE, 2017.

[12] Utstumo T, Urdal F, Brevik A, et al. Robotic in-row weed control in vegetables [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 154: 36-45.

[13] Sori H, Inoue H, Hatta H, et al. Effect for a paddy weeding robot in wet rice culture [J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2018, 30 (2): 198-205.

[14] 陈 勇, 田 磊, 郑加强. 基于直接施药方法的除草机器人 [J]. 农业机械学报, 2005, 36 (10): 91-93.

[15] 侯学贵. 除草机器人杂草识别与视觉导航技术研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2007.

[16] 郭伟斌. 除草机器人设计与控制 [D]. 南京: 南京林业大学, 2008.

[17] 赵德升. 基于机器视觉的精确喷施智能除草装置杂草实时识别技术 [D]. 镇江: 江苏大学, 2009.

[18] 刘继展, 李萍萍, 毛罕平, 等. 一种激光除草机器人: 中国, CN200910031994.2 [P]. 2009-12-02.

[19] 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.

[20] 吴 健, 闫 磊, 钱 桦, 等. 自动可视除草机器人系统设计 [J]. 湖南农业科学, 2011 (21): 129-131.

[21] 夏 欢. 水田用除草机器人的结构与实现 [D]. 广州: 华南理工大学, 2012.

[22] 贾耀文. 多功能果园避障除草机器人机械及控制系统设计 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.

[23] 李庆中, 顾伟康, 叶秀清, 等. 移动机器人模糊控制方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2002, 23 (5): 480-483.

[24] 金立生, 王荣本, 纪寿文, 等. 智能车辆自主导航神经网络控制器设计 [J]. 农业机械学报, 2005, 36 (10): 30-33.

[25] 郭伟斌, 陈 勇. 基于模糊控制的除草机器人自主导航 [J]. 机器人, 2010, 32 (2): 204-209.

[26] 经建峰, 楼佩煌. 基于智能体的分布式多 AGV 控制系统设计与实现 [J]. 工业控制计算机, 2013, 26 (9): 37-38.

[27] 陈 艳, 张 漫, 马文强, 等. 基于 GPS 和机器视觉的组合导航定位方法 [J]. 农业工程学报, 2011, 27 (3): 126-130.

[28] 周 俊, 陈 钦, 梁 泉. 基于强化学习的农业移动机器人视觉导航 [J]. 农业机械学报, 2014, 45 (2): 53-58.

[29] 丁 巍, 戈振扬, 卢衷正. GPS 组合模糊控制的农田机器人导航系统设计 [J]. 农机化研究, 2015 (9): 109-112.

[30] 姚恒峰. 基于双目视觉的农业机器人导航系统研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2017.

[31] 白 敬, 徐 友, 魏新华, 等. 基于光谱特性分析的冬油菜苗期田间杂草识别 [J]. 农业工程学报, 2013, 29 (20): 128-134.

[32] 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.

[33] 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.