doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.04.002

旱田智能化机械除草技术与装备研究进展

张馨悦[1,2]　王庆杰[1,2]　王　超[1,3]　徐征鑫[1,3]　卢彩云[1,3]　何　进[1,3]　李洪文[1,3]

(1.中国农业大学工学院,北京 100083;2.农业装备技术全国重点实验室,北京 100083;
3.农业农村部河北北部耕地保育科学观测实验站,北京 100083)

摘要:当前传统化学和物理除草方法面临环境污染和效率低等问题,因此智能化机械除草技术成为一种可行的替代方案。本文系统阐述了旱田智能机械除草机工作原理与关键技术,结合国内外研究现状与应用案例,重点探讨了作物行检测、避苗控制以及多传感器融合等核心环节。智能除草机基于高精度图像识别与深度学习算法,实现杂草精准定位与识别,并利用机械臂或其他执行机构完成高效除草作业,不仅有效降低了对化学除草剂的依赖,且可显著提高作物产量,兼具突出的环境与经济效益。然而,田间环境的复杂性和成本高昂等限制了其广泛应用。进一步探讨了作物行检测、避苗控制以及多传感器融合等旱田智能机械除草系统的关键技术,强调了提升系统实时性和除草精准度的必要性,并提出未来发展方向:多传感器融合、模块化设计及适应多样化作物环境个性化解决方案,以推动农业可持续发展。

关键词:智能除草机;精准农业;人工智能;旱田

中图分类号:S224.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)04-0022-20　　**OSID**:

Research Progress on Intelligent Mechanical Weeding Technology and Equipment in Dry Field

ZHANG Xinyue[1,2]　WANG Qingjie[1,2]　WANG Chao[1,3]　XU Zhengxin[1,3]　LU Caiyun[1,3]　HE Jin[1,3]　LI Hongwen[1,3]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology*, *Beijing* 100083, *China*
3. *Scientific Observing and Experiment Station of Arable Land Conservation* (*North Hebei*), *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: With increasing global environmental and economic pressures on agriculture, traditional chemical and physical weed control methods face significant challenges, such as environmental pollution and inefficiency in operations. Intelligent mechanical weeding technology has emerged as a sustainable alternative, effectively addressing these challenges. This review examined the research progress on intelligent mechanical weeding machines designed specifically for dryland environments, focusing on their working principles, key technologies, practical applications, and development status both domestically and internationally. Intelligent weeding machines increasingly utilized high-precision image recognition and advanced deep learning algorithms to achieve accurate weed identification and precise positioning. These systems used mechanical arms or other units to perform efficient and targeted weeding operations, enhancing crop yield and reducing reliance on chemical herbicides while providing substantial environmental and economic benefits. However, challenges such as variable field conditions, high equipment costs, and technical limitations hindered widespread adoption. This review also explored essential technologies in dryland intelligent mechanical weeding, including crop row detection, seedling-avoidance control mechanisms, and multi-sensor integration, emphasizing the importance of improving real-time processing and precision in weeding operations. Future directions included multi-sensor fusion, modular design, and adaptations for various crop environments to enhance the practicality and adoption of intelligent weeding technologies in agriculture.

Key words: intelligent weeding machine; precision agriculture; artificial intelligence; dry field

收稿日期:2024-12-20　修回日期:2025-01-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD1500401)

作者简介:张馨悦(2000—),女,博士生,主要从事保护性耕作技术与装备研究,E-mail:xinyue0093@163.com

通信作者:王庆杰(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作技术与装备研究,E-mail:wangqingjie@cau.edu.cn

0　引言

农田杂草对作物生长构成严重威胁，竞争光、水、肥等资源，导致作物减产。据统计，我国每年杂草发生 9.93×10^8 hm^2 次以上，造成粮食损失 3×10^8 t[1]。20 世纪 80 年代以来，我国农业生产对除草剂的依赖逐步加深，虽然提升了作物产量，但也导致土壤环境恶化、生物多样性减少等负面影响[2]。化学除草带来的污染问题已引起全球关注，欧盟和美国等国家相继制定政策，倡导采用非化学的杂草控制方法[3-5]。中国也提出《到 2025 年化学农药减量化行动方案》[6]，以实现绿色防控。

机械除草方法具有高效大面积的作业能力，能够快速有效地控制杂草[7]，因此成为非化学防治的重要手段。然而，要提高机械除草效率并减少对作物的损伤，仍需引入智能技术。近年来，人工智能、云计算、机器学习、大数据和智能传感技术在农业中的广泛应用，使智能机械除草设备成为研究热点。其主要通过自动识别田间杂草和作物，精准控制执行机构在作物行间移动，实现松土与除草作业。相比传统除草方式，智能除草不仅扩大了作业幅度，适应复杂农田环境，提升除草效率，还有效降低了伤苗率和人工劳动强度，减少了对化学除草剂的依赖，对环境保护和可持续农业发展具有重要意义。

当前旱田智能化除草技术仍面临诸多挑战。田间环境复杂多变，光照条件、植被密度等因素影响杂草与作物的检测精度。此外，株间杂草对秧苗危害尤为严重，对除草的精准度和实时性提出了更高要求。虽然机械除草在环保和安全性方面优于化学除草，但其作业效果和效率仍存在不足。因此，提高机械除草的精准性成为关键，亟需智能技术进一步提升杂草识别和检测精度。

本文阐述国内外旱田智能机械除草研究现状，重点探讨图像处理、机器学习、多传感融合等智能技术在杂草检测与决策中的应用，并分析除草部件的设计与优化。最后，展望智能化除草技术与装备的未来发展趋势，以期为我国智能化机械除草设备的研发和推广提供参考。

1　旱田智能化机械除草机国内外研究现状

1.1　国外研究现状

国外旱田智能除草机械研究起步较早，已形成较为成熟的农机体系，研究重点集中于减少化学除草剂使用、提升农业可持续性以及环境保护方面。例如，荷兰因气候干燥影响喷洒除草效果，对机械除草的需求逐步增加[8]。英国、丹麦和德国的研究机构和企业在机器视觉、自动导航及智能控制领域取得了显著进展[9]，为智能化机械除草的发展奠定了技术基础。

由英国 Garford 公司[10]设计的 Robocrop Inrow 除草机（图 1）主要用于生菜、卷心菜、芹菜等移植作物的行间与株间除草，可高精度去除距离作物 8 mm 以外的杂草，每秒可处理 6 个作物间距。采用新月形圆盘围绕作物旋转并在植物间切割，同时绕轴旋转，其圆盘旋转速度与机具行进速度及成像相机获取的植物位置信息实现同步。然而，该系统对机具行驶速度和除草刀旋转速度匹配度要求较高，否则易对作物造成损伤。

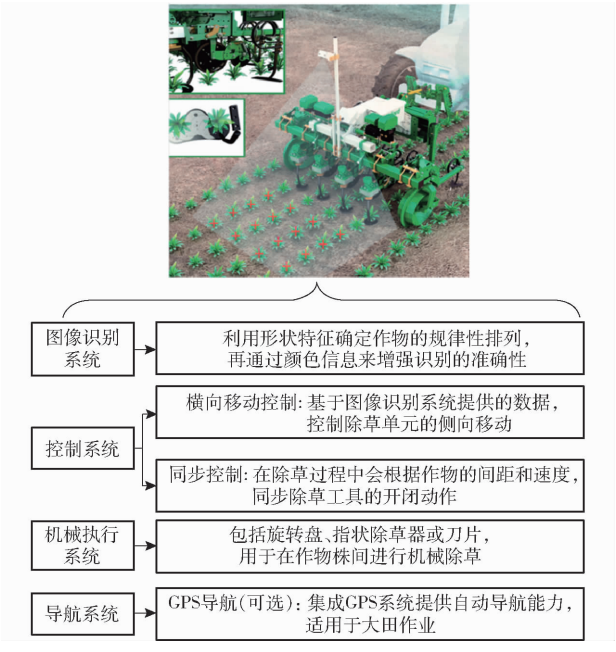


图 1　英国 Robocrop Inrow 除草机

Fig. 1　British Robocrop Inrow weeder

德国 LEMKEN 公司生产的 EC－Weeder 除草机[11]（图 2）适用于玉米、甜菜、谷物、生菜、洋葱和大豆等作物。通过捕获植物反射的光谱来识别作物的种植行，并通过作物形状、大小、排列样式等特征进一步确定作物的精确位置。该系统具备灵活的行间适应性与高精度控制能力，可实现对 1～5 行作物的精确识别，并将除草单元与作物间距控制在最接近 2 cm 的精度范围内。此外，支持对多达 26 行的单独升降调控，可根据作物类型、土壤条件、行距与拖拉机轮距进行差异化设置。与 Robocrop Inrow 除草机的横向平移不同，EC－Weeder 采用平行转向架设计，具备更大的摆动范围，实现精确的自动对中调整。然而，该设备对田间条件要求较高，适合平坦、作物种植规律的田地，在复杂地形和密集种植模式下除草精度可能降低。

丹麦 FarmDroid ApS 公司生产的自动化农业机

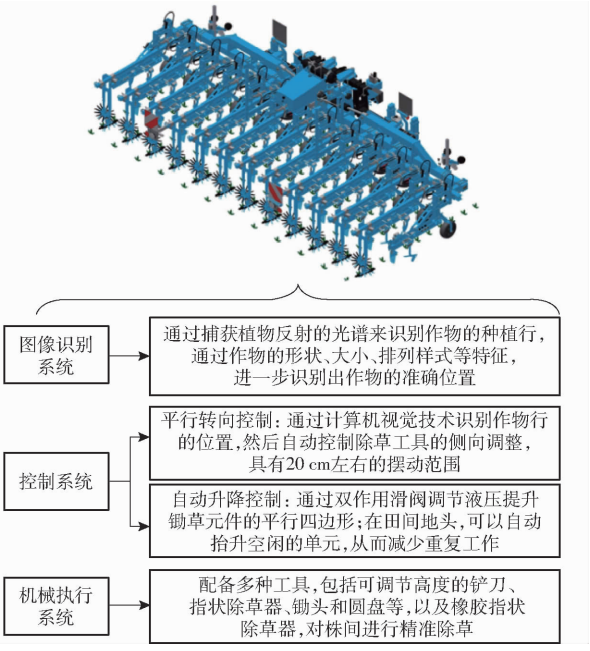


图 2 德国 EC－Weeder 除草机

Fig. 2 German EC－Weeder weeding machine

器人 FarmDroid FD20[12]（图 3）适用于甜菜、蔬菜等作物的精准播种与除草。该设备基于 RTK－GPS 定位技术，精准确定作物播种位置，以此为基础执行后续除草操作。其定位精度可达到厘米级，支持连续 18～24 h 作业，作业速度约为 950 m/h，单日可完成约 6 hm^2 的播种或除草任务。在行距调控方面，FD20 可灵活适应 4～12 行的作业配置，行距范围 22.5～90 cm，同时可将除草精度控制在距离作物约 5 mm 的极近距离。具有多种可更换除草工具（如小刀、圆盘等），可实现高效杂草清除。设备搭载太阳能电池板，依靠太阳能提供动力，实现全天候自主运行，无需人工干预。然而，由于缺乏摄像头识别系统，该设备无法实时检测和应对作物生长过程中的动态变化（如作物偏移或杂草过度生长）。

意大利 Ferrari Growtech 公司生产的 Ferrari Remoweed 自动除草机[13]（图 4）由液压浮动框架和除草单元组成，适用于多种蔬菜作物行间和株间除草。该设备采用视觉传感器和红外感应器识别作物，可识别叶片宽度 0.8～20 cm 的多类植株，并通过独立操作的除草单元实现近距离精确除草，刀片能在距离作物仅 1 cm 处安全作业。其行间除草效率较高，在设备前进的同时沿框架宽度并行除草，每小时可清除约 9 000 株杂草。Remoweed 可适应行间间距 25 mm 和株间间距 4 cm，确保在密植条件下仍能高效完成除草任务。该设备支持三点悬挂式和蝎子型自走式两种模式，由视觉系统指导横向液压平移，传感器控制刀片开合以实现精准而高效的除草作业。然而对于株距较小的作物如玉米等，其适应性不足。

