

猕猴桃作业机器人研究进展及全程智能化生产展望

贺磊磊¹, 辜煜¹, 夏满¹, 李瑞¹, ZHANG Qin², 傅隆生^{1,3*}

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 杨凌 712100; 2. 华盛顿州立大学精细农业及农业自动化研究中心, 华盛顿 99350;
3. 农业农村部农业物联网重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 猕猴桃为特色高效益林果作物, 生产管理长期依赖高强度人工, 效率低、品质不稳, 制约产业持续发展。发展以作业机器人为核心的智能化装备体系, 是破解劳动力瓶颈、推动规范高效生产的关键路径。该文梳理猕猴桃种植特征与生产模式, 重点聚焦采摘、授粉、疏果、疏蕾等用工密集环节, 构建智能感知、决策、执行与控制的技术框架, 系统分析以机器人作业为代表的智能化生产关键技术与装备进展, 探讨其发展趋势与适用场景。针对技术落地与装备推广难题, 提出了“空间适配-生物适配-技术适配”三位一体的发展建议, 强调通过果园宜机化适配改造与规划、果树标准化种植与开放性冠层形态调整、智能装备全程生产环节一机多用与多品种柔性适配等关键方向协同推进。该文旨在为猕猴桃智能作业机器人研发与推广提供理论支撑与实践参考, 助力林果产业高质量智能转型。

关键词: 猕猴桃; 智能化; 标准化; 农业机器人; 人工智能

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202504018

中图分类号: S-1; S22

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2025)-17-0001-14

贺磊磊, 辜煜, 夏满, 等. 猕猴桃作业机器人研究进展及全程智能化生产展望[J]. 农业工程学报, 2025, 41(17): 1-14.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202504018 <http://www.tcsae.org>

HE Leilei, GU Yu, XIA Man, et al. Research progress of the kiwifruit operation robots and prospects for fully intelligent production[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2025, 41(17): 1-14.

(in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202504018 <http://www.tcsae.org>

0 引言

猕猴桃是中国特色优势林果产业的重要代表, 果实风味独特、营养丰富, 深受消费者喜爱。虽然国内猕猴桃产业起步较晚, 但依托优越的生态条件与丰富种质资源, 已逐步发展成为全球产业核心区域之一, 市场消费也从鲜果扩展至果汁、果脯、保健品等多元化产品^[1]。多元化的市场需求为猕猴桃产业的持续发展提供了广阔的发展空间和强劲的动力, 使其成为具有显著经济价值和发展潜力的特色农业产业。

近年来, 智慧农业快速发展, 物联网、人工智能与自动化装备不断加快农业向精准化、智能化方向转型。当前中国农业综合机械化率已超过 70%^[2], 初步实现了以小麦、玉米、水稻为代表的主粮作物的机械化规模生产, 而果园机械化率仍偏低, 仅为 25.88%^[3]。以猕猴桃为例, 其生产涉及施肥、施药、疏蕾、授粉、疏果、修剪及采摘等多个环节, 现有装备大多局限于单环节作业, 作业效率低、协同性差, 且高度依赖人工辅助操作^[4]。在农业劳动力持续减少背景下, 人工密集型果园作业面临可持续性与成本双重挑战, 推进智能化转型尤显紧迫。

因此, 围绕猕猴桃全程智能化生产技术与装备开展研究, 发展具备高适应性与自主作业能力的机器人技术, 填补现有生产领域的技术空白, 对于实现猕猴桃产业高质量可持续发展至关重要。

本文聚焦猕猴桃生产中对人工依赖最为严重、智能化需求最迫切的采摘、授粉、花果管理等作业环节, 结合“全程智能化”生产理念, 系统梳理当前猕猴桃作业机器人在感知、决策与执行等关键技术的研究进展。同时, 深入探讨当前存在的技术瓶颈与挑战, 结合猕猴桃实际生产与产业需求, 提出技术集成与优化的可行路径, 展望未来的发展方向, 旨在为猕猴桃作业机器人关键技术攻关与全程智能化转型提供理论支撑与实践参考。

1 猕猴桃产业发展概况

1.1 猕猴桃种植规模与分布情况

猕猴桃原产中国, 但长期被作为野生资源, 直到 20 世纪才被人工驯化成为商品类水果。近年来全球猕猴桃产业发展持续扩张, 2003 年至 2023 年期间, 其种植面积增加了 105.90%, 达 28.63 万 hm^2 ; 总产量增加了 119.53%, 达 443.31 万 t ^[5]。尽管已有 26 个国家开展商品化种植, 但高品质产区仍集中于特定地理条件区域, 中国、意大利、新西兰、希腊、伊朗五国为猕猴桃主要生产国家, 占据全球 91.23% 的种植面积和 90.88% 的产量 (表 1)。

中国作为猕猴桃的发源地, 在种质资源以及地理环境上具有绝对优势, 种植面积以及总产量均为世界第一。经过资源开发、种植规模扩大、产业体系结构调整等多环节发展, 形成了陕西秦岭北麓山区, 四川大

