DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2025.04.005

机器人技术在蔬菜生产领域的应用现状及发展趋势

梁明旭[1,2], 袁昌荣[1], 夏先飞[2*], 宫庆硕[2]

(1. 南京工程学院机械工程学院,江苏南京,211167;
2. 农业农村部南京农业机械化研究所,江苏南京,210014)

摘要:中国作为世界最大的蔬菜生产国和消费国,蔬菜种植面积不断扩大,但面临机械化、智能化水平偏低以及人工成本连年增长的挑战。随着机器人技术的发展,农业机器人日益广泛地应用于蔬菜生产领域,已成为替代人工劳动、提升生产效率与质量的关键技术手段。为系统了解蔬菜生产领域机器人技术的研究现状并明确其未来发展方向,首先对农业机器人的定义进行了阐述。其次,聚焦蔬菜生产中播种移栽、田间管理和收获分选3大核心作业环节,整理国内外先进研究成果,分别从感知、决策和控制3个层面剖析相关研究进展,包括基于多信息融合的SLAM自主导航技术与路径规划原理;机器视觉在蔬菜生产各环节应用的技术路线与关键技术研究水平;以及针对特定农艺要求和作业环境特征,在作业执行机构及末端执行器控制技术方面取得的进展。最后,分析当前农业机器人在蔬菜生产中面临的主要技术挑战,即适用性和作业效率仍存在显著瓶颈,并对未来发展方向进行展望。未来研究应重点发展多功能作业机器人,需突破多机协同控制技术、深化专业化与模块化设计;同时,政策支持亦不可或缺。随着技术的持续进步和多方的协同努力,机器人技术有望成为推动农业劳动力结构优化、提升蔬菜生产效率、实现智慧农业的关键支撑。

关键词:蔬菜生产;农业机器人;自主导航;机器视觉;作业执行与末端控制;多机协同控制

中图分类号:S24 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-7217(2025)04-0050-14

梁明旭, 袁昌荣, 夏先飞, 宫庆硕. 机器人技术在蔬菜生产领域的应用现状及发展趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2025, 6(4): 50-63

LIANG Mingxu, YUAN Changrong, XIA Xianfei, GONG Qingshuo. The current application and future trends of robotics in vegetable production [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2025, 6(4): 50-63

0 引言

蔬菜是人类必不可少的食物,也是重要的经济作物。蔬菜生产主要分为大田生产和设施生产。我国是全球最大的蔬菜生产国,据国家统计局数据,2023年蔬菜播种面积达22 873 khm^2,产量达828 681.1 kt,然而,随着蔬菜种植面积的不断扩大,蔬菜生产的装备化和机械化水平仍处于较低阶段,大部分生产仍依赖人工模式,导致产量和质量难以保障[1-2]。2022年1月,农业农村部颁布的《"十四五"全国农业机械化发展规划》明确指出,要加快推进农业机械化全程、全面和高质量发展。规划目标为:到2025年,设施农业、畜牧养殖、水产养殖和农产品初加工机械化率总体达到50%以上;到2035年,主要农作物生产实现全过程机械化,畜禽养殖、水产养殖机械化水平大幅跃升,设施种植、农产品初加工机械化促进农产品增值能力显著增强,"机械化+"信息化、智能化全面应用于农业机械化管理、作业监测与服务,因此,亟须对我国农业装备技术进行升级。

随着机器人技术的飞速发展,农业机器人应运而生。它能够有效解决农业劳动力短缺和生产效率瓶颈等问题,已成为未来智能农业的核心工具,受到国内外研究者的广泛关注[3-5]。本综述将给出农业机器人的定义,系统梳理机器人技术在蔬菜生产领域的应用现状,深入探讨其关键技术,并最终总结当前的研究成果,展望未来发展方向。

1 农业机器人的定义与分类

1.1 农业机器人的定义

农业机器人是一种应用于农业领域的特种机器人,结合了人工智能、机器视觉、传感器技术等,以农产品为操作对象,具备环境感知、自主决策和作业执行能

收稿日期:2025-07-09 修回日期:2025-09-17
基金项目:中国农业科学院科技创新工程基础科学研究中心(CAAS-BRC-SAE-2025-02)
第一作者:梁明旭,男,2000年生,江苏淮安人,硕士研究生;研究方向为农业机器人技术。E-mail: 1175063865@qq.com
*通信作者:夏先飞,男,1987年生,重庆人,博士,研究员;研究方向为收获机械化及农业机器人技术。E-mail: xiaxianfei@caas.cn

力的智能装备[6-8]。它既是现代农业机械的升级形态，也是机器人技术在农业场景中的具体应用，核心目标是通过自动化与智能化解决劳动力短缺、提升生产效率并推动农业可持续发展。

在蔬菜生产的诸多作业环节，农业机器人已有较为成熟的商业化机型，并获得广泛应用，且随着技术的发展，农业机器人已基本实现导航定位、自主路径规划以及基于机器视觉的精准定位与采摘作业，从而能够代替人工承担更复杂的蔬菜生产任务，有效提高产量与质量[9-12]。

1.2　农业机器人的分类

当前应用于蔬菜生产领域的机器人根据其适用环境主要分为两类：大田生产机器人和设施生产机器人，具体技术路线与功能架构详见图 1 所示的分类体系。

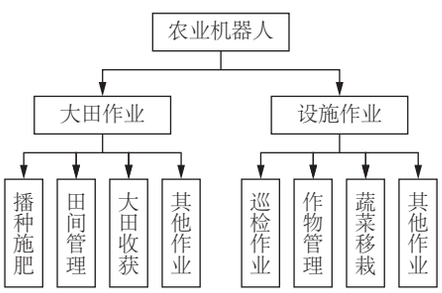


图 1　蔬菜生产领域机器人分类

Figure 1　Classification of robots in vegetable production sector

大田生产机器人设计用于应对开阔、多变的露天农田环境，通常装备先进的自主导航系统以及复杂的地形适应底盘[13]，能够高效完成大田环境下的蔬菜精密播种[14]、精准变量施肥施药[15]、管理、自动化机械除草以及部分茎叶菜和果菜（如大葱、青椒，黄瓜等）的大规模智能化采收作业[16-17]，显著提升生产效率和资源利用率。

而设施生产机器人则专门面向温室、植物工厂等受控环境，依托设施内预设的导轨、地标或高精度室内定位系统实现移动，高度集成环境信息感知、植株生长状态监测以及精细操作机构，专注于设施内苗床管理、秧苗嫁接、植株修剪、叶菜及茄果类作物的自动化采收、移栽等任务，是实现设施蔬菜工厂化生产的核心智能装备[18-20]。这两类机器人共同构成了推动现代蔬菜产业向智能化、精准化、无人化转型升级的关键技术力量。

2　机器人技术在蔬菜生产领域的应用与研究现状分析

在设施作业方面，美国、荷兰、日本等发达国家已建成高度自动化和智能化的植物工厂，并广泛应用农业机器人。在大田作业方面，这些国家也形成了成熟的自动化农场体系，能对蔬菜生产过程实现集成化管理[21]。相比之下，我国农业仍以人工操作为主，自动化水平较低，因此，国内研究人员近年来对农业机器人技术的研发高度重视，相关投入持续增加。本节将从蔬菜生产过程中的播种和移栽，作物管理和收获分类这 3 个重要环节介绍机器人技术在蔬菜生产领域的应用与研究现状。