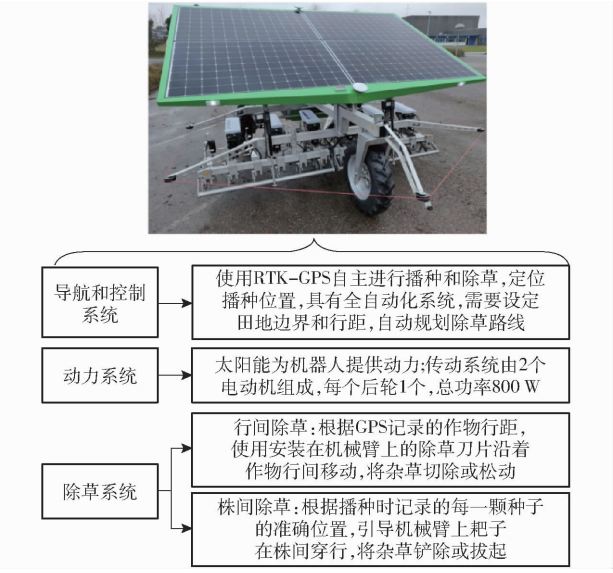


图 3 丹麦 FarmDroid FD20 除草机

Fig. 3 Danish FarmDroid FD20 weeding machine

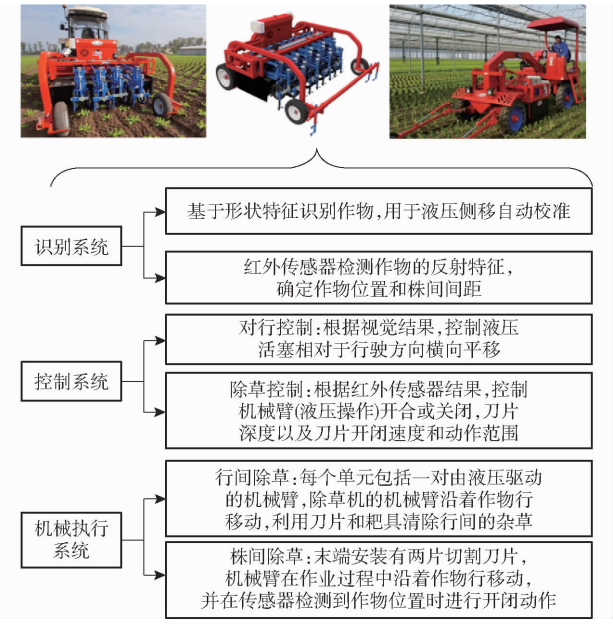


图 4 意大利 Ferrari Remoweed 自动除草机

Fig. 4 Italy Ferrari Remoweed weeding machine

表 1 中的国外智能除草机（如法国 Naïo Technologies 公司的“Oz”、美国 FarmWise 的“Vulcan”等）以视觉识别、RTK－GPS 定位以及电动或太阳能驱动为主要技术特点，能够满足从小型园艺农场到大规模蔬菜种植的多样化需求。尽管这些成熟的产业化产品在降低化学除草剂使用、提高除草精度和作业效率方面成效显著，但在复杂田间环境下仍存在除草率与作业效率有待进一步优化等问题。为此，本文结合国内外典型研究与实际应用案例，重点探讨作物行检测、避苗控制、多传感器融合等关键技术在旱田智能机械除草中的实现方法及发展趋势，为满足更高精度与复杂环境作业需求提供

表 1　国外旱田智能机械除草机典型研究成果

Tab. 1　Dryland intelligent mechanical weeder at abroad

机具	公司/机构	年份	国家	实物图	特点
Oz	Naïo Technologies[14]	2014	法国		专为花园和小型农场设计的自主除草机器人，能够利用计算机视觉区分农作物和杂草并进行机械除草。完全电动，使用 RTK GPS 进行精确导航，机械结构包括扭簧、刷子、播种器、Kress 指头、五齿耙、钉耙、犁刀、叶子防撞板等部件
Bonirob	Deepfield Robotics[15]	2015	德国		拥有一套名为决策树学习“decision tree learning”的学习机制，根据叶子的颜色、形状和大小来判断这些植物是否需要被清理
Dino	Naïo Technologies[16]	2017	法国		用于大型蔬菜作物大规模除草机器人，完全自主的电动机器
Orio	Naïo Technologies[17]	2021	法国		通过基于 RTK GPS 信号的导航系统在田地中精确工作，适用大型蔬菜生产作业
Ekobot WEAI	Ekobot[18]	2023	瑞典		适用于蔬菜行间除草，使用 7 台 RGB－D 相机进行深度和彩色识别，通过一系列金属手指快速挖掘杂草并将其从泥土中推出
Vulcan	FarmWise[19]	2017	美国		悬挂开放式除草机，结合视觉系统，适用于 15 种作物模型。提供亚英寸精度的精确除草，能够对 20 多种蔬菜作物进行自主除草
Odd. Bot Quirky	Odd. Bot[20]	2020	荷兰		自动机械行内除草，设计用于除掉沟槽顶部的杂草，自动拔草机器人
Bakus	Vitibot[21]	2022	美国		专用于大体积作物的多功能机器，采用 GPS 定位，通过机械除草提高产量
Andela Robot Weeder ARW－912	Andela[22]	2019	荷兰		采用先进的摄像系统和横跨 12 个除草单元的机械臂，确保在 9 m 工作宽度内精确识别和消除杂草。每个单元都配备了摄像头，用于检测杂草，并通过连接的机械臂将其除去，用于行间除草

有效的技术支撑。

1.2　国内研究现状

我国自 20 世纪 60 年代开始研究苗间除草机械，70 年代机械苗间除草技术得到了显著发展[23]。90 年代引进美国旋转锄技术后，王金忠等[24]研制出耕旋联合除草机，将中耕深松与旋转锄结合，成为我国早期机械化除草的重大突破。

近年来，国内除草机也在向着智能化方向发展，例如，通过识别作物行信息确定株间机械除草装置与作物行的横向偏移量，结合行内爪齿式除草部件绕开作物进行除草（图 5）[25]。李南等[26]基于传统中耕锄草机（图 6），通过摄像头获取田间作物位置

信息,使用月牙形锄草刀实现护苗除草。贾洪雷等[27]设计一种避苗除草装置(图 7),利用弹性软轴传感器确定秧苗位置,配合间歇式旋转除草部件清除杂草。此外,基于深度学习的杂草检测方法近几年也被提出[28],通过建立保护区和工作区精准识别杂草行,并利用除草刷高速旋转完成杂草的割除和连根拔除(图 8),这些智能化技术显著提升了除草作业的精度和效率。

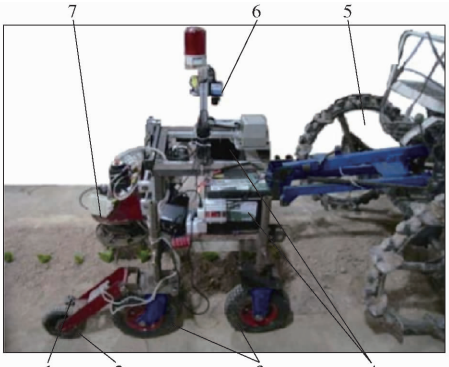


图 5 爪齿式除草装置

Fig. 5 Claw and tooth weeding device

1. 编码盘 2. 地轮 3. 轮子 4. 电池 5. 拖拉机 6. 摄像头 7. 除草装置

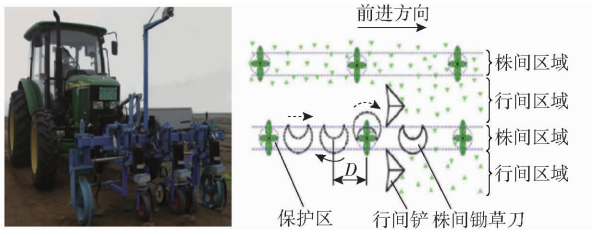


图 6 月牙形锄草装置

Fig. 6 Crescent hoe device

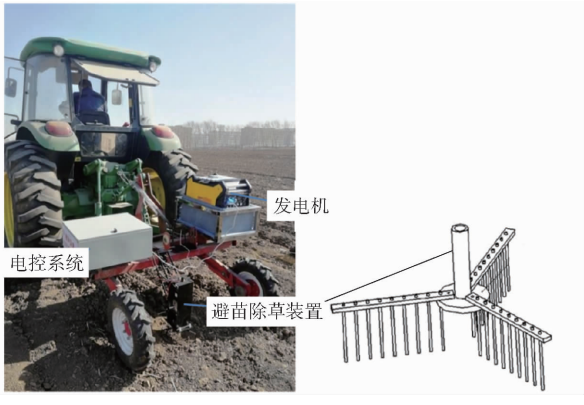


图 7 避苗除草装置

Fig. 7 Anti-seedling and weeding device

国内外在智能机械除草的研究上遵循相似的基本原理和发展方向,但由于农业生产模式和地理环境的差异,二者在具体实现上存在显著不同。国内外普遍通过摄像头或传感器采集田间图像,结合深度学习算法实现作物与杂草的精准识别,并由执行机构清除杂草,此方法在株间距较大的作物行中表现出良好适应性。然而,多数国家仍以复合式机械除草为主,这种方式要求农作物行距和株距标准化,以保障机械设备的高效运行。



图 8 株间除草机器人

Fig. 8 Intra row weeding robot

国外在农业机械化和大规模机械作业方面具有明显优势,得益于其完善的农业设施和广阔的平原地形,便于大面积农田机械作业。大规模农场经营模式也促进了智能除草系统的应用推广,在视觉识别、地理信息采集、路径规划等技术方面取得了一定成果。相比之下,国内智能除草机器人的研究起步较晚,研究重点多集中于图像识别,在广泛性和深度上与国外存在差距。目前,国内多数样机仍主要停留在实验室模拟测试阶段,尚未达到田间作业的实际应用水平。

2 智能感知技术研究现状

除草感知技术主要包括作物行检测和杂草定位。作物行检测为除草机提供导航和路径规划,广泛应用于行间除草,通过图像识别或 GIS 技术实现沿作物行的精准移动,避免误伤作物。杂草定位技术侧重于株间除草,利用传感器和图像处理算法精准识别杂草位置,配合执行机构完成高效作业,最大限度减少对作物的干扰。这两种方法各有侧重,分别满足行间和株间除草需求,实现高效精准作业。

2.1 导航与作物行检测技术

2.1.1 GNSS 与 RTK - GPS 定位

在除草作业中,通常采用全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)和 RTK - GPS 技术实现自动导航和高精度定位。GNSS 是提供全球卫星导航服务的系统,包括多个国家的导航系统,如美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、欧盟的 Galileo 以及中国的北斗系统。GNSS 广泛应用于除草农机的导航,能够精确控制机械沿预定路线行进,实现高效除草。实时动态测量(Real-time kinematic, RTK)是基于 GPS 的增强技术,通过地面基准站与移动接收设备之间的差分修正信号,定位精度可达厘米级。RTK - GPS 技术能够精确定位作

物行线及作物与杂草的位置，为精准除草提供了重要支持。

除草时，可根据预先采集的作物地图并结合 GPS 实时反馈的位置，确定除草器在行间的移动路径和范围，通过除草转子在作物行空隙中移动清除杂草[29]（图 9）。GPS 不仅可以定位机器位置，也可定位作物位置。英国农业科技公司 Arvorum[30] 为农户提供种子地图（Seeding map）以协助田间除草、施肥等作业（图 10）。在播种过程中，配备 GNSS 的播种机记录每颗种子的位置信息并生成电子地图，该地图用于后续田间管理中的幼苗定位。NØRREMARK 等[31] 基于 RTK－GPS 定位技术，在播种时定位种子位置，并创建地理参考种子图，通过作物位置控制除草刀的开合，其控制流程如图 11 所示。除草机的末端执行器在后续除草过程中依据种子位置图进行幼苗回避和杂草清除。然而，高精度 GPS 系统依赖卫星信号，一旦信号受干扰，定位精度下降将直接影响除草系统性能。此外，若作物生长位置与播种时不完全一致，系统可能误将作物识别为杂草或漏除杂草。因此，要在不同农业环境中广泛应用，仍需克服这些技术和应用上的挑战。

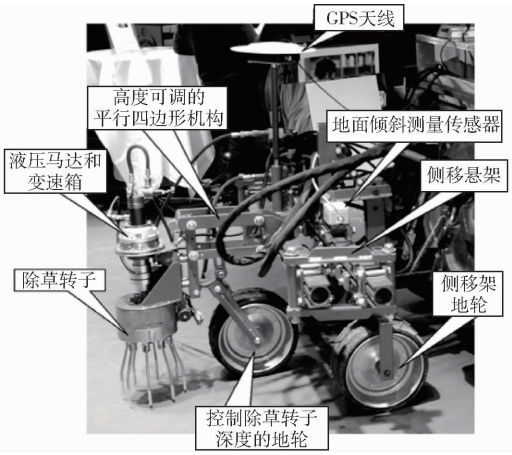


图 9　基于 GPS 定位的除草机

Fig. 9　GPS based weeder

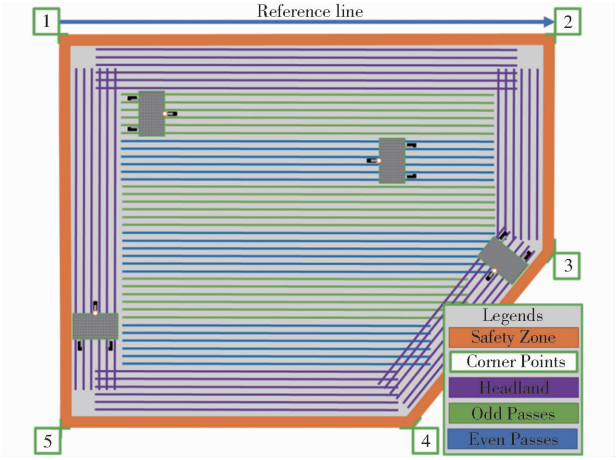


图 10　基于 GNSS 建立的种子地图

Fig. 10　Seeding map based on GNSS

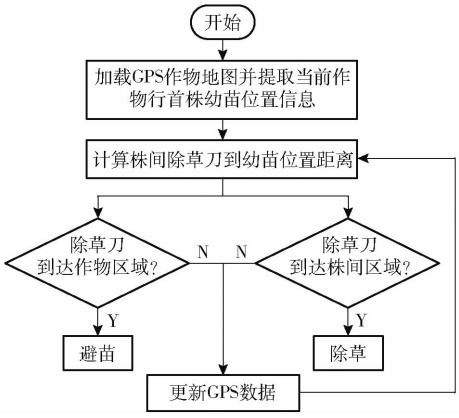


图 11　基于电子地图的除草刀控制流程图

Fig. 11　Control process of weeding knife based on electronic map

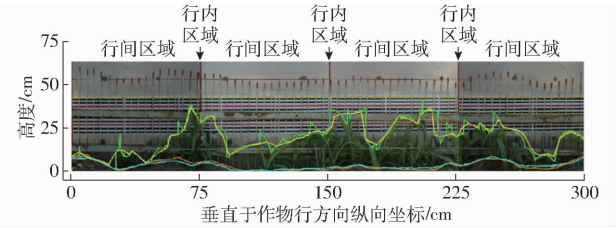


图 12　激光雷达获得的垂直于作物行方向的纵向截面

Fig. 12　Longitudinal cross-section obtained by LiDAR perpendicular to crop line direction

