

农业收获装备自动对行关键技术研究进展

王申莹^{1,2} 潘金波^{1,2} 谢胜仕³ 钱旺³ 吕俊潼¹ 鄢金山² 王洪杰⁴ 夏先飞¹

(1. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014; 2. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052;

3. 内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010018; 4. 赤峰鑫达机械制造有限公司, 赤峰 025550)

摘要: 自动对行是提升农业收获装备作业精度、降低机收损失和驾驶员劳动强度的重要技术。针对复杂田间环境下作物行感知稳定性不足以及控制精度与实时性难以兼顾等问题, 本文分析了该领域关键技术与研究进展, 围绕“感知—决策—执行”闭环控制架构, 系统梳理了机械触觉、机器视觉、激光雷达及多源信息融合技术的感知原理、适用场景与典型案例; 归纳了从 PID 控制到模型预测控制、模糊控制及深度强化学习等导航控制算法的演进逻辑; 分析了电液比例转向、伺服电动纠偏及工作部件横移等执行机构的响应特性。结合自动对行技术典型应用场景与案例, 指出了自动对行技术在农业收获装备应用中还存在的问题, 并展望了该技术未来的主要发展方向为: 推进多源传感器互补融合与轻量化实时识别以提升复杂工程感知适应性, 发展状态自适应、安全容错的自主决策控制方法, 强化感知、决策、控制与执行的协同匹配及可靠性验证, 并通过低成本模块化配置、标准化接口和多区域长周期评价促进技术普惠应用。

关键词: 收获机械; 自动对行; 作物行感知; 多传感器融合; 纠偏控制; 纠偏执行机构

中图分类号: S222.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)19-0126-23

OSID:



Research Progress on Key Technologies of Automatic Row Guidance for Agricultural Harvesting Equipment

Wang Shenying^{1,2} Pan Jinbo^{1,2} Xie Shengshi³ Qian Wang³ Lü Juntong¹

Yan Jinshan² Wang Hongjie⁴ Xia Xianfei¹

(1. Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China

4. Chifeng Xinda Machinery Manufacturing Co., Ltd., Chifeng 025550, China)

Abstract: Automatic row guidance is an important technology for improving the operational accuracy of agricultural harvesting equipment, reducing mechanical harvesting losses, and alleviating operators' workload. To address the insufficient stability of crop-row perception under complex field conditions and the difficulty in balancing control accuracy and real-time performance, the key technologies and research advances in this field were analyzed within a closed-loop control architecture consisting of perception, decision-making, and actuation. The sensing principles, applicable scenarios, and representative applications of mechanical contact sensing, machine vision, light detection and ranging (LiDAR), and multisensor information fusion were systematically reviewed. The development of navigation control algorithms, including proportional-integral-derivative (PID) control, model predictive control, fuzzy control, and deep reinforcement learning, was summarized. The response characteristics of electro-hydraulic proportional steering, servo motor-based correction, and lateral shifting mechanisms for working components were also analyzed. Based on typical application scenarios and representative cases of automatic row-guidance technology, the remaining problems in its application to agricultural harvesting

收稿日期: 2026-04-24 修回日期: 2026-07-15

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(2025ZY0090)、国家自然科学基金项目(52105263)和江苏省农机研发制造推广应用一体化试点项目(JSYTH2025-05)

作者简介: 王申莹(1986—), 男, 副研究员, 主要从事农业装备机电液一体化技术及农业机器人研究, E-mail: wangshenying@caas.cn

通信作者: 钱旺(1982—), 男, 正高级工程师, 主要从事甜菜收获机械及其自动化研究, E-mail: qianwang0319@imau.edu.cn

equipment were identified, and the main directions for future development were discussed.

Key words: harvesting machinery; automatic row guidance; crop-row perception; multi-sensor fusion; deviation correction control; deviation correction actuator

0 引言

2026 年中央一号文件明确提出因地制宜发展农业新质生产力,强调促进良田良种良机良法集成增效,推进粮油作物大面积提单产,加强智能化、丘陵山区农机装备研发应用,促进人工智能与农业发展相结合。在此背景下,智能化收获装备作为“良机”的核心支撑,是实现粮食安全与机收减损的重要保障。

自动对行技术作为推动农业收获装备智能化发展和机收减损的关键技术之一,目前已成为国内外农业工程领域的研究热点,其应用价值日益凸显。自动对行技术的精度直接影响联合收获作业质量,当收获装备产生横向跟踪偏差时,收获装备与作物行之间发生偏离,导致漏收及喂入不均等问题,进而增加机收损失,如在谷物高速收获或作物倒伏等复杂工况下,行进偏差会进一步放大作物喂入量波动,引起脱粒和清选过程负荷不稳定,最终导致含杂率与损失率升高;同时,自动对行收获技术能够减轻驾驶员劳动强度,降低收获作业人为因素影响^[1-3]。

当前,国际上 John Deere、Claas、AVR 等企业已在部分高端收获装备中采用行传感、GNSS、视觉或激光雷达等融合对行方案,相关研究多集中在高速作业、复杂地形、倒伏作物、弱纹理行线和全天候运行条件下的鲁棒感知与控制等方面。国内研究多根据非结构化农田特征突出、作物种植模式多样、田间工况复杂多变等现实需求,在低成本视觉行线提取、北斗/IMU 组合导航、经典控制算法自适应优化、智能控制轻量化及机电液一体化纠偏执行机构等方面开展了大量探索,形成了面向玉米、棉花、马铃薯、甜菜、花生等典型作物的自动对行技术方案^[4]。

尽管自动对行技术已取得较大进展,但在复杂工况下仍存在感知精度下降、控制稳定性不足、执行机构响应滞后以及高精度传感部件成本较高等问题,制约了其规模化应用。本文旨在通过系统梳理农业收获装备自动对行技术的国内外研究现状,重点围绕作物行检测感知、纠偏及导航控制技术、纠偏执行机构等关键技术体系进行深度分析,解析自动对行技术存在的问题及未来发展趋势,以促进自动对行技术创新与产业化应用,提高我国农业收获装备作业质量和效率及智能化水平。

1 自动对行技术演进

自动对行技术的早期研究始于 20 世纪 70 年代。在这一阶段,系统多依赖物理接触式机械感知机构获取作物行位置。Wilson^[5]的研究表明,早期的机械触杆式对行装置虽结构简单且横向跟踪性能有限,但通过物理反馈验证了动态纠偏的可行性,为后续系统的研发奠定了基础。然而,随着农机作业速度的提升,机械式感知在面临作物倒伏、缺苗断垄或杂草丛生等非结构化田间工况时,易出现传感信号失真,致使系统鲁棒性与动态作业精度受到显著制约^[6-7]。

为突破机械物理感知的瓶颈,20 世纪 90 年代起,自动对行技术逐步由接触式机械感知转向以空间定位和机器视觉为代表的单源非接触式感知阶段,空间定位与机器视觉技术逐步应用于农业装备领域。O'Connor 等^[8]验证了基于全球导航卫星系统(GPS)的农田车辆自动转向方法,提出了全局路径导航的技术路线。在局部特征跟踪方面,Marchant 等^[9]将 Hough 变换算法引入植物行特征提取,实现了基于二维图像信息的农机动态对行。单源非接触式感知的引入提高了系统的灵活性,但在光照剧烈变化、垄形破损及信号盲区等复杂环境中,单一传感器的泛化与抗干扰能力仍显不足。

近年来,随着高端智能农机装备自主可控需求的提升,以及人工智能、传感器融合和嵌入式控制技术的发展,自动对行技术逐步由单一感知与传统控制模式迈入多源信息融合与智能决策阶段。机器视觉、激光雷达、机械仿形触杆、GNSS/IMU 组合导航及多源传感器融合技术被用于提取作物行距、行线位置、作物特征和机具位姿等信息^[10-11],PID 控制、模型预测控制、滑模控制和深度强化学习等方法也逐渐应用于路径跟踪和纠偏控制过程,以提高系统在大惯量、大滞后和强耦合非线性工况下的适应能力^[12-13]。

总体来看,自动对行技术经历了由机械接触式对行向非接触感知、多源信息融合和智能控制协同发展的过程。随着研究对象由单纯车辆行驶轨迹控制拓展到作业部件与作物行、垄体或块根中心之间的精确对准,自动对行已不再是单一导航控制问题,而是涉及感知输入、偏差解算、控制输出、执行响应和作业质量反馈的闭环系统。

2 农业收获装备自动对行系统框架

农业收获装备自动对行系统的主要工作原理为:通过前端传感单元实时捕获田间作物行的空间位姿信息,经控制单元解算机具当前位姿与目标作业行的横向偏差、航向角偏差,进而向执行机构输出纠偏控制指令,驱动转向或移位机构动态修正机具行驶轨迹与作业部件位姿,最终保证收获机割台、挖掘铲等核心作业部件始终与目标作物行精准对齐,实现稳定、低损的收获作业^[14-18]。与一般农业车辆自动驾驶相比,收获装备自动对行不仅关注车辆行驶路径,还需同时考虑作业部件与作物行、垄体或块根中心之间的相对位置关系,因此具有“感知输

入—偏差解算—控制输出—执行纠偏—作业质量反馈”的闭环特征^[19-20]。

如图1所示,农业收获装备自动对行系统由物理层、感知单元、决策单元和执行单元构成。物理层包括收获装备、作业环境以及二者之间的相互作用关系,是系统感知、控制和反馈的对象基础;感知单元负责获取作物行、垄体、作业边界、机具位姿和执行机构状态等信息;决策单元根据感知结果完成目标作业基准线确定、偏差变量解算、路径跟踪控制和控制指令生成;执行单元则将控制指令转化为底盘转向、牵引机构调整或作业部件横移等实际机械动作,并通过执行状态和作业质量反馈形成系统闭环。

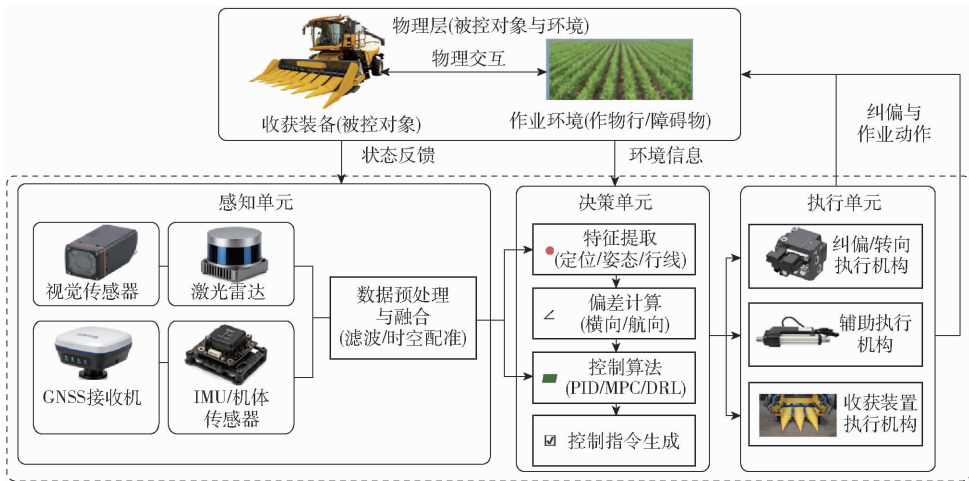


图1 自动对行系统框架图

Fig.1 Framework of automatic row-guidance system

自动对行系统主要包括感知输入、偏差变量、控制输出和作业质量反馈4类关键要素。感知输入主要包括图像、点云、机械接触信号、GNSS/IMU位姿信息以及执行机构状态信息,用于描述作物行空间分布、垄体轮廓、作业边界和机具姿态等外部与自身状态^[21-25]。偏差变量是连接感知层与控制层的核心中间量,主要包括横向偏差、航向角偏差、作业部件偏差、路径曲率、行驶速度及执行机构位置等^[26-28]。

控制输出是偏差变量经过控制决策后形成的可执行指令,主要包括目标转向角、目标横移量、液压控制量、电机控制量或速度调节量等。执行机构根据控制输出完成底盘转向、牵引机构姿态调整或作业部件横向移动,并通过转向角、液压缸位移、电机编码器位置、履带速度、工作部件实际位移和执行机构响应时间等状态量形成局部反馈^[29-32]。作业质量反应用于评价自动对行系统在实际收获过程中的综合效果,除横向跟踪误差、航向角跟踪误差等控制层指标外,还应结合漏收率、损失率、损伤率、破损

率、含杂率、喂入均匀性、作业能耗和系统故障率等作业层指标进行综合判断^[33]。

因此,农业收获装备自动对行系统并非由感知、控制和执行环节简单串联而成,而是由感知输入、偏差变量、控制输出、执行状态和作业质量反馈共同构成的动态闭环。

3 自动对行关键技术研究进展

3.1 作物行线检测与感知技术

作物行感知与检测技术是自动对行系统获取目标作业基准线和关键偏差变量的基础,其主要任务是实时采集作物空间分布、作业边界、垄体轮廓及机具位姿信息,为后续偏差解算和路径跟踪控制提供数据支撑。与通用农机在苗期或营养生长期所面对的清晰结构化特征(如苗带与土壤颜色对比显著)不同,收获期的田间环境往往已发生较大变化。在茎秆类大田作物收获中,系统需要应对密集冠层、作物倒伏、茎叶遮挡及光影交错等因素对视觉图像和点云数据的干扰;而在地下结实类作物收获中,受风

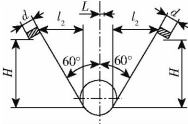
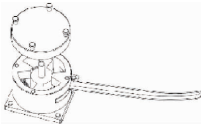
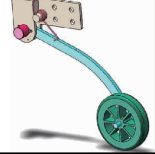
雨侵蚀、土壤扰动和田间管理作业影响,原有垄形或垄沟边界往往发生变形,难以继续作为稳定的对行基准。以甜菜联合收获为例,自动对行检测的目标是甜菜块根,而非传统的土壤垄形。因此,收获期作物行检测不能仅依赖垄形、边缘或直线等单一几何特征,而需要结合图像纹理、三维结构、作物器官位置和机具姿态等多维信息,以提高系统在倒伏、遮挡、垄形破损和光照变化条件下的识别稳定性。

3.1.1 机械式检测方法

尽管光电感知技术发展迅速,但在高粉尘、强振动及泥土粘附严重的恶劣收获环境中,接触式机械感知凭借低成本、结构简单以及抗电磁和光照干扰能力强等优势,仍在复杂田间工况下具有较高的应用价值。随着农机与农艺融合的不断深化,机械式

检测机构已由早期单一物理导向装置,逐步发展为适配不同作物表型特征和种植模式的多种结构形式。如表 1 所示,机械接触式对行检测装置可根据接触对象和导向方式的不同,分为触杆式、探针接触式、机械摆杆式和滚轮导引式等类型。触杆式主要通过接触玉米、甘蔗等高秆作物的茎秆获取偏差信号,适用于茎秆强度较高、行距较为清晰的中高速收获场景;探针接触式多用于甜菜、花生等根茎类或株丛密集作物,通过探测植株根部、块根顶部或冠层底部阻力来判断行位;机械摆杆式主要依靠摆杆贴合垄侧或沟底轮廓实现仿形导向,适用于马铃薯、棉花等垄作场景;滚轮导引式则通过滚轮嵌入垄沟或沿沟底滚动获得导向约束,适用于垄沟结构较明显的旱田作业。

