

中国人工智能技术在农业生产领域中的应用研究综述及展望

——以番茄生产中的应用为例

朱艾青, 田文婕, 李梅芳*

(中国农业大学烟台研究院, 山东 烟台 264670)

摘要: 随着人工智能技术的蓬勃发展和政策的大力支持, 智慧农业已经成为中国农业未来发展的重点。番茄是国内外广受喜爱的一种作物, 人工智能技术在番茄生产中的应用日益广泛。本文系统梳理中国农业领域人工智能技术应用现状, 重点分析总结人工智能技术在番茄生产中的应用现状, 初步归纳现存问题, 并对未来发展趋势进行展望, 提出建议。

关键词: 人工智能技术; 番茄生产; 农业生产; 智慧农业; 智能采摘

中图分类号: S126

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2026)03-0112-07

Review and Prospect of the Applications of Artificial Intelligence in Agricultural Production: A Case Study of Tomato Production

ZHU Aiqing, TIAN Wenjie, LI Meifang*

(Yantai Research Institute, China Agricultural University, Yantai 264670, China)

Abstract: With the vigorous development of artificial intelligence(AI) technology and strong policy support, smart agriculture has emerged as a key focus for the future development of China's agricultural sector. Tomatoes are a crop widely favored both domestically and internationally, and AI has been increasingly applied in tomato production. This paper comprehensively reviews the current status of AI applications in China's agricultural sector, with particular emphasis on analyzing and summarizing the applications of AI in tomato production. It also identifies existing problems and provides an outlook on future development trends, accompanied by corresponding suggestions.

Key words: Artificial intelligence technology; Tomato production; Agricultural production; Intelligent agriculture; Intelligent harvesting

近年来, 人工智能技术发展势头迅猛, 不仅推动了传统产业转型升级, 也为智慧农业的进一步发展提供了强大的技术支撑。2025年中央一号文件首次提出“农业新质生产力”的概念, 并明确表示支持发展智慧农业, 拓展人工智能、数据、低空等技术应用场景。

中国是番茄种植面积最广、生产总量最大的国家。然而, 目前中国番茄产业发展仍然面临诸多问题, 如采收期集中导致劳动力紧张, 单产量

低、产业化水平低等^[1]。人工智能技术在番茄生产领域的应用不仅可以提升番茄的品质和产量, 还能带来不可忽视的经济效益^[2]。本研究首先梳理人工智能技术在番茄生产中的应用现状, 并对未来发展趋势进行展望。

1 中国农业领域人工智能运用现状

当前人工智能技术在农业领域的应用呈现出“数据-算法-装备”协同发展的特征。通过物联网传感器、无人机遥感与深度学习技术的结合, 农业生产正从经验驱动转向数据驱动, 以本文关注的种植业为例, 该领域人工智能应用现状按照技术应用方向主要可以分为5部分。

1.1 精准生产管理

人工智能与物联网技术的深度融合显著提升

收稿日期: 2025-07-28

基金项目: 烟台市教育局校地融合项目(2022XDRHXMQT24); 中国农业大学烟台研究院引导性课题(Z202304)

作者简介: 朱艾青(2004-), 女, 在读本科, 研究方向为技术经济、农业经济。

通信作者: 李梅芳, E-mail: limeifang1969@163.com

了农业生产资源动态调控能力。“伏羲农场”智慧农业体系以“OODA”为指导原则的闭环管理策略^[3],在农作物生长过程中及时发现农田管理的需求,空间上精准控制作业范围,目前根据“伏羲农场”的智能模型决策方案,在13万m²示范田中,利用基于AI的水肥一体滴灌技术,比农场原有雨养管理模式增产24%左右,相比于农场的喷灌管理模式,在节水36.7%的情况下增产2.2%^[4]。基于天空地协同的智能果园监测体系,整合卫星遥感、无人机巡检、农业物联网及AI算法等技术手段,研发了果园多源信息采集装置套件,并依托SSM架构搭建果园监测数据集成平台,实现了果园土壤参数、生态环境指标及果树个体与群体特征的三维监测服务功能^[5]。