2.1.2　激光雷达（LiDAR）与地面导航

激光雷达（光探测和测距）是一种遥感技术，用于测量传感器与目标之间的距离。其原理是通过发射激光脉冲，根据脉冲的反射时间和角度，精确计算目标距离，并生成周围环境的三维点云图（图 12）[32]，从而精确描绘环境结构。激光雷达可在黑暗或强光环境下正常工作，具有较高的环境适应性[33]。

3D LiDAR 的导航线提取准确度较高，但实时性不佳或受不平坦地面的影响较大。为解决这一问题，BAN 等[34] 融合相机和 LiDAR 数据，将 LiDAR 的深度信息与摄像头的视觉数据和 IMU 的运动数据结合，提取出更准确的导航线。首先通过激光雷达获得玉米点云图，初步得到由投影点云获取的轮廓，在轮廓内提取绿色数据，最后得到导航线（图 13）。

2.1.3　机器视觉与作物行检测

与卫星导航相比，机器视觉导航具有适用性强、实时灵活、采集环境信息丰富、不易受信号干扰、使用成本低等诸多优点[35]。机器视觉系统通常通过采集相关二维图像，运用处理器处理和分析，自动得出各种指令输出[36]。利用视觉进行作物行检测通常包括预图像分割和作物行线拟合[37]（图 14）。

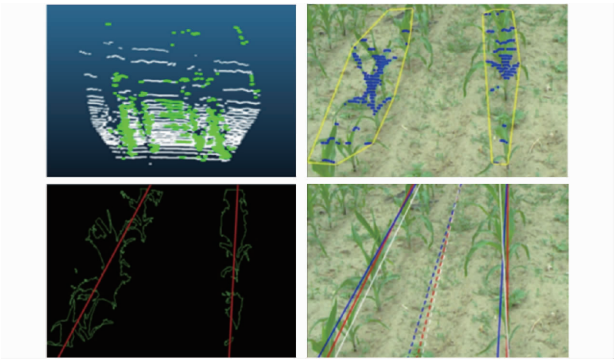


图 13 基于 3D LiDAR 的导航线提取

Fig. 13 Navigation line extraction based on 3D LiDAR

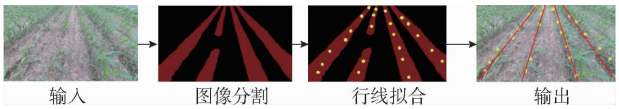


图 14 基于机器视觉的作物行检测原理图

Fig. 14 Steps of crop row detection method based on machine vision

图像分割目的是分割出作物行和背景。常见图像分割方法如表 2 所示,其中阈值分割方法因不依赖先验知识而被广泛采用。通过设定一个或多个阈值,像素点被划分为不同类别。研究表明,大津阈值分割法相比最大熵和迭代阈值分割法表现更为稳定,在目标分割效果上具有明显优势。虽然迭代阈值分割法具有较快的处理速度,但易受噪声干扰;而最大熵阈值分割法对目标体积和噪声敏感,适用性受限[38]。边缘检测分割法通过检测像素急剧变化的边缘来确定轮廓,通常结合植被指数分割作物。王建仑[39]采用 Canny 和 Otsu 算子,成功提取出叶片边缘。聚类分割法通常应用于边缘模糊、背景复杂的场景,与传统分割算法相比,聚类分割具有无监督、高效等优势[40]。例如,迟德霞等[41]利用模糊 C 均值聚类法实现了秧苗的有效分割。区域生长法则从种子像素出发,逐步合并相似像素形成连通区域,更适合处理复杂目标的分割。然而,该方法受噪声和平坦区域细密纹理的影响,易产生局部极值过多的问题,导致过度分割现象。针对这一问题,金飞剑[42]提出了一种基于预标记的分水岭分割算法,通过在分水岭分割前预设标记,以此标记为梯度图的极值并屏蔽其他极小值,从而提高了分割精度。近年来,深度学习凭借其强大的特征提取能力在图像分割领域受到广泛关注。一些基于 Mask R - CNN 的杂草分割网络相比传统方法显示出更高的识别精度,尤其是在与 FCN、SegNet、U - Net 等分割网络的对比中表现突出[43]。卷积神经网络模型已成为杂草分割和作物行检测中的重要工具,为进一步提升分割性能提供了可能。

表 2 常见图像分割算法对比

Tab. 2 Comparison of common image segmentation algorithms

图像分割方法	原理	代表方法	优点	缺点
阈值分割	基于图像的灰度特征计算灰度阈值,将每个像素的灰度与阈值进行比较并分到合适的类别中	固定阈值法、自适应阈值法、Otsu 法	简单、快速,适用于单一目标分割	对噪声和光照变化敏感
边缘检测分割	利用像素灰度的急剧变化,检测出图像中的边缘并进行分割	Canny 边缘检测、Sobel 算子	易检测到物体的边缘	容易受噪声干扰
区域生长	从种子点出发,根据相似性准则逐渐将邻近像素归并到区域中	基本区域生长、基于统计的方法	适用于复杂目标分割	对初始种子的选择敏感
分水岭算法	将图像的梯度视为地形,通过模拟水从低处流向高处的过程进行分割	基于梯度的分水岭算法	能检测到微弱边缘	容易过分割
聚类分割	将像素聚类到不同组中,使组内相似度高,组间相似度低	K-means、高斯混合模型	能处理复杂场景	对初始条件和参数设置敏感
图像切割分割	将图像表示为图结构,通过最小切割算法进行分割	最小切割/最大流算法、Normalized Cut	能处理全局信息,分割效果好	计算复杂度高,需要大量计算资源
深度学习分割	利用卷积神经网络等深度学习模型进行端到端的图像分割	U - Net、Mask R - CNN、DeepLab	精度高,能处理复杂图像和场景	需大量标注数据

图像分割出目标作物后,根据作物位置拟合出直线。霍夫变换和随机霍夫变换(RHT)被广泛应用于作物行检测[44]。这些方法通过提取图像中的直线特征,来识别和定位作物行。

由表 3 可知,GNSS 导航与机器视觉作物行检测各有优劣,实际应用中可根据需求与环境灵活选择或组合使用,以提升精准农业成效。张漫等[45]将 GNSS 与机器视觉相结合,通过 GNSS 接收机获取作业位置,并利用摄像头实时识别作物行,实现中耕除草中铲刀与作物行距离的自动调节,从而提高作业精度与效率。尽管机器视觉导航已取得一定进展,但其多功能性和技术鲁棒性仍处于低水平,原因在

于除草机器人处于非结构化、动态变化的环境，面临地形、植物形状和颜色等噪声干扰。因此，将高精度定位技术与视觉识别结合是提升作物行检测精度和适应性的重要发展方向。

表 3　GNSS 与机器视觉比较

Tab. 3　Comparison of GNSS and machine vision

项目	GNSS	机器视觉
原理	利用全球导航卫星系统进行定位和导航	通过摄像头和图像处理算法识别和检测作物行
精度误差/cm	5	2
环境影响	受卫星信号遮挡和多路径效应影响较大	受光照、天气、背景复杂度影响较大
优点	提供高精度的全球定位，适用于大规模田间作业	无需依赖卫星信号，可以识别作物行和周围环境的详细信息
缺点	需要良好的卫星信号覆盖，成本较高	受光照和环境影响大
应用场景	自动驾驶，精准播种	作物行检测，田间导航

2.2　杂草检测与定位技术

杂草检测是精准除草的关键部分，对于检测任务，有两种方式[46]：①创建杂草（种子）地图，在随后的控制操作中使用该信息。②实时杂草检测，集成传感器、处理程序和驱动系统。

2.2.1　杂草（种子）地图

机械除草机的杂草地图可以通过两种方式绘制：一种是在作物播种时利用 RTK－GPS 配备的播种机同步生成种子地图；另一种是在作物生长后通过视觉或传感器技术生成杂草分布地图。种子地图绘制方法的原理是将 RTK－GPS 与播种机联动，记录每颗种子的精确位置，使非播种点检测到的任何植物可识别为杂草。相关研究对玉米种子的自动地图绘制系统测试结果显示，种子发芽时平均位置偏差 x 小于 34 mm（30～38 mm），表明该方法具有较高的定位准确性[47]。

基于多光谱航空影像的遥感技术能够提供准确的杂草分布图（图 15）[48]。其基本原理是通过特定光谱区域定位或植被指数，最大化土壤、杂草与植被间的差异，并区分杂草和作物。此方法通过捕获远程图像的反射率值识别杂草[49]。BROWN 等[50]使用 10 cm 像素区分了早期免耕玉米中的阔叶杂草和禾本科杂草。GRAY 等[51]探讨了包含裸土、大豆及 6 种杂草分组的杂草图准确性，比较了出苗后 56 d 和 70 d 的 50 cm 像素航空图，结果表明出苗后 70 d 的遥感数据准确性更高，杂草种类差异更加明显。GOEL 等[52]利用高光谱检测玉米田中的杂草分布，生成杂草地图（图 16），为后续除草提供指导。然而，上述研究仅限于杂草存在与否，而未涉及杂草个体差异。实现精准机械除草仍需更高分辨率的高光谱数据支持。

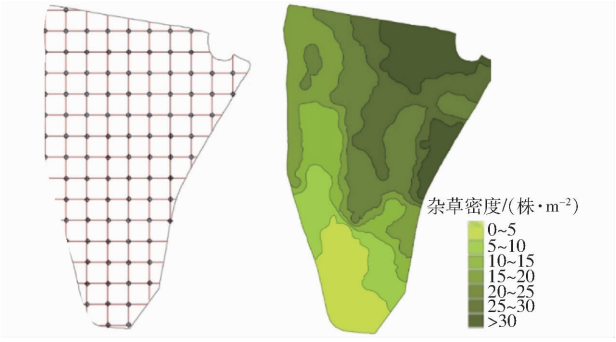


图 15　杂草分布密度图

Fig. 15　Weed density map

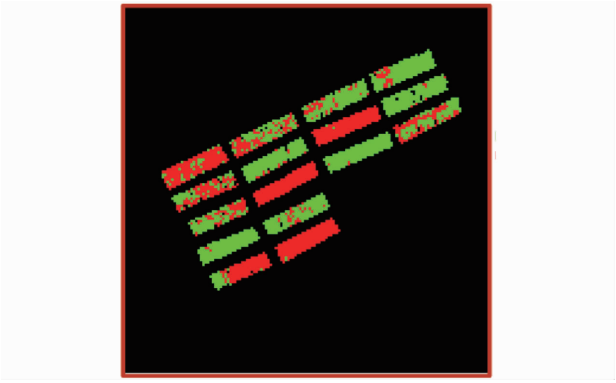


图 16　杂草分布图

Fig. 16　Weed map

除了基于高空成像外，杂草地图还可通过地面绘图技术生成，以解决卫星图像分辨率不足、难以提供关键杂草控制时期（如杂草幼苗期）空间分布细节的问题。LONGCHAMPS 等[53]提出了一种基于地面平台的高精度连续杂草地图制作方法，利用商业相机获取红、绿、蓝（RGB）图像，在控制光照环境下，通过简单的图像分割技术，并结合主成分分析与强度阈值区分植被与非植被像素。SUI 等[54]开发了一种基于地面的杂草测绘系统，用于测量棉田中的杂草密度与分布（图 17），并提供杂草的经纬度信息。为优化采样分辨率，研究对比不同模拟距离（1.5～6.0 m）下传感器采集的杂草地图，结果表明距离为 4.5 m 时可生成准确的杂草地图，满足行间杂草控制的空间分辨率需求。然而，此类地图的主要局限在于杂草位置可能会随时间推移发生变化，



图 17　用于杂草地图绘制的移动平台及杂草地图绘制过程

Fig. 17　Mobile platform for weed mapping and weed mapping

无法在后期确保其位置稳定性[55]。

2.2.2 基于传感器的实时杂草检测技术

当前基于传感器的实时杂草检测技术分为非成像和成像两类[56]。非成像技术包括光谱反射、荧光、超声波和激光雷达传感器,按检测特征分为两种方法[57]:基于光谱特征(如反射光或发射光)检测的光谱仪和荧光传感器,输出光谱数据;基于距离和高度特征的 LiDAR 和超声波传感器,输出距离值。光谱反射传感器因成本低廉,能够有效区分裸露地面与绿色植被而被广泛应用[58],但由于无法区分植物种类,主要适用于作物出苗前或行间、作物行内的杂草定位。表 4 为杂草实时检测相关研究成果。