表 1 典型机械接触式对行检测方法分析

Tab.1 Structural features and performance comparison of typical mechanical contact row sensors						
接触式 结构类型	探测接触部位	适用作物 类型	行位检测 误差范围/cm	对作物 损伤风险	适用场景特征	结构示意图
触杆式	茎秆中上部,接触硬质茎秆,避开下部叶片干扰	玉米、甘蔗 (高秆硬茎)	2.0 ~ 5.0 ^[34-35]	低,弹性形变缓冲	茎秆强壮的行栽作物 (利用茎秆拨动触杆产生连续角度信号,适合中高速作业)	
探针接触式	根部/冠层,探测作物根部或甜菜块茎顶部	小麦、水稻、甜菜 (密植/根茎类)	3.0 ~ 6.0 ^[36-38]	中,可能刮伤块茎	叶丛密集/隐蔽行线 (通过探针感知叶丛阻力或块茎硬度来定位行中心)	
机械摆杆式	垄侧壁/沟底,贴合土垄两侧形状,不直接接触作物	棉花、马铃薯、高粱 (典型垄作)	4.0 ~ 8.0 ^[39-41]	低,主要接触土壤	垄作/沟灌地形 (依靠摆杆贴合垄壁行走,对垄形完整度依赖高)	
垄沟滚轮导引式	垄沟底部及两侧沟壁	大豆、油菜 (垄沟明显)	5.0 ~ 10.0 ^[42-44]	中/高,易压伤作物	旱田垄沟作业 (物理滚轮卡入垄沟导向,接触面积大,但泥泞地块易粘连失效)	

在低成本与高环境适应性的双重需求下,近年来机械式检测方法的研究重点逐渐由单纯结构设计转向接触部件、信号采集单元和执行控制环节的协同优化。针对地下块根类作物挖掘过程中土壤阻力与机械探杆高频互动易导致信号失真的问题,杨然兵等^[42]从物理信号传导的保真度入手,在花生收获机上引入高强度聚氨酯弹性挡条,优化了角位移传感器的柔性联动机制。该方案有效去除了硬碰撞干扰,在硬件成本严格控制在 500 元以内的前提下,整机田间试验的平均横向跟踪偏差为 4.82 cm,较人工驾驶的平均横向跟踪偏差降低 1.5 cm。面向丘陵山区崎岖地形引发的农机底盘横向高频颠簸难题,陈刚等^[43]重构了触杆的空间自由度与随动仿形

结构,即便在雨雾屏蔽视觉传感器的恶劣气候下,该系统整机横向跟踪偏差范围依然保持在 ± 8.76 cm,填补了小型农机在全天候复杂地形下的低成本感知空白。此外,为突破传统机械传动固有的响应迟滞瓶颈,陈声佩^[34]对触杆末端与角度传感器之间的信号传递关系进行了优化,使触杆位移能够更快转化为可用于控制的偏差信号,动态响应时间缩短至 0.08 s。综合来看,机械接触式对行检测方法虽然感知信息维度有限,且易受作物倒伏、杂草缠绕和泥土粘附影响,但其结构简单、成本较低、抗光照和粉尘干扰能力强,在根茎类作物、垄作作物以及视觉感知易失效的复杂收获环境中仍具有较好的适用性。其典型机械接触式对行传感器结构如图 2 所示。

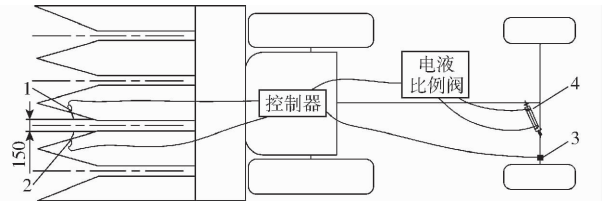


图2 机械接触式对行传感器结构示意图

Fig.2 Schematic of mechanical contact row-guidance sensor

1. 右导向机构 2. 左导向机构 3. 角度传感器 4. 转向液压缸

3.1.2 基于机器视觉的检测方法

机器视觉技术凭借其丰富的空间纹理与色彩维度,已成为非接触式环境感知的核心手段。其基础处理范式依赖于灰度化、滤波去噪与边缘算子,进而在二维图像特征空间中提取导航基准线^[35]。然而,实际田间图像易受到光照变化、阴影遮挡、粉尘、杂草及作物倒伏等因素干扰,导致作物行边缘、颜色和纹理特征不稳定。因此,机器视觉检测方法通常需要在算法实时性、计算资源消耗与复杂环境鲁棒性之间进行权衡。

在作物行边界清晰、背景干扰较少、结构化程度较高的田间场景下,基于阈值分割、边缘检测、Hough 变换和最小二乘拟合等传统图像处理方法具有算法简单、计算量小和易于嵌入式部署等优势,如陈子文等^[45]针对蔬菜行线提取,深度挖掘了自动霍夫(Hough)变换在空间直线拟合上的潜力,通过引入累加自适应阈值策略,在不依赖高性能 GPU、仅凭普通工业相机的硬件条件下,实现了 92% 的行线提取准确率。该类传统几何算子以牺牲部分非结构化环境的适应性为代价,换取了底层控制的较高实时性。

然而,一旦进入“草苗混生”的非结构化大田工况,作物与杂草在颜色及纹理特征空间高度重叠,传统基于颜色阈值或灰度梯度的分割模型往往陷入“语义混淆”。为此,李洪波等^[46]跳出传统图像处理框架,构建了基于改进 YOLO v8 的深度语义分割网络,在杂草覆盖率高达 40% 的恶劣遮挡干扰下,依然能够有效区分杂草与作物行特征,准确率跃升至 92% 以上。这表明,深度学习方法能够在一定程度上缓解复杂背景下作物与杂草特征重叠造成的识别困难,提高视觉感知在非结构化场景中的适用性。除了通过算法增强图像特征提取能力,将视觉信息与惯性信息融合也是提高收获机导航稳定性的有效途径。Zhu 等^[47]面向联合收获机自动导航作业,构建了视觉 SLAM-惯性导航融合系统。该系统利用双目相机提取未收获作物边界并建立导航基准线,通过融合相机与 IMU 信息,实时估计联合收获机相对于导航基准线的位姿,进而驱动转向机构实施纠偏,研究表明,视觉-惯性融合可以弥补单一机器视

觉导航在连续位姿估计方面的不足,为联合收获机在复杂田间环境中的稳定作业提供技术支撑。

综合表 2 可知,不同机器视觉对行算法在适用场景和性能侧重点上存在差异:传统几何方法更适用于作物行线清晰、光照相对稳定的结构化田间环境,具有计算量小、实时性好的优势;而以卷积神经网络为代表的深度学习方法更适用于倒伏、遮挡、杂草混生等非结构化场景,能够通过语义特征学习提升复杂背景下的作物行识别稳定性,但对样本数据和计算资源的依赖更高。

表 2 不同机器视觉作物行检测算法的适用性对比

Tab.2 Applicability and performance comparison of different machine vision-based crop row detection algorithms

算法技术流派	核心算法	检测正确率/%	主要适用场景与局限性
传统几何法	Hough 变换、最小二乘法	85 ~ 92 ^[9,45]	结构化强、光照稳定,适用于行线清晰的标准农田;但在缺苗、杂草多或光照剧变时鲁棒性较差
特征融合/分类法	边缘检测 + CNN 分类	90 ~ 95 ^[21-22]	动态光照、部分遮挡,结合了人工特征提取的快速性与学习分类的鲁棒性,适合有轻微遮挡或光照变化的场景
深度语义分割	U-Net 语义分割	94 ~ 98 ^[2,33]	复杂田间环境、多作物类型,适用于高杂草密度(草苗混生)、倒伏及非结构化环境,但对硬件算力(GPU)要求高

3.1.3 基于激光雷达的检测方法

相较于视觉传感器在二维像素平面的颜色与纹理依赖,激光雷达(LiDAR)通过主动发射高频激光束并接收目标回波,获取作物及周围环境的距离信息和三维点云数据。其优势在于不依赖可见光,因此在晨昏、夜间及强光等环境中具有较强适应性;同时,激光雷达还具有一定的冠层穿透能力,能够获取作物冠层、茎秆和地表的三维空间结构信息^[48]。此外,固态激光雷达(Solid-state LiDAR)在抗振动、小型化和稳定性方面不断成熟,该技术在复杂、颠簸农机作业环境中的田间应用基础进一步增强^[49]。

围绕点云数据中的作物行特征提取,现有基于激光雷达的检测方法通常需要在空间信息利用程度与算法计算复杂度之间进行权衡。根据点云处理方式和特征表达层级的不同,相关方法大致可分为 2D

投影降维法、3D 几何聚类法和深度语义分割法 3 类,如表 3 所示。2D 投影降维法通常将三维点云投影至二维平面或栅格图像,再利用 Hough 变换、最小二乘拟合等方法提取作物行线。该方法数据量小、计算速度快,适用于地势平坦、行间结构明显的简单场景;但由于舍弃了高度信息,在地面起伏、低矮杂草或残茬干扰较多的条件下,行中心线拟合误差容易增大。为弥补降维造成的空间信息损失,3D 几何聚类法进一步利用点云的三维坐标、高程差和局部密度等信息进行作物行识别。该类方法通常根据激光雷达安装位置、割台宽度及前方检测距离设置感兴趣区域(ROI),利用直通滤波和统计滤波剔除地面、远距离目标及离群点,再结合点云聚类 and 几何拟合方法提取作物行或收获边界。Zhang 等^[51]面向玉米收获机自动对行,在收获机顶部安装 VLP-16 激光雷达,对割台前方的玉米植株进行三维扫

描,并采用欧氏聚类与 K-means 聚类相结合的方法分离作物行点云。试验结果表明,该组合方法的聚类成功率达到 81.5%,明显优于单独采用 K-means 聚类的方法,为玉米收获机目标作物行识别和对行偏差计算提供了基础。然而,在小麦、水稻和大豆等连续种植作物的收获过程中,作物冠层通常相互交叠,难以通过聚类获得彼此独立的植株行。此时,可利用已收割区与未收割区之间的高度差和点云密度差提取收获边界,并将其作为联合收获机的行驶基准。Jeon 等^[52]在联合收获机上搭载由俯仰机构驱动的激光扫描器,通过改进 RANSAC 算法滤除点云异常值、提取作物边界并拟合行驶基准线,进而实时计算收获机的横向偏差和航向偏差。该研究表明,相较于面向植株个体的语义分类,直接提取已收割区与未收割区边界更符合联合收获机自动对行控制的实时性和工程应用需求。

表 3 基于激光雷达的作物行检测算法分类与对比

Tab.3 Classification and qualitative performance comparison of LiDAR-based crop row detection algorithms						
检测方法类别	关键数据特征	核心算法机制	性能特征描述	硬件需求	典型适用场景	示意图
2D 投影降维法 ^[49]	平面坐标 (X,Y) (舍弃高度信息)	降维+图像处理: 将 3D 点云投影至二维栅格或图像,利用成熟的 Hough 变换或最小二乘法提取行线	实时性极高,但鲁棒性一般,数据量压缩显著,处理速度快;但因丢失高度信息,易受地面起伏及杂草干扰,行线拟合精度波动大	算法复杂度低,普通单片机(MCU)或低端嵌入式处理器即可运行	果园/树干导航(树干与地面特征区分明显、地势平坦的简单场景)	
	空间坐标 (X,Y,Z) +局部密度	特征过滤+拟合: 基于作物与地面的高度差(ROI 滤波)及点云密度差异进行欧氏聚类,结合 RANSAC 拟合中心线	精度与速度的平衡,利用作物株高和冠宽特征,抗光照干扰能力强;但在苗期(点云稀疏)或倒伏场景下,聚类参数需频繁调整	涉及大量浮点运算,需配备高性能 CPU 工控机或中端嵌入式板卡	高秆作物中后期(玉米、甘蔗等株型特征显著、行间分界明显的作物)	
3D 几何聚类法 ^[50]	全维信息 (X,Y,Z) +反射强度(I)	端到端特征学习: 利用 PointNet++ 或 VoxelNet 网络,学习点云的局部几何结构与反射强度特征,逐点分类	环境适应性最强,但延迟较高,能有效区分几何形状相似的杂草与作物,解决“草苗混生”难题;但推理过程耗时,实时性受限	矩阵运算量巨大,需依赖 GPU 加速器或边缘计算终端(如 Jetson Orin)	复杂非结构化环境(杂草密集、作物形态复杂、需精细区分茎叶的场景)	

尽管基于激光雷达的检测方法在作物空间结构感知方面表现较好,但由表 3 可知,高精度点云检测方法通常伴随较大的数据处理量,对嵌入式计算平台的实时处理能力要求较高。在作物行间杂草、地面起伏以及田间残留物干扰等复杂田间环境下,点

云噪声、目标粘连和行间边界模糊等问题会影响行线拟合精度。此外,虽然激光雷达硬件成本有所下降,但相较于视觉方案,其点云数据处理仍对嵌入式计算平台的实时性提出较高要求。因此,如何在保证行线检测正确率和中心线拟合精度的前提下优化

点云处理算法的轻量化部署,并探索低成本固态雷达的农业适配性,是未来该领域的重要发展方向。

3.1.4 多源信息融合感知方法

随着农业装备作业场景向全天候、高密度和非结构化环境延伸,单一感知方式在复杂田间条件下的局限性逐渐显现。例如,视觉传感器容易受到强光、阴影、粉尘和遮挡影响;激光雷达在作物严重倒伏、冠层高度密集或行间边界模糊时,可能出现点云缺失、目标粘连或结构特征不连续等问题;GNSS/北斗定位则易受树冠遮挡、丘陵地形和信号多路径效应影响,导致定位精度下降或短时失锁。为提高自动对行系统在复杂收获环境中的感知稳定性,基于异构传感器互补特性的多源信息融合技术逐渐成为作物行线检测与导航基准线提取的重要发展方向。

近年来,多源感知融合技术已由简单的数据叠加逐步发展为面向复杂农田环境的层级化融合架构。从融合发生的位置和信息抽象程度来看,多源信息融合通常可分为数据级融合、特征级融合和决策级融合 3 类,如表 4 所示。数据级融合主要发生

在原始数据层面,通常需要对相机图像、激光雷达点云及 GNSS/IMU 位姿数据进行时间同步、坐标统一和外参标定,将不同传感器数据映射至统一空间坐标系后,再进行作物行线提取或环境重建。该方法能够较完整地保留原始感知信息,但对传感器标定精度、时间同步误差和计算平台实时处理能力要求较高。特征级融合是在各传感器完成初步特征提取后,将视觉纹理、作物行边缘、点云几何结构和机体姿态等中间特征进行联合表达,常见方法包括特征拼接、注意力机制、Transformer 跨模态编码和概率滤波等。该层级能够在降低原始数据处理负担的同时保留多模态互补信息,是复杂田间环境下较具发展潜力的融合方式。决策级融合则是在不同传感器或算法模块分别输出作物行位置、障碍物状态、横向偏差和航向偏差等结果后,通过加权融合、贝叶斯估计、模糊逻辑或投票机制形成最终导航基准线和控制输入。该方法结构清晰、实时性较好,便于在农业装备中集成应用,但其融合效果受各单一感知模块可靠性的影响较大。