1.2 病虫害智能识别与防控

人工智能技术的迅猛发展为农业病虫害防控做出了巨大贡献。中国病虫害智能检测技术已形成天空地一体化监测体系,通过无人机遥感、卫星监测技术和地面传感器,可快速识别病虫害并动态预警^[6]。融合深度学习与物联网技术,通过多尺度视频流数据研发柑橘叶片动态病虫害识别系统,叶片检测平均精度达87.72%,病害识别准确率达95.46%^[7]。基于改进YOLO V3算法构建葡萄病害智能识别系统,集成微信小程序、云服务器及病害识别模型,实现了手机拍摄的12类葡萄病害图像的识别^[8]。基于ImageNet预训练的DenseNet-169分类模型优化,针对11种常见桃树病害图像开展预处理及模型训练,实现病害平均识别准确率超91%^[9]。研发水稻病虫害识别模型,可精准鉴别8种常见水稻病虫害及健康植株^[10]。基于交互式图像分割算法,结合LOG算子与高斯拉普拉斯算法实现苹果叶片病斑提取,融合深度神经网络开展病害分析,对苹果树5种常见病虫害识别准确率达91.17%^[11]。

1.3 农业机器人及自动化设备

农业机器人技术的发展正加速向多机协同与智能化方向演进。基于模块化理论的多场景农业机器人,可应用于多种复杂场景。通过搭载不同的模块化农机设备,实现多种作物的监测、授粉、药物喷洒、采摘等任务,并提出新型的冗余协同控制策略,相比传统的间歇式效率最多可提升30%^[12]。基于蚁群算法改进的多田块路径规划方案,通过融入区域启发式函数增强路径选择的导向性。该方法在最优路径实施信息素浓度人工增强策略,同时构建自适应信息素挥发模型优化更

新机制。结合启发式A*算法开展子区域连接路径规划,最终实现农业机器人遍历路径100%覆盖,路径重复率仅为6.48%^[13]。通过数学模型、边界约束和环境约束对农业机器人优化约束模型进行了分析,实现了农业机器人在复杂的作业环境下进行最优动态避障和路径规划^[14]。目前,中国农业智能控制与农业机器人发展的主要阻碍是智慧农业技术有效供给不足,核心感知元器件主要依赖进口,高端产品几乎全部依赖进口^[15]。

1.4 数据驱动的智能决策体系

数据驱动的智能决策体系通过多源数据整合与智能算法融合,显著提升了农业生产决策的精准性与时效性。朱望纯等^[16]设计了融合物联网与嵌入式技术的智能农场决策支持系统架构,实现数据采集、本地显示、网络发布及设备故障诊断等核心功能。基于“云到端”模式,开发棉花苗情调查与决策支持系统,能够快速获取文字和图片2种形式的棉田苗情信息,显著提高了工作效率^[17]。基于温湿度传感器的环境参数采集,构建融合智能控制算法的精准灌溉调控系统,通过实时监测数据实现灌溉过程的精准调控,较传统方式总灌水量降低26%^[18]。

1.5 产后处理与供应链优化

人工智能技术应用于农产品全产业链的各个阶段,其中农产品的供应链优化是重要方向。实现对农业生产全过程的实时监控和溯源追踪,需应用区块链技术发展建立透明、可信的共享数据平台^[19];众安科技与沃朴物联联合研发的“步步鸡”项目融合区块链技术、农业物联网及防伪溯源技术,实现鸡苗供应、养殖、加工及物流全流程数据的区块链存证,通过共识算法保障数据透明性与不可篡改性,构建农产品质量安全追溯体系^[20]。人工智能正逐步实现供应链一体化、立体冷链库、自动仓储等功能,对农产品进行智能管控,分级分拣、无损检测、产销追溯、安全监管等,科学性、精准性和高效性广受肯定^[21]。

2 人工智能技术在番茄生产中的应用研究

2.1 应用模块划分

人工智能技术在番茄生产的应用按照作物生产流程可以大致分为4个模块,即环境控制、过程管理、智能采摘和采后处理。

目前,人工智能技术几乎全面覆盖番茄生产的过程,但研究重点还是集中在智能采摘流程,主要原因是番茄采收期集中,此流程的劳动力紧

张且人工成本比较高,使用智能采摘机器人可以提高生产效率、带来经济效益。

2.2 环境控制

2.2.1 环境监测与数据采集

多模态传感器协同监测技术正推动温室环境感知从单一参数采集向多维度融合跨越。连栋温室番茄生长环境监测系统,基于实际监测需求部署传感器节点,周期性采集冠层、中部及根部高度的空气温湿度参数,冠层与中部高度的光照强度,以及冠层光合有效辐射及 CO_2 浓度参数,实现温室环境参数的无线远程监测^[22]。番茄叶面积智能采集装置集成传感器数据采集、实时定位显示等6个功能模块,将番茄叶总面积与投影面积误差分别控制在1.02%和0.64%,垂直投影总面积误差率0.42%,满足设施农业智能化管理需求^[23]。