2.1　播种和移栽作业

在播种和移栽作业方面，农业机器人通过集成传感技术、自动化控制及智能算法，能显著提升作业效率和精准度。荷兰的 ISO 分选和移栽机，如图 2 所示，机器人通过全自动切割分拣技术替代人工劳动，按尺寸精准分类插条并生成标准化培育托盘，为植物提供最佳生长环境，其视觉系统可快速处理多品类作物，且产能达 1 600 插条/h，以实现植物工厂高效地自动化分拣和栽培。加拿大的 RoamIO-HCT 机器人，如图 3 所示，该机器人拥有完全自主作业能力，无须人工监管即可在田间持续高效工作，可实现对大田种植的蔬菜的耕作、播种、除草和运输[22]。



图 2　ISO 分选和移栽机

Figure 2　ISO sorter and planter machine



图 3　RoamIO-HCT 机器人

Figure 3　RoamIO-HCT robot

丹麦的 FD20 是一款全自动太阳能田间机器人[23]。如图 4 所示，该机器人的核心设计融合了精准农业技术与可持续能源理念，其采用的高精度（real-

time kinematic,RTK)定位系统,能够在播种时标记每株作物的精确位置,并基于此数据在后续除草作业中实现行间与行内的机械除草,可显著降低人工损耗,且FD20配备4块高效太阳能电池板,单日产生电能可达20 kW·h,支持24 h连续作业。FD20的模块化设计允许快速切换播种与除草模式,适用甜菜、洋葱、油菜籽等行播作物,播种间距误差小于1 cm,除草效率较传统方法提升60%。NILS等[24]研发了一种大田蔬菜移栽机器人Phoenix,如图5(a)所示。该机器人采用电力驱动,并配备了履带底盘和可调侧移框架,具备自主导航与精准定位能力,同时搭载智能种植单元,可实现0.5 m株距作业下平均偏差小于16 mm、最小可靠株距0.1 m的全流程高效精准的自动化移栽作业,智能种植单元如图5(b)所示。



图4 FD20田间机器人

Figure 4 FD20 field robot



(a) 机器人主体



(b) 智能种植单元

图5 Phoenix机器人

Figure 5 Phoenix robot

2.2 作物管理作业

在作物管理方面,农业机器人通过集成人工智能、机器视觉及高精度导航技术,可实现从灌溉、植保到生长监测的全流程智能化管理,提升资源利用效率和作物品质。EarthSense开发的TerraSentia农作物监测机器人[25],如图6所示,可实现端到端自主数据采集与高精度高通量表型分析,利用配备的4个高清摄像头与激光雷达进行导航与表型测定,每秒可扫描10株作物,并同时记录下5项数据,可高精度估算玉米株高、大豆荚数等关键表型,了解植物各项生长的健康状况、植物发育、病虫害、良产率等信息。



图6 TerraSentia农作物监测机器人

Figure 6 TerraSentia crop-monitoring robot

农业农村部南京农业机械化研究所研发的多功能田间管理机器人[26],如图7所示,其集成可重构柔性底盘、基于SLAM的自主导航、模块化搭载等关键技术,可快速便捷地挂接施药、施肥、除草和作物表型探测等作业部件,实现一机多用,适用于大田及温室作物的施药、机械化除草作业,油菜制种过程中的异杂株去除等作业,施药宽幅高达6 m,且转弯半径小于2 m,任务载荷大于300 kg,适用多种作物表型检测实际场景,为相关农业生产活动提供技术支撑与应用解决方案。



图7 多功能田间管理机器人

Figure 7 Field management robot

2.3 收获分类作业

在蔬菜收获分类方面,温室大棚和田间的传统收获分类作业大部分都依靠人工,其作业流程复杂且繁琐,而农业机器人通过融合人工智能决策、高灵敏度的机器视觉识别及多关节柔性控制技术,可实现对目标果蔬的成熟度判定、精准空间定位与无损抓取,完成从识别、定位到采摘的全过程自动化操作,大幅降低人工

劳动强度并提升鲜蔬品质与采收时效性。荷兰瓦赫宁根大学、瑞典于默奥大学和以色列内盖夫本古里安大学的科学家团队开发了一种用于温室甜椒采摘机器人SWEEPER[27]。如图8所示，SWEEPER机器人系统集成末端执行器、RGB-D视觉模块、六轴机械臂、实时控制系统及自主导航移动平台，通过三维视觉定位和路径规划实现甜椒的精准采收。机械臂以亚毫米级精度定位植株主茎，结合振动切割与负压吸附完成无损采摘，且经过试验测试，其收获的平均周期为24 s，卸果采摘过程仅需7.8 s。



图8　甜椒采摘机器人SWEEPER

Figure 8　Sweet pepper harvesting robot sweeper

智农番茄采摘机器人如图9所示，该机器人深度融合机器视觉与人工智能技术，利用基于深度学习的视觉算法，实现了对采摘果实成熟度和空间位置的精准识别，其目标检测精度达95%，成熟度判断正确率达98%，并能通过识别的结果精准引导机械臂及末端执行器，以无接触吸取式方式完成果实的采摘、收集及运输作业，采摘成功率达到92%，平均单棵果实采摘用时约为4 s，实现了果实低损伤、高效、安全采摘。



图9　智农番茄采摘机器人

Figure 9　ZHINONG tomato picking robot

3　关键技术研究现状分析

农业机器人的共性关键技术主要可分为3层分别为：感知层、决策层和控制层，分别代表机器人的“眼”（感知层）、“脑”（决策层）、“手和脚”（控制层），关键技术框图如图10所示。本节将着重于分析农业机器人的自主导航技术、机器视觉技术及作业执行与末端控制技术及其发展现状。

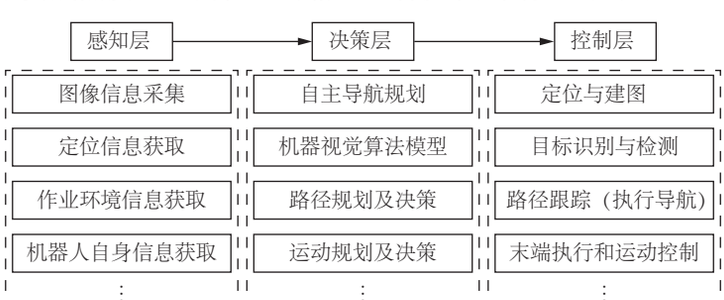


图10　关键技术构成

Figure 10　Key technology components

3.1　自主导航

3.1.1　多信息融合的SLAM技术

地图构建是通过数据采集、处理和分析，生成高精度、动态更新的地理空间模型，也是用于自主导航和路径规划的重要技术。由于农业机器人其工作的环境相对比较复杂，像传统的栅格地图构建，拓扑地图构建，已经难以满足农业机器人的工作精度要求。早在1986的IEEE机器人与自动化会议上，由SMITH和

CHEESEMAN共同提出了一种同时定位与地图构建技术(simultaneous localization and mapping,SLAM),旨在解决移动体在未知环境中同步完成自身定位与环境地图构建的问题。当前主流的SLAM技术主要包括激光SLAM与视觉SLAM两大体系,其核心框架均包含环境感知、特征提取、位姿优化及地图构建等关键技术与模块[28-29]。