表 4 多源信息融合层级及其适用性对比
Tab.4 Comparison of fusion levels and applicability of multi-source information fusion

融合架构 层级	融合对象	信息维度与特征流 失度	容错能力	适配场景	局限性
数据级融合 ^[53]	原始图像、原始点云、GNSS/IMU 测量数据等	信息保留程度较高,能够较完整地保留环境几何结构、光学纹理和运动状态等底层信息	对异常值、传感器噪声、时间同步误差和外参标定漂移较为敏感;局部异常数据可能影响整体融合结果	适用于低速果园巡检、农业试验田建图、静态或准静态高精度三维环境重构	计算量和通信带宽需求较大,对传感器时间同步及空间标定精度要求较高,标定误差可能造成跨模态数据错位
特征级融合 ^[54-55]	视觉边缘与纹理特征、作物语义特征、点云几何特征及姿态特征等	通过特征提取过滤部分底层冗余信息,在降低数据维度的同时保留具有较强判别能力的结构与语义特征	具有较好的环境适应性;通过特征选择、注意力加权 and 联合优化,在一定程度上缓解噪声以及轻微时空错位的影响	适用于丘陵起伏地形、作物遮挡或倒伏条件下的农作物行检测、导航线提取和农业机器人实时定位	融合网络和中间特征表示设计较为复杂,融合节点、特征尺度和损失函数需要结合任务进行优化
决策级融合 ^[56-57]	各传感器或感知模块独立输出的作物行线、横向偏差、障碍物类别、位置和置信度等信息	融合数据维度较低,但对各模态底层细节及跨模态互补信息的利用程度有限	在具备传感器冗余、置信度评价及故障隔离机制的情况下,可以提高系统对单一传感器失效的容错能力	适用于多感知模块独立运行,且需要快速仲裁、故障切换和实时控制的农业装备系统	难以利用不同模态的底层互补信息;当不同传感器输出冲突时,需要设置置信度管理、优先级判断或决策仲裁机制

综合来看,农业收获装备自动对行系统正逐步形成“数据级融合提升环境表达能力、特征级融合增强复杂场景鲁棒性、决策级融合保障系统实时性”的层级协同架构。其中,特征级融合在行线检测性能、计算负荷和环境适应性之间具有较好的平衡能力,已成为复杂农田环境下自动对行感知系统的重要发展方向。未来,多源融合系统将进一步向“边缘计算+异构协同”的智能感知架构演进,通过边缘端轻量化融合推理与实时同步补偿,提高农业

收获装备在高速、全天候及非结构化环境下的自主作业能力^[50,58]。

多源信息融合技术通过不同传感器之间的优势互补,能够提升自动对行系统在复杂收获环境下的感知稳定性。机械式感知具有成本低、抗光照和粉尘干扰能力强等优势,但在作物倒伏、杂草缠绕或触杆卡滞条件下容易失效;机器视觉能够获取丰富的颜色、纹理和语义信息,但易受强光、阴影、粉尘和遮挡影响;激光雷达能够提供三维结构信息,抗光照干

扰能力较强,但存在点云处理复杂和硬件成本较高等问题。相比之下,视觉、激光雷达、GNSS/北斗、IMU、触觉及超声等多源融合方案,能够在一定程度

上弥补单一感知技术的不足,提高系统在倒伏、遮挡、泥泞、粉尘和复杂地形等收获期工况下的鲁棒性。不同感知与融合对行技术的综合对比如表 5 所示。

表 5 自动对行系统典型感知与融合技术对比

Tab. 5 Comparison of typical perception and fusion technologies for automatic row guidance systems

技术类型	典型方案	代表性指标及来源	适用收获工况	主要特点与局限
机械式感知	机械触杆、探针、机械仿形、压力传感器	花生收获机机械对行平均横向偏差为 4.82 cm ^[42] ;机械接触式导航系统在复杂地形下跟踪精度可达±8.76 cm ^[35]	泥泞、粉尘、雨雾、丘陵山区,以及根茎类作物低成本收获场景	成本低、结构简单、响应快,抗光照和粉尘干扰能力强;但易受作物倒伏、杂草缠绕、泥土粘附和机械卡滞影响,感知信息维度有限
机器视觉	RGB 相机、工业相机、传统图像处理、深度学习识别	基于 Hough 变换的蔬菜作物行提取准确率可达 92% ^[45] ;基于改进 YOLO v8 的苗期玉米行检测准确率超过 92% ^[46]	作物行线清晰、光照相对稳定的玉米、小麦、蔬菜等田间作业场景	可获取颜色、纹理、边缘和语义信息,适合轻量化部署;但易受强光、阴影、粉尘、遮挡和作物倒伏影响
激光雷达	2D/3D LiDAR、点云聚类、RANSAC 拟合、点云语义分割	2D 激光雷达导航对行误差±3 cm,多生育期玉米 3D 点云行中心线检测正确率超过 86% ^[51]	高秆作物、果园、夜间作业或光照变化明显的收获场景	可获取三维结构信息,抗光照干扰能力强,空间定位精度较高;但设备成本较高,点云处理量大,作物严重倒伏或行间间隙消失时识别稳定性下降
视觉 SLAM + 惯性导航融合	双目相机 + IMU,结合视觉 SLAM、惯性导航和滑动窗口优化	联合收获机田间试验速度为 0.9 ~ 1.5 m/s,平均横向偏差为 2.21 ~ 8.62 cm,平均切割率为 92.2% ~ 96.0% ^[47,58]	小麦、水稻等联合收获作业,适合需要实时获取作物边界线和机具相对位姿的收获场景	能够融合图像信息与惯性姿态信息,提高联合收获机导航基准线提取和位姿估计稳定性;但对视觉质量、标定精度和实时计算能力要求较高
激光雷达 + GNSS/北斗融合	LiDAR + RTK - GNSS/北斗,结合滤波估计或局部路径修正	John Deere S700 系列联合收获机采用 RTK - GNSS 与 LiDAR 融合后,对行精度可达±2.1 cm ^[59]	开阔平原、大地块、高速连续收获作业,以及大豆、甜菜等长行距作物收获场景	全局定位与局部感知互补,适合高速和长行距作业;但成本较高,GNSS/北斗信号易受遮挡或强电磁干扰影响
视觉 + 激光雷达融合	相机 + LiDAR,结合深度融合网络、Transformer 模型或点云-图像联合特征提取	LiDAR 点云与多光谱影像融合可提升作物行检测稳定性 ^[48] ;单目相机与 3D LiDAR 融合可在玉米冠层遮挡条件下提取导航线 ^[50]	倒伏、遮挡、冠层密集、复杂非结构化收获环境	视觉提供纹理和语义信息,LiDAR 提供三维结构信息,二者互补性强;但时空标定、数据同步和计算负荷较大
触觉/超声 + 视觉融合	小型水田底盘触觉引导对行误差可控制在±3 cm 以内 ^[36] ;水田自动对行锄草机采用超声 + 视觉融合,对行精度±3.6 cm ^[60]		水田、浅水、泥泞、水面反光或视觉容易失效的作业场景	可弥补单一视觉在水面反光、泥泞和遮挡环境下的不足;但触觉信号易受土壤阻力和机械振动影响,超声传感器分辨率有限

多源融合系统在实际应用中仍面临数据时间不同步、传感器坐标系不统一和计算负荷较大等问题,因此,时间同步与空间联合标定是保证融合效果的重要前提。Hu 等^[61]通过融合相机、激光雷达和 IMU 信息,实现了玉米茎叶识别与距离测量;Benet 等^[62]融合激光传感器、IMU 和彩色相机信息,提高了复杂地形条件下作物行跟踪的稳定性;Ban 等^[63]进一步利用相机、激光雷达和 IMU 联合提取玉米行导航线,验证了多源融合在复杂田间环境中的应用潜力。这些方法为收获机自动对行提供了参考,但仍需针对粉尘、振动、作物倒伏和割台遮挡等收获期工况开展进一步验证。

对于高浓度粉尘环境,毫米波雷达可作为视觉和激光雷达的潜在补充传感器,但其在收获机自动对行中的应用仍处于探索阶段。总体来看,机械感

知、视觉检测、激光雷达、卫星定位和多源融合并非简单的替代关系,而是针对不同作物、作业环境和成本需求并行发展。自动对行系统需要在感知精度、环境适应性、实时性和硬件成本之间进行综合权衡。

3.2 纠偏及导航控制技术

3.2.1 导航纠偏的路径规划方法

当前,路径规划方法的研究呈现从“全局静态寻优”向“局部动态协同”演进的趋势,其核心目标是为后续的纠偏控制提供一条适应复杂非结构化田间环境、满足精细化农艺需求的参考基线^[64]。

在全局全覆盖作业中,针对传统启发式算法在不规则地块中易陷入局部死锁的问题,李政等^[65]提出的改进灰狼优化算法(IGWO)与刘天湖等^[66]开发的跳点优化蚁群算法(JPOACO),在显著降低转弯消耗与作业成本的同时,大幅提升了算法在复杂

边界约束下的全局收敛鲁棒性。随着自动对行技术从单纯几何路径跟踪向农机-农艺协同发展,路径规划不再仅以作业覆盖率和行驶距离为优化目标,而是进一步将作物种植模式、收获损失控制、地表碾压约束和作业部件保护等农艺要求纳入规划模型。该类方法能够为自动对行系统提供既满足几何精度,又符合实际收获需求的基准路径。胡炼等^[67]将再生稻头季收获的“低碾压”需求建模为带容量约束的车辆路径问题,田间试验显示全田碾压率控制在27.42%,地头区域碾压率降幅达52.2%,实现了作业效率与作物保护的双重优化。

针对作业过程中突遇静态或动态障碍(如倒伏作物、田埂)及特定场景的局部动态路径规划,研究焦点在于平衡实时性、安全性与运动平滑性,以防纠偏动作过大导致机械振荡。杨丽丽等^[68]提出基于二次规划的局部规划方法,在平均耗时48 ms的前提下,保证了与障碍物的安全距离($>0.76\text{ m}$),且平均横向跟踪误差为3.23 cm。杨洋等^[69]利用三阶贝塞尔曲线在动态识别区内生成避障路径,使最大曲率和跟踪误差分别控制在 0.126 m^{-1} 和 0.057 m ,提升了避障及纠偏过程的平稳性。针对地头转向这一高难度场景,南京农业大学团队利用全景环视系统与轻量级语义分割模型,精准提取作业边界,有效解决了地头转向区域的自主路径规划难题^[70]。

面向规模化作业的多机协同路径规划,其核心在于任务分配、冲突消解与系统整体效能优化。李荣轩等^[71]采用改进粒子群算法解决多地块多机型协同收获问题,使系统总作业时间减少29.05%,总油耗降低13.16%。梁亚杰等^[72]提出的改进迭代贪婪算法(IIG)则突出了动态适应性,在农机故障或效率不均等不确定场景下能快速重规划,仿真显示可令总作业时间减少约35%,标志着路径规划正从单机优化迈向多智能体系统协同优化。从算法来源看,蚁群、粒子群、灰狼优化、麻雀搜索等方法均属于典型生物启发式智能优化算法。Fan等^[73]对生物启发式算法进行了系统分类,指出该类算法可按进化机制、群体智能、生态系统行为和多目标优化等方向进行归纳。因此,农业收获装备路径规划中引入改进蚁群、粒子群或灰狼优化算法,本质上是将生物群体搜索机制转化为复杂农田路径寻优问题的计算策略。其优势在于适合处理不规则地块、障碍约束和多目标优化问题,但仍需结合农机运动学约束、地头转向半径和实时计算负荷进行工程化改进。

3.2.2 导航纠偏控制算法

导航纠偏控制算法负责将前期规划得到的参考路径转化为底盘转向、机具横移或作业部件位姿调

整等具体控制指令,其核心目标是在保证系统稳定性的前提下,快速、平稳地减小横向偏差与航向角偏差。根据控制机理和模型依赖程度的不同,现有导航纠偏控制算法大致可分为经典几何/模型控制方法和智能自适应控制方法两类。前者具有结构清晰、计算量小和易于部署等特点,后者则更强调对复杂非线性、参数不确定性和外部扰动的适应能力。

纯追踪(Pure pursuit)、斯坦利(Stanley)与线性二次调节器(LQR)等经典算法因计算负荷低而在农业装备路径跟踪中应用较为广泛,但其理想运动学模型在松软田间极易因滑移而失效。为此张华强等^[74]针对纯追踪模型前视距离无法适应农机变工况的缺陷,引入粒子群寻优与卡尔曼滤波,对拖拉机的动态侧滑角进行在线补偿,将直线跟踪横向误差控制在 0.09 m 。在修正车身姿态方面,赵琦等^[75]为Stanley算法注入了预瞄前馈机制,有效平抑了机具在高速入弯时极易产生的“蛇形”振荡。而为了进一步挖掘LQR在处理多变量反馈上的潜力,吴江东等^[76]设计的曲率自适应权重LQR控制器,在动态解耦路径曲率的基础上实时分配状态权重,使平均横向路径跟踪误差降低56.5%。上述研究表明,经典控制算法通过引入参数自适应、状态估计和前馈补偿等机制,仍可在农业装备自动对行控制中保持较好的应用价值。

随着联合收获机结构尺寸、作业速度和负载水平的提升,系统非线性、执行约束和外部扰动问题更加突出,模型预测控制(MPC)、模糊控制、鲁棒控制和深度强化学习(DRL)等方法逐渐成为导航纠偏控制的重要研究方向。MPC的优势在于能够在滚动优化过程中显式考虑转向角、转向速度、液压缸行程及执行机构饱和等约束,从而兼顾路径跟踪精度与控制输入平滑性。刘环宇等^[77]提出多目标自适应MPC方法,在保持较好实时性的基础上,使不同速度下的跟踪误差降低33%以上。此外,针对山区及恶劣土壤阻力引发的系统不确定性,李逃昌等^[78]与李磊等^[79]利用模糊逻辑规则在线修正跟踪参数,实现了对未知地貌的柔性适应;杜威^[80]在大迟滞的山地静液驱动泵控回路中植入模糊PID,通过算法补偿使物理阶跃响应调节时间缩短24.1%。此外,吴振龙等^[81]引入全驱鲁棒控制方法,在仿真中表现出对未知扰动的强适应性。新兴研究开始尝试构建端到端的深度强化学习(DRL)控制器。Zhang等^[82]设计了融合路径曲率特征的轻量化深度Q网络,在U型路径测试中平均路径跟踪误差为 0.0389 m 。