2.2.2 智能调控系统

智能控制算法驱动温室调控从经验驱动向多目标协同优化转型。基于STM32嵌入式系统构建土壤湿度监测平台,实时获取上、中、下3层深度的土壤湿度数据,结合作物预设的水肥管理策略,实现温室水肥一体化灌溉的智能控制^[24]。多智能算法融合的设施番茄温度决策模型,通过获取不同环境条件下苗期番茄的光合速率数据,构建光合速率预测模型,利用导数理论确定最佳温度阈值,并通过模拟实验验证该温度条件对番茄幼苗光合积累的促进作用^[25]。基于深度强化学习算法构建温室环境协同调控系统,可同步调控温度、光照及水肥环境因子,与传统控制方案相比,环境调控能耗量降低8.1%,营养液灌溉量减少7.9%,番茄光合速率提升2.7%^[26]。

2.3 过程管理

2.3.1 生长状态监测

植株表型参数获取技术已从单一特征分析向多源信息融合演进,显著提升了生长状态监测的全面性与精准度。针对番茄病害识别难题,构建基于计算机视觉技术框架,融合图像处理与模式识别技术,研发包含早疫病在内的4种叶部病害自动识别方法。该研究构建室内图像采集处理系统,实现病害样本图像的采集、预处理及病斑区域分割,可快速准确完成番茄叶部病害识别,为田间实时在线检测提供技术支撑^[27]。针对番茄缺素识别难题,基于CCD摄像机获取番茄叶片图像,提取颜色与纹理特征参数,结合遗传算法优化特征参数,构建特征参数模型,通过二叉树分类模型开展缺素识别研究,识别准确率达96%,满

足实际生产需求^[28]。

2.3.2 机器人作业

多模态感知与智能控制技术的融合显著提升了农业机械人的作业精度与环境适应性。通过闭环旋转结构环绕樱桃番茄主茎,采用循环旋转方式驱动活动环上的光电传感器进行 360° 水平扫描,实现叶柄位置及投影方向角的精确测量。测试结果表明,该装置在1.8 m作业高度内的检测成功率达88.2%^[29]。针对工厂化番茄整枝打叶智能化需求,建立温室番茄植株图像样本库,采用学习率微调策略对Mask R-CNN预训练模型实施迁移训练,构建主茎与侧枝像素区域识别分割算法,通过优化模型参数提升定位精度,为整枝机器人视觉系统研发提供技术支撑^[30]。

2.4 智能采摘

2.4.1 目标检测与定位技术

近年来,番茄智能采摘技术的核心突破聚焦于复杂场景下的果实感知与精准定位能力提升。针对果实遮挡与重叠问题,基于改进Hough圆变换的边缘信息与聚类算法,将遮挡果实识别率提升至84.6%^[31]。结合YOLOv5(成熟度分类)与MobileNetv3(果梗位置关系判断),实现分期采收和末端执行器采摘位姿控制,使综合采摘效率提升28.7%^[32]。基于YOLACT实例分割算法,通过实例特征标准化与掩膜评分机制实现番茄串及果梗ROI粗分割,结合细化算法、膨胀操作和深度信息融合精确定位采摘点。利用果梗几何特征与八邻域端点检测预测姿态,引导机械臂调整采摘角度,对4品种番茄串的采摘点识别成功率达98.07%,采摘成功率98.15%,满足非结构化环境采摘需求^[33]。张永宏等^[34]提出一种改进YOLOv5模型的算法,融合中心点距离、预测框尺寸差与面积交并比损失项,使算法平均精度达到95.6%,相较于改进前全类精度提升0.4百分点,满足采摘机器人识别需求。基于A-ENet模型的图像处理技术,通过注意力机制筛选出重点分析区域,Efficient Net自动调节参数避免网络过拟合状态,信噪比在97%以上且用时较短,满足棚室环境下番茄果实识别需求^[35]。关键技术方法及性能对比如表1所示。