随着农业机器人应用场景的复杂化,单一传感器的局限性日益凸显,视觉SLAM依赖图像信息,易受温室环境中光照突变和动态遮挡的干扰;激光SLAM虽对光照变化具有较强的鲁棒性,但高成本特性制约了其在农业领域的规模化应用,且缺乏对作物生长状态等语义信息的感知能力[30-31]。针对上述挑战,同时为了满足农业机器人面对复杂环境及多种工作任务的需求,近年来,多信息融合SLAM开始受到越来越多的关注。

多传感器融合SLAM系统通常配备多种传感器,常见组合包括激光雷达、视觉传感器、惯性测量单元(inertial measurement unit,IMU)及RTK基站等。此类系统需依赖专门设计的融合算法,以实现多源数据的有效整合与协同处理。

黄超等[32]提出了VIG-SLAM算法,创新性地将视觉、惯导、轮速计紧耦合系统与GPS数据的自适应融合,试验表明,该算法在公开数据集及真实场景中的平均定位误差较Vins-fusion等主流算法降低15%以上,且在GPS信号遮挡或动态干扰环境下仍保持轨迹一致性。LYNEN等[33]提出了一种模块化的多传感器融合扩展卡尔曼滤波(MSF-EKF)框架,用于解决微小型无人机(MAV)导航中多源传感器融合的校准、延迟和间歇性信号问题。该框架通过状态缓冲机制处理异步延迟测量,结合迭代EKF优化线性化点,支持GPS、惯性、视觉及气压传感器的动态切换与在线自校准。在农业机器人的SLAM系统设计方面,庚士涵[34]提出了一种融合激光雷达、IMU与单目视觉的果园机器人SLAM框架。该框架在KITTI数据集试验中实现1.83 m的绝对位姿误差,较激光—惯导系统精度提升82.7%,并通过模拟果园环境验证了系统在复杂场景下的鲁棒性,为果园机器人导航提供了多模态感知融合解决方案。

3.1.2 路径规划

路径规划是农业机器人自主导航模块的关键环节之一,而相较于工业或城市环境,农业环境的复杂程度更高,且具有非结构化、不可预测等特点,传统路径规划算法难以有效应对,为此,农业机器人的路径规划算法设计需针对该环境的特殊复杂性进行针对性优化[35]。

根据机器人在蔬菜生产领域的工作任务与环境的不同,可将路径规划划分为两种,分别为点到点的路径规划和覆盖路径规划[36]。点到点的路径规划的核心目标是通过算法优化路径长度、时间或能耗,同时避开静态或动态障碍物。目前广泛用于机器人的点到点的路径规划算法如表1所示。

表1 点到点的路径规划算法

Table 1 Point-to-point path planning (PPP) algorithm

算法类型	代表算法	特点	适用场景
传统图搜索	Dijkstra、A*	保证最优解或高效启发式搜索	静态环境全局规划(如仓库、温室)
随机采样	RRT、RRT*	适应高维空间和动态障碍物,路径次优但实时性强	复杂动态环境(如无人机避障)
智能仿生学	蚁群算法、遗传算法	全局优化能力强,适合多目标约束	多目标协同任务(如农业多区域作业)
增量式搜索	D*、LPA*	动态更新路径,适应环境变化	实时导航(如自动驾驶避障)

近年来,许多研究学者对算法进行针对性的优化,使其在设施或大田的环境下,表现更加优异。WANG等[37]针对温室环境中移动机器人的路径规划问题,提出了一种融合改进A*算法与模糊动态窗口法(FDWA)的路径规划方法。该方法实现了在温室环境下,机器人移动距离偏差最大减少了31.8%,航向角偏差最大减少了28.6%,安全距离提升了30%,极大提高了农业机器人在温室环境下的路径规划精度。李文峰等[38]针对丘陵地区因田块碎片化和障碍物影响农业机器人作业的情况,提出了一种基于改进蚁群算法和A*算法相结合的多田块路径规划方法,有效解决丘陵地区农业机器人多田块路径规划问题。SANTOS等[39]针对陡坡葡萄园中农业机器人自主导航的路径规划难题,提出了一种基于AgRobPP框架,并通过扩展A*算法,融合多层占用网格地图、海拔地图和机器人质心坐标,实现对地形坡度和机器人姿态的约束,确保机器人的高效安全作业。

覆盖路径规划的核心是通过算法设计,使机器人以高效方式完全覆盖目标区域,同时优化覆盖效率,降低能耗或时间成本,并避开静态和动态障碍物[40]。目前广泛用于机器人的覆盖路径规划算法如表2所示。

覆盖路径规划在农业机器人的应用上也是比较广

泛的。刘国海等[41]为满足高地隙无人喷雾机自主导航全覆盖作业的应用需求并优化农机作业效率，提出了一种基于改进粒子群算法的高地隙无人喷雾机不规则凸田块全覆盖路径规划方法，有效缩短路径长度、减少能量消耗并提升作业效率，为复杂地形农机路径规划提供了新思路。许娜等[42]提出了一种基于自适应蚁群算法的采摘机器人全局覆盖路径规划方法。该方法通过引入自适应机制动态调整蚁群算法的信息素挥发系数和转移概率，优化了传统蚁群算法的全局搜索能力，显著提高了采摘机器人的导航效率和作业覆盖率。SOITINAHO 等[43]提出了一种协同覆盖路径规划算法，通过将农田任务分解为“作业＋转弯”的短路径单元，并预计算田地的边界、内部路径中心线，结合实时动态优化和几何碰撞检测，使两台自主农业机械能在同一田地上同步执行任务。为农业自动化机械群协同作业提供了实践基础。

表 2　覆盖路径规划算法

Table 2　Coverage path planning (CPP) algorithm

算法名称	基本原理	适用场景	优点	缺点
栅格分解法	将区域划分为规则栅格，按顺序遍历	规则区域(如矩形农田)	简单易实现，路径明确	不适用于复杂形状区域
螺旋式覆盖	从区域中心向外螺旋扩展路径	小面积、无障碍物的圆形和方形区域	路径连续，转弯次数少	无法处理障碍物，边缘覆盖效率低
牛耕式覆盖(Boustrophedon)	类似犁地模式，逐行往返覆盖	大面积规则区域	路径重复率低，适合农业机械	对不规则区域适应性差
生物激发算法(ACO，ABC)	模拟蚁群(ACO)或蜂群(ABC)行为，通过信息素或群体协作优化路径	复杂障碍物环境	适应动态环境，全局优化能力强	计算复杂度高，实时性较差
基于图的方法(TSP/STC)	将区域分解为子区域，转化为旅行商问题(TSP)或生成覆盖树(STC)	不规则区域分解后的全局规划	路径最优性强，支持多区域覆盖	计算量大，需预先分解区域
深度强化学习(DRL)	使用神经网络训练覆盖策略，动态适应环境变化	动态或未知环境	实时避障，自适应性高	需要大量训练数据，硬件要求高