表 4 实时杂草检测相关研究成果

Tab. 4 Research on real-time weed detection

作物	杂草种类	检测面积/高度	技术类型	传感器	文献序号
玉米	禾本草,双子叶草	4.2 mm²	荧光光谱	摄谱仪	[59]
小麦,豌豆	所有杂草	518 cm × 2.5 cm	光谱	光谱传感器	[60]
玉米	高粱草,莎草,曼陀罗,苍耳	0.45 m²	激光雷达	LiDAR	[33]
玉米	禾草(高粱草),阔叶杂草(苍耳草,曼陀罗)	30 cm	超声波	超声波传感器	[61]
玉米	单子叶,双子叶	1 m²	三维成像	深度相机	[62]
大豆	禾本草,阔叶杂草	4 m	机器视觉	RGB 摄像头	[63]

近距离传感器检测技术可通过接触式和非接触式两类手段测量作物和杂草的空间位置,以实现精确避苗除草。在接触式检测中,利用柔性软轴[27]或绕转轴旋转的触杆[64]与植株轻微接触,可在不损伤作物的前提下感知植株位置,从而引导除草刀和拔草盘适时避开目标作物。相较之下,非接触式检测技术则更加多样和便捷,包括红外线、光电、激光以及 X 射线等多种传感方式[65]。通过红外与光电元件组成的简单系统,可利用信号处理精确锁定行内单株作物的位置,引导机械除草装置实施更具针对性的作业[66]。进一步地,X 射线成像技术可根据不同植物组织对射线吸收程度的差异,实现对目标作物主茎与杂草叶片的有效区分[67],识别率可达 90% 以上。激光扫描(图 18)与超声测量的检测方式[68](图 19)则可确保在除草过程中精准感知作物位置,实现对玉米等重要农作物的安全保护[69]。虽然近距离传感器在成本、操作与反应速度方面具备优势,其在高复杂背景下对作物与杂草的区分精度仍存在提升空间。这一不足有待进一步优化,以满足现代农业对精准除草的严格要求。

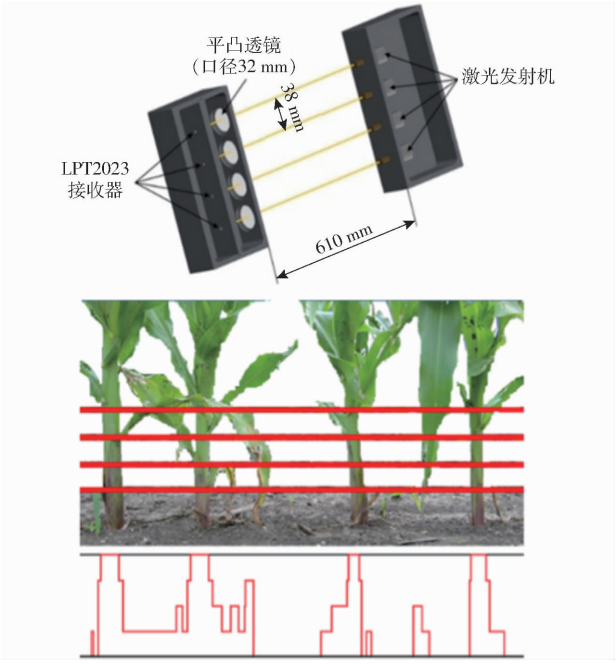


图 18 用于区分作物与杂草的 4 个激光发射器

Fig. 18 Four laser emitters used to distinguish crops from weeds

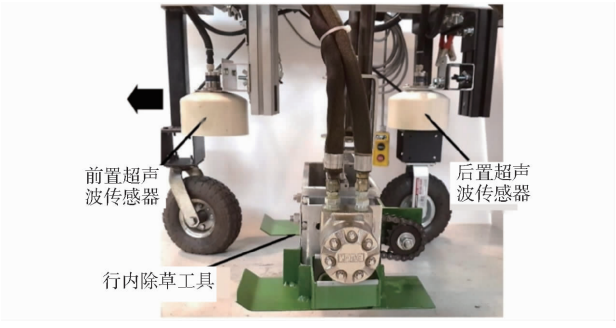


图 19 用于检测作物的前后超声波传感器

Fig. 19 Front and rear ultrasonic sensors for crop detection

2.2.3 基于机器视觉的苗草识别

成像技术与机器学习的集成能够实现作物与杂草的高精度区分[70]。针对更精细空间尺度的特定区域控制,越来越多的研究开始关注利用数字摄像头用地面平台监测杂草。

全球已知的杂草种类超过 50 000 种,其中数十种对田间作物构成严重危害。一般而言,杂草检测并不区分具体种类,研究者通常将其简化为二元或多分类问题[71]。类似于作物行检测,传统基于机器视觉的苗草识别流程包括图像分割、特征提取和分类 3 个步骤。图像分割通过有效的分割算法提取目标区域,生成作物或杂草的目标图像。植物在形状、颜色和空间位置等图像特征方面存在显著差异,基于这些特征可以实现杂草和作物的区分。如表 5 所示,作物与杂草区分的视觉特征主要包括生物形态、

表 5　不同特征识别特点

Tab. 5　Different features identify characteristics

特征类型	特点	优点	缺点	代表方法
生物形态	基于植物的几何形状和结构	直观性强，适用范围广	对光照、遮挡和背景变化敏感，形态变化复杂	面积、周长、长度、直径、傅立叶描述符等
光谱特征	基于植物反射光谱的特性	高精度，能检测健康状态	成本高，数据处理复杂，数据量大	RGB、HIS、ExG、颜色直方图、颜色矩阵颜色熵等
视觉纹理	纹理反映了图像中均匀现象的视觉特征	对光照变化和部分遮挡有鲁棒性，细节捕捉能力强	依赖高质量图像，计算复杂，需要高计算能力	纹理分析（GLCM、LBP）、机器学习（SVM、CNN）

光谱特征和视觉纹理[72]。例如，NGUYEN 等[73]通过局部二值模式（LBP）纹理特征和支持向量机实现了玉米和单种杂草的识别。ZHU 等[74]提出了一种基于形状和纹理的农田 5 种杂草分类方法。张小龙等[75]对豌豆幼苗期田间常见杂草的 RGB、HSV 和 HIS 颜色空间中各组分的灰度分布进行分析比较，并提出基于 R－B 色差特征的杂草分割方法以应对复杂背景。鉴于单一特征分类易受环境干扰，部分研究者提出采用多特征融合检测方法。SABZI 等[76]开发了一种基于灰度共生矩阵（GLCM）、颜色特征、纹理特征、不变矩和形状特征的视频处理和元启发式分类器的机器视觉原型。邓向武等[77]将杂草图像的颜色、形状和纹理特征总共 101 维特征相结合，解决了杂草单个特征识别精度低的问题。相比单特征识别，这种多特征决策融合方法具有更好的稳定性和较高的识别精度。

传统的机器视觉技术需要依赖大量专业知识从原始数据中构建特征提取器[78]，而深度学习能自动提取特征实现高效的杂草识别与检测。深度学习方法主要分为图像分类[79]、目标检测[80]、语义分割[81]和实例分割[82]。近年来，深度卷积神经网络（CNN）在杂草检测中应用广泛，取得显著成果。例如，BEEHARRY 等[83]评估了 ANN 和 AlexNet 的杂草检测算法的性能。实验结果表明，AlexNet 在杂草检测中的准确率超过 99%，而 ANN 在同一数据集上的准确率为 48%。RAMIREZ 等[84]的分割模型显示数据平衡和空间语义信息的重要性。PATIDAR 等[85]提出的增强型 Mask R CNN 杂草检测模型在验证阶段准确率达到了 98% 以上。以 YOLO 系列为代表的杂草检测模型具有速度快、参数量小的特点，更加适用于部署到农机设备上[86]，冀汶莉等[87]基于 YOLO v5s 设计一种轻量化杂草检测模型，但训练样本仍然庞大，为解决此问题，张继成等[88]在 YOLO v5 架构的基础上，通过引入注意力机制从而提高模型对不同尺度和复杂度目标的检测精度。然而，深度学习对大数据集的依赖性、作物和杂草图像采集难度大仍是瓶颈。

杂草检测面临诸多挑战，如作物与杂草形态相似、数据集不足、检测环境复杂等。此外，叶片形态、光照变化、重叠与遮挡等问题限制了检测速度和精度。未来趋势包括：①发展半监督或无监督特征学习，减少对标记数据的依赖。②多传感器融合和多特征检测以提升精度。③融合传统与深度学习优势，提出有效应对光照、遮挡等问题的优化方案。

3　除草控制技术研究现状

3.1　避苗除草控制

避苗除草控制是智能除草系统的核心环节，对实现精准除草和提升作业质量具有决定性作用。避苗除草控制方法涵盖多种技术，如比例积分微分（PID）控制[89]、最优控制[90]、模糊控制[91]、纯跟踪模型[92]、神经网络[93]以及模型预测控制等[94]。其中，模糊控制和神经网络因无需建立精确的运动学或动力学模型，表现出一定优势。尤其是神经网络，尽管具有强大处理能力，但依赖高质量的训练数据。而 PID 控制以其技术成熟、控制效果良好，被广泛应用于智能除草控制中。KUMAR 等[95]设计了一种基于模糊逻辑算法的机电原型系统，旨在实现生态友好的株间除草作业并避免作物损伤。通过结合模糊控制和实时传感器数据，精确识别杂草位置（图 20）并动态调整除草路径，模糊逻辑控制增强了系统在非线性田间环境中的适应性，能在作物与杂草交错的情况下有效避开作物，提高除草精度的同时保护作物。实验表明，该系统在不同作业环境中展现出优异的除草精度和作物保护效果。

CHANG 等[96]利用深度学习识别和定位杂草，并设计一种倒金字塔形除草工具（图 21），能够有效铲除杂草且不受土壤污染影响。该检测与控制方法集成在配备高速图形处理单元的嵌入式系统中，与除草机结合使用，通过电机控制除草机构，实现智能化除草：当检测到杂草时启动除草操作，未检测到时则停止运作。实验结果表明，即使在移动平台速度达 20 cm/s 的情况下，该系统依然能够准确检测和

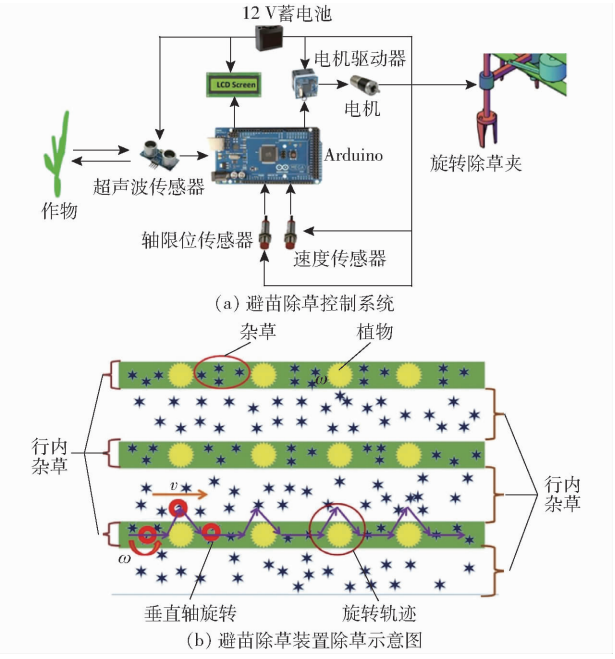


图 20 旋转避苗除草控制

Fig. 20 Rotary weed control

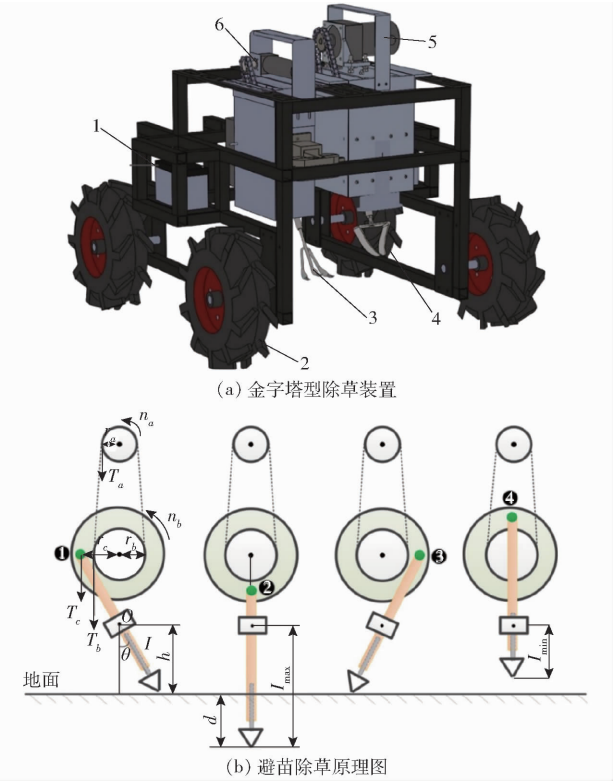


图 21 基于深度学习的避苗除草装置

Fig. 21 Weeding and avoiding seedling device based on deep learning

1. 电池 2. 四轮底盘 3. 爪耙除草工具 4. 倒三角除草工具 5.1 号除草系统 6.2 号除草系统

定位杂草位置,除草机构也能够成功铲除杂草根部。然而,受限于爪耙的结构设计和执行机构的扭矩,该系统仅适用于软土质地及小型杂草的清除。

混合自主机器人平台(图 22),能够实现行间和株间杂草清除[97]。该机器人在田间导航时由远程人类操作员控制移动,而杂草识别和清除过程完全自主进行。除草开始时,机器人通过 RGB - D 摄像头采集目标区域的空间、颜色和深度信息,并利用预训练的深度神经网络对土壤、作物和杂草进行分类。为确保识别准确性,夹持器上的第 2 个 RGB - D 摄像头对目标进行二次分析,以确认分类的正确性。系统中,任何未识别为作物的植物均被视为杂草。实验室、田间和温室环境测试结果表明,在不同光照条件下,该系统作物和杂草识别准确率超过 95%,加入行间距等信息后识别率提升至 98%。除草效率达 85%,作物损伤率低于 5%。