为了直观对比不同控制算法在纠偏作业中的控制机理、性能特点和适用场景,本文对主要导航纠偏

控制方法进行了系统总结,如表 6 所示。总体来看,农业装备纠偏及导航控制技术正由单一几何跟踪向

融合状态估计、约束优化和智能自适应调节的综合控制方向发展。如图 3 所示,在路径规划层面,研究

表 6 自动对行系统主要控制算法对比分析

Tab. 6 Comparative analysis of main control algorithms for automatic row guidance systems

算法类型	核心机制与特点	典型性能表现	主要优势	局限性	适用场景
传统 PID 控制 ^[27]	基于偏差反馈:仅依据当前位置偏差进行比例(P)、积分(I)、微分(D)调节,不依赖车辆模型	直线跟踪尚可,但在入弯或纠偏时容易产生“蛇形”振荡(超调),稳态误差消除慢	原理最简单,参数物理意义明确,无需任何车辆参数,几乎所有控制器都能运行	参数固定,无法适应速度变化或土壤阻力变化;对大滞后系统(如液压转向)控制效果差	低速直线作业
纯追踪模型 ^[74]	几何圆弧拟合:基于后轮中心,计算从当前位置切入目标路径的圆弧,通过前视距离确定转向角	响应平滑,但在曲线路径上存在稳态误差	核心仅需调节“前视距离”一个参数,实现简单,抗噪性好	高速、大曲率路径跟踪时容易产生内切现象,导致横向跟踪误差增大	作物行线较平直、地面硬实起伏小的旱田作业
Stanley 算法 ^[75]	基于前轮反馈的几何跟踪,同时考虑横向偏差和航向偏差,利用非线性反馈律实现渐进收敛	在路径平滑且连续条件下,收敛速度快于纯追踪,稳态误差极小	对横向误差的校正能力强,且在理论上证明了系统的全局渐进稳定性	速度较高或路径曲率突变时容易产生剧烈转向抖动,需配合平滑处理	中低速曲线跟踪(如果园巡检、大棚内较复杂的路径)
模糊自适应 PID ^[29]	通过模糊逻辑推理,实时估算土壤硬度、坡度等非线性扰动,并在线调整 PID 参数	在坡度 15°、土壤含水率 25% 的条件下,对行精度保持率可达 85%	不依赖被控对象的精确数学模型,能自主适应复杂多变的田间环境	计算量相对较大,控制性能依赖于所设计模糊规则库的完备性	复杂非结构化地形(如丘陵山区、水田泥泞环境、土壤阻力变化剧烈的地块)
模型预测控制(MPC) ^[77]	基于农机动力学模型预测未来状态,通过滚动优化计算控制输入,兼顾路径跟踪精度与能耗	在保证高跟踪精度的同时,能够优化系统能量消耗	能够显式地处理多目标优化和多约束问题,综合控制性能优越	严重依赖精确的车辆动力学模型,在线滚动优化计算复杂度高	高精度与高速作业(如精量播种、高速收割,及算力充足的大型智能农机)
深度强化学习(DRL) ^[82-83]	智能体通过与仿真或真实环境交互,自主学习最优控制策略,实现从感知到执行的端到端控制	在 U 型路径测试中,平均跟踪误差可达 0.038 9 m,性能优于许多传统方法	无需精确的机理模型,能从数据中自学复杂控制策略,在非结构化环境中潜力巨大	训练过程耗时且样本效率低,控制策略的可解释性及安全性验证较为困难	极端或未知环境研究(如复杂障碍物规避、新型作物行特征识别等实验性场景)
滑模控制(SMC) ^[84]	设计滑模面,通过高频切换控制量,强制系统状态沿预定轨迹运动	动态响应迅速,能有效抑制突发干扰带来的路径偏差	鲁棒性强,能够有效抑制负载变化、坡度扰动等不确定因素对系统跟踪性能的影响	需结合滤波或改进趋近律,容易加剧执行器磨损	动态干扰环境(如丘陵坡地、高速作业等)存在持续侧向力干扰

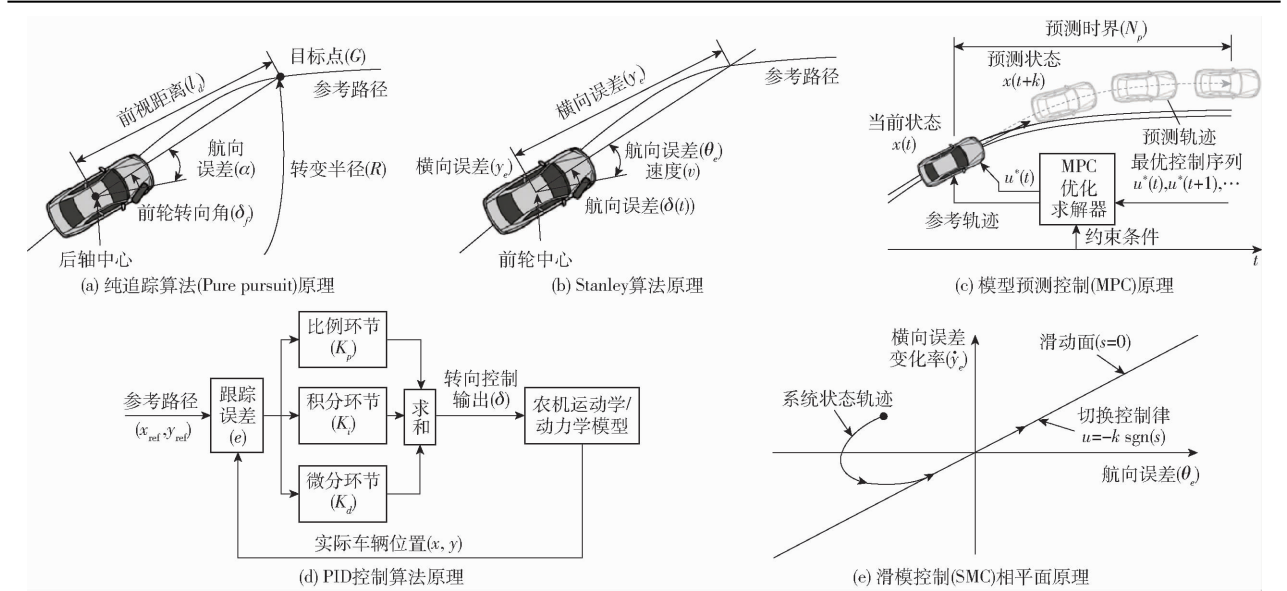


图 3 典型自动对行导航控制算法原理图

Fig. 3 Schematics of principle of typical automatic row navigation control algorithm

重点由静态全覆盖路径生成逐步转向兼顾农艺约束、动态避障和地头转向的局部实时规划;在导航纠偏控制层面,经典算法仍凭借实时性和实现简便性具有较强应用基础,而 MPC、模糊控制、鲁棒控制和深度强化学习等方法则进一步提升了系统非线性扰动、复杂地形和高速作业条件下的跟踪精度与鲁棒性。这种“路径规划动态化、纠偏控制自适应化”的发展趋势,为农业收获装备在非结构化田间环境下实现稳定自动对行提供了重要支撑。

3.3 纠偏执行机构

纠偏执行机构是自动对行系统的末端实现环节,其功能是将路径跟踪控制器输出的电信号、液压控制量或电机控制量转化为底盘转向、牵引机构姿态调整或作业部件横移等机械动作。执行机构的响应速度、执行定位误差和抗扰能力直接影响整机横向跟踪误差、作业稳定性和收获质量^[31]。

目前,常见纠偏执行方式主要包括电动助力转向、电液比例转向、牵引机构横向调节和作业部件独立横移等。中小型农机多采用结构紧凑、控制灵活的电动助力转向或伺服电动机构;大型联合收获装备由于作业负荷大、工况复杂,常采用输出力矩较大的电液比例转向系统或液压横移机构。因此,纠偏执行系统优化需要结合机电液一体化设计、死区补偿、动态响应补偿和状态反馈控制等方法,以提升高负载和强扰动条件下的执行稳定性。由于田间作业环境复杂,执行机构普遍存在的动态响应延迟、机械传动间隙(回程误差)以及液压阀口死区,往往是导致算法理论精度与实际对行精度存在显著差别的直接原因^[85-87]。根据作用部位与驱动原理的不同,当前纠偏执行机构正呈现出多样化、专用化和集成化的发展趋势。

在作用部位与纠偏模式方面,主要分为整机底盘转向、牵引挂接调整与工作部件独立调整 3 大类。对于玉米、棉花等大型自走式收获机械,整机底盘转向是主流方案。除了传统的前轮或后轮偏转转向外,为解决大型机具挂接宽幅割台后,因轴距过长导致的横向纠偏“摆尾”与响应滞后难题,国外高端机型(如 Claas、John Deere)普遍引入了先进的四轮独立转向技术。该技术允许车身在保持航向角不变的前提下进行整体横向斜移(蟹行模式),大幅提升了非结构化环境下的纠偏敏捷性。针对牵引式机具在丘陵坡地横切作业时因重力侧向分量与土壤剪切滑移极易诱发的航向偏移难题,基于牵引杆角度动态伺服补偿的挂接调整机构已逐渐成为高精度作业的标准配置。王申莹等^[37]设计的甜菜收获机液压纠偏系统,通过闭环驱动前后双液压缸同步调整牵引

三角架的角度,使对行响应时间缩短至 0.4 s,显著降低了漏收损失。而对于作业精度要求严苛的低矮根茎类或蔬菜作物,工作部件独立位姿调整(即底盘路径跟踪、工作部件横向微调)更具优势。杨然兵等^[42]通过液压系统驱动挖掘铲整体平移以补偿偏差;张晓龙等^[88]则创新性地设计了基于四连杆机构的自动对行装置,利用连杆摆动特性替代了易受泥沙卡滞的平移导轨,使核心部件国产化率达 95%,制造成本降低 60%。

在底层驱动形式方面,纠偏执行机构总体呈现出重载装备以电液驱动为主、轻量化装备逐步采用电动驱动的发展趋势。大型联合收获装备作业负载较大,且执行机构易受负载变化和地面扰动影响,因此通常更适合采用输出力较大、调节范围较宽的电液比例驱动系统。沈文龙等^[89]以农业车辆为对象,设计了由电液比例阀、转向油缸和转角反馈装置组成的电控液压转向系统,并采用带死区补偿的控制方法改善转向跟踪性能,验证了电液比例驱动在农业车辆转向控制中的可行性。然而,油液压缩性、阀口死区、参数时变和负载扰动等因素仍可能造成执行延迟及跟踪误差,需要通过死区补偿、状态反馈和控制参数优化提高系统稳定性。相比之下,伺服电动执行机构具有结构紧凑、控制接口简单和便于数字化控制等特点,在中小型轻量化农机中具有较好的应用潜力^[90]。缪鹏等^[91]在电动叶菜收获机上采用伺服电机驱动齿轮齿条及转向连杆机构,并结合模糊 PID 控制实现了自动对行。但在大扭矩、连续高负载和泥泞阻滞等工况下,电动驱动仍需重点解决电机过载、散热和持续输出能力等问题。总体而言,电液驱动更适用于高负载纠偏场景,电动驱动则在轻量化、低功耗和高集成度装备中更具优势。

综上所述,纠偏执行机构的发展已从单纯的机械结构设计,迈向机电液一体化的高频动态响应优化。综合对比分析如表 7 所示。

4 典型作物与场景自动对行技术应用与实践

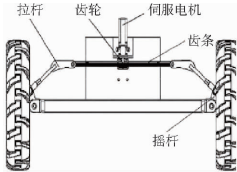
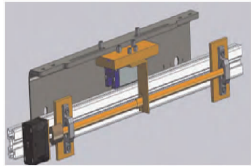
4.1 茎秆类作物(玉米、甘蔗、棉花)

茎秆类作物通常植株高大、行线特征较为明显,但在收获期也容易受到倒伏、冠层遮挡、高密度种植及行间边界模糊等因素影响。针对上述问题,自动对行技术逐步由单一机械触觉或机器视觉感知,向激光雷达、机械传感器、GNSS/IMU 与视觉等多源信息融合方向发展,以提高高速收获作业下的系统鲁棒性与对行精度。

在玉米收获自动对行技术领域,国内已开展较多多样机试验与应用探索。针对倒伏玉米识别难题,

表 7 自动对行系统典型执行机构

Tab.7 Typical actuators of automatic row guidance systems

机构类型	核心工作原理	核心优势	应用局限性	典型应用案例	机构示意图
液压驱动	电信号驱动比例阀,控制液压缸或转向器输出动力	输出扭矩大,技术成熟,可靠性高,适合重载连续作业	系统复杂,存在泄漏风险;对油液清洁度要求高;能耗较高	雷沃重工 4YZ-4G 型玉米收获机 ^[92] ;王申莹团队 ^[37] 甜菜收获机液压纠偏系统	
电动驱动	控制器驱动电机,经传动机构转换为直线或旋转运动	响应快,控制精度高,易于数字化控制,维护简单	大扭矩持续输出易过热,热管理难;电池性能限制其在大型农机应用	宇通重工马铃薯收获机低成本电动对行系统 ^[93] ;缪鹏等 ^[91] 叶菜收获机电动推杆方案	
电液混合驱动	结合电机控制精度与液压输出动力,通常电机控制液压阀/泵	平衡控制精度与输出动力,灵活性好,支持多模式驱动	系统更复杂,成本与维护难度介于纯电与纯液之间	半喂入花生收获机电液自动对行试验装置 ^[94]	
机械传动驱动	依靠地轮、PTO、连杆、凸轮等机械传动实现被动或半主动纠偏	结构简单,成本较低,可靠性较高,对电控/液压系统依赖较小	调节灵活性有限,难以适应高精度和复杂变工况对行需求	张晓龙等 ^[88] 设计四连杆自动对行装置国产化率 95%,成本降低 60%,精度 ± 4.5 cm	

张凯良等^[95]设计了“激光雷达 + 机械传感器”玉米行融合感知系统,激光雷达负责精准识别直立玉米行,机械传感器辅助检测倒伏玉米,采用多模式切换控制策略,整机试验表明,在作业速度 8 km/h 下,静态行位检测误差范围为 ± 7.75 cm,整机动态横向跟踪偏差范围为 ± 8.76 cm,籽粒损失率降低 0.76%。曹向虎^[96]开发了基于机器视觉的玉米收获机割台自动对行控制系统,该系统具有较快动态响应,可使整体漏收率降低 3.5 个百分点。雷丹等^[97]针对大规模收获需求,设计了全喂入玉米联合收获机电气控制系统,集成 PID 控制与“视觉 + IMU”反馈,优化控制参数后,整机横向跟踪偏差范围为 ± 5 cm。唐子昊^[98]设计的基于机器视觉与电液比例控制的对行系统表现出良好的多作物适应性,在 0.8 m/s 的田间作业速度下,实现了大豆行作业最大单边横向偏差不超过 4.2 cm,玉米带作业最大单边横向偏差不超过 4.6 cm。这进一步验证了机器视觉技术结合先进的控制算法在不同作物带及复杂农田环境中的对行可靠性。美国 John Deere 公司推出的 AutoTrac RowSense 系统代表了当前玉米收获的先进水平,该系统创新性地采用了机械触杆 + GNSS 的融合策略:在玉米倒伏或卫星信号丢失区域,位于割台分禾器上的机械触杆提供实时行位反馈;而在作物稀疏区,系统自动切换至 GNSS 引导。该类设计通过作物行传感与 GNSS 互补,可提升玉米收获