当前,研究仍面临极端环境鲁棒性不足与高精度模型实时性受限等挑战,未来需进一步探索轻量化网络部署与跨季节动态自适应学习机制。

2.4.2 采摘机器人设计与控制

当前番茄采摘机器人设计与控制正朝着智能

化、柔性化及高效协同方向加速演进。在技术层面,机械结构趋向轻量化与模块化设计,提升对复杂场景的适应能力。实操方面,机器人设计创

新聚焦柔性化夹持,基本实现无损采摘。表2选取部分有代表性的番茄采摘机器人设计进展进行汇总。

表 1 采摘过程中目标监测与定位技术

Table 1 Target monitoring and positioning technologies during harvesting process

技术方向	核心方法/模型	性能指标	文献来源
Technical direction	Core methods/model	Performance indicator	Literature source
遮挡果实识别	改进 Hough 圆变换与聚类算法	遮挡果实识别率提升至 84.6%	冯俊惠等,2021
果实分期采收与位姿控制	YOLOv5+MobileNetv3 级联系统	综合采摘效率提升 28.7%	李兴旭等,2023
番茄串采摘点定位与姿态估算	YOLACT 实例分割算法	采摘点识别成功率 98.07%, 采摘成功率 98.15%	张勤等,2023
果实目标检测优化	改进 YOLOv5(融合多损失项)	平均精度 95.6%, 全类精度提升 0.4 百分点	张永宏等,2024
番茄果实图像处理优化	A-ENet+EfficientNet	信噪比≥97%, 参数调节避免过拟合, 处理用时较短	陈翠琴等,2025

表 2 番茄采摘机器人设计及应用

Table 2 Design and application of tomato harvesting robots

机械类型	核心技术	应用成效	文献来源
Mechanical type	Core technology	Application effect	Literature source
串番茄机械臂运动规划	基于空间分割的实时路径规划算法(OPS),结合聚类拟合障碍物与最优采摘空间筛选	单串番茄采摘时间 12.51 s, 成功率 99.81%, 较 RRT*-connect 算法效率提升 31.23%	张勤等,2021 ^[36]
无损采摘末端执行器设计	气动吸-夹一体式多连杆空间三爪机构,结合压力反馈与双阈值滑移判别算法,单气缸驱动回拉与夹持动作	采摘成功率 96.03%, 单个采摘耗时 5 s, 直接损伤率 1.58%, 72 h 褐变率 1.76%	陈子文等,2021 ^[37]
番茄采摘机器人模块化设计	模块化关节结构设计,基于 ADAMS 和 ANSYS 的动力学仿真与有限元分析, MATLAB 运动学仿真	动力学仿真确认关节扭矩在额定范围内,重复定位精度为±10mm,实验室采摘试验验证有效性	杨乐平等,2023 ^[38]
番茄采摘机器人机械臂设计	四自由度伸缩机械臂、绳排式可伸缩移动关节、三指扭转采摘末端执行器、ROS 控制系统与四转四驱移动底盘	果实采摘成功率 88.7%, 采摘周期时间为 13.4 s/个	王亚薇等,2024 ^[39]
农业机械手轻量化与减振设计	采用颗粒阻尼器优化机械手传动齿轮组与手指结构,结合番茄表皮破损压力阈值(<15.75 N)设计柔性夹持	果实抓取成功率 89%, 损伤率 0%, 手指转动时间减少 20.54%, 整体质量降低 23.06%	刘广杰等,2025 ^[40]

2.5 采后处理

采后处理技术的智能化转型显著提升了番茄品质分选效率与精准度。在质量检测与分级领域,多模态感知技术通过融合形态、纹理与光谱特征,构建了覆盖果实内外品质的立体化评价体系。综合运用计算机视觉技术、BP 算法、人工神经网络技术,实现番茄损伤的自动检测与分类,检验番茄损伤检测和分类的准确率不低于 90%。运用多元线性预测模型创新整合投影面积、轮廓周长等 4 项形态参数,构建果实质量与外观特征的量化关系网络,预测误差压缩至 1.535%,为自动化称重分级提供可靠依据。