图 22 自主杂草机器人

Fig. 22 Autonomous weed-picking robot

QUAN 等[98]利用神经网络模型对作物和杂草进行识别分类,能够在复杂田间环境中有效区分杂草和作物,从而规划除草路径,确保精准避开作物。该机器人配备旋转刀片和机械臂等除草装置,实现高效除草操作(图 23)。在接近作物时,系统会自动调整除草装置的方向和位置,防止误伤作物。此模式尤其适用于密植作物或行间距较小的作业场景。实验结果表明,该系统除草率达 85.91%,作物损伤率仅为 1.17%,显著提升了除草效率和精确性。

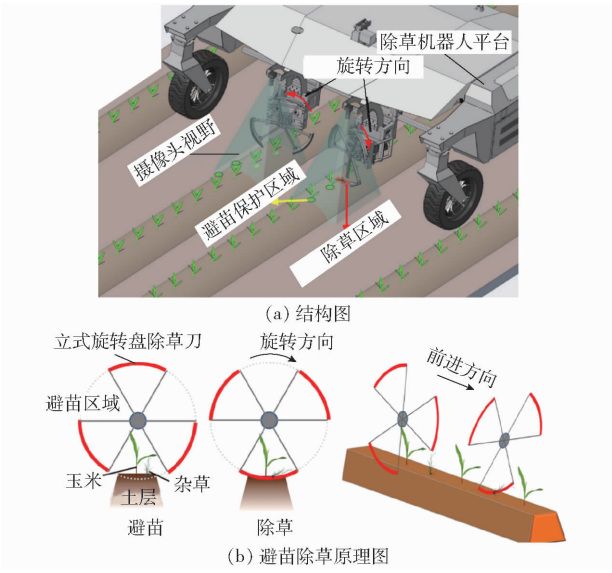


图 23 立式旋转避苗除草装置

Fig. 23 Vertical rotary control for avoiding seedlings and weeding

3.2　对行控制

随着精准播种机的发展，作物行间间距更为均匀，这一技术促进了多种中耕作物自动间苗机的开发。在牵引式设备中，多个除草单元可同时运作，实现多行同步除草，从而进一步提升作业效率。杂草清除的设计主要分为两种：①利用机械刀快速定位，在播种线内外切割不需要的植株。②使用旋转锄头，将其降低以切割不需要的植物材料，或升高到目标植株上方加以保护。这些系统可作为杂草控制机器人中的除草执行器，具有广泛的应用前景。

对行控制是确保精准除草的关键，尤其对于拖拉机悬挂式智能机械除草机，精准的对行控制系统可以使除草部件沿作物行精确移动，从而避免作物损伤并优化除草效果[99]（图 24）。对行控制依赖于作物行位置的感知系统，该系统能够提供实时的作物行位置信息，帮助确定除草机与作物行之间的相对位置。

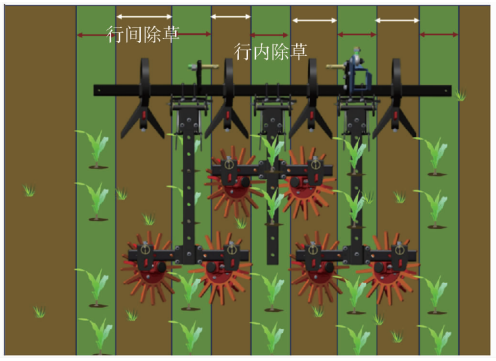


图 24　行间-行内除草示意图

Fig. 24　Inter-row and intra-row weeding diagram

对行控制系统主要由执行元件和反馈元件两部分组成。执行元件负责实际的物理移动，反馈元件提供位置和方向信息，以确保移动的精确性，其闭环控制流程如图 25 所示。执行元件（如液压缸和电缸）可根据作物行调整除草机位置，确保其沿作物行精准前进。液压驱动系统因大扭矩和高可靠性，常用于大型机械设备[100]；电缸则适合精细调整的小型设备。反馈系统通过传感器数据提供实时位置反馈，实现闭环控制，确保机器实时纠偏。

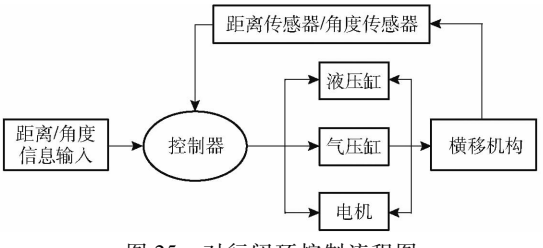


图 25　对行闭环控制流程图

Fig. 25　Flowchart of closed-loop control

为进一步满足农机对行控制中平稳驱动、低速运动与大驱动力输出等特殊需求，一些研究将定子与动子相结合的横移机构与液压缸驱动相互耦合，通过电磁阀电磁铁线路的有序通断，实现横向自适应对行（图 26）[101]。在这种设计中，定子-动子式结构为液压系统提供精确的横移基础，而电气控制部分则可灵活调节输出动力，确保在低速、大负载条件下仍能够保持运动的稳定性与可靠性。

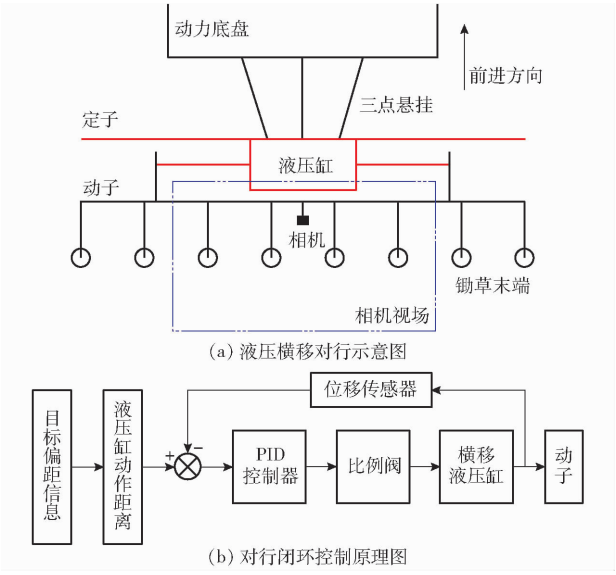


图 26　液压横移对行系统

Fig. 26　Hydraulic cross alignment system

然而，复杂的田间环境下，液压驱动系统极易受到外界扰动和系统参数变化的影响，从而对对行精度与稳定性构成挑战。为此，研究者引入主动抗扰控制（ADRC）策略，以提升系统的鲁棒性与动态响应特性（图 27）[102]。ADRC 通过状态观测器实时估计未建模扰动和不确定性因素，将复杂非线性动态过程转化为更易于控制的对象。与此同时，引入跟踪微分器（TD）以平滑外部输入信号的突变，从而有效减少对行机构的震荡和振幅过大的瞬态响应。该策略使得液压执行机构在不确定性和时变干扰下仍能维持对行精度与控制灵活性。

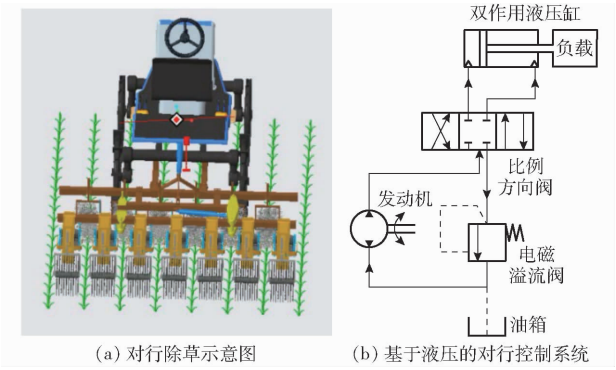
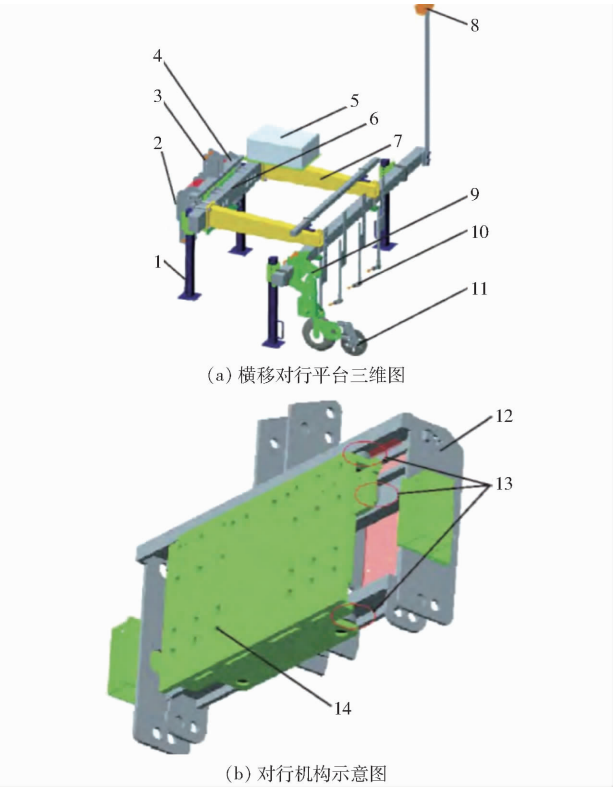


图 27　基于主动抗扰控制的对行除草控制系统

Fig. 27　Row weeding control system based on active disturbance rejection control

在这一基础上,更为先进的对行装置与控制方案还将机器视觉与液压伺服技术深度融合(图 28)[103]。通过在液压杆推板上安装动子滚轮,使其沿定子滚道实现精确的横向移动,再结合直线位移传感器对动子相对于定子位置的实时检测,便可对液压系统输出进行闭环控制。此类方案不但能在视觉信息的辅助下实现基于目标特征的精准对行,还可根据实测位移偏差灵活调整横移策略,使整体装置在多变的现场作业条件下依然能够精确完成对行动作。



(a) 横移对行平台三维图

(b) 对行机构示意图

图 28 主动横移对行装置

Fig. 28 Active traverse alignment device

1. 作业执行器 2、3. 仿形机构 4. 相机安装架 5. 三点悬挂 6. 支座 7. 定子 8. 控制箱 9. 动子 10. 机架 11. 测速单元 12. 滚道 13. 滚轮 14. 滚轮安装板

4 除草部件研究现状

根据作物除草目标的不同,除草部件可分为行间除草和株间除草两类。在除草过程中,除草部件需与杂草和土壤直接接触,不同的杂草类型、土壤条件以及行间与株间位置对除草部件的性能要求各异。因此,优化除草部件的设计对提高除草效果和降低作物损伤风险至关重要。常见行间与株间除草结构如图 29 所示,除草部件类型及特点如表 6 所示。

4.1 行间除草装置

行间除草装置主要包括直线运动的锄铲和滚切



(a) 行间除草装置

(b) 株间除草装置

图 29 常见行株间除草部件结构图

Fig. 29 Common inter row weeding components

式锯齿旋耕刀,具有结构简单、拆装方便的特点,适用于大面积田间作业,通常无需复杂控制系统。在土壤条件较好时可满足中耕要求,但在粘重土壤或杂草过多时,易出现刀齿缠草、碎土率低、功耗高等问题。

行间除草装置以被动式为主,包括耙轮式、刷式、梳齿式、铲式和旋转刀片式等,物理清除行间杂草。驱动式中耕除草机械碎土率高、除草效果好,适合粘重土壤作业。吕金庆等[106]设计了如图 30 所示的驱动式旋转除草部件,通过拖拉机传动轴输出,驱动旋刀刀组进行高速转动,打碎杂草和土壤。此外,杜伟等[107]引入仿生栉孔扇贝棱纹结构(图 31),减少土壤阻力,并增加土壤扰动。尹志平[108]以东北鼹鼠爪趾的中趾作为仿真对象,分析爪趾的减阻特征与破土特点,设计出如图 32 所示的仿生双翼除草铲。但该种除草方式一般抛土量大,易伤苗,因此,在作物行间作业时,前进速度相对较慢。