过程中行导向的连续性和稳定性^[59]。

由于南方丘陵蔗区地块破碎、地形起伏明显和种植行不规则等作业条件,甘蔗收获机易出现割台高度波动、车身侧倾及行向偏移等问题。为提高装备对复杂蔗田环境的适应能力,相关研究主要围绕割台地形仿形、车身姿态调节和甘蔗导航感知等方面展开。

在割台地形仿形方面,宫元娟等^[99]设计了由自重摆动式仿形机构、传感器、控制器和液压执行机构组成的割台随动控制系统。该系统通过感知地表高程变化,驱动液压缸调节割台或基切器高度,从而提高起伏地面条件下割茬高度的一致性并降低宿根损伤。在车身姿态调节方面,李尚平等^[100]针对履带式甘蔗收获机坡地作业时易发生横向侧倾的问题,设计了基于倾角检测和液压执行的横向调平系统,通过调节履带行走机构与车架之间的相对位置,提高了整机的坡地稳定性和抗倾翻能力。在甘蔗导航感知方面,杨洋等^[101]利用固态激光雷达获取甘蔗行点云信息,通过点云滤波、特征提取和直线拟合获得垄间中心导航线,为甘蔗收获机横向偏差解算和后续转向控制提供了参考路径。后续需进一步融合甘蔗行感知、机具姿态检测、底盘转向控制和割台高度调节,实现整机路径跟踪、姿态稳定与作业部件位姿调控的协同控制。

棉花收获及打顶作业通常面临冠层密集、行向

弯曲、封行遮挡和松软土壤滑移等复杂工况,对自动对行系统的感知稳定性和底盘行驶稳定性提出了较高要求。张晋国等^[41]设计的高地棉花打顶机自动对行装置,整合了摄像头识别行边缘与压力传感器感知阻力,实现了 $\pm 4\text{ cm}$ 的偏行识别精度范围,打顶整齐度提升30%,其结构示意图如图4所示。

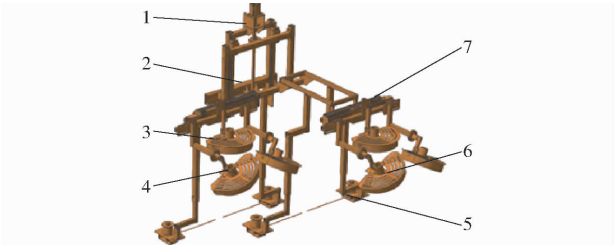


图4 棉花打顶机整机结构图

Fig. 4 Structure diagram of cotton topping machine

1. 升降机构 2. 悬挂机构 3. 主枝打顶机构 4. 直流电机
5. 检测机构 6. 侧枝打顶机构 7. 对行调整机构

在执行与行走系统方面,为减小松软棉田中机具滑移跑偏对对行精度的影响,韩长杰等^[102]对棉花打顶机履带底盘行走系统进行了优化,有效提升了机组在复杂工况下的直线行驶稳定性与抗偏移能力,为高精度的自动对行控制提供了可靠的物理支撑。棉花打顶机自动对行结构示意图^[103]如图5所示。

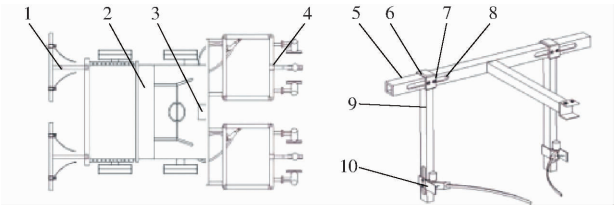


图5 自动对行棉花打顶机俯视图

Fig. 5 Top view of automatic row-following cotton topping machine

1. 检测模块 2. 打顶机底盘 3. 液压控制模块 4. 自动对行模块
5. T型固定支架 6. 滑块 7. 螺栓 8. 凹槽 9. 移动滑杆
10. 转动检测机构

此外,针对冠层严重遮挡导致的实时识别难题,何创新等^[104]提出平行轨迹导航方法,通过RTK-GNSS拟合参考线规避实时识别难题,横向跟踪偏差范围为 $\pm 6\text{ cm}$ 。

棉花收获领域,Case IH公司的Module Express采棉机通过集成Row-Trak导向系统,利用安装在采棉头两侧的触觉传感器感知棉株茎秆位置,结合液压转向系统的快速响应,有效解决了封行棉田中视觉失效的难题。

综上所述,茎秆类作物自动对行技术已由单一机械触觉或机器视觉感知,逐步向视觉、激光雷达、

机械传感器与GNSS/IMU等多源信息融合方向发展。国内研究多围绕视觉识别、激光雷达感知、融合检测与控制算法优化开展样机试验和应用验证;国外高端机型则较早将机械触觉、GNSS和液压转向等技术集成到商业化收获装备中,更强调复杂工况下系统运行的连续性与稳定性。总体来看,茎秆类作物对行技术的关键突破在于利用激光雷达的三维结构感知能力、机器视觉的语义识别能力以及机械触觉的近距离接触反馈优势,提升系统在倒伏、封行遮挡、高密度种植和高速作业条件下的作物行识别稳定性与对行控制精度。

4.2 根茎类作物(甜菜、马铃薯、花生)

根茎类作物的收获质量与对行精度密切相关,挖掘铲或拔取部件的横向偏差容易导致块根、块茎漏收或机械损伤。因此,根茎类作物自动对行技术早期多依赖机械仿形和接触式检测,近年来逐步向机械检测、液压纠偏、视觉感知与多源信息辅助监测相结合的方向发展,其目标是在复杂土壤条件下实现对垄中心、块根位置或挖掘作业中心线的稳定跟踪。对于甜菜、马铃薯、花生等地下结实类作物,自动对行的工程难点不仅在于机具能否沿作物行中心运动,还在于挖掘部件能否在土壤阻力波动、残茬缠绕和块根不规则分布条件下保持稳定入土与低损挖掘。研究表明,仿生结构对土壤挖掘或切削可改善触土部件的入土性能并降低切削阻力^[105-107]。因此,根茎类作物自动对行系统应进一步将行位检测、液压纠偏和挖掘部件低阻仿生设计结合起来,以降低横向偏差、挖掘阻力和块根损伤之间的影响。

甜菜自动对行收获技术主要以接触式检测与液压纠偏为基础,并逐步向视觉感知和收获质量监测拓展。吴惠昌等^[108]研发的牵引式甜菜联合收获机集成了对行探测装置与液压纠偏系统,其自动对行系统可根据作业过程中的行位偏差实时调整机具姿态,从而降低漏收和块根损伤风险。为了进一步提升自走式甜菜联合收获机的对行能力,高飞扬等^[109]设计了一种接触式自动对行检测装置,该装置通过机械探测杆接触甜菜块根,并结合角度传感器获取行位偏差信息,在建立运动学与动力学模型的基础上,分析偏移量与传感器输出信号之间的对应关系。在系统的仿真与优化方面,针对甜菜块根的自动对行技术,王申莹等^[110-111]结合ADAMS与AMESim软件对探测机构及液压纠偏执行系统进行了动态响应分析;随后基于Proteus平台开展了电控系统的虚拟仿真优化,田间试验结果表明,该系统的平均对行角度相对误差为1.30%^[112];后又设计了甜菜收获机自动对行执行机构^[37],如图6所示。国

际上,荷兰瓦赫宁根大学开发的基于立体视觉的甜菜收获机器人,展示了视觉方案在复杂土壤条件下的潜力^[113]。针对以往依靠操作员主观经验评估机械损伤的局限性,研究人员引入了 YOLO v4 等卷积神经网络(CNN)模型,在复杂的收获机内部实现了对甜菜可见机械损伤的高速(约 29 f/s)、高精度(精确率约 93%)实时检测^[114]。这种将“对行导航”与“损伤监测”相结合的多维感知技术,将是未来智能采收装备的核心发展方向。

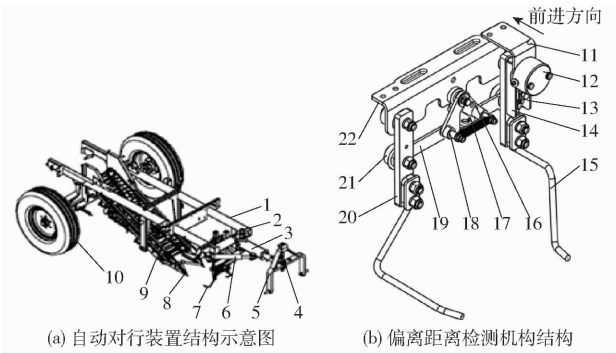


图 6 甜菜自动对行联合收获机结构图

Fig. 6 Sugar beet automatic row combine harvester structure
1. 主机架 2. 后角度传感器 3. 牵引杆 4. 前角度传感器 5. 牵引架 6. 液压缸 7. 偏离距离检测机构 8. 挖掘机构 9. 输送链 10. 行走轮 11. 传感器安装板 12. 角度传感器 13. 传感器连接轴 14. 传感器支板 15. 右探测杆 16. 右弹簧限位板 17. 复位弹簧 18. 左弹簧限位板 19. 连杆 20. 挂杆 21. 轴承 22. 固定架

马铃薯收获质量对挖掘部件与垄体中心的对准精度要求较高,挖掘铲横向偏移容易导致漏挖、伤薯或薯土分离效果下降。魏志彩等^[38]设计了履带自走式分拣型马铃薯收获机,整机主要由挖掘铲、自动对行装置、分拣平台、操纵装置、行走底盘和机架等组成,采用自动对行挖掘、薯土分离与人工辅助分拣相结合的作业方式,其折叠状态如图 7 所示。

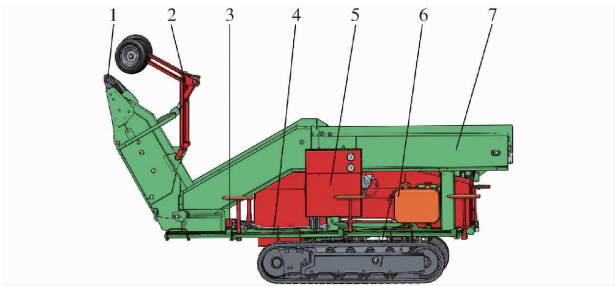


图 7 履带自走式分拣型马铃薯收获机折叠状态

Fig. 7 Folding state diagram of crawler self-propelled sorting type potato harvester
1. 挖掘铲 2. 自动对行装置 3. 座椅 4. 分拣平台 5. 操纵装置 6. 行走底盘 7. 机架

马铃薯收获机自动对行技术早期主要依赖地垄仿形、机械触杆和液压纠偏,近年来逐步向多传感器

感知、多模转向控制和智能化作业参数调节方向发展。李涛等^[115]设计的地垄仿形 + PID 系统通过机械触杆感知垄形,横向跟踪偏差范围为 $\pm 3.5\text{ cm}$,伤薯率降低 3.2 个百分点,其结构示意图如图 8 所示。杨金砖等^[39]优化马铃薯捡拾机对行机构,采用弹性仿形轮替代刚性触杆,减少土壤阻力对机构的影响,明薯率提升 2.16 个百分点。然而,王虎存等^[40]指出机械仿形机构在砂石地块故障率高。针对西北旱作区马铃薯垄体特征起伏大、作业轨迹易偏移的难题,王虎存^[116]研发了多模转向马铃薯联合收获装备及其控制系统,该系统通过多传感器融合实时获取垄沟地形、机具姿态和整机偏角等信息,并结合多模式转向控制策略,实现了复杂地形下挖掘部件对垄中心的动态跟踪与位姿自适应调节。田间试验表明,该自动对行系统有效提升了挖掘部件的对准精度,在保证路径跟踪可靠性的同时,显著降低了马铃薯的漏收率与机械损伤率。

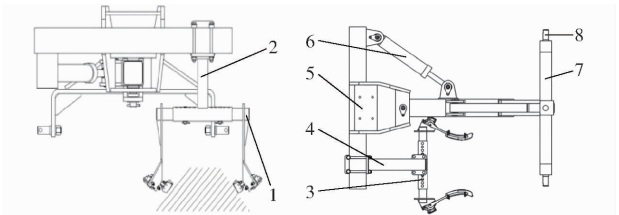


图 8 马铃薯收获机械接触式自动对行探测原理图

Fig. 8 Principle of mechanical contact-based automatic row-following detection for potato harvester
1. 传感器连接架 2. 传感器支座 3. 挂接销轴 4. 探测安装座 5. 牵引安装座 6. 液压缸 7. 前牵引架 8. 下悬挂轴

国外马铃薯收获装备则更强调机械仿形、液压调节与作业部件协同控制的可靠性。以比利时 AVR 公司的 Puma 系列马铃薯收获机为例,其 ACC 系统主要围绕挖掘单元的深度控制与垄体仿形展开,可通过探针或陀形仿形滚轮感知垄体高度变化,并结合液压执行机构实时调整挖掘深度,以提高不同土壤条件下的收获稳定性。德国 ROPA 公司的 Keiler 2 RK22 型马铃薯收获机则采用垄体自动导向、挖掘深度调节和垄体压力控制相结合的方案。作业过程中,系统通过检测两侧垄压辊的倾角变化获取垄体位置,并据此引导挖掘单元沿垄体中心运动;同时利用液压系统调节挖掘深度和垄体接触压力,从而提高挖掘部件与垄体之间的匹配稳定性,且无需复杂的图像处理算力支持,展现了较高的实用价值^[117]。

花生收获适配窄行距垄作模式,以机械接触式和视觉导航为主。马宁等^[118]针对多垄花生收获过程中挖掘部件易偏离垄行的问题,研制了具有自动对行功能的四垄八行花生条铺收获机。该机利用仿形轮与传感器组成的偏离探测机构获取机具相对垄

行的偏移信息,并通过液压缸驱动夹持输送机架横向移动,使挖掘与输送部件保持沿垄作业。为了进一步探究并优化机电液协同纠偏性能,Lv 等^[94]针对半喂入花生收获机设计了基于四杆检测机构与单片机控制的自动对行试验装置。华勇^[119]开发的机器视觉系统通过识别苗带中心线,使横向跟踪偏差保持在 $\pm 2.9\text{ cm}$ 以内,杂草防除率达 91.3%。