3.2　机器视觉技术

机器视觉也是应用于农业机器人的重要技术之一。在蔬菜生产领域，机器视觉常用于对蔬菜生长监测、病虫害监测与预警、蔬菜质量的检测、精准农业等方面，且已有大量的研究和应用[44-46]。机器视觉系统的技术路线离不开3个部分，分别为图像的采集、目标的识别及目标的定位。以下将逐一阐述并总结各技术要点。

3.2.1　图像采集

图像采集是机器视觉系统的数据入口，直接影响后续处理的精度与鲁棒性，其技术要点包括图像传感器的选择和对图像的预处理。

根据农业机器人在蔬菜生产中的作业分工不同，其图像传感器选择，拍摄角度，放置位置也各不相同。在果实识别与定位方面，通常采用高分辨率的RGB相机或结合深度信息的RGB-D相机，以获取果实的颜色、形状和位置信息，拍摄角度一般为俯视或斜视，以覆盖更大的视野范围[47]，而在环境感知方面，常使用单目，双目或结构光相机，来获取周围环境的三维信息，传感器通常安装在机器人顶部或前方，以确保对周围障碍物的全面感知[47]。

在对图像的预处理方面，采集到的蔬菜果实，环境信息可能受到光照，噪声干扰等因素的影响，需要进行预处理以提高图像质量，为后续的特征提取和识别提供基础，常见的预处理方法有噪声抑制、几何标定及数据增强[48-49]；在噪声抑制方面，滤波去噪技术是较为有效的处理办法之一，常用的滤波处理有均值滤波、中值滤波、高斯滤波和双边滤波等，其对比如表3所示。

表 3　图像降噪滤波方法对比

Table 3　Comparison of image denoising filtering methods

滤波方法	优势	局限
均值滤波	简单快速，平滑图像	模糊边缘，丢失细节
中值滤波	保护边缘，有效去除孤立噪声	计算量大，对高斯噪声效果差
高斯滤波	保留边缘信息，平滑效果自然	计算复杂度高，可能模糊细节
双边滤波	去噪同时保留边缘，适合复杂光照	计算量大，实时性差

数据增强也是用于对采集后的图像预处理的重要技术之一，通过对原始图像进行多样化变换来扩充数据集，可有效缓解因数据量不足导致的模型过拟合问题，并提升其在复杂场景下的泛化能力。常见方法包括几何变换与颜色调整，这些操作模拟了真实环境中

的视角变化、光照波动及遮挡效应。

3.2.2 目标识别检测

目标检测是机器视觉的核心任务之一,旨在从图像或视频中定位并识别特定目标,其技术路线主要分为传统目标检测方法和基于深度学习的目标检测方法。传统方法依赖手工设计的特征和滑动窗口机制,通过SVM或Adaboost分类器进行目标判别,其优势在于计算资源需求低且适用于小样本场景,但受限于特征泛化能力,难以应对复杂背景、多尺度目标及遮挡问题,已不能很好地满足目前目标检测所要求的高精度、速度快的要求[50]。

深度学习方法凭借其高精度与强适应性成为主流,基于深度学习的目标检测算法主要分为两阶段检测方法和单阶段检测方法两类[51-53]。两阶段方法的代表性算法包括Faster R-CNN及其衍生模型,其核心思想是首先生成候选区域,再对候选区域进行细粒度分类和边界框回归[54]。此类方法通过区域提议网络(RPN)生成高质量候选框,结合ROI池化提取特征,显著提升了检测精度,尤其在小目标和复杂场景中表现优异,但因其分步处理流程,计算复杂度较高,所以实时性较弱[55-56]。而单阶段方法则以YOLO系列和SSD为代表,其将目标检测视为端到端的回归问题,直接在特征图上预测目标类别和位置,相较于两阶段,这类方法通过网格划分或多尺度特征融合实现高效检测,速度优势显著,且有着更好的实时性,所以更广泛用于蔬菜生产领域的目标识别[57-58]。

3.2.3 目标定位

机器视觉目标定位技术是通过图像处理和算法分析确定物体在三维空间中的精确位置与姿态,涵盖传统方法和深度学习两大方向[59]。传统方法基于特征提取(如SIFT、SURF等算法)和模板匹配,通过图像预处理(去噪、边缘检测)提取角点或边缘特征,并结合相机标定实现像素坐标到物理坐标的转换,这类技术对硬件要求低,但在复杂光照或遮挡场景下鲁棒性不足,而深度学习方法则利用卷积神经网络(convolutional neural networks,CNN)端到端学习特征,如YOLO、Faster R-CNN等模型直接在图像中回归目标位置与姿态,显著提升了定位精度和实时性[60-63]。

此外,3D视觉技术(如双目视觉、结构光)结合点云处理,进一步增强了复杂场景下的定位能力。该技术广泛应用于采摘机器人抓取、农业机器人自动驾驶导航等领域[64-65]。

3.2.4 机器视觉技术的应用领域

在识别检测方面,李君茂等[66]为解决温室大棚番茄采摘机器人的番茄果实识别需求,提出了一种基于YOLOv10n框架的改进型目标检测模型YOLOv10n-SPPF-LSKA,极大地提高了对番茄果实成熟度的检测精度和速度。杨肖委等[67]针对茶园复杂环境下茶树嫩芽识别率低的问题,该研究提出了一种改进YOLOv8n模型,用FasterNet替换主干网络以减少计算冗余,在主干网络尾部引入全局注意力机制(GAM)抑制背景、增强特征提取,并在Neck网络中加入上下文引导(CG)模块融合局部与环境特征,极大提高了原模型茶树嫩芽识别率,为智能化茶叶采摘机器人开发提供了技术支撑。

在对采摘及目标定位方面,李俊萩等[68]针对果实采摘自动化问题,设计了一种基于YOLOv5和双目视觉的采摘机器人系统,用于识别果实种类并获取三维坐标,后经过逆运动学解算控制六自由度机械臂抓取果实。提供了一种可靠采摘机器人的机械臂控制方案。

在环境识别及自动导航方面,李亚军等[69]提出了一种基于机器视觉的叶菜类蔬菜菜垄识别算法,通过改进超绿算法(Gray=2Cg-Cr-Cb)增强图像灰度化处理的抗光照干扰能力,结合二值形态学变换与连通区域分析提取菜垄边界,显著提升了叶菜田间的自动导航精度与鲁棒性。

3.3 作业执行与末端控制技术

在蔬菜生产领域,农业机器人的作业执行与末端控制技术是其实现精准操作的核心,而现有的农业机器人的末端作业层面,多采用工业机器人的方案,在采摘作业方面,复杂的农业生产环境,使得机械臂的路径规划、避障和抓取变得非常困难,传统的工业机械臂在灵活性和自由度上都很难满足要求,尤其在机械臂抓取时,极易损伤作物[70]。在底盘控制和导航执行方面,传统底盘方案面对非结构化的蔬菜生产环境,存在跟踪路径累计误差大,转向灵活度差,转向精度不足等问题,严重制约了机器人田间精准作业的实现[71]。

农业机器人的作业执行与末端控制系统设计需充分考虑到蔬菜生产的核心特征:目标作物的多样性和易损性、非结构田间环境的高度复杂性等方面进行适应性设计和功能优化,具体应用如下。