3 农业生产中运用人工智能技术存在的问题

(1)复杂场景下,目标识别与定位精度不足。以番茄生产为例,番茄植株的枝叶遮挡、果实重叠以及光照变化等非结构化环境对视觉算法构成挑战。目前 YOLOv3 模型在密集果实场景下误检率较高,但基于改进 YOLOv3 的果实识别模型在茎叶遮挡和多果重叠场景中虽然精度有所提升,可为智能化估产系统研发提供技术支撑。叶柄方向探测和果梗定位还未达到完全机器作业的水平,仍需依赖人工经验,使用机械臂采摘存在不

完全抓取,抓取不牢的情况,导致抓取失败^[34]。定位精度不足问题在实时动态环境中尤为突出,难以满足连续作业需求。

(2)设施硬件成本高,农民难以负担。现有AI设备的研发投入与经济效益难以平衡,尤其是智能作业机器,单台成本高,且需配套高精度传感器(3D相机、多光谱设备等),智慧农业关键技术受制于人,高端技术产品90%依赖进口,导致价格更高。中国农业作业主体还是广大农民,传统小农经济下的农民主体不仅难以承受智能设备高昂的价格,还因文化程度有限,对于机械化生产、信息技术的新兴产物接受能力较差,导致人工智能技术未能广泛应用于农业生产。

(3)数据共享不足,信息化水平低。中国农业生产中人工智能技术应用面临显著数据共享壁垒与信息化基础薄弱问题。国内目前还没有建成统一的涉农数据标准体系,导致各部门数据难以互通,不同部门采集的数据格式互不兼容,容易形成格式混乱的局面,形成信息孤岛。此外,农业生产的信息化水平也还有很大提升空间,当前农民对农业数据的采集、整理的积极性不高,导致农业大数据的采集并不完整。

4 展 望

针对当前人工智能技术在农业生产应用中面临的关键问题,未来研究应致力于通过多学科交叉与技术融合,可在以下4方面进行深入探索与创新:

(1)开发面向复杂场景的轻量化混合模型与数字孪生系统。为克服现有视觉算法在枝叶遮挡、重叠果实等非结构化环境下识别精度不足的问题,可探索将改进的YOLO系列模型与注意力机制、图神经网络等进行融合,构建兼顾识别精度与推理速度的轻量化混合识别架构。进一步结合数字孪生技术,构建作物生长与农业环境的虚拟映射系统,实现对采摘路径、作业策略的动态仿真与优化,为机器人在真实场景中的鲁棒作业提供理论支撑。

(2)构建跨场景、多模态的标准化数据集与感知平台。针对农业数据标准不一、共享困难的问题,建议由国家或行业主导,联合科研机构与企业,共同建立覆盖主要作物、多生长阶段的国家级图像与多模态农业数据库,并制定统一的数据采集与标注规范。在此基础上,发展基于多传感器融合(如3D视觉、多光谱、LiDAR等)的协同感知

方案,提升数据获取的全面性与准确性,为模型训练与系统决策提供高质量数据基础。

(3)研发作物模型驱动的自适应智能决策系统。为提升农业管理的精准性与智能化水平,可重点探索将作物生长模型(如光合作用、养分传输等机理模型)与强化学习、深度学习等数据驱动方法相结合,构建具备解释性与自适应能力的决策支持系统。如通过融合番茄生理模型与环境传感数据,动态优化温室内的水肥调控策略,实现资源投入与作物需求之间的精准匹配。

(4)推动低成本、高适应性农业智能装备的本土化创新。为降低智能装备成本、提升其在中国小农场景下的适用性,应加强关键核心部件(如柔性执行器、专用芯片、低功耗传感器等)的自主研发与技术突破,逐步摆脱对国外高端产品的依赖。同时,通过模块化、软硬件解耦等设计方法,增强智能装备的可配置性与可扩展性,使其能够根据不同地区、不同作物类型的具体需求进行灵活适配,加速技术成果的落地转化。

参考文献:

- [1] 牛艳,王晓静,陈翔,等.中国番茄产业发展的现状问题和对策及宁夏番茄产业发展成效[J].黑龙江农业科学,2022(12):70-74.
NIU Y, WANG X J, CHEN X, et al. Current situation, problems and countermeasures of tomato industry development in China and achievements of tomato industry development in Ningxia[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2022(12): 70-74. (in Chinese)
- [2] 张静.智慧农业在番茄生产中的应用[J].农业工程技术,2023,43(20):30-32.
ZHANG J. Application of smart agriculture in tomato production[J]. Agricultural Engineering Technology, 2023, 43(20): 30-32. (in Chinese)
- [3] 郑阳阳,梅林峰,刘瑞峰.农业数字化转型的国际经验、本土实践和政策启示[J].世界农业,2025(1):18-30.
ZHENG Y Y, MEI L F, LIU R F. International experiences, local practices and policy implications of digital transformation in agriculture[J]. World Agriculture, 2025(1): 18-30. (in Chinese)
- [4] 张玉成,张晓博,高树琴,等.“伏羲农场”:智慧农业技术集成创新的实践探索与思考[J].中国科学院院刊,2025,40(2):301-309.
ZHANG Y C, ZHANG X B, GAO S Q, et al. The Fuxi Farm: Practice and reflection on integrated innovation of smart agriculture technology[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2025, 40(2): 301-309. (in Chinese)
- [5] 饶晓燕,吴建伟,李春朋,等.智慧苹果园“空-天-地”一体化监控系统设计与研究[J].中国农业科技导报,2021,23(6):59-66.

- RAO X Y, WU J W, LI C P, et al. Design and research on "Space-Air-Ground" integrated monitoring system for intelligent orchard[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(6): 59-66. (in Chinese)
- [6] 廖娟, 陶婉琰, 臧英, 等. 农作物病虫害遥感监测关键技术研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2023, 54(11): 1-19.
- LIAO J, TAO W Y, ZANG Y, et al. Research progress and prospect of key technologies in crop disease and insect pest monitoring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 1-19. (in Chinese)
- [7] 李昊, 刘海隆, 刘生龙. 基于深度学习的柑橘病虫害动态识别系统研发[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(9): 195-201, 208.
- LI H, LIU H L, LIU S L. Research on dynamic identification system of citrus diseases and pests based on deep learning[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(9): 195-201, 208. (in Chinese)
- [8] 王超学, 祁昕, 马罡, 等. 基于YOLO V3的葡萄病害人工智能识别系统[J]. 植物保护, 2022, 48(6): 278-288.
- WANG C X, QI X, MA G, et al. Intelligent identification system of grape diseases based on YOLO V3[J]. Plant Protection, 2022, 48(6): 278-288. (in Chinese)
- [9] 吴建伟, 黄杰, 熊晓菲, 等. 基于AI的桃树病害智能识别方法研究与应用[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(5): 111-118.
- WU J W, HUANG J, XIONG X F, et al. Research and application of intelligent recognition method of peach tree diseases based on AI[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2022, 24(5): 111-118. (in Chinese)
- [10] 陈浪浪, 张艳. 基于改进深度卷积神经网络的水稻病虫害识别[J]. 山东农业科学, 2023, 55(5): 164-172.
- CHEN L L, ZHANG Y. Identification of rice diseases and pests based on improved deep convolutional neural network [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2023, 55(5): 164-172. (in Chinese)
- [11] 李海, 李谊骏, 陈诗果, 等. 苹果树病虫害智能识别系统设计与实现[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(25): 10639-10645.
- LI H, LI Y J, CHEN S G, et al. Design and implementation of intelligent recognition system for apple tree diseases and pests [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(25): 10639-10645. (in Chinese)