表 6　除草部件类型与特点

Tab. 6　Comparison of weeding parts

类型	优点	缺点
耙轮式	耙齿松土，将杂草连根拔起，可以有效疏松土壤，提高土壤的透气性，有助于作物根系的生长；适用于玉米、小麦	可能伤及作物根部，特别是较浅根的作物
刷式	刷毛通常由聚丙烯或钢制成[104]，除草时将杂草从土壤中拔出来，折断茎，露出根，使它们容易干燥。对作物伤害小，不容易损伤作物；适用于地表杂草	除草效率较低，不能彻底清除深根杂草
梳齿式	通过梳齿刮动除草，适用于早期杂草阶段，表层松散，没有大的石头嵌入其中，对作物伤害较小；适用于蔬菜、草莓等高含水率土壤中生长的作物	工作效率较低，无法处理大面积杂草
铲式	通过铲土割草，除草效果彻底，能够清除根部较深的杂草，效率高，速度快，铲的刀片是“L”形或“a”形[105]；适用于大豆、棉花、玉米	容易伤及作物，特别是苗期作物
旋转刀片式	旋转刀片可以快速切割和清除杂草，刀片的角度和深度可调，适应性强；适用于各种行作物	对土质要求高，硬质土壤可能影响其工作效果
指状	由两个方向相反的盘组成，盘上安装指形钢齿或指形橡胶[105]。工作时，圆盘在土壤摩擦力作用下旋转，使指状结构进入土壤，损坏杂草根部。对较大和较小的杂草均有效；适用于玉米、蔬菜等	对粘重土壤的效果较差，在密集种植条件下效果不佳

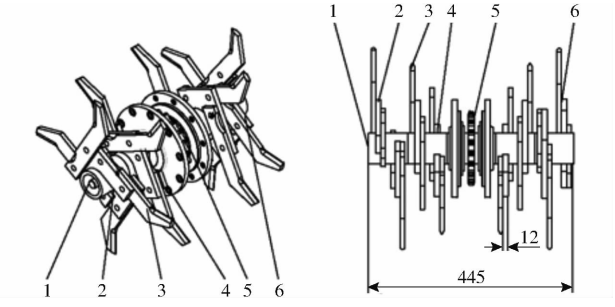


图 30　行间驱动式旋转除草装置

Fig. 30　Row driven rotary weeding device

1. 刀棍　2. 左刀盘　3. 碎土刀　4. 内刀盘　5. 传动齿轮　6. 右刀盘

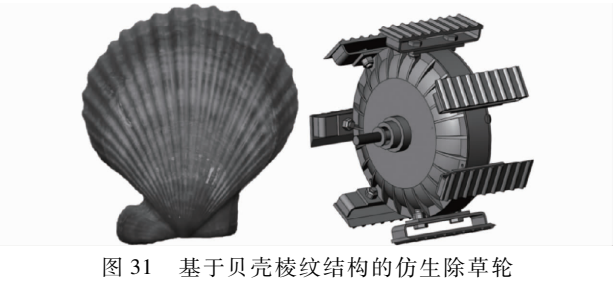


图 31　基于贝壳棱纹结构的仿生除草轮

Fig. 31　Bionic weeding wheel based on shell ribbed structure

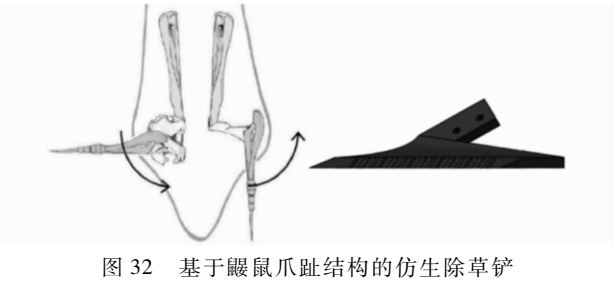


图 32　基于鼹鼠爪趾结构的仿生除草铲

Fig. 32　Bionic weeding shovel based on mole claw toe structure

4.2　株间除草装置

株间除草装置分为被动型和主动型两类[109]。被动型装置包括指状锄草刀、弹性锄草齿、垂直轴刷式锄草刀等，主要依靠地面摩擦力被动转动，适用于中耕作物的苗期除草，具有成本低廉的优势。

随着人工智能、智能传感和精准控制等技术的发展，主动型株间锄草装置得以实现。主动型装置通过获取作物与杂草信息，实时调整除草部件的运动参数，分为旋转式、摆动式和混合式 3 种，显著提高了除草精准度并减少作物损伤。YE 等[110]设计了基于摆动开合的主动弹性梳齿装置，适用于大豆株间除草。当装置处于除草阶段时，梳齿板闭合并渗入土壤；在避苗阶段，法兰盘旋转打开梳齿板，避开植株后再次闭合，完成避苗（图 33）。

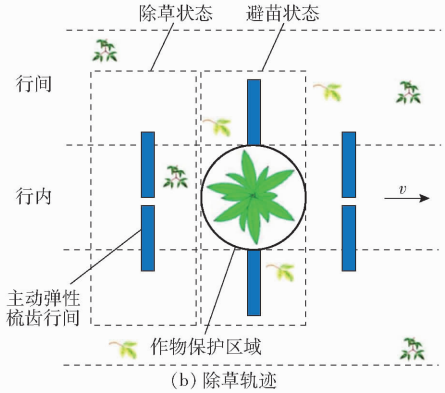
旋转式末端执行器通过变频旋转实现避苗，分为水平和垂直方向。贾洪雷等[27]针对机械式避苗装置难以准确定位秧苗的问题，通过对玉米和杂草根系的物理特性进行分析，设计了 3 条互呈 120°的梳齿板间歇性旋转避苗装置（图 34）。GOBOR 等[111]为适应不同植物间距、行距及生长阶段，开发了沿作物行水平旋转的集成臂除草工具（图 35），该工具具有较高的稳定性，但控制难度较大[112]。

摆动式主动型末端执行器通过往复运动实现避苗，相较于旋转式除草装置，其对精准控制要求较低，适应不同土壤环境的能力更强[113]。王文明[114]设计了凸轮摇杆式摆动型苗间除草装置，将电机连续转动转化为除草刀的往复摆动，以实现不伤苗的除草（图 36）。PÉREZ-RUÍZ 等[115]通过气动驱动刀具实现张合，以摆动方式完成避苗除草（图 37）。

此外，许多研究将旋转与摆动结合使用。王艳[116]设计的除草机器人在检测到行内杂草时，执行器闭合，刀盘嵌入土中旋转以搅断杂草根部（图 38）；在无杂草时，刀盘则空转。Maya 公司生产的混合式除草机同样采用该设计[117]，如图 39 所



(a) 主动弹性梳齿除草部件



(b) 除草轨迹

图 33 大豆株间主动弹性梳齿除草装置

Fig. 33 Active elastic comb weeding device between soybean plants



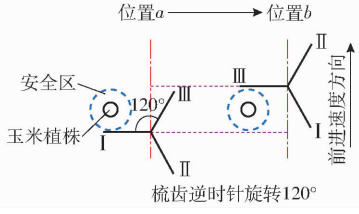


图 34 垂直式间歇旋转避苗除草装置

Fig. 34 Vertical intermittent rotary anti-seedling and weeding device

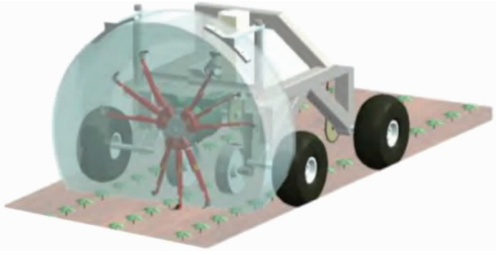


图 35 水平式旋转避苗除草装置

Fig. 35 Horizontal rotary device for avoiding seedlings and weeding

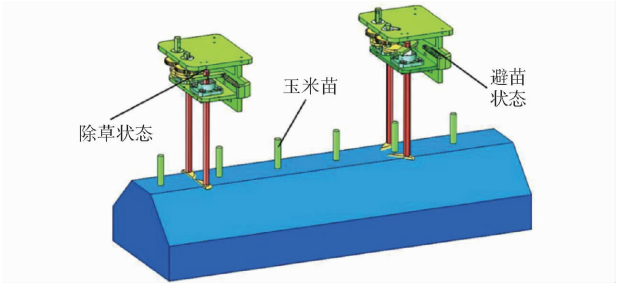


图 36 凸轮摇杆式摆动型苗间除草装置

Fig. 36 Cam-rocker type oscillating weeding device between seedlings

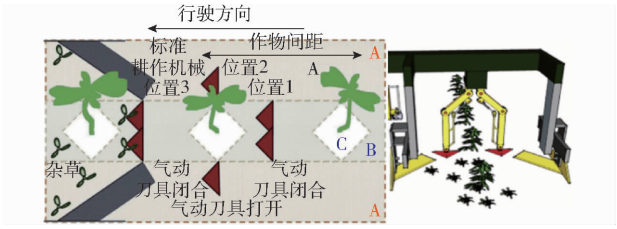


图 37 气动摆动型除草装置

Fig. 37 Pneumatic oscillating weeding device

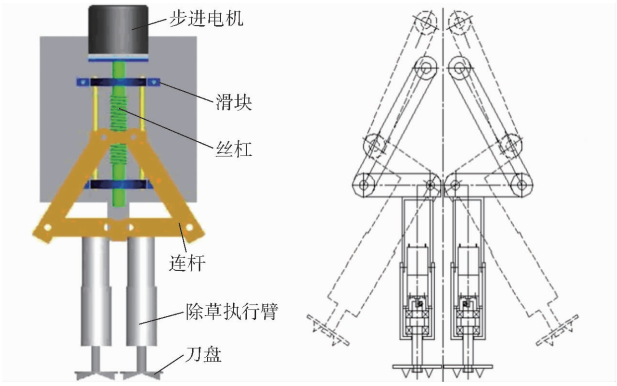


图 38 混合式除草装置

Fig. 38 Hybrid weeding device

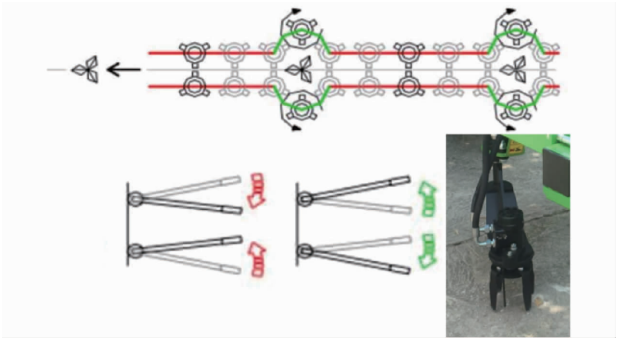


图 39 Maya 混合式除草装置

Fig. 39 Maya hybrid weeding unit

示,当检测到植株时,除草臂自动打开实现避苗。

5 结论与展望

旱田智能化机械除草技术近年来在多传感器融合、深度学习算法及自动化控制等领域取得了显著进展,为精准农业的发展提供了重要技术支撑。然而,现有技术在实际应用中仍面临诸多问题和挑战:

(1)复杂田间环境的适应性不足:非结构化的田间环境、作物与杂草形态的多样性以及光照、土壤条件的变化,均对智能化除草设备的可靠性提出了较高要求。现有除草机对复杂环境的适应性有限,特别是在密集种植和多种作物共存的农田中表现较差。

(2)成本高:大多数智能除草设备的研发与制

造成本较高，特别是高精度传感器、控制系统和执行机构的成本，限制了其在中小型农场中的广泛应用。

（3）杂草识别精度和实时性不足：尽管机器视觉和深度学习算法显著提高了杂草识别的能力，但在动态环境下实现实时、高精度的检测与决策仍存在技术瓶颈。

（4）多功能性与技术鲁棒性较低：许多智能除草设备难以同时满足不同作物行距、株距和种植模式的需求，设备的通用性和鲁棒性尚需进一步提高。

未来，随着物联网、大数据、云计算、智能传感和人工智能等技术在农业中的深入应用，智能化机械除草将以其精准、高效的优势逐步取代传统化学除草，成为主要的农田除草方式。智能除草系统的进一步发展将集中于以下方面：

（1）AI 模型优化：先进的深度学习算法（如卷积神经网络和递归神经网络）在智能除草中的应用将更加广泛。通过在大规模、多样化数据集上训练，这些 AI 模型的识别精度和环境适应性将显著提高，使得智能除草机在多种作业条件下具备更高的杂草识别能力。

（2）多源数据集成：物联网设备、无人机和现场机器人等技术的协同应用将进一步提升智能除草系统的感知能力。这些设备通过实时数据采集、现场监测与作业执行，实现除草机对作业环境的精准感知，从而实现高效的杂草定位与处理。

（3）多传感器融合：智能除草系统中将采用视觉、红外、超声波等多种传感器的组合，以增强对田间环境的识别精度，支持除草作业的精细化操作。

（4）适应性设计：针对不同种植环境，智能除草机将进行适应性设计。例如，在大规模种植环境中，系统将整合多个并行工作的除草单元，由无人拖拉机搭载大型悬挂式除草机，自动完成田间除草，减少人工干预；在小规模农场中，设备则将向轻量化和高精度方向发展，集成视觉识别系统以实现选择性除草。

（5）基于北斗导航的精准除草：基于北斗导航和种植电子地图的智能除草系统将从播种到管理提供全程支持。系统通过北斗导航获取的高精度位置信息与种植地图结合，实现作物行的精准识别和除草路径优化，从而有效提升除草效率并减少作物损伤，推动精准农业的发展。

参 考 文 献

[1] 李香菊. 近年我国农田杂草防控中的突出问题与治理对策[J]. 植物保护，2018，44(5)：77－84.
LI Xiangju. Main problems and management strategies of weeds in agricultural fields in China in recent years[J]. Plant Protection，2018，44(5)：77－84.（in Chinese）

[2] ZHANG Z，LI R，ZHAO C，et al. Reduction in weed infestation through integrated depletion of the weed seed bank in a rice-wheat cropping system[J]. Agronomy for Sustainable Development，2021，41(10)：1－14.