马义东等[72]针对植物工厂水培生菜采收易损伤问题,设计了低损柔性采收装置,通过图像处理获取生菜尺寸,利用柔性抓爪抓取、切割器切茎实现低损采收。张红娟等[73]为提升玉米免耕机排种施肥精度及实时调控能力,基于模糊PID控制方法,建立了排种轴转速与排种量的线性模型,并分析排肥轴转速为施肥量关键控制参数,通过设计模糊PID调速系统,实现排肥轴和排种轴转速快速精准控制。谢晓轩等[74]针对番茄智能

化采摘问题。设计了基于ROS系统的采摘机器人分布式模块化的控制系统，包括人机交互、自主导航、视觉识别和采摘执行等各个功能子系统，能够实现植物工厂环境下的高精度导航、目标识别、番茄采摘和语音人机交互等各项功能。瞿济伟等[75]针对农业轮式机器人各转向轮协调控制问题，提出了一种基于PID控制的四轮独立转向策略，通过台架和路面试验验证了该控制方法能有效维持阿克曼转向关系，适用于设施农业狭小环境下的精准转向控制。

4　发展趋势与总结展望

农业机器人在蔬菜生产领域的应用非常广泛，涵盖果蔬收获、施肥、巡检和管理等环节，显著提高了生产效率，其多源开发平台也为研究人员高效开发先进农业生产技术提供了支持。在国家大力支持农业装备升级的政策背景下，农业机器人有望迎来更快发展，成为未来“无人农业”与“智能农业”的核心生产力。然而，要实现这一目标，目前仍面临诸多挑战和技术上的不足。

4.1　发展面临的挑战

首先，我国蔬菜产业存在显著的地区间发展水平差异，不同区域在种植模式、生产设施及环境条件等方面呈现多元化特征。这种区域异质性要求农业机器人研发必须充分考虑不同产区的地域特点，通过对作业场景、种植品种和农艺要求的系统分析，去设计机械结构、感知系统和作业算法，这导致农业机器人的开发成本和周期较长。其次，农业机器人的购买和维护成本普遍较高，对于中小农户的投资回报周期长，目前难以大规模地推广。最后，农民缺乏对相关技术的了解及农户间缺乏相关技术人才，例如采摘机器人的操控，巡检机器人所测得的信息都需要相关技术人员去决策和分析。

4.2　关键技术的存在问题

机器人技术在蔬菜生产领域的发展迅速，也受到极大的关注，但也存在一些问题。

4.2.1　适用性差

现有的技术研究多针对单一的场景和作物，在自主导航方面，针对设施和大田作业场景，常基于不同的导航方案。在设施作业中，常用激光、视觉或多信息融合的SLAM技术，完成定位建图和路径规划，而在大田中，常因为多变的光照，复杂的地形等因素，导致建图和路径规划的精度下降，难以满足作业要求；而基于GPS或北斗的RTK定位的大田环境的自主导航方案，常因为设施或作物的遮挡，导致定位信号的丢失，无法适用于设施作业。

在机器视觉的识别和定位技术方面，同样面临多重环境适应性挑战，显著影响系统性能，具体而言：在不稳定光照和不同光源下，常会导致识别图像的噪声增多，从而影响识别的准确度，同时在不同的作业环境下，植物的种植分布随机，则会导致定位的精度下降，最为关键的是，大多数蔬菜生产机器人的识别定位系统多针对的是单一作物的识别和定位，难以适用于多种作物。

在末端执行控制技术方面，多基于单一场景和作物进行执行控制，且多为整体控制方案，未能形成模块化设计，解耦能力差，适用性大大降低。

4.2.2　效率低

当前农业机器人在蔬菜生产中的技术应用方案主要局限于单机作业模式，即在同一生产场景中各机器人独立执行任务，缺乏有效的多机协同机制。这种单机－单机作业模式存在显著局限性：一方面，由于机器人技术适用性不足，单一机器人难以同时完成多农事操作；另一方面，作业过程中任务分配粗放、路径规划冗余、资源调度低效，导致系统整体生产效率低下，无法满足规模化蔬菜生产对时效性和精准性的要求，因而难以实现实际生产场景的大范围应用。

这些问题与挑战都需要在研究中考虑和深思的，同样这些挑战也给农业机器人的发展提供了方向，并以此形成趋势。

4.3　未来发展方向和趋势

1）多机协同、多用途、高效率。随着5G、数字孪生和边缘计算等技术的发展，研发多机器人协同作业算法及系统，通过多机器人协作实现蔬菜生产的精细化作业，研发可应用于多种蔬菜、多种作业场景，并能适应不同环境的多用途农业机器人，能有效解决因区域、环境、种类等差异带来的问题，从而提升蔬菜生产效率并节省相关开发成本。

2）专业化、模块化。农业机器人的设计需深度融入蔬菜生产全周期的核心需求，通过结构适配、功能协同与智能决策实现精准作业。首先，针对作物生长特性，需开发差异化执行机构，其次，机械结构需适应种植模式，而模块化设计可快速切换播种、施肥、采摘、除草等组件，提高农业机器人的作业灵活性和适应性，并提升了设备的复用率，以降低了蔬菜生产的成本投入。

3）推广和扶持政策。各地政府应建立完善的推广和扶持政策，推动农业机器人的发展，并建设相关试点，部署相关智能农机和农业机器人，让相关技术得到应用与推广；而在人才培养方面，政府应通过设立奖学金、培训班及引进国际人才的形式，培养掌握农业机器人操作、智慧农业管理的复合型人才，同时加强对农民

的技术培训与推广力度。

4.4 总结

机器人在蔬菜生产领域具备广阔的前景。然而,现阶段机器人技术仍存在诸多局限性,距离实现商业化大规模应用,尚存差距。未来,通过学校、企业、科研院所与政府部门的多方协作与联合攻关,机器人关键核心技术有望取得突破性进展,加速蔬菜产业发展。同时,随着农艺技术的持续革新并逐步适应机器人作业模式,机器人技术将成为推动现代农业升级的核心动力,并在优化农业劳动力结构、提升蔬菜产业整体效率方面发挥着关键作用。

参 考 文 献

[1] 王江,李浩,马志伟,等. 国内外设施蔬菜机械化发展现状分析及对策[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(1): 124－130.
WANG Jiang, LI Hao, MA Zhiwei, et al. Analysis and countermeasures of mechanization development of domestic and foreign facility vegetables [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(1): 124－130.

[2] 杨家豪,房欣,马浏轩,等. 结球蔬菜收获机械研究现状与方向[J]. 农机化研究, 2023, 45(11): 10－17.
YANG Jiahao, FANG Xin, MA Liuxuan, et al. Research status and direction of headed vegetable harvesting machinery [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(11): 10－17.

[3] 宋鹏,李正达,杨蒙,等. 作物表型机器人研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2025, 56(3): 1－17.
SONG Peng, LI Zhengda, YANG Meng, et al. Current status and prospects of crop phenotyping robots [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 1－17.

[4] 刘成良,贡亮,苑进,等. 农业机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 1－22, 55.
LIU Chengliang, GONG Liang, YUAN Jin, et al. Current status and development trends of agricultural robots [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 1－22, 55.