- [12] 潘宇真, 魏佳炜, KHAN Rezwan AllIslam, 等. 新型模块化农业机器人设计分析与冗余协同控制[J]. 机械工程学报, 2024, 60(23): 88-101.
- PAN Y Z, WEI J W, KHAN R A, et al. Design and analysis of a novel modular agricultural robot with its redundant cooperative control strategy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(23): 88-101. (in Chinese)
- [13] 李文峰, 徐蕾, 杨琳琳, 等. 基于改进蚁群算法的农业机器人多田块路径规划方法与试验[J]. 南京农业大学学报, 2024, 47(4): 823-834.
- LI W F, XU L, YANG L L, et al. Multi field path planning method and experiment of agricultural robot based on improved ant colony algorithm[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2024, 47(4): 823-834. (in Chinese)
- [14] 王娜, 吴延凯, 许娜. 基于粒子群优化算法的农业机器人控制策略研究[J]. 农机化研究, 2025, 47(1): 205-209.
- WANG N, WU Y K, XU N. Research on control strategy of agricultural robot based on particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(1): 205-209. (in Chinese)
- [15] 赵春江. 智慧农业的发展现状与未来展望[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 1-7.
- ZHAO C J. Current situations and prospects of smart agriculture [J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 1-7. (in Chinese)
- [16] 朱望纯, 宋辉, 曹健. 基于物联网的智能农场决策支持系统[J]. 测控技术, 2015, 34(12): 90-94.
- ZHU W C, SONG H, CAO J. Decision support system of intelligent farm based on internet of things[J]. Measurement & Control Technology, 2015, 34(12): 90-94. (in Chinese)
- [17] 戴建国, 王守会, 赖军臣, 等. 基于智能手机的棉花苗情调查与决策支持系统[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 200-206.
- DAI J G, WANG S H, LAI J C, et al. Cotton growth statuses investigation and decision support system based on smart phone [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(21): 200-206. (in Chinese)
- [18] 周永阔. 基于智能控制的农业精准灌溉系统设计研究[J]. 农机化研究, 2023, 41(11): 132-135.
- ZHOU Y C. Design of agricultural precision irrigation system based on intelligent control[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 41(11): 132-135. (in Chinese)
- [19] 陈林蔚. 区块链技术在智慧农业领域中的应用[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(6): 1358-1365.
- CHEN L W. The application of blockchain technology in the field of smart agriculture[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2023, 39(6): 1358-1365. (in Chinese)
- [20] 王菲, 吕可. 浅析区块链和农业物联网在养殖业中的应用——以众安科技“步步鸡”为例[J]. 农村经济与科技, 2020, 31(1): 71-72.
- WANG F, LYU K. A brief analysis of the application of blockchain and agricultural internet of things in aquaculture: A case study of Zhongan technology's "Step-by-Step Chicken"[J]. Rural Economy and Science-Technology, 2020, 31(1): 71-72. (in Chinese)
- [21] 聂莹, 布海乔, 陈蕾, 等. 农业现代化背景下设施蔬菜智能化: 挑战与策略探索[J]. 中国蔬菜, 2024(10): 1-7.
- NIE Y, BU H Q, CHEN L, et al. Intelligentization of facility vegetables under background of agricultural modernization: Challenges and strategy exploration[J]. China Vegetables, 2024(10): 1-7. (in Chinese)
- [22] 周建军, 赵国新, 王秀, 等. 连栋温室番茄生长环境监测系统设计与试验[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(17): 222-225.
- ZHOU J J, ZHAO G X, WANG X, et al. Design and test of environmental monitoring system for tomato growth in multi-span greenhouse[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(17): 222-225. (in Chinese)
- [23] 贺峰, 杨青丰, 刘思雨. 番茄叶面积数据智能采集系统软件开发及试验研究[J]. 农机化研究, 2022, 44(11): 155-158.