收稿日期: 2025-04-02 修订日期: 2025-07-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32371999); 陕西省重点研发计划项目 (2024PT-ZCK-27, 2024NC-YBXM-195, 2023JBGS-21); 人力资源和社会保障部外国专家局项目 (H20240238); 西安市科技计划项目 (23NYGG0071, 24NYGG0035)

作者简介: 贺磊磊, 博士生, 研究方向为智能化农机装备。

Email: hll@nwfufu.edu.cn

*通信作者: 傅隆生, 教授, 博士生导师, 研究方向为智慧农业技术与装备研究。Email: fulsh@nwfufu.edu.cn

巴山南麓山区及龙门山区, 湖南省西部和湖北省西南部武陵山区, 贵州苗岭乌蒙山区, 河南大别山区五大优势产区^[6]。

表 1 2023 年全球猕猴桃产业规模统计
Table 1 Statistics on the scale of global kiwifruit industry in 2023

产区 Producing area	收获面积 Harvested area/ 10 ⁴ hm ²	收获面积占比 Proportion of harvested area/%	总产量 Production quantity/ 10 ⁴ t	总产量占比 Proportion of production quantity/%	单位面积产量 Production per unit area/ (t·hm ⁻²)
中国	19.88	69.41	236.27	53.30	11.88
意大利	2.39	8.34	39.11	8.82	16.40
新西兰	1.47	5.13	66.27	14.95	45.13
希腊	1.40	4.89	31.71	7.15	22.68
伊朗	0.99	3.46	29.51	6.66	29.74
其他	2.51	8.77	40.44	9.12	-

截至 2023 年, 中国猕猴桃收获面积达 19.88 万 hm², 占全球收获总面积的 69.41%, 为意大利的 8.32 倍、新西兰的 13.52 倍; 总产量达 236.27 万 t, 占全球猕猴桃生产

总量的 53.30%, 为意大利的 6.04 倍、新西兰的 3.57 倍; 但单产仅为 11.96 t/hm², 较意大利 (16.40 t/hm²)、新西兰 (45.13 t/hm²) 等国家还有较大差距。

1.2 猕猴桃栽培模式与关键作业环节

猕猴桃栽培模式直接影响机械化与智能化作业的可实施性, 受地域气候与管理水平差异影响, 呈现多样化发展格局。露天栽培作为主要栽培方式, 建园与管理成本低, 但易受自然气候干扰; 设施化栽培虽能提供稳定生长环境, 但建设成本高、管理要求强, 多用于高价值品种; 避雨棚栽培兼顾成本与病害防控, 成为露天与设施之间的折中选择。尽管栽培模式多样, 但猕猴桃为藤本类植物, 需配置支架系统承载树体 (图 1), 以满足优质稳产要求^[7]。随着技术发展, 现代果园逐步形成以棚架、立柱与钢丝网的半结构化标准体系, 规范化果园行株距一般为 3~5 m, 树行规整, 冠高 1.5~2 m, 具备良好的作业空间, 为机器人作业与机械化设备运行创造了基础条件。



图 1 猕猴桃典型栽培架型
Fig.1 Typical trellis for kiwifruit cultivation

猕猴桃为多年生藤本果树, 其周年生产涉及花果管理、病虫害防治、水肥调控、修剪整形等多个环节, 呈现典型的季节性劳动密集特征。陕西省作为主产区, 提出了包括充分授粉、科学修剪、适期采收等在内的十大关键技术及全程机械化发展路径^[8]。当前猕猴桃园区已引入部分通用型机械, 如运输车、旋耕机、喷雾器等, 初步缓解基础作业压力, 但在授粉、疏果、疏蕾、采摘等对时效与精度要求高的关键环节, 专用装备仍不足, 智能化装备应用处于空白。现有授粉设备存在花粉浪费问题, 坐果多导致后期疏果压力大; 而疏果、疏蕾与采摘等环节需依赖精准识别和操作, 相关机器人尚在研发中, 难以广泛应用。随着农业劳动力日益紧缺, 这些关键作业环节已成为猕猴桃生产向智能化、高效化转型的核心瓶颈。要破解传统生产模式的制约, 提升产业核心竞争力和可持续发展能力, 亟需在关键环节的核心技术与智能装备上实现突破。

2 猕猴桃智能化作业技术与装备

与传统大田中的装配、运输、耕土等标准化基础作业不同, 猕猴桃果园在采摘、授粉、疏果、疏蕾等关键管理环节, 作业对象主要是花蕾、花朵和果实等小尺寸目标。这些目标个体多分布密集且受果园光照变化、枝叶遮挡、地形起伏等因素干扰, 对作业精度和效率要求极高。传统人工作业劳动强度大、效率低且稳定性差, 难以满足现代果园管理需求; 现有机械化装备在作业精