[5] 王飞涛,樊春春,李兆东,等. 机器人在设施农业领域应用现状及发展趋势分析[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(3): 93－98, 120.
WANG Feitao, FAN Chunchun, LI Zhaodong, et al. Application status and development trend of robots in the field of facility agriculture [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(3): 93－98, 120.

[6] 李道亮. 我国农业机器人技术与发展趋势[J]. 人民论坛, 2024(24): 70－74.

[7] 肖坚星,王天海,王宁,等. 农业机器人障碍物检测与避障技术研究进展[J/OL]. 农业工程学报, 1－16[2025－06－24].
XIAO Jianxing, WANG Tianhai, WANG Ning, et al. Research progress of obstacle detection and obstacle avoidance technology for agricultural robots [J/OL]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1－16[2025－06－24].

[8] ARAD B, BALENDONCK J, BARTH R, et al. Development of a sweet pepper harvesting robot [J]. Journal of Field Robotics, 2020, 37(6): 1027－1039.

[9] 王洪宇,余忠义,赵磊,等. 我国设施蔬菜植保机械发展现状与展望[J/OL]. 中国蔬菜, 1－14[2025－06－11].
WANG Hongyu, YU Zhongyi, ZHAO Lei, et al. Development status and prospects of facility vegetable plant protection machinery of China [J/OL]. China Vegetables, 1－14[2025－06－11].

[10] 王得志,王延鑫,汪小昱,等. 农业机器人中的管理与采摘技术:现状、挑战与未来发展[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2025, 6(2): 1－23.
WANG Dezhi, WANG Yanxin, WANG Xiaochan, et al. Management and harvesting technologies in agricultural robotics: Current status, challenges and future developments [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2025, 6(2): 1－23.

[11] YANG Q, DU X, WANG Z, et al. A review of core agricultural robot technologies for crop productions [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 206: 107701.

[12] ZHANG Q. Opinion: Agricultural Robotics, issues worthy to study [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 216: 108528.

[13] 王琳,陈强,施印炎,等. 农业机器人底盘关键技术研究现状分析[J]. 拖拉机与农用运输车, 2023, 50(5): 1－9.
WANG Lin, CHEN Qiang, SHI Yinyan, et al. Progress and development on key technologies of robot chassis in agricultural production [J]. Tractor & Farm Transporter, 2023, 50(5): 1－9.

[14] 任娟. 农业播种机器人的设计及试验研究[J]. 农机化研究, 2023, 45(8): 74－78.
REN Juan. Design and experimental research of agricultural seeding robot [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(08): 74－78.

[15] 李海龙. 大田对靶施药除草机器人系统研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2023.
LI Hailong. Research on field targeted herbicide spraying robot system [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023.

[16] 宁晓峰,刘俟墨,孙晓天,等. 果蔬采摘机器人的设计与试验[J/OL]. 农机化研究, 1－8[2025－06－24].

NING Xiaofeng, LIU Simo, SUN Xiaotian, et al. Design and experiment of fruit and vegetable picking robot [J/OL]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 1－8 [2025－06－24].

[17] 王艺翔，李红双．自动化大葱收获机器人[J]．机械设计，2024，41(S1)：114－117.
WANG Yixiang, LI Hongshuang. Automated green onion harvesting robot [J]. Journal of Machine Design, 2024, 41(S1): 114－117.

[18] 张凯良，褚佳，张铁中，等．蔬菜自动嫁接技术研究现状与发展分析[J]．农业机械学报，2017，48(3)：1－13.
ZHANG Kailiang, CHU Jia, ZHANG Tiezhong, et al. Development status and analysis of automatic grafting Technology for Vegetables [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 1－13.

[19] 杨鑫宇，杨启志，刘磊，等．设施番茄采摘机器人末端执行器设计与试验[J/OL]．农机化研究，1－9[2025－06－24].
YANG Xinyu, YANG Qizhi, LIU Lei, et al. Design and experiment of end effector for facility tomato harvesting robot [J/OL]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 1－9 [2025－06－24].

[20] 杨振宇，刘发英，王勇．自导航温室黄瓜收获机器人的研究[J]．中国农机化学报，2013，34(6)：225－229.
YANG Zhenyu, LIU Faying, WANG Yong. Study of automatic navigation cucumber harvesting robot in greenhouse [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(6): 225－229.

[21] 王祎娜，沐森林，顾峰伟，等．国内外农机化技术发展现状与对策建议[J]．中国农机化学报，2019，40(3)：227－230.
WANG Yina, MU Senlin, GU Fengwei, et al. Current situation and suggestions for the development of agricultural mechanization technology at home and abroad [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(3): 227－230.

[22] TAWSEEF S A, TABASUM R, FAISAL L R. Towards leveraging the role of machine learning and artificial intelligence in precision agriculture and smart farming [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 107119.

[23] LIU L, YANG F, LIU X, et al. A review of the current status and common key technologies for agricultural field robots [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 227(P2): 109630－109630.

[24] NILS L L, STRAUB J, STANA A, et al. Development and evaluation of a self-adaptable planting unit for an autonomous planting process of field vegetables [J]. Smart Agricultural Technology, 2024, 9: 100578.

[25] ZHANG Z, KAYACAN E, THOMPSON B, et al. High precision control and deep learning-based corn stand counting algorithms for agricultural robot [J]. Autonomous Robots, 2020, 44(7): 1289－1302.

[26] CUI L F, LE F X, Xue X Y, et al. Design and experiment of an agricultural field management robot and its navigation control system [J]. Agronomy, 2024, 14(4): 654.

[27] VITZRABIN E, EDAN Y. Changing task objectives for improved sweet pepper detection for robotic harvesting [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2016, 1(1): 578－584.

[28] SMITH R C, CHEESEMAN P. On the representation and estimation of spatial uncertainty [J]. The International Journal of Robotics Research, 1986, 5(4): 56－68.

[29] 程亮，罗洲，何赟泽，等．视觉和激光SLAM发展综述与展望[J]．中国测试，2025，51(6)：1－16.
CHENG Liang, LUO Zhou, HE Yunze, et al. Overview and prospect of vision and lidar SLAM [J]. China Measurement & Test, 2025, 51(6): 1－16.

[30] IMAN K A, LUKE F, GERARD D, et al. A survey of state-of-the-art on visual SLAM [J]. Expert Systems With Applications, 2022, 205.

[31] 谢红玉．多源信息融合的移动机器人SLAM方法研究[D]．北京：北京化工大学，2024.
XIE Hongyu. Multi-source fusion slam technology [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2024.

[32] 黄超，黄予昕，杨泽彬，等．VIG-SLAM：基于自适应多传感器融合的SLAM算法[J/OL]．电子测量与仪器学报，1－9[2025－05－18].
HUANG Chao, HUANG Yuxin, YANG Zebin, et al. VIG-SLAM: Adaptive multi-sensor fusion-based SLAM algorithm [J/OL]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 1－9[2025－05－18].

[33] LYNEN S, ACHTELIK M W, WEISS S, et al. A robust and modular multi-sensor fusion approach applied to MAV navigation [C]// 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2013: 3923－3929.

[34] 庚士涵．多信息融合的果园移动机器人SLAM技术研究[D]．秦皇岛：燕山大学，2024.
GENG Shihan. Research on SLAM technology of orchard mobile robot based on multi-information fusion [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2024.