5 存在的问题

5.1 感知技术的适应性不足

在面临作物倒伏错乱、杂草密集遮挡、环境光照剧变以及作物不同生长期表型形态差异等高度复杂田间工况时,现有的环境感知系统普遍存在行线检测或分割性能显著下降与适应性不足的问题。机械式检测装置需要依赖于物理接触来感知作物位置,在作物茎秆发生倒伏或田间存在大量杂草时,容易因信号干扰或部件卡滞而导致检测失效,无法为导航系统持续提供稳定的行线信息^[120]。基于机器视觉的系统虽然能够获取到丰富的纹理与颜色特征,但在强烈逆光、阴影交错或晨昏时段光照不足的条件下,图像对比度会显著降低,导致作物行线边缘特征变得模糊不清,进而造成识别算法的误检与漏检现象。激光雷达通过主动发射激光束来构建环境三维点云,理论上对光照变化并不敏感,然而在作物冠层茂密或存在严重遮挡时,点云密度分布会出现不均,使得行线几何特征的提取工作变得困难,在实际应用中难以保证持续的检测鲁棒性。不同作物于生长阶段的形态变化进一步增加了感知系统的适配难度。叶类蔬菜在生长中后期植株间会相互遮蔽,导致行线边界逐渐模糊,现有视觉算法在分割此类目标时的准确率波动较为明显^[120]。在水稻智慧无人农场的无人收获环节,同样会由于稻穗垂坠、茎秆倾斜等自然生长形态,使得基于单一传感器的行线检测稳定性不足^[121]。多源信息融合方法尝试整合视觉、激光雷达乃至惯性测量单元的数据,以期提升系统对环境变化的适应能力,但传感器之间的时空配准偏差、数据异步问题以及融合算法本身的复杂性,在实时作业条件下仍可能引入新的误差源,难以完全解决复杂田间场景下的感知可靠性问题。上述分析表明,在理想条件下表现较好的感知方案,一旦面临倒伏、遮挡或光照突变等干扰,其性能仍可能显著下降,凸显了现有技术在实际田间环境中的适应瓶颈。

感知系统在适应性方面存在的不足,会直接制约高端农业装备的广泛应用。在小区育种这类对作业精度要求极高的场景中,收获装备需要精确区分

不同品系并且避免发生混杂现象,任何行线识别环节所产生的偏差,都可能会造成样本污染,进而对育种数据的科学性造成影响^[122]。自动化技术的深度应用,从根本上取决于可靠环境感知的建立,当前感知模块所面临的瓶颈问题,已然成为提升农机整体智能化水平的关键制约因素之一^[123]。因此,研发能够有效克服复杂田间干扰且具备更强跨域泛化能力的智能感知系统,是推动农业收获装备自动对行技术规模化与产业化应用有待解决的关键问题之一。

5.2 控制算法的实时性与精度矛盾

在高速作业环境下,收获装备自动对行对控制算法的实时性与跟踪精度提出了极为严格的要求,然而二者之间往往存在着难以调和的矛盾。其中,实时性要求系统能够对环境变化做出快速响应并更新控制指令,而高精度则需要依赖复杂的算法模型进行精细调节,导致计算负担较重。例如在联合收获机作业过程中,卫星定位系统虽然可提供厘米级的位置信息,然而数据处理与路径规划环节存在的延迟,可能导致实际运行轨迹偏离理想路径,从而对作业质量造成影响^[124]。选用模糊控制等智能算法可以在一定程度上缓解这一矛盾,如在双电机履带式水稻收获机导航系统中,通过引入一种考虑滑移率的模糊控制器,直线跟踪的平均横向偏差可被控制在 5 cm 以内,但算法复杂度的增加导致实时性下降,该现象在曲线路径跟踪任务中表现得尤为明显^[125]。为提高控制效率,部分系统采用简化模型或线性化处理方法,然而这类方法在作物行线弯曲或地面起伏条件下,容易出现适应性不足的问题,难以维持稳定的控制精度。

尽管模型预测控制(MPC)方法能够实现极高的路径跟踪精度,但其依赖的复杂多步滚动优化机制导致了底层计算求解耗时显著长于传统反馈方法。在农机高速作业场景下,这种高计算负荷极易引发底层控制指令的滞后与机械执行系统的物理振荡。与之相比,传统 PID 控制具备响应迅速的优势,但在精度方面存在一定局限,难以满足精细化作业需求。该实时性与精度的矛盾问题同样存在于电动助力转向系统以及电液转向系统之中,其中前者响应快却存在扭矩输出受限的情况,而后者精度较高但伴随有液压延迟的固有特性^[126]。随着收获机作业速度的不断提升,控制算法在泛化能力方面也面临严峻考验,其在多种作物类型及不同田块条件下的适应性仍有待加强。数字农业时代所发展的收获监测技术虽提供了丰富的数据支持,但如何将所获取数据高效转化为控制指令,仍是有待突破的关键

问题^[127]。

5.3 系统集成与可靠性问题

系统集成与可靠性问题不仅涉及硬件接口兼容性,更涉及感知、决策、控制和执行全环节的协同优化。由于各子系统通常来源于不同技术路线以及供应商,数据格式与通信协议层面所存在的差异容易导致信息交互延迟甚至失效现象,进而影响整体作业精度。例如,若环境感知模块获取的作物行线信息无法实时传递至导航决策单元,则路径跟踪控制器将难以生成准确的纠偏指令,从而引发执行机构出现振荡或超调问题。有研究在联合收获机自主作业过程中发现,感知系统检测未切割作物边缘的定位数据与导航控制指令之间存在毫秒级延迟,该现象致使路径跟踪误差显著增大,尤其在高速收获工况下此类问题表现得更为突出^[128]。为提升系统级协同性能,部分方案尝试运用自适应神经网络估计器对系统动态模型开展在线补偿工作,通过融合车辆运动学与动力学特性来改善参数不确定性所带来的负面影响,从而增强控制指令与执行动作之间的一致性^[84]。

系统长期工作的可靠性还面临恶劣田间环境的严峻考验,振动、灰尘以及湿度等因素会加速传感器性能的退化进程或机械部件的磨损程度。激光雷达与视觉相机在复杂光照或多尘条件下可能出现点云数据缺失或图像噪变现象,这将直接降低作物行线检测环节的鲁棒性^[129]。执行机构中的电液转向系统虽然具备高负载能力,但液压油泄漏、阀芯卡滞等故障会直接影响转向精度,而电动助力转向系统虽然维护较为简便,却容易受到电磁干扰的影响。如何在保证可靠性的同时控制成本已成为产业化推广过程中的关键矛盾,高端多传感器融合方案虽能提升环境适应性,但其高昂造价难以被中小型农场所接受。现有系统大多针对特定作物或地块条件开发,当转移至不同生长形态的作物或起伏地形时,感知模块的标定参数与控制算法往往需要重新进行调整,此类泛化能力的缺乏进一步制约了系统的规模化应用进程^[130]。

系统集成的另一项核心挑战在于异常状态自主处置能力的不足。当遇到未建模动态或突发障碍时,多数现有系统仍需依赖人工干预,难以维持连续作业状态。这种局限性在收获机械高速行进工况下表现得尤为突出,因为动态路径跟踪既要求控制算法具备高响应速度,又需保持足够的抗干扰裕度,二者之间的平衡关系尚未得到充分解决。随着农机作业场景向全天候、多作物方向扩展,系统可靠性设计需从单一部件耐久性测试转向全链路故障预测与健

康管理,通过嵌入自诊断与重构机制降低突发故障导致的作业中断风险。

6 发展展望

农业收获装备自动对行技术正由单项功能试验转向复杂田间条件下的系统应用。现有系统在作物倒伏、粉尘干扰、光照变化和地表起伏等条件下仍可能出现检测结果不稳定、控制响应滞后及执行精度下降等问题。后续研究应在提高对行精度的同时,更加关注环境适应性、系统可靠性、运行安全性和应用成本,推动感知、决策、控制与执行环节协同发展。

6.1 感知智能化

感知智能化首先要解决导航基准信息不连续的问题。作物倒伏、相互遮挡、杂草混生和光照变化都会影响作物行或未收获作物边界的识别,单一传感器难以适应所有作业条件。后续可根据作物类型和收获方式,将机器视觉、激光雷达、机械接触式传感器以及 GNSS/INS 组合导航系统进行合理配置,利用不同传感器的特点相互补充。多源数据使用前应统一坐标系和时间基准,并完成传感器标定。融合过程中需要判断各类数据是否有效,防止异常数据造成导航基准线跳变。算法研究应重点提高作物行与作物边界提取的稳定性,同时减少计算量,使其能够在车载控制器上实时运行。模型训练和性能验证还应覆盖不同作物、不同地区及不同生长状态,避免系统更换作业对象后需要大幅调整参数。

6.2 决策自主化

决策自主化的基础是将感知结果及时、准确地转化为控制指令。系统应根据横向偏差、航向偏差、行驶速度、路径曲率和执行机构状态,完成作业状态判断、参考路径生成、控制参数选择和转向指令计算。相较于固定参数控制,根据作业状态调整控制参数更有利于适应速度变化和弯曲作物行,但参数调整范围必须受到限制,以免产生振荡、超调或转向突变。控制方法的复杂程度应与车载控制器的计算能力相匹配。模型预测控制、优化控制和数据驱动控制可以用于改善复杂路径下的跟踪效果,但不能以增加计算延迟为代价。相关算法需要在统一工况下比较跟踪精度、运算时间和稳定性。对于导航基准线丢失、传感器异常或执行机构故障,系统还应具备报警、停车或人工接管功能,保证异常情况下的作业安全。

6.3 系统协同化

感知、决策、控制和执行之间的信息传递直接影响自动对行效果。系统设计应统一数据格式、通信

接口和坐标定义,明确各环节的采样频率、传输时间和更新顺序,减少数据不同步造成的控制误差。控制器还应考虑电液转向或电动转向机构的响应延迟、死区和输出限制,使计算得到的转向指令与执行机构的实际能力相符。当转向纠偏与割台调节、挖掘部件调节等功能同时工作时,需要合理安排控制顺序,避免不同执行机构相互干扰。系统可靠性不能只通过短时间功能试验判断,还应结合台架试验、硬件在环试验和田间试验,检查振动、粉尘、温湿度变化及连续作业对系统性能的影响,并逐步完善故障诊断和降级运行功能。

6.4 技术普惠化

技术普惠化需要在满足基本对行精度和可靠性要求的前提下,降低设备购置、安装调试和后期维护成本。传感器和计算平台应根据实际作业需求选

择,不宜单纯追求高配置。采用模块化控制器、标准化接口和通用零部件,有利于降低改装难度,也便于部件更换和系统维护。面向不同作物和不同型号的收获装备,控制系统还应简化安装、标定和参数设置过程,减少对专业技术人员的依赖。系统评价除横向偏差和航向偏差外,还应包括响应时间、故障率、作业损失、能耗和维护成本。通过多区域、多作物和长周期田间试验,可以较为全面地判断自动对行系统的适用范围和推广条件。

总体来看,农业收获装备自动对行技术已经具备一定的研究和应用基础,但与复杂田间条件下的长期稳定作业仍有差距。后续研究应更加重视传感器配置、控制算法与执行机构之间的配合,并加强长期试验和统一评价,使自动对行系统达到性能稳定、维护方便和成本可接受的应用要求。

参 考 文 献

[1] 王申莹,胡志超,陈有庆,等. 土下作物自动对行挖掘收获试验台研制[J]. 农业工程学报,2020,36(5):29-37.
Wang Shenying, Hu Zhichao, Chen Youqing, et al. Development of the test bench for automatic alignment digging harvest of subterranean crops[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(5):29-37. (in Chinese)

[2] Luo Y S, Wei L L, Xu L Z, et al. Stereo vision-based multi-crop harvesting edge detection for precise automatic steering of combine harvester[J]. Biosystems Engineering, 2022, 215: 115-128.

[3] Sun J W, Zhou J, He Y Q, et al. Traveling control method adapted to different paddy ground conditions with feedforward compensation for crawler combine harvester based on online tracking error prediction [J]. Computers and Electronics in Agriculture,2024,220:108853.

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

[5] Wilson J N. Guidance of agricultural vehicles-a historical perspective[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2000, 25(1-2):3-9.

[6] Karim M R, Reza M N, Jin H, et al. Application of LiDAR sensors for crop and working environment recognition in agriculture: a review[J]. Remote Sensing,2024,16(24):4623.

[7] Xie B, Jin Y, Faheem M, et al. Research progress of autonomous navigation technology for multi-agricultural scenes[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2023,211:107963.

[8] O'Connor M, Bell T, Elkaim G, et al. Automatic steering of farm vehicles using GPS[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture. Minneapolis: ASA, CSSA, SSSA,1996:767-777.

[9] Marchant J A, Brivot R. Real-time tracking of plant rows using a Hough transform[J]. Real-Time Imaging,1995,1(5):363-371.

[10] 何勋,陈旭,屈哲,等. 小麦收获智能化技术应用研究进展[J]. 河南农业大学学报,2022,56(3):341-354.
He Xun, Chen Xu, Qu Zhe, et al. Research progress on the application of intelligent technology for wheat harvesting[J]. Journal of Henan Agricultural University,2022,56(3):341-354. (in Chinese)

[11] Thrun S, Burgard W, Fox D. Probabilistic robotics[M]. Cambridge, MA: MIT Press,2005.

[12] 马熙然. 智能除草机自动对行电液控制系统研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2025.
Ma Xiran. Research on automatic row-following electro-hydraulic control system for intelligent weeder [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University,2025. (in Chinese)

[13] 胡炼,关锦杰,何杰,等. 花生收获机自动驾驶作业系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(9):21-27.
Hu Lian, Guan Jinjie, He Jie, et al. Design and experiment of automatic driving operation system for peanut harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(9):21-27. (in Chinese)

[14] 沈跃,张亚飞,刘慧,等. 农业装备自动控制技术研究综述[J]. 农业机械学报,2023,54(8):1-18.
Shen Yue, Zhang Yafei, Liu Hui, et al. Review of research on automatic control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(8):1-18. (in Chinese)

[15] Yao Z, Zhao C, Zhang T. Agricultural machinery automatic navigation technology[J]. iScience,2024,27(2):108714.