[3] PARVEN A，MEFTAUL I，VENKATESWARLU K，et al. Herbicides in modern sustainable agriculture：environmental fate，ecological implications，and human health concerns[J]. International Journal of Environmental Science and Technology，2024(22)：1181－1202.

[4] FISHKIS O，WELLER J，LEHMHUS J，et al. Ecological and economic evaluation of conventional and new weed control techniques in row crops[J]. Agriculture，Ecosystems & Environment，2024，360：108786.

[5] European Innovation Partnership for Agricultural Productivity and Sustainability（EIP－AGRI）. Inspirational ideas：weed control without chemicals[EB/OL]. [2024－11－14]. https：//ec.europa.eu/eip/agriculture/en/news/inspirational-ideas-weed-control-without-chemicals.html.

[6] 农业农村部关于印发《到 2025 年化肥减量化行动方案》和《到 2025 年化学农药减量化行动方案》的通知[EB/OL]. [2024－11－14]. https：//www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202212/t20221201_6416398.htm.

[7] RAO A，SINGH R，MAHAJAN G，et al. Weed research issues，challenges，and opportunities in India[J]. Crop Protection，2020，134：104451.

[8] VAN DER WEIDE R，BLEEKER P，ACHTEN V，et al. Innovation in mechanical weed control in crop rows[J]. Weed Research，2008，48(3)：215－224.

[9] PÉREZ-RUIZ M，SLAUGHTER D，GLIEVER C，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.

[10] Garford Farm Machinery Ltd Precision Guided Hoes & InRow Weeders[EB/OL]. [2024－11－14]. https：//garford.com/.

[11] EC－Weeder LEMKEN[EB/OL]. [2024－11－14]. https：//lemken.com/en-en/agricultural-machines/cropcare/weed-control/mechanical-weed-control/ec-weeder.

[12] Farmdroid FD20－FarmDroid[EB/OL]. [2024－11－14]. https：//farmdroid.com/products/farmdroid-fd20/.

[13] Automatic Weeder-Ferrari Growtech REMOWEED and SCORPION[EB/OL]. [2024－11－14]. https：//ferrarigrowtech.com/en/automated-weeders/28-remoweed.html.

[14] Naio-technologies[EB/OL]. [2024－11－14]. https：//www.naio-technologies.com/en/home/.

[15] Bosch's giant robot can punch weeds to death[EB/OL]. [2024－11－14]. https：//spectrum.ieee.org/bosch-deepfield-

robotics-weed-control.
[16] DE DINO À ORIO[EB/OL]. [2024 - 11 - 14]. https://www.naio-technologies.com/dino/.
[17] Orio[EB/OL]. [2024 - 11 - 14]. https://www.naio-technologies.com/en/orio-is-the-most-versatile-tool-carrier/.
[18] Ekobot-Autonomous precision agriculture[EB/OL]. [2024 - 11 - 14]. https://www.ekobot.se/.
[19] FarmWise Vulcan: Autonomous Weeding Robot-agtecher: The Agri Tech Place[EB/OL]. [2024 - 11 - 14]. https://agtecher.com/product/farmwise-vulcan-autonomous-weeding-robot/.
[20] Odd. Bot-mechanical weeding robots[EB/OL]. [2024 - 11 - 14]. https://www.odd.bot/.
[21] Products and services-vineyards robots-made in france by vitibot[EB/OL]. [2024 - 11 - 14]. https://vitibot.fr/vineyards-robots-bakus/? lang = en.
[22] Andela robot weeder ARW - 912: efficient agricultural weeding-agtecher: The Agri Tech Place[EB/OL]. [2024 - 11 - 14]. https://agtecher.com/product/weeder-arw-912/.
[23] 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.
LI Jiangguo, LIU Zhanliang, ZHANG Jinguo, et al. Review of mechanical weeding technique in field at home and abroad[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006,28(10):14 - 16. (in Chinese)
[24] 王金忠, 陈琪. 3ZS - 6 型耕旋联合除草机[J]. 粮油加工与食品机械, 1994(2):22 - 23.
WANG Jinzhong, CHEN Qi. 3ZS - 6 tilling-rotary combined weeder[J]. Cereals and Oils Processing, 1994(2):22 - 23. (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 forintra-row mechanical weeding[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(14):8 - 14. (in Chinese)
[26] 李南, 陈子文, 朱成兵, 等. 电驱锄草机器人系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016,47(5):15 - 20.
LI Nan, CHEN Ziwen, ZHU Chengbing, et al. System design and experiment of electric driven weeding robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(5):15 - 20. (in Chinese)
[27] 贾洪雷, 李森森, 王刚, 等. 中耕期玉米田间避苗除草装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018,34(7):15 - 22.
JIA Honglei, LI Sensen, WANG Gang, et al. Design and experiment of seedling avoidable weeding control device forintertillage maize (*Zea Mays* L.)[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(7):15 - 22. (in Chinese)
[28] JIANG W, QUAN L, WEI G, et al. A conceptual evaluation of a weed control method with post-damage application of herbicides: a composite intelligent intra-row weeding robot[J]. Soil and Tillage Research, 2023,234:105837.
[29] GRIEPENTROG H, NØRREMARK M, NIELSEN J, et al. Autonomous intra-row rotor weeding based on GPS autonomous intra-row rotor weeding based on GPS[C]// CIGR World Congress, Germany,2006.
[30] Arvorum | Precision Farming | Farming Management[EB/OL]. [2024 - 11 - 15]. https://arvorum.com.
[31] NØRREMARK M, GRIEPENTROG H, NIELSEN J, et al. Evaluation of an autonomous GPS-based system for intra-row weed control by assessing the tilled area[J]. Precision Agriculture, 2012,13(2):149 - 162.
[32] 胡炼, 王志敏, 汪沛, 等. 基于激光感知的农业机器人定位系统[J]. 农业工程学报, 2023,39(5):1 - 7.
HU Lian, WANG Zhimin, WANG Pei, et al. Agricultural robot positioning system based on laser sensing[J]. Transactions of the CSAE, 2023,39(5):1 - 7. (in Chinese)
[33] ANDÚJAR D, ESCOLÀ A, ROSELL-POLO J, et al. Potential of a terrestrial LiDAR-based system to characterise weed vegetation in maize crops[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013,92:11 - 15.
[34] 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.
[35] 邢钦淞, 丁素明, 薛新宇, 等. 智能田间除草机器人发展现状研究[J]. 中国农机化学报, 2022,43(8):173 - 181.
XING Qinsong, DING Suming, XUE Xinyu, et al. Research on the development status of intelligent field weeding robot[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022,43(8):173 - 181. (in Chinese)
[36] 苏筠皓. 复杂环境下中耕除草机器人视觉导航路径识别研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2024.
SU Junhao. Research on visual navigation path recognition of field tillage weeding robot in complex environment[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2024. (in Chinese)
[37] ZHANG X, WANG Q, WANG X, et al. Automated detection of crop-row lines and measurement of maize width for boom spraying[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023,215:108406.
[38] 朱超冉, 张春雨. 基于杂草图像处理的阈值分割算法研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2022,40(3):16 - 19.
ZHU Chaoran, ZHANG Chunyu. Research on threshold segmentation algorithm based on weed image processing[J]. Journal of Jiamusi University(Natural Science Edition), 2022,40(3):16 - 19. (in Chinese)
[39] 王建仑. 田间叶片图像分割与单幅三维重建的机器视觉算法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
WANG Jianlun. Study on field leaf image segmentation and 3D reconstruction from a single image machine vision algorithms[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
[40] 郑小南, 杨凡, 李富忠. 农作物图像分割算法综述[J]. 现代计算机, 2020(19):72 - 75.
ZHENG Xiaonan, YANG Fan, LI Fuzhong. Overview of crop image segmentation algorithm[J]. Modern Computer, 2020

(19):72 – 75. (in Chinese)
[41] 迟德霞, 任文涛, 刘金波, 等. 基于模糊 C 均值聚类的水稻秧苗图像分割[J]. 沈阳农业大学学报, 2013,44(6):787 – 792.
CHI Dexia, REN Wentao, LIU Jinbo, et al. Segmentation of rice images with fuzzy C-means clustering algorithm[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2013,44(6):787 – 792. (in Chinese)
[42] 金飞剑. 基于机器视觉的杂草图像特征提取及识别研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2008.
JIN Feijian. Research of feature extraction and recognition method of weed lmage based on machine vision[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008. (in Chinese)
[43] 王鹏飞. 基于深度学习的玉米田间杂草识别技术及应用[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
WANG Pengfei. Recognition technology and application of weed in corn field based on deep learning[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020. (in Chinese)
[44] RABAB S, BADENHORST P, CHEN Y, et al. A template-free machine vision-based crop row detection algorithm[J]. Precision Agriculture, 2021,22(1):124 – 153.
[45] 张漫, 项明, 魏爽, 等. 玉米中耕除草复合导航系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015,46(1):8 – 14.
ZHANG Man, XIANG Ming, WEI Shuang, et al. Design and implementation of a corn weeding-cultivating integrated navigation system based on GNSS and MV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(1): 8 – 14. (in Chinese)
[46] FERNÁNDEZ-QUINTANILLA C, PEÑA J, ANDÚJAR D, et al. Is the current state of the art of weed monitoring suitable for site-specific weed management in arable crops? [J]. Weed Research, 2018,58(4):259 – 272.
[47] EHSANI M, UPADHYAYA S, MATTSON M. Seed location mapping using RTK GPS[J]. Transactions of the ASAE, 2013, 47(3):909 – 914.
[48] COMPARETTI A, CARRARA M, FEBO P, et al. First tests of spatially variable rate herbicide application on Durum wheat in Sicily[C]// International Conference on Agricultural Engineering, 2002.
[49] PEÑA-BARRAGÁN J, LÓPEZ-GRANADOS F, JURADO-EXPÓSITO M, et al. Spectral discrimination of *Ridolfia segetum* and sunflower as affected by phenological stage[J]. Weed Research, 2006,46(1):10 – 21.
[50] BROWN R, STECKLER J. Prescription maps for spatially variable herbicide application in no-till corn[J]. Transactions of the ASABE, 1995,38:1659 – 1666.
[51] GRAY C, SHAW D, GERARD P, et al. Utility of multispectral imagery for soybean and weed species differentiation[J]. Weed Technology, 2008,22:713 – 718.
[52] GOEL P, PRASHER S, LANDRY J, et al. Hyperspectral image classification to detect weed infestations and nitrogen status in corn[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2003,46:539 – 550.
[53] LONGCHAMPS L, PANNETON B, SIMARD M, et al. A technique for high-accuracy ground-based continuous weed mapping at field scale[J]. Transactions of the ASABE, 2013,56:1123 – 1133.
[54] SUI R, THOMASSON J, HANKS J, et al. Ground-based sensing system for weed mapping in cotton[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008,60(1):31 – 38.
[55] CASTILLEJO-GONZÁLEZ I, PEÑA-BARRAGÁN J, JURADO-EXPÓSITO M, et al. Evaluation of pixel- and object-based approaches for mapping wild oat (*Avena sterilis*) weed patches in wheat fields using QuickBird imagery for site-specific management[J]. European Journal of Agronomy, 2014,59:57 – 66.
[56] PETEINATOS G, WEIS M, ANDÚJAR D, et al. Potential use of ground-based sensor technologies for weed detection[J]. Pest Management Science, 2014,70(2):190 – 199.
[57] SLAUGHTER D, GILES D, DOWNEY D. Autonomous robotic weed control systems: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008,61(1):63 – 78.
[58] BROWN R, NOBLE S. Site-specific weed management: sensing requirements— what do we need to see? [J]. Weed Science, 2005,53(2):252 – 258.
[59] LONGCHAMPS L, PANNETON B, SAMSON G, et al. Discrimination of corn, grasses and dicot weeds by their UV-induced fluorescence spectral signature[J]. Precision Agriculture, 2010,11(2):181 – 197.
[60] DAMMER K, WARTENBERG G. Sensor-based weed detection and application of variable herbicide rates in real time[J]. Crop Protection, 2007,26(3):270 – 277.
[61] ANDÚJAR D, ESCOLÀ A, DORADO J, et al. Weed discrimination using ultrasonic sensors[J]. Weed Research, 2011,51: 543 – 547.
[62] ANDÚJAR D, DORADO J, FERNÁNDEZ – QUINTANILLA C, et al. An approach to the use of depth cameras for weed volume estimation[J]. Sensors, 2016,16(7):972.
[63] 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.
[64] 高强, 袁向东. 葡萄自动避障株间除草机的设计与验证[J]. 农业技术与装备, 2023(3):33 – 35.
GAO Qiang, YUAN Xiangdong. Design and verification of grape automatic obstacle avoidance interplant weeding machine[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2023(3):33 – 35. (in Chinese)

[65] SOUSSI A, ZERO E, SACILE R, et al. Smart sensors and smart data for precision agriculture: a review[J]. Sensors, 2024, 24(8):2647.