[35] 何勇，黄震宇，杨宁远，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 prospects of key navigation technologies for facility agricultural robots [J]. Smart Agriculture, 2024, 6(5): 1－19.

[36] 孙志强, 唐森洋, 罗兴发, 等. 农业巡检机器人路径规划研究应用现状[J]. 农业装备与车辆工程, 2025, 63(1): 18－24.
SUN Zhiqiang, TANG Senyang, LUO Xingfa, et al. Research and application status of path planning for agricultural inspection robots [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2025, 63(1): 18－24.

[37] WANG Y, FU C, HUANG R, et al. Path planning for mobile robots in greenhouse orchards based on improved A* and fuzzy DWA algorithms [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 227(P2): 109598.

[38] 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 Wenfeng, XU Lei, YANG Linlin, 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.

[39] SANTOS L, SANTOS F, MENDES J, et al. Path planning aware of robot′s center of mass for steep slope vineyards [J]. Robotica, 2020, 38(4): 684－698.

[40] 王宁, 韩雨晓, 王雅萱, 等. 农业机器人全覆盖作业规划研究进展[J]. 农业机械学报, 2022, 53(S1): 1－19.
WANG Ning, HAN Yuxiao, WANG Yaxuan, et al. Research progress of agricultural robot full coverage operation planning [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(S1): 1－19.

[41] 刘国海, 万亚连, 沈跃, 等. 基于改进粒子群算法的高地隙无人喷雾机对不规则凸田块的全覆盖作业路径规划[J]. 华南农业大学学报, 2025, 46(3): 390－398.
LIU Guohai, WANG Yalian, SHEN Yue, et al. Complete coverage path planning of irregular convex field for the high clearance unmanned sprayer based on improved particle swarm optimizer algorithm [J]. Journal of South China Agricultural University, 2025, 46(3): 390－398.

[42] 许娜, 周炜明. 采摘机器人全局覆盖路径规划研究——基于自适应蚁群算法[J]. 农机化研究, 2023, 45(11): 213－216, 221.
XU Na, ZHOU Weiming. Research on global coverage path planning of picking robot based on adaptive ant colony algorithm [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(11): 213－216, 221.

[43] SOITINAHO R, VÄYRYNEN V, OKSANEN T. Heuristic cooperative coverage path planning for multiple autonomous agricultural field machines performing sequentially dependent tasks of different working widths and turn characteristics [J]. Biosystems Engineering, 2024, 242: 16－28.

[44] ZHONG X, ZHANG M, TANG T, et al. Advances in intelligent detection, monitoring, and control for preserving the quality of fresh fruits and vegetables in the supply chain [J]. Food Bioscience, 2023, 56: 103350.

[45] ZHANG K, CHAI Q, QIAN X, et al. Potential of machine learning in leaf-based multi-source data driven tomato growth monitoring [J]. Smart Agricultural Technology, 2025, 10: 100854.

[46] 温艳兰, 陈友鹏, 王克强, 等. 基于机器视觉的病虫害检测综述[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(10): 271－279.
WEN Yanlan, CHEN Youpeng, WANG Keqiang, et al. An overview of plant diseases and insect pests detection based on machine Vision [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(10): 271－279.

[47] 石国照, 张富贵, 苟园旻, 等. 水果采摘机器人目标识别与采摘点定位研究进展[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(5): 115－124.
SHI Guozhao, ZHANG Fugui, GOU Yuanmin, et al. Research progress on target recognition and picking point localization for fruit picking robots[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(5): 115－124.

[48] OSPINA R, ITAKURA K. Obstacle detection and avoidance system based on layered costmaps for robot tractors [J]. Smart Agricultural Technology, 2025, 11: 100973.

[49] KUAN Y , GOH K , LIM L . Systematic review on machine learning and computer vision in precision agriculture: Applications, trends, and emerging techniques [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2025, 148: 110401.

[50] 李华. 基于机器视觉的柑橘外观品质鉴定技术研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2023.
LI Hua. Research on citrus quality identification based on machine vision [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2023.

[51] 夏子林, 张新洲, 王文波, 等. 基于机器视觉的蚕豆荚高精度检测方法研究[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(1): 157－163, 353.
XIA Zilin, ZHANG Xinzhou, WANG Wenbo, et al. Research on high precision detection method of broad bean pods based on machine vision [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(1):157－163, 353.

[52] 田鹏菲, 王皞阳. 机器视觉技术在我国农业领域内的应用分析[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(14): 13－21.
TIAN Pengfei, WANG Haoyang. Analysis of the application of machine vision technology in china′s agricultural sector [J]. Jiangsu Agricultural Sciences,

2023，51(14)：13－21.

[53] 郭希岳，李劲松，郑立华，等. 利用Re-YOLOv5和检测区域搜索算法获取大豆植株表型参数[J]. 农业工程学报，2022，38(15)：186－194.
GUO Xiyue，LI Jinsong，ZHENG Lihua，et al. Acquiring soybean phenotypic parameters using Re-YOLOv5 and area search algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2022，38 (15)：186－194.

[54] 谢家兴，廖飞，王卫星，等. 基于改进Faster R-CNN的荔枝病虫害检测[J]. 华中农业大学学报，2025，44(1)：62－73.
XIE Jiaxing，LIAO Fei，WANG Weixing，et al. Detecting diseases and insect pests in litchi based on improved Faster R-CNN [J]. Journal of Huazhong Agricultural University，2025，44(1)：62－73.

[55] 李律，龙陈锋，杨玉娟，等. 基于FEPW R-CNN的苗期油菜和杂草检测方法[J]. 农业与技术，2025，45(10)：35－40.

[56] 龚昌智，郭丹丹. 基于深度学习的番茄叶片病害检测研究[J]. 现代农业科技，2025(10)：159－164.
GONG Changzhi，GUO Dandan. Tomato leaf disease detection based on deep learning [J]. Modern Agricultural Science and Technology，2025(10)：159－164.

[57] ZOUBEK T，BUMBÁLEK R，UFITIKIREZI J D M，et al. Advancing precision agriculture with computer vision：A comparative study of YOLO models for weed and crop recognition [J]. Crop Protection，2025，190：107076.

[58] 金岩. 基于改进SSD算法的害虫识别研究[D]. 长春：吉林农业大学，2023.
JIN Yan. Research on pest identification based on improved SSD algorithm [D]. Changchun：Jilin Agricultural University，2023.

[59] 徐征，翟季青，陈永强，等. 基于机器视觉的机器人作业目标定位[J]. 机床与液压，2023，51(11)：72－75.
XU Zheng，ZHAI Jiqing，CHEN Yongqiang，et al. Operation target location of robots based on machine vision [J]. Machine Tool & Hydraulics，2023，51(11)：72－75.

[60] 戈刚，杨珺，刘毅，等. 改进YOLOv8n模型对复杂农业场景下西红柿目标的检测[J]. 农业工程学报，2025，41(9)：143－153.
GE Gang，YANG Jun，LIU Yi，et al. Detecting tomatoes in complex agricultural environments using improved YOLOv8n [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2025，41(9)：143－153.

[61] 刘进一，晏伏山，董赫，等. 基于改进MBS-YOLO v8的火龙果目标检测与定位方法[J]. 农业机械学报，2025，56(5)：425－432.
LIU Jinyi，YAN Fushan，DONG He，et al. Pitaya fruit target detection and localization method based on improved MBS-YOLO v8 [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2025，56(5)：425－432.