- [16] Zhang J, Lv S, Pan Y, et al. Auto-follow row control system for an autonomous maize harvester using adaptive segmented PID and row-deviation detection[J]. *Robotics and Autonomous Systems*,2026,196:105252.
- [17] 杨涛,李晓晓. 农机自动驾驶系统研究进展与行业竞争环境分析[J]. *中国农机化学报*,2021,42(11):222–231.
Yang Tao, Li Xiaoxiao. Research progress of agricultural machinery autopilot system and analysis of industry competition environment[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*,2021,42(11):222–231. (in Chinese)
- [18] 胡子谦,王登辉,胡瑞,等. 基于拟人驾驶模型的联合收获机导航控制器设计与试验[J]. *华中农业大学学报*,2022,41(4):248–258.
Hu Ziqian, Wang Denghui, Hu Rui, et al. Design and experiment of navigation controller for combine harvester based on anthropomorphic driving model[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*,2022,41(4):248–258. (in Chinese)
- [19] Cui S B, Kong F T, Tian K P, et al. Review of automatic row alignment technology for intelligent agricultural machinery in the field[J]. *Smart Agricultural Technology*,2026,14:102059.
- [20] Wu H X, Wang X Z, Chen X G, et al. Review on key technologies for autonomous navigation in field agricultural machinery [J]. *Agriculture*,2025,15(12):1297.
- [21] Quan L, Guo Z, Huang L, et al. Efficient extraction of corn rows in diverse scenarios: a grid-based selection method for intelligent classification[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*,2024,218:108759.
- [22] Bah M D, Hafiane A, Canals R. CRowNet: deep network for crop row detection in UAV images[J]. *IEEE Access*,2020,8:5189–5200.
- [23] 苗中华,田大庆,何创新,等. 智能采棉机自动对行辅助驾驶控制技术研究[J]. *农机化研究*,2022,44(10):72–76.
Miao Zhonghua, Tian Daqing, He Chuangxin, et al. Research on automatic row-following auxiliary driving control technology for intelligent cotton picker[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*,2022,44(10):72–76. (in Chinese)
- [24] 杨少奇,李广宇,徐峰,等. 电动玉米收获机自动对行控制系统的研究[J]. *农业与技术*,2024,44(5):41–45.
Yang Shaoqi, Li Guangyu, Xu Feng, et al. Research on automatic row-following control system of electric maize harvester[J]. *Agriculture and Technology*,2024,44(5):41–45. (in Chinese)
- [25] 吉嵩,张大斌,曹阳,等. 丘陵地区非标准垄仿形机构设计与仿真[J]. *农机化研究*,2026,48(7):48–55.
Ji Gui, Zhang Dabin, Cao Yang, et al. Design and simulation of non-standard ridge profiling mechanism in hilly areas[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*,2026,48(7):48–55. (in Chinese)
- [26] Cui B, Cui X, Wei X, et al. Design and testing of a tractor automatic navigation system based on dynamic path search and a fuzzy Stanley model[J]. *Agriculture*,2024,14(12):2136.
- [27] 丁幼春,夏中州,彭靖叶,等. 联合收获机单神经元 PID 导航控制器设计与试验[J]. *农业工程学报*,2020,36(7):34–42.
Ding Youchun, Xia Zhongzhou, Peng Jingye, et al. Design and experiment of single neuron PID navigation controller for combine harvester[J]. *Transactions of the CSAE*,2020,36(7):34–42. (in Chinese)
- [28] Hao Y, Laxton B, Benson R E, et al. Differential flatness-based formation following of a simulated autonomous small grain harvesting system[J]. *Transactions of the ASAE*,2004,47(3):933–941.
- [29] An G, Zhong Z, Yang S, et al. EASS: an automatic steering system for agricultural wheeled vehicles using fuzzy control[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*,2024,217:108544.
- [30] 丁幼春,王绪坪,彭靖叶,等. 轮式谷物联合收获机视觉导航系统设计与试验[J]. *智慧农业(中英文)*,2020,2(4):89–102.
Ding Youchun, Wang Xuping, Peng Jingye, et al. Design and experiment of vision navigation system for wheeled grain combine harvester[J]. *Smart Agriculture*,2020,2(4):89–102. (in Chinese)
- [31] Thomas G, Simundsson A, Mann D D, et al. Classification of auditory signals from a combine harvester based on Mel-frequency cepstral coefficients and machine learning[J]. *Canadian Biosystems Engineering*,2021,63:2.13–2.22.
- [32] Meng J, Xian W, Li F, et al. A monocular camera-based algorithm for sugar beet crop row extraction[J]. *Engenharia Agrícola*,2024,44:e20240034.
- [33] Liu P, Cui Z, Hu J, et al. Lodge-Unet: a dual-frequency feature fusion network with boundary-aware optimization for wheat lodging detection via autonomous harvesters[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*,2025,238:110769.
- [34] 陈声佩. 触杆位置探测原理及自动对行应用[J]. *机电技术*,2023(4):2–4.
Chen Shengpei. Principle of feeler rod position detection and application in automatic row-following[J]. *Electromechanical Technology*,2023(4):2–4. (in Chinese)
- [35] 崔永祯. 机器视觉技术在农业机械路径导航中的应用研究[J]. *农机使用与维修*,2024(4):45–47.
Cui Yongzhen. Research on application of machine vision technology in agricultural machinery path navigation[J]. *Agricultural Machinery Using and Maintenance*,2024(4):45–47. (in Chinese)
- [36] 陈学深,熊悦松,齐龙,等. 基于触感引导的小型水田行进底盘自动对行方法[J]. *农业工程学报*,2022,38(21):8–15.
Chen Xueshen, Xiong Yuesong, Qi Long, et al. Automatic row-following method of small paddy field traveling chassis based on tactile guidance[J]. *Transactions of the CSAE*,2022,38(21):8–15. (in Chinese)
- [37] 王申莹,胡志超,Chen Charles,等. 牵引式甜菜联合收获机自动对行系统设计与台架试验[J]. *农业机械学报*,2020,51(4):103–112,163.

- Wang Shenying, Hu Zhichao, Chen Charles, et al. Design and bench test of automatic row-following system for trailed sugar beet combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 103 – 112, 163. (in Chinese)
- [38] 魏忠彩, 王兴欢, 李学强, 等. 履带自走式分拣型马铃薯收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 95 – 106.
Wei Zhongcai, Wang Xinghuan, Li Xueqiang, et al. Design and experiment of crawler self-propelled sorting type potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 95 – 106. (in Chinese)
- [39] 杨金砖, 李国民, 郝磊, 等. 马铃薯捡拾机发展现状及主要功能结构研究[J]. 农机使用与维修, 2019(3): 15 – 16.
Yang Jinzhuan, Li Guomin, Hao Lei, et al. Development status and main functional structure research of potato picker[J]. Agricultural Machinery Using and Maintenance, 2019(3): 15 – 16. (in Chinese)
- [40] 王虎存, 赵武云, 孙伟, 等. 马铃薯机械化收获技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报, 2023, 39(14): 1 – 22.
Wang Hucun, Zhao Wuyun, Sun Wei, et al. Research progress of mechanized potato harvesting technology and equipment [J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(14): 1 – 22. (in Chinese)
- [41] 张晋国, 郑超, 赵金, 等. 棉花打顶机自动对行装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 93 – 101.
Zhang Jinguo, Zheng Chao, Zhao Jin, et al. Design and experiment of automatic row-following device for cotton topping machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 93 – 101. (in Chinese)
- [42] 杨然兵, 尚书旗, 王家胜, 等. 根茎类作物收获机械自动对行技术的研究[C]//中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集. 青岛: 中国农业工程学会, 2011: 138 – 142.
- [43] 陈刚, 周平, 孙宜田, 等. 机械接触式导航控制系统的研究与试验[J]. 农机化研究, 2017, 39(8): 186 – 190.
Chen Gang, Zhou Ping, Sun Yitian, et al. Research and experiment of mechanical contact navigation control system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(8): 186 – 190. (in Chinese)
- [44] 刘阳. 大豆玉米带状复合种植增程式对行喷杆喷雾机设计与试验[D]. 郑州: 河南农业大学, 2025.
Liu Yang. Design and experiment of extended-range row-following boom sprayer for soybean-maize strip intercropping[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2025. (in Chinese)
- [45] 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[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 314 – 322.
Chen Ziwen, Li Wei, Zhang Wenqiang, et al. Vegetable crop row extraction method based on automatic Hough transform accumulation threshold[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(22): 314 – 322. (in Chinese)
- [46] 李洪波, 田鑫, 阮志文, 等. 基于改进 YOLO v8 的苗期玉米行检测方法[J]. 智慧农业(中英文), 2024, 6(6): 72 – 84.
Li Hongbo, Tian Xin, Ruan Zhiwen, et al. Seedling maize row detection method based on improved YOLO v8[J]. Smart Agriculture, 2024, 6(6): 72 – 84. (in Chinese)
- [47] Zhu F H, Chen J, Guan Z H, et al. Development of a combined harvester navigation control system based on visual simultaneous localization and mapping-inertial guidance fusion[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2024, 55(3): 269657692.
- [48] Li Y, Wang C, Zhang J, et al. Deep learning based fusion of LiDAR point cloud and multispectral imagery for crop row detection[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(8): 8210 – 8221.
- [49] Zhang S, Ma Q, Cheng S, et al. Crop row detection in the middle and late periods of maize under sheltering based on solid state LiDAR[J]. Agriculture, 2022, 12(12): 2011.
- [50] Ban C, Wang L, Su T, et al. Fusion of monocular camera and 3D LiDAR data for navigation line extraction under corn canopy [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 232: 110124.
- [51] Zhang B, Xu H, Tian K, et al. Research on automatic alignment for corn harvesting based on euclidean clustering and K-means clustering[J]. Agriculture, 2024, 14(11): 2071.
- [52] Jeon C W, Kim Y H, Kim H J, et al. Development of a real-time crop edge detection algorithm based on laser scanner for autonomous combine harvesters[J]. Journal of Biosystems Engineering, 2025, 50(3): 379 – 392.
- [53] Chang X Y, Liang R Q, Zhang J, et al. Design and evaluation of a multi-sensor fusion navigation system for autonomous orchard weeding robot[J]. Smart Agricultural Technology, 2026, 13: 101873.
- [54] 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, 137.
He Jing, He Jie, Luo Xiwen, et al. Rice row recognition and navigation control based on multi-sensor fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 18 – 26, 137. (in Chinese)
- [55] Shi Z, Bai Z, Yi K, et al. Vision and 2D LiDAR fusion-based navigation line extraction for autonomous agricultural robots in dense pomegranate orchards[J]. Sensors, 2025, 25(17): 5432.
- [56] 何勇, 黄震宇, 杨宇远, 等. 设施农业机器人导航关键技术研究进展与展望[J]. 智慧农业(中英文), 2024, 6(5): 1 – 19.
He Yong, Huang Zhenyu, Yang Ningyuan, et al. Research progress and prospect of key technologies for facility agricultural robot navigation[J]. Smart Agriculture, 2024, 6(5): 1 – 19. (in Chinese)
- [57] Barbedo J G A. Data fusion in agriculture: resolving ambiguities and closing data gaps[J]. Sensors, 2022, 22(6): 2285.
- [58] Zuo X, Geneva P, Lee W, et al. LIC – Fusion: LiDAR-inertial-camera odometry[C]// 2019 IEEE/RSJ International

- Conference on Intelligent Robots and Systems. Macau: IEEE,2019;5848 – 5854.
- [59] John Deere. S700 series combine harvester technical manual[R]. Moline; Deere & Company,2021.
- [60] 赖海林. 水田自动对行锄草机研制与试验[D]. 杭州:浙江理工大学,2023.
Lai Hailin. Development and experiment of paddy field automatic row-following weeder[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University,2023. (in Chinese)
- [61] Hu X, Zhang X, Chen X, et al. Research on corn leaf and stalk recognition and ranging technology based on LiDAR and camera fusion[J]. Sensors,2024,24(16):5422.
- [62] Benet B, Lenain R, Rousseau V. Development of a sensor fusion method for crop row tracking operations[J]. Advances in Animal Biosciences,2017,8(2):583 – 589.
- [63] 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.
- [64] 戴祯,郭延超,王笑乐,等. 酿酒葡萄收获机自动对行驾驶局部路径动态规划算法[J]. 农业机械学报,2025,56(2):124 – 135.
Dai Zhen, Guo Yanchao, Wang Xiaole, et al. Local path dynamic planning algorithm for automatic row-following driving of wine grape harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 124 – 135. (in Chinese)
- [65] 李政,张璠,常淑惠,等. 复杂环境下农机全覆盖作业路径优化问题研究[J]. 中国农机化学报,2025,46(9):120 – 128.
Li Zheng, Zhang Fan, Chang Shuhui, et al. Research on path optimization of agricultural machinery full coverage operation in complex environment[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2025,46(9):120 – 128. (in Chinese)
- [66] 刘天湖,赖嘉上,孙伟龙,等. 基于跳点优化蚁群算法的菠萝田间导航路径规划[J]. 农业机械学报,2025,56(4):387 – 396.
Liu Tianhu, Lai Jiashang, Sun Weilong, et al. Path planning for pineapple field navigation based on jump point optimization ant colony algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 387 – 396. (in Chinese)
- [67] 胡炼,张鸿,何杰,等. 再生稻头季低碾压收获作业路径规划技术研究[J]. 农业机械学报,2025,56(2):19 – 27.
Hu Lian, Zhang Hong, He Jie, et al. Path planning technology for low-compaction harvesting of first season ratoon rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(2):19 – 27. (in Chinese)
- [68] 杨丽丽,唐晓宇,吴思贤,等. 机耕道自动驾驶农机局部路径规划[J]. 农业工程学报,2024,40(1):27 – 36.
Yang Lili, Tang Xiaoyu, Wu Sixian, et al. Local path planning for autonomous agricultural machinery on farm roads[J]. Transactions of the CSAE,2024,40(1):27 – 36. (in Chinese)
- [69] 杨洋,温兴,马强龙,等. 基于贝塞尔曲线的动态识别区农机避障路径实时规划[J]. 农业工程学报,2022,38(6):34 – 43.
Yang Yang, Wen Xing, Ma Qianglong, et al. Real-time planning of obstacle avoidance path for agricultural machinery based on Bezier curve in dynamic recognition area[J]. Transactions of the CSAE,2022,38(6):34 – 43. (in Chinese)
- [70] Li D, Lei Y, Fan J, et al. Real-time path planning for multi-scenario headland turns in agricultural vehicles using panoramic vision and sequential frame correlation method[J]. Journal of Industrial Information Integration,2025,48:100938.
- [71] 李荣轩,龚立娇,李玉洁,等. 异类型多机自主智能协同收获作业任务规划方法与试验[J]. 农业工程学报,2025,41(24):33 – 42.
Li Rongxuan, Gong Lijiao, Li Yujie, et al. Task planning method and experiment of heterogeneous multi-machine autonomous intelligent cooperative harvesting[J]. Transactions of the CSAE,2025,41(24):33 – 42. (in Chinese)
- [72] 梁亚杰,杨丽丽,徐媛媛,等. 不确定场景下无人农机多机动态路径规划方法[J]. 农业工程学报,2021,37(21):1 – 8.
Liang Yajie, Yang Lili, Xu Yuanyuan, et al. Multi-machine dynamic path planning method for autonomous agricultural machinery in uncertain scenarios[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(21):1 – 8. (in Chinese)
- [73] Fan X, Sayers W, Zhang S, et al. Review and classification of bio-inspired algorithms and their applications[J]. Journal of Bionic Engineering,2020,17:611 – 631.
- [74] 张华强,王国栋,吕云飞,等. 基于改进纯追踪模型的农机路径跟踪算法研究[J]. 农业机械学报,2020,51(9):18 – 25.
Zhang Huaqiang, Wang Guodong, Lü Yunfei, et al. Path tracking algorithm of agricultural machinery based on improved pure pursuit model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(9):18 – 25. (in Chinese)
- [75] 赵琦,许畅,姬晨禹,等. 基于预瞄时间的斯坦利控制算法[J]. 汽车实用技术,2024,49(19):22 – 28.
Zhao Qi, Xu Chang, Ji Chenyu, et al. Stanley control algorithm based on preview time[J]. Automobile Applied Technology, 2024,49(19):22 – 28. (in Chinese)
- [76] 吴江东,潮群,刘成良,等. 无人驾驶农机曲率自适应轨迹规划与跟踪控制协同优化方法[J]. 农业工程学报,2026,42(3):1 – 12.
Wu Jiangdong, Chao Qun, Liu Chengliang, et al. Synergistic optimization method of curvature adaptive trajectory planning and tracking control for autonomous agricultural machinery[J]. Transactions of the CSAE,2026,42(3):1 – 12. (in Chinese)
- [77] 刘环宇,唐嘉城,邹顺,等. 基于多目标优化的策略型自适应农机路径跟踪控制方法[J]. 农业机械学报,2025,56(3):

198 – 207.