- HE F, YANG Q F, LIU S Y. Software development and experimental study of tomato leaf area intelligent acquisition system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(11): 155-158. (in Chinese)
- [24] 蔡长青, 侯首印, 栢张, 等. 温室智能灌溉水肥一体化监控系统[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(10): 164-166.
- CAI C Q, HOU S Y, ZHEN Z, et al. An intelligent monitoring system for integration of irrigation and fertilization in greenhouse[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(10): 164-166. (in Chinese)
- [25] 吴清丽, 高攀, 高茂盛. 多智能算法融合的苗期番茄最佳温度决策方法[J]. 西北农业学报, 2024, 33(9): 1795-1805.
- WU Q L, GAO P, GAO M S. A decision-making method for optimal temperature of tomato seedling based on multi-intelligent algorithms[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2024, 33(9): 1795-1805. (in Chinese)
- [26] 左志宇, 牟晋东, 毛罕平, 等. 基于深度强化学习的温室环境协调控制系统设计[J]. 农机化研究, 2025, 47(5): 22-27.
- ZUO Z Y, MU J D, MAO H P, et al. Design of greenhouse environment coordinated control system based on deep reinforcement learning[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(5): 22-27. (in Chinese)
- [27] 柴阿丽, 李宝聚, 石延霞, 等. 基于计算机视觉技术的番茄叶部病害识别[J]. 园艺学报, 2010, 37(9): 1423-1430.
- CHAI A L, LI B J, SHI Y X, et al. Recognition of tomato foliage disease based on computer vision technology[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2010, 37(9): 1423-1430. (in Chinese)
- [28] 张陆. 基于计算机视觉的番茄营养元素亏缺识别研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(3): 232-235.
- ZHANG L. Research on nutrient deficiency identification of tomato based on computer vision[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(3): 232-235. (in Chinese)
- [29] 王萌, 李建平, 朱盘安, 等. 樱桃番茄叶柄方向光电自动探测方法与机构设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(Z1): 42-48.
- WANG M, LI J P, ZHU P A, et al. Photoelectric automatic rotation direction-finding detection method and mechanism design of cherry tomato petiole[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(Z1): 42-48. (in Chinese)
- [30] 冯青春, 成伟, 李亚军, 等. 基于Mask R-CNN的番茄植株整枝操作点定位方法[J]. 农业工程学报, 2022, 38(3): 128-135.
- FENG Q C, CHENG W, LI Y J, et al. Method for identifying tomato plants pruning point using Mask R-CNN[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(3): 128-135. (in Chinese)
- [31] 冯俊惠, 李志伟, 戎有丽, 等. 基于改进Hough圆变换算法的成熟番茄果实识别[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(4): 190-196.
- FENG J H, LI Z W, RONG Y L, et al. Identification of mature tomatoes based on an algorithm of modified circular Hough transform[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(4): 190-196. (in Chinese)
- [32] 李兴旭, 陈雯柏, 王一群, 等. 基于级联视觉检测的樱桃番茄自动采收系统设计及试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(1): 136-145.
- LI X X, CHEN W B, WANG Y Q, et al. Design and experiment of an automatic cherry tomato harvesting system based on cascade vision detection[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(1): 136-145. (in Chinese)
- [33] 张勤, 庞月生, 李彬. 基于实例分割的番茄串视觉定位与采摘姿态估算方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 205-215.
- ZHANG Q, PANG Y S, LI B. Visual positioning and picking pose estimation tomato clusters based on instance segmentation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 205-215. (in Chinese)
- [34] 张永宏, 李宇超, 董天天, 等. 非结构化环境下番茄采摘机器人目标识别与检测[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(4): 205-213.
- ZHANG Y H, LI Y C, DONG T T, et al. Target identification and detection for tomato harvesting robot in unstructured environments[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(4): 205-213. (in Chinese)
- [35] 陈翠琴, 孟清. 基于图像处理技术的棚室番茄果实识别[J]. 农机化研究, 2025, 47(1): 189-193.
- CHEN C Q, MENG Q. Tomato fruit recognition in greenhouse based on image processing technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(1): 189-193. (in Chinese)
- [36] 张勤, 刘丰溥, 蒋先平, 等. 番茄串收机械臂运动规划方法与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 149-156.
- ZHANG Q, LIU F P, JIANG X P, et al. Motion planning method and experiments of tomato bunch harvesting manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(9): 149-156. (in Chinese)
- [37] 陈子文, 杨明金, 李云伍, 等. 基于气动无损夹持控制的番茄采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(2): 27-35.
- CHEN Z W, YANG M J, LI Y W, et al. Design and experiment of tomato picking end-effector based on non-destructive pneumatic clamping control[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(2): 27-35. (in Chinese)
- [38] 杨乐平, 王加泽, 朱宣任, 等. 番茄采摘机器人模块化设计与分析[J]. 中国科技论文, 2023, 18(2): 215-223.
- YANG L P, WANG J Z, ZHU X R, et al. Modular design and analysis of tomato harvesting robot[J]. China Science Paper, 2023, 18(2): 215-223. (in Chinese)
- [39] 王亚薇, 何津立, 林熙森, 等. 温室番茄采摘机器人伸缩式机械臂设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(S1): 18-28.
- WANG Y W, HE J L, LIN X M, et al. Design and experiment of tomato picking robot based on telescopic robotic arm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(S1): 18-28. (in Chinese)
- [40] 刘广杰, 申会鹏. 基于颗粒阻尼器下农业机械手轻量化设计[J]. 农机化研究, 2025, 47(3): 207-210.
- LIU G J, SHEN H P. Lightweight design of agricultural manipulators based on particle dampers[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(3): 207-210. (in Chinese)

(责任编辑:王 昱)