[62] 徐艳蕾，郭丽丽，黄东岩，等. 基于高贴合旋转框的复杂环境玉米株心定位方法[J]. 农业机械学报，2025，56(4)：129－138.
XU Yanlei，GUO Lili，HUANG Dongyan，et al. Corn plant core localization method based on high-fitting rotated bounding boxes for complex environments [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2025，56(4)：129－138.

[63] 刘媛媛，何铭，王跃勇，等. 基于优化SIFT算法的农田航拍全景图像快速拼接[J]. 农业工程学报，2023，39(1)：117－125.
LIU Yuanyuan，HE Ming，WANG Yueyong，et al. Fast stitching for the farmland aerial panoramic images based on optimized SIFT algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2023，39 (1)：117－125.

[64] 朱昱荣，胡波. 基于双目匹配的间苗机器人视觉定位算法研究[J]. 新疆农机化，2024(6)：11－14.
ZHU Yurong，HU Bo. Visual localization algorithm based on binocular matching in seedling robots [J]. Xinjiang Agricultural Mechanization，2024(6)：11－14.

[65] 郑太雄，江明哲，冯明驰. 基于视觉的采摘机器人目标识别与定位方法研究综述[J]. 仪器仪表学报，2021，42(9)：28－51.
ZHENG Taixiong，JIANG Mingzhe，FENG Mingchi. Vision based target recognition and location for picking robot：A review [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument，2021，42(9)：28－51.

[66] 李君茂，黄子露，何冬黎，等. 基于YOLOv10n的温室大棚番茄成熟度检测算法研究[J/OL]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版)，1－11[2025－05－26].
LI Junmao，HUANG Zilu，HE Dongli，et al. Research on greenhouse tomato maturity detection algorithm based on YOLOv10n [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition). Available online：1－11[2025－05－26].

[67] 杨肖委，沈强，罗金龙，等. 贵州丘陵茶园田间管理机设计与试验[J]. 中国农机化学报，2024，45(10)：76－81.
YANG Xiaowei，SHEN Qiang，LUO Jinlong，et al. Design and test of field management machine in Guizhou hilly tea plantation [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2024，45(10)：76－81.

[68] 李俊萩，王甲一，孔德肖，等. 结合YOLOv5与双目视觉定位的摘果机械臂控制研究[J]. 农机化研究，2024，46(7)：38－43.
LI Junqiu，WANG Jiayi，KONG Dexiao，et al. Research

on the control of fruit picking manipulator based on the fusion of YOLOv5s and binocular vision [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46 (7): 38－43.

[69] 李亚军, 向阳, 林洁雯, 等. 基于机器视觉的叶菜类蔬菜菜垄识别算法[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(3): 88－98.
LI Yajun, XIANG Yang, LIN Jiewen, et al. Ridge recognition algorithm for leaf vegetables based on machine vision [J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(3): 88－98.

[70] 杨琳, 苗长友, 葛元月, 等. 蔬菜采摘机器人的研究现状与未来发展趋势[J]. 蔬菜, 2025(5): 27－42.
YANG Lin, MIAO Changyou GE Yuanyue, et al. Research status and future development trend of vegetable harvesting robots [J]. Vegetables, 2025(5): 27－42.

[71] 黄一霖, 王琳, 施印炎, 等. 农业机器人底盘研究现状与展望[J]. 拖拉机与农用运输车, 2023, 50(3): 15－19.
HUANG Yilin, WANG Lin, SHI Yinyan, et al. Development status and future trends for agricultural robot chassis [J]. Tractor & Farm Transporter, 2023, 50(3): 15－19.

[72] 马义东, 胡鹏展, 金鑫, 等. 水培生菜低损柔性采收装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 175－183, 210.
MA Yidong, HU Pengzhan, JIN Xin, et al. Design and experiment of low damage flexible harvesting device for hydroponic lettuce [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 175－183, 210.

[73] 张红娟, 窦新宇. 模糊PID玉米免耕机排种施肥控制方法研究[J]. 农机化研究, 2025, 47(1): 178－184.
ZHANG Hongjuan, DOU Xinyu. Study on control method of seed metering and fertilization for corn no-tillage seeder [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(1): 178－184.

[74] 谢晓轩, 孔德义, 潘斌, 等. 基于ROS的植物工厂番茄采摘机器人控制系统设计[J]. 农机化研究, 2025, 47(10): 82－89.
XIE Xiaoxuan, KONG Deyi, PAN Bin, et al. Design of control system for tomato picking robot in plant factory based on ROS [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(10): 82－89.

[75] 瞿济伟, 李鸿基, 张瑞宏, 等. 农业轮式机器人底盘转向运动控制及试验[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(5): 140－147, 160.
QU Jiwei, LI Hongji, ZHANG Ruihong, et al. Research on steering motion control and experiments of agricultural wheeled robot chassis [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(5): 140－147, 160.

The current application and future trends of robotics in vegetable production

LIANG Mingxu[1, 2], YUAN Changrong[1], XIA Xianfei[2*], GONG Qingshuo[2]

(1. *School of Mechanical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing* 211167, *China*; 2. *Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing* 210014, *China*)

Abstract: As the world's largest vegetable producer and consumer, the area of vegetable cultivation in China is constantly increasing. However, it faces challenges such as relatively low levels of mechanization and intelligentization, as well as the annual increase in labor costs. With the development of robot technology, agricultural robots have been increasingly widely applied in the vegetable production field and have become a key technical means to replace manual labor and improve production efficiency and quality. To systematically understand the research status of robotic technology in vegetable production and clarify its future development direction, this paper first elaborates on the definition of agricultural robots. Secondly, focusing on the three core operation links in vegetable production: sowing and transplanting, field management, and harvesting and sorting, it sorts out advanced research results at home and abroad, and analyzes the relevant research progress from three dimensions: perception, decision-making, and control. This includes the SLAM-based autonomous navigation technology and path planning principles based on multi-information fusion; the technical routes and key technology research levels of machine vision application in various links of vegetable production; and the progress achieved in the control technology of operation execution mechanisms and end-effectors in response to specific agronomic requirements and

operational environment characteristics. Finally, the paper analyzes the main technical challenges faced by current agricultural robots in vegetable production, namely the significant bottlenecks in applicability and operational efficiency, and looks forward to future development directions. Future research should focus on the development of multi-functional operation robots, which requires breaking through multi-robot collaborative control technology and deepening specialized and modular design; at the same time, policy support is also indispensable. With the continuous advancement of technology and the joint efforts of various parties, robotic technology is expected to become a key support for optimizing the agricultural labor structure, improving vegetable production efficiency, and realizing smart agriculture.

Keywords: vegetable production; agricultural robotics; autonomous navigation; machine vision; task execution and end-effector control; multi-robot coordination

Foundation items: Basic Research Center, Innovation Program of Chinese Academy of Agricultural Sciences(CAAS-BRC-SAE-2025-02)

First Author: LIANG Mingxu, E-mail: 1175063865@qq.com

* **Correspondence Author:** XIA Xianfei, E-mail: xiaxianfei@caas.cn