[66] BONTSEMA J, GRIFT T, PLEIJSIER K. Mechanical weed control in sugar beet growing: the detection of a plant in a row [J]. IFAC Proceedings Volumes, 1991,24(11):207 - 211.

[67] HAFF R, SLAUGHTER D, JACKSON E. X-ray based stem detection in an automatic tomato weeding system[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2011,27(5):803 - 810.

[68] CORDILL C, GRIFT T. Design and testing of an intra-row mechanical weeding machine for corn[J]. Biosystems Engineering, 2011,110(3):247 - 252.

[69] SABER M, SUK LEE W, F. BURKS T, et al. Performance and evaluation of intra-row weeder ultrasonic plant detection system and pinch-roller weeding mechanism for vegetable crops[C]//2015 ASABE Annual International Meeting, St. Joseph, MI, 2015.

[70] HU K, WANG Z, COLEMAN G, et al. Deep learning techniques for in-crop weed recognition in large-scale grain production systems: a review[J]. Precision Agriculture, 2024,25(1):1 - 29.

[71] LI Y, GUO Z, SHUANG F, et al. Key technologies of machine vision for weeding robots: a review and benchmark[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022,196:106880.

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

[73] NGUYEN THANH LE V, APOPEI B, ALAMEH K. Effective plant discrimination based on the combination of local binary pattern operators and multiclass support vector machine methods[J]. Information Processing in Agriculture, 2019,6(1): 116 - 131.

[74] ZHU W, ZHU X. The application of support vector machine in veed classification[C]//2009 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems, Shanghai, 2009.

[75] 张小龙, 谢正春, 张念生, 等. 豌豆苗期田间杂草识别与变量喷洒控制系统[J]. 农业机械学报, 2012,43(11):220 - 225.
ZHANG Xiaolong, XIE Zhengchun, ZHANG Niansheng, et al. Weed recognition from pea seedling images and variable spraying control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(11):220 - 225. (in Chinese)

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

[77] 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.
DENG Xiangwu, QI Long, MA Xu, et al. Recognition of weeds at seedling stage in paddy fields using multi-feature fusion and deep belief networks[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(14):165 - 172. (in Chinese)

[78] HASAN A, SOHEL F, DIEPEVEEN D, et al. A survey of deep learning techniques for weed detection from images[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021,184:106067.

[79] LAM O, DOGOTARI M, PRÜM M, et al. An open source workflow for weed mapping in native grassland using unmanned aerial vehicle: using Rumex obtusifolius as a case study[J]. European Journal of Remote Sensing, 2021,54(Supp.1):71 - 88.

[80] GAO J, FRENCH A, POUND M, et al. Deep convolutional neural networks for image-based *Convolvulus sepium* detection in sugar beet fields[J]. Plant Methods, 2020,16(1):29.

[81] WANG A, XU Y, WEI X, et al. Semantic segmentation of crop and weed using an encoder-decoder network and image enhancement method under uncontrolled outdoor illumination[J]. IEEE Access, 2020,8:81724 - 81734.

[82] CHAMP J, MORA FALLAS A, GOËAU H, et al. Instance segmentation for the fine detection of crop and weed plants by precision agricultural robots[J]. Applications in Plant Sciences, 2020,8(7):e11373.

[83] BEEHARRY Y, BASSOO V. Performance of ANN and AlexNet for weed detection using UAV-based images[C]//2020 3rd International Conference on Emerging Trends in Electrical, Electronic and Communications Engineering (ELECOM), Mauritius, 2020.

[84] RAMIREZ W, ACHANCCARAY P, MENDOZA L, et al. Deep convolutional neural networks for weed detection in agricultural crops using optical aerial images[C]//2020 IEEE Latin American GRSS & AMP; ISPRS Remote Sensing Conference (LAGIRS), Santiago, 2020.

[85] PATIDAR S, SINGH U, SHARMA S, et al. Weed seedling detection using mask regional convolutional neural network[C]// 2020 International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC), India, 2020.

[86] 刘莫尘, 高甜甜, 马宗旭, 等. 基于 MSRCR - YOLOv4 - tiny 的田间玉米杂草检测模型[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2):246 - 255.
LIU Mochen, GAO Tiantian, MA Zongxu, et al. Target detection model of corn weeds in field environment based on MSRCR algorithm and YOLOv4 - tiny[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(2):246 - 255. (in Chinese)

[87] 冀汶莉, 刘洲, 邢海花. 基于 YOLO v5 的农田杂草识别轻量化方法研究[J]. 农业机械学报, 2024,55(1):212 - 222.

JI Wenli, LIU Zhou, XING Haihua. Lightweight method for identifying farmland weeds based on YOLO v5[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(1):212 - 222. (in Chinese)

[88] 张继成, 侯郁硕, 郑萍, 等. 低数据集下基于 ASPP - YOLO v5 的苋菜识别方法研究[J]. 农业机械学报, 2023,54(增刊 2):223 - 228.
ZHANG Jicheng, HOU Yushuo, ZHENG Ping, et al. Method for amaranth identification based on ASPP - YOLO v5 model in low data set[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(Supp. 2):223 - 228. (in Chinese)

[89] FARKH R, ALJALOUD K. Vision navigation based PID control for line tracking robot[J]. Intelligent Automation & Soft Computing, 2023,35(1):901 - 911.

[90] TOURAJIZADEH H, GHOLAMI O. Optimal control and path planning of a 3PRS robot using indirect variation algorithm[J]. Robotica, 2020,38(5):903 - 924.

[91] YANG Z, HUANG J, YANG D, et al. Design and optimization of robust path tracking control for autonomous vehicles with fuzzy uncertainty[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2022,30(6):1788 - 1800.

[92] WU G, WANG G, BI Q, et al. Research on unmanned electric shovel autonomous driving path tracking control based on improved pure tracking and fuzzy control[J]. Journal of Field Robotics, 2023,40:1739 - 1753.

[93] LI J, WU Q, WANG J, et al. Neural networks-based sliding mode tracking control for the four wheel-legged robot under uncertain interaction[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2021,31:4306 - 4323.

[94] GRAF PLESSEN M, BEMPORAD A. Reference trajectory planning under constraints and path tracking using linear time-varying model predictive control for agricultural machines[J]. Biosystems Engineering, 2017,153:28 - 41.

[95] KUMAR S, TEWARI V, CHANDEL A, et al. A fuzzy logic algorithm derived mechatronic concept prototype for crop damage avoidance during eco-friendly eradication of intra-row weeds[J]. Artificial Intelligence in Agriculture, 2020,4:116 - 126.

[96] CHANG C, XIE B, CHUNG S. Mechanical control with a deep learning method for precise weeding on a farm[J]. Agriculture, 2021,11:1049.

[97] VISENTIN F, CREMASCO S, SOZZI M, et al. A mixed-autonomous robotic platform for intra-row and inter-row weed removal for precision agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023,214:108270.

[98] QUAN L, JIANG W, LI H, et al. Intelligent intra-row robotic weeding system combining deep learning technology with a targeted weeding mode[J]. Biosystems Engineering, 2022,216:13 - 31.

[99] 陈海荣, 陈应海, 车年萍, 等. 适用于条播水稻机械除草作业的对行纠偏控制系统设计与试验[J]. 农业装备技术, 2024,50(3):41 - 44.
CHEN Hairong, CHEN Yinghai, CHE Nianping, et al. Design and test of alignment and deviation control system suitable for mechanical weeding operation of drill sowing rice[J]. Agricultural Equipment & Technology, 2024,50(3):41 - 44. (in Chinese)

[100] LUO Z, WANG J, WU J, et al. Research on a hydraulic cylinder pressure control method for efficient traction operation in electro-hydraulic hitch system of electric tractors[J]. Agriculture, 2023,13(8):1555.

[101] 邵伟. 甘薯垄作自适应中耕除草机关键部件设计与优化[D]. 北京: 中国农业科学院, 2023.
SHAO Wei. Sweet potato ridge adaption intertillage weeder design and optimization of key components[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2023. (in Chinese)

[102] LIU F, YANG Y, WANG L. Active disturbance rejection control design for the hydraulic actuator on weeding machine[C]// 2021 40th Chinese Control Conference (CCC), 2021.

[103] 张俊雄, 王凯, 张良, 等. 横移对行控制系统设计与试验分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2017,38(4):423 - 427.
ZHANG Junxiong, WANG Kai, ZHANG Liang, et al. Design and experimental analysis of side-shift row-follow control system [J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2017,38(4):423 - 427. (in Chinese)

[104] RASK A, KRISTOFFERSEN P. A review of non-chemical weed control on hard surfaces[J]. Weed Research, 2007,47: 370 - 380.

[105] DEDOUSIS A. An investigation into the design of precision weeding mechanisms for inter and intra-row weed control[C]// 2007 American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) Annual International Meeting, Rhode Island, 2007.

[106] 吕金庆, 刘志峰, 王鹏榕, 等. 驱动式碎土除草多功能马铃薯中耕机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019,35(10):1 - 8.
LÜ Jinqing, LIU Zhifeng, WANG Pengrong, et al. Design and experiment of driving-type crushing-weeding multi-functional potato cultivator[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(10):1 - 8. (in Chinese)

[107] 杜伟, 海文博, 刘春雨, 等. 基于贝壳棱纹结构的仿生除草轮设计与分析[J]. 农机化研究, 2023,45(6):94 - 99.
DU Wei, HAI Wenbo, LIU Chunyu, et al. Design and analysis of bionic weeding wheel based on shell rib structure[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023,45(6):94 - 99. (in Chinese)

[108] 尹志平. 基于鼹鼠爪趾结构仿生除草铲的设计与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
YIN Zhiping. Design and experimental study of bionic swipe shovel based on mole cave structure[D]. Changchun: Jilin University, 2023. (in Chinese)

(下转第 71 页)

BAI Huijuan, FANG Xianfa, WANG Decheng, et al. Design and test of control system for seeding depth and compaction of corn precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 61 – 72. (in Chinese)

[29] 高原源,翟长远,杨硕,等. 精密播种机下压力和播深 CAN 总线监控与评价系统研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 15 – 28.
GAO Yuanyuan, ZHAI Changyuan, YANG Shuo, et al. Development of CAN-based downforce and sowing depth monitoring and evaluation system for precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 15 – 28. (in Chinese)

[30] 颜丙新,付卫强,武广伟,等. 基于卫星定位的玉米高位精播种子着床位置预测方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 44 – 54.
YAN Bingxin, FU Weiqiang, WU Guangwei, et al. Seed location prediction method of maize high-height precision planting based on satellite positioning [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 44 – 54. (in Chinese)

[31] 高筱钧,徐杨,张东兴,等. 气送式高速玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 9 – 20.
GAO Xiaojun, XU Yang, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of air-assisted high speed precision maize seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(23): 9 – 20. (in Chinese)

[32] 姜惠,唐小虎,张旭烽,等. 丘陵山地姿态调整轮式拖拉机运动控制研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(6): 392 – 403.
JIANG Hui, TANG Xiaohu, ZHANG Xufeng, et al. Motion control of attitude adjustment wheeled tractor in hilly and mountain areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 392 – 403. (in Chinese)

[33] 边明博,马彦鹏,樊意广,等.融合无人机多源传感器的马铃薯叶绿素含量估算[J].农业机械学报,2023,54(8):240 – 248.
BIAN Mingbo, MA Yanpeng, FAN Yiguang, et al. Estimation of potato chlorophyll content based on UAV multi-source sensor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 240 – 248. (in Chinese)

(上接第 41 页)

[109] RASMUSSEN J, BIBBY B, SCHOU A. Investigating the selectivity of weed harrowing with new methods[J]. Weed Research, 2008,48(6):523 – 532.

[110] YE S, XUE X, SI S, et al. Design and testing of an elastic comb reciprocating a soybean plant-to-plant seedling avoidance and weeding device[J]. Agriculture, 2023,13(11):2157.

[111] GOBOR Z, LAMMERS P, MARTINOV M. Development of a mechatronic intra-row weeding system with rotational hoeing tools: theoretical approach and simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013,98:166 – 174.

[112] DOGHERTY M, GODWIN R, DEDOUSIS A, et al. A mathematical model of the kinematics of a rotating disc for inter- and intra-row hoeing[J]. Biosystems Engineering, 2007,96(2):169 – 179.

[113] 陈子文, 张春龙, 李南, 等. 智能高效株间锄草机器人研究进展与分析[J]. 农业工程学报, 2015,31(5):1 – 8.
CHEN Ziwen, ZHANG Chunlong, LI Nan, et al. Study review and analysis of high performance intra-row weeding robot[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(5):1 – 8. (in Chinese)

[114] 王文明. 垄作玉米机械除草装置设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
WANG Wenming. Design and experimental study on mechanical weeding device of the ripple maize[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[115] PÉREZ-RUÍZ M, SLAUGHTER D, FATHALLAH F, et al. Co-robotic intra-row weed control system[J]. Biosystems Engineering, 2014,126:45 – 55.

[116] 王艳. 高效除草机器人控制系统设计[D]. 南京: 南京林业大学, 2014.
WANG Yan. Researches on the control system for a high-efficient weeding robot[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2014. (in Chinese)

[117] Maya FM2 Bifila-Fardin Macchine[EB/OL]. [2024 – 06 – 26]. https://www.fardinmacchine.com/produzione/maya-fm2-bifila/.