Liu Huanyu, Tang Jiacheng, Zou Shun, et al. Strategic adaptive path tracking control method for agricultural machinery based on multi-objective optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 198 – 207. (in Chinese)

- [78] 李逃昌, 胡静涛, 高雷, 等. 基于模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 205 – 210.
Li Taochang, Hu Jingtao, Gao Lei, et al. Path tracking method for agricultural machinery based on fuzzy adaptive pure pursuit model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 205 – 210. (in Chinese)
- [79] 李磊, 余小明, 唐兴隆, 等. 基于模糊逻辑控制的滑移转向底盘避障控制方法[J]. 智慧农业(中英文), 2026, 8(1): 213 – 225.
Li Lei, She Xiaoming, Tang Xinglong, et al. Obstacle avoidance control method of skid-steering chassis based on fuzzy logic control[J]. Smart Agriculture, 2026, 8(1): 213 – 225. (in Chinese)
- [80] 杜威. 基于静液驱动的山地农机驱动装置电液控制研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
Du Wei. Research on electro-hydraulic control of hydrostatic driving device for mountainous agricultural machinery[D]. Guiyang: Guizhou University, 2023. (in Chinese)
- [81] 吴振龙, 李林, 刘艳红. 基于全驱控制方法的农机路径跟踪控制[J]. 郑州大学学报(工学版), 2025, 46(4): 24 – 31.
Wu Zhenlong, Li Lin, Liu Yanhong. Path tracking control of agricultural machinery based on all-drive control method[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2025, 46(4): 24 – 31. (in Chinese)
- [82] Zhang L, Zhang R, Zhang D, et al. Path curvature incorporated reinforcement learning method for accurate path tracking of agricultural vehicles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 234: 110243.
- [83] Ren Z, Liu Z, Yuan M, et al. Double-DQN-based path-tracking control algorithm for orchard traction spraying robot[J]. Agronomy, 2022, 12(11): 2803.
- [84] Zhang Y, Wang L, Liu Y. Adaptive neural network-based path tracking control for autonomous combine harvester with input saturation[J]. Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application, 2021, 48(4): 510 – 522.
- [85] 鲁植雄, 龚佳慧, 鲁杨, 等. 拖拉机线控液压转向系统的双通道 PID 控制仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 101 – 106.
Lu Zhixiong, Gong Jiahui, Lu Yang, et al. Simulation and experiment of dual-channel PID control for tractor steer-by-wire hydraulic steering system[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 101 – 106. (in Chinese)
- [86] 金梅, 吴崇友, 韩树钦. 液压传动与控制技术在农机上的应用与发展趋势[J]. 机床与液压, 2017, 45(23): 172 – 176.
Jin Mei, Wu Chongyou, Han Shuqin. Application and development trend of hydraulic transmission and control technology on agricultural machinery[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(23): 172 – 176. (in Chinese)
- [87] 傅梁起, 王龙龙, 毛恩荣, 等. 高地隙喷雾机全液压多轮转向控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(10): 746 – 757.
Fu Liangqi, Wang Longlong, Mao Enrong, et al. Design and experiment of full hydraulic multi-wheel steering control system for high clearance sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(10): 746 – 757. (in Chinese)
- [88] 张晓龙, 易克传, 姜春霞, 等. 基于四连杆机构自动对行装置的设计与仿真[J]. 东莞理工学院学报, 2024, 31(5): 110 – 116.
Zhang Xiaolong, Yi Kechuan, Jiang Chunxia, et al. Design and simulation of automatic row-following device based on four-bar linkage[J]. Journal of Dongguan University of Technology, 2024, 31(5): 110 – 116. (in Chinese)
- [89] 沈文龙, 薛金林, 张永. 农业车辆电控液压转向系统的设计[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2014, 40(3): 325 – 329.
Shen Wenlong, Xue Jinlin, Zhang Yong. Design of electronic-controlled hydraulic steering system for agricultural vehicle[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2014, 40(3): 325 – 329. (in Chinese)
- [90] Kasal Y G, Singh S, Khan S. Electrification of agricultural machinery: advances in battery technology, powertrain design, and field performance for sustainable farming[J]. International Journal of Agriculture and Food Science, 2025, 7(10): 252 – 256.
- [91] 缪鹏, 左志宇, 毛罕平, 等. 电动叶菜收获机自动对行控制系统研究[J]. 农机化研究, 2022, 44(3): 84 – 89.
Miao Peng, Zuo Zhiyu, Mao Hanping, et al. Research on automatic row-following control system of electric leaf vegetable harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(3): 84 – 89. (in Chinese)
- [92] 雷沃重工. 4YZ-4G 玉米联合收获机技术说明书[R]. 潍坊: 雷沃重工, 2022.
- [93] 宇通重工. 马铃薯收获机电动对行系统技术手册[R]. 郑州: 宇通重工, 2023.
- [94] Lv X L, Hu Z L, Wang S Y, et al. Design and research of automatic alignment test device of semi-feeding peanut combine harvester[J]. INMATEH-Agricultural Engineering, 2019, 57(1): 71 – 80.
- [95] 张凯良, 胡勇, 杨丽, 等. 玉米收获机自动对行系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 103 – 114.
Zhang Kailiang, Hu Yong, Yang Li, et al. Design and experiment of automatic row-following system for maize harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 103 – 114. (in Chinese)
- [96] 曹向虎. 智能化玉米收获机割台自动对行控制系统研究[D]. 蚌埠: 安徽科技学院, 2021.

- Cao Xianghu. Research on automatic row-following control system for header of intelligent maize harvester[D]. Bengbu: Anhui Science and Technology University, 2021. (in Chinese)
- [97] 雷丹, 郑璇. 全喂入玉米联合收获机电气控制系统的设计[J]. 农机化研究, 2024, 46(12): 118–121, 126.
Lei Dan, Zheng Xuan. Design of electrical control system for full-feed corn combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(12): 118–121, 126. (in Chinese)
- [98] 唐子昊. 大豆玉米复合种植对行除草机设计与试验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2025.
Tang Zihao. Design and experimental study of row-following weeder for soybean-corn strip intercropping[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2025. (in Chinese)
- [99] 宫元娟, 金忠博, 白晓平, 等. 甘蔗收获机割台随动控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 119–128.
Gong Yuanjuan, Jin Zhongbo, Bai Xiaoping, et al. Design and experiment of servo control system for sugarcane header[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 119–128. (in Chinese)
- [100] 李尚平, 韦雨彤, 任泓宇, 等. 丘陵地区履带式甘蔗收获机横向调平系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(6): 374–385.
Li Shangping, Wei Yutong, Ren Hongyu, et al. Design and experiment of leveling system for crawler-type sugarcane harvesters in hilly areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6): 374–385. (in Chinese)
- [101] 杨洋, 马强龙, 陈志桢, 等. 激光雷达实时提取甘蔗垄间导航线[J]. 农业工程学报, 2022, 38(4): 178–185.
Yang Yang, Ma Qianglong, Chen Zhizhen, et al. Real-time extraction of the navigation lines between sugarcane ridges using LiDAR[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(4): 178–185. (in Chinese)
- [102] 韩长杰, 李超, 徐阳, 等. 棉花打顶机履带行走系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(5): 121–129, 267.
Han Changjie, Li Chao, Xu Yang, et al. Design and experiment of crawler walking system for cotton topping machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(5): 121–129, 267. (in Chinese)
- [103] 河北农业大学. 一种自动对行棉花打顶机: CN211020144U[P]. 2020–07–17.
- [104] 何创新, 巩蕾, 苗中华, 等. 基于平行轨迹导航的采棉机自动对行控制方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(6): 34–41.
He Chuangxin, Gong Lei, Miao Zhonghua, et al. Automatic row-following control method of cotton picker based on parallel trajectory navigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 34–41. (in Chinese)
- [105] Li M, Chen D H, Zhang S J, et al. Biomimetic design of a stubble-cutting disc using finite element analysis[J]. Journal of Bionic Engineering, 2013, 10: 118–127.
- [106] Chang Z, Liu W, Tong J, et al. Design and experiments of biomimetic stubble cutter[J]. Journal of Bionic Engineering, 2016, 13: 335–343.
- [107] Tong J, Ji W, Jia H, et al. Design and tests of biomimetic blades for soil-rototilling and stubble-breaking[J]. Journal of Bionic Engineering, 2015, 12: 495–503.
- [108] 吴惠昌, 胡志超, 王申莹, 等. 牵引式甜菜联合收获机自动对行系统研制[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 17–24.
Wu Huichang, Hu Zhichao, Wang Shenying, et al. Development of automatic row-following system for trailed sugar beet combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12): 17–24. (in Chinese)
- [109] 高飞扬, 王卓, 白晓平, 等. 自走式甜菜联合收获机自动对行检测装置的设计[J]. 农机化研究, 2020, 42(5): 69–76.
Gao Feiyang, Wang Zhuo, Bai Xiaoping, et al. Design of automatic row-following detection device for self-propelled sugar beet combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(5): 69–76. (in Chinese)
- [110] 王申莹, 胡志超, 吴惠昌, 等. 甜菜收获机自动对行液压纠偏执行系统设计与试验[J]. 农机化研究, 2016, 38(3): 155–162.
Wang Shenying, Hu Zhichao, Wu Huichang, et al. Design and experiment of hydraulic correction execution system for automatic row-following of sugar beet harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(3): 155–162. (in Chinese)
- [111] Wang S Y, Pan J B, Xiao Q, et al. Design of a deviation information detection mechanism for sugar beet harvesters based on agricultural machinery and agronomy integration[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2026, 19(1): 120–131.
- [112] 王申莹, 胡志超, 吴惠昌, 等. 基于 Proteus 的甜菜收获机自动对行控制系统设计仿真与试验[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(3): 35–40.
Wang Shenying, Hu Zhichao, Wu Huichang, et al. Design, simulation and test of automatic row-following control system for sugar beet harvester based on Proteus[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(3): 35–40. (in Chinese)
- [113] 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.
- [114] Nasirahmadi A, Wilczek U, Hensel O. Sugar beet damage detection during harvesting using different convolutional neural network models[J]. Agriculture, 2021, 11(11): 1111.
- [115] 李涛, 周进, 徐文艺, 等. 根茎类作物收获机自动对行系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 102–110.
Li Tao, Zhou Jin, Xu Wenyi, et al. Design and experiment of automatic row-following system for root and tuber crop harvester

- [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 102–110. (in Chinese)
- [116] 王虎存. 西北旱作区马铃薯减阻碎土挖掘机理与联合收获技术研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2025.
Wang Hucun. Research on the mechanism of resistance-reducing and soil-crushing digging and combined harvesting technology for potatoes in the northwest dryland area[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2025. (in Chinese)
- [117] ROPA Fahrzeug- und Maschinenbau GmbH. Keiler 2 RK22[EB/OL]. (2024–06–12)[2026–07–28]. https://www.ropa-maschinenbau.de/site/assets/files/44928/ropa_keiler_2_rk22_p900212gb.pdf.
- [118] 马宁, 王东伟, 尚书旗, 等. 基于自动对行的四垄八行花生条铺收获机设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报, 2021, 56(5): 159–168, 177.
Ma Ning, Wang Dongwei, Shang Shuqi, et al. Design and testing of peanut strip-laying harvester of four ridges and eight rows based on automatic alignment[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2021, 56(5): 159–168, 177. (in Chinese)
- [119] 华勇. 基于机器视觉的花生株间除草装置控制系统研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2024.
Hua Yong. Research on control system of peanut inter-plant weeding device based on machine vision[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2024. (in Chinese)
- [120] 梁树建, 刘立晶, 刘芳建, 等. 叶类蔬菜机械化收获技术装备发展现状[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(1): 346–352.
Liang Shujian, Liu Lijing, Liu Fangjian, et al. Development status of mechanized harvesting technology and equipment for leaf vegetables[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(1): 346–352. (in Chinese)
- [121] 于丰华, 许童羽, 郭忠辉, 等. 水稻智慧无人农场关键技术研究现状与展望[J]. 智慧农业(中英文), 2024, 6(6): 1–22.
Yu Fenghua, Xu Tongyu, Guo Zhonghui, et al. Research status and prospects of key technologies for rice smart unmanned farm[J]. Smart Agriculture, 2024, 6(6): 1–22. (in Chinese)
- [122] 徐涛, 朱炫铭, 梁玉成, 等. 小区育种田间试验关键技术装备研究现状与趋势[J]. 农机化研究, 2025, 47(12): 283–293.
Xu Tao, Zhu Xuanming, Liang Yucheng, et al. Research status and trends of key technology and equipment for plot breeding field experiment[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(12): 283–293. (in Chinese)
- [123] 柴宗旺, 王春娟. 自动化技术在农业机械中的应用研究[J]. 南方农机, 2024, 55(20): 196–198.
Chai Zongwang, Wang Chunjuan. Research on application of automation technology in agricultural machinery[J]. Southern Agricultural Machinery, 2024, 55(20): 196–198. (in Chinese)
- [124] 潘超然. 联合收获机的卫星定位控制与远程管理技术应用[J]. 农机使用与维修, 2022(7): 26–28.
Pan Chaoran. Application of satellite positioning control and remote management technology in combine harvesters[J]. Agricultural Machinery Using and Maintenance, 2022(7): 26–28. (in Chinese)
- [125] 王伟康. 基于GNSS的双电机履带式水稻收获机底盘自动导航系统设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
Wang Weikang. Design and experiment of automatic navigation system for dual-motor crawler rice harvester chassis based on GNSS[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [126] 王金国. 自动控制技术在农业机械中的应用[J]. 乡村科技, 2020, 11(34): 122–123.
Wang Jinguo. Application of automatic control technology in agricultural machinery[J]. Countryside Science and Technology, 2020, 11(34): 122–123. (in Chinese)
- [127] 李鑫. 约翰迪尔 S 系列收割机配置 HarvestDoc 收获监测技术[J]. 农机科技推广, 2022(4): 64.
Li Xin. John Deere S-series harvesters configured with HarvestDoc harvest monitoring technology[J]. Agricultural Machinery Technology Promotion, 2022(4): 64. (in Chinese)
- [128] Cho W, Iida M, Suguri M, et al. Using multiple sensors to detect uncut crop edges for autonomous guidance systems of head-feeding combine harvesters[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2014, 7(3): 115–121.
- [129] Biglia A, Zaman S, Gay P, et al. 3D point cloud density-based segmentation for vine rows detection and localisation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 199: 107166.
- [130] 刘婉茹, 张国忠, 周勇, 等. 智能化技术在水稻生产全程机械化中的应用研究与发展趋势[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(1): 105–122.
Liu Wanru, Zhang Guozhong, Zhou Yong, et al. Application research and development trend of intelligent technology in whole-process mechanization of rice production[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(1): 105–122. (in Chinese)