度和操作柔性等方面仍难以胜任复杂作业场景。智能化作业技术的引入, 为破解难题提供了路径。与传统机械化不同, 智能化作业强调动态感知与自适应调控, 依托传感器、机器视觉与智能控制等技术, 实现对目标与环境的精准感知、路径规划与高效执行。农业机器人作为智能作业的关键载体, 集成感知、决策、执行和控制模块, 能够在复杂果园环境中自主完成精准识别与柔性作业, 为猕猴桃产业的智能转型提供重要支撑。

2.1 猕猴桃智能采摘技术与装备

猕猴桃采摘是生产周期中的关键环节, 直接关系到果品贮藏品质与市场销售效益。目前鲜果实采摘仍高度依赖人工, 劳动强度大、作业集中且季节性强, 约占生产周期总劳动力投入的 35%~45%^[9-11]。随着劳动力短缺与成本上升, 人工采摘面临效率低、成本高、时效性差等问题, 难以满足产业发展需求。猕猴桃果实成熟期较为集中、藤蔓缠绕复杂, 对操作技能要求高, 进一步加剧采摘作业难度。推动采摘作业向机械化、智能化转型, 发展具备精准识别、柔性抓取与无损分离能力的智能采摘机器人, 已成为产业升级的必然选择。

2.1.1 果实识别

果实识别是猕猴桃智能采摘系统的前提与基础, 其核心在于在复杂果园环境中准确提取果实目标区域。猕猴桃采用棚架栽培, 果实多簇生悬挂于枝蔓下方, 从冠层底部采集图像能提高果实暴露率, 利于目标检测^[12]。早期识别方法基于果实颜色、形状等低层特征进行图像

分割,并辅以边缘提取与形态学运算以获取果实区域^[13-14]。然而在实际果园中,叶片遮挡、果叶同色以及光照不均等因素易导致识别精度下降。尤其在果实簇生、结构重叠场景中,传统图像处理方法难以准确区分果实边界与空间关系^[15-17]。

深度学习图像算法较传统方法在鲁棒性与自适应性方面表现更优,能有效应对枝叶遮挡与光照变化等复杂场景。傅隆生等^[18]率先将 LeNet 网络应用于猕猴桃目标识别任务,在多果簇识别精度方面突破了传统方法的瓶颈,达到了 89.29% 的检测精度和 0.27 s/果的处理速度。为提升模型在光照变化条件下的稳定性,LIU 等^[19]引入近红外(near infrared, NIR)图像与 RGB 图像融合作为输入,利用 Faster R-CNN 实现多模态特征融合,检测精度达到 91.70%。同时,研究者尝试将 AlexNet、MobileNet、InceptionNet 等轻量化或高效的骨干网络引入 Faster R-CNN 与 SSD 架构,以提升遮挡鲁棒性和满足实时检测要求,在兼顾精度的同时有效控制了计算成本^[20-21]。在面向实时检测的研究中,YOLO 系列网络因其兼顾高精度与检测速度受到广泛关注。针对 YOLOv3-tiny、YOLO-X 等版本,研究者采取网络剪枝、结构重构等优化手段以压缩模型规模、提升检测效率,部分改进模型在复杂光照与重度遮挡条件下仍可保持 90% 以上的识别精度,单帧图像处理时间控制在 10 ms 以内^[22-23]。深度学习算法通过多层次特征抽象与非线性关系建模,显著提升了田间环境下光照变化、枝叶遮挡等挑战性场景的检测性能,其中 YOLO 系列网络及其衍生出的改进模型已成为猕猴桃果实识别的主流技术方案^[24-28]。

2.1.2 果实定位

猕猴桃果实的三维定位是指导后续机械臂运动的基础,如何获取准确的果实位置信息是确保顺利采摘的关键。通过技术实施手段的不同,果实三维空间信息获取可分为主动和被动两种获取方式,其中主动方式多通过深度相机自身传感器直接获取深度信息,利用相机标定参数方法将二维像素坐标转换为三维空间坐标,实现猕猴桃果实的定位实现猕猴桃的三维定位。王滨等^[29]采用飞行时间测距原理的 Kinect V1 相机以测定猕猴桃果实深度,对相机获取原始彩色以及深度图像进行坐标转换与配准,室内环境下经手动选点所得平均深度误差为 2.00 mm,满足采摘的定位需求。然而,基于主动深度获取的视觉定位方法受光线波动干扰影响较大,特别是出于成本考量,多数农业机器人采用的深度相机为消费级产品,应用于环境复杂的开放式猕猴桃果园时,其稳定性以及定位精度难以满足高效采摘需要^[30]。

被动获取方式多基于双目视觉系统,通过立体匹配算法计算出物体的空间坐标,其在复杂环境中的鲁棒性较高,逐渐成为目前采摘机器人的实现果实定位的主要方式。该方法通过目标检测与关键点提取,识别果实边界、重心或果萼等关键特征点,并结合半全局块匹配^[31]、匈牙利匹配^[32]、改进的半全局关键点匹配^[33]等算法实现深度估计与三维坐标计算。LIU 等^[34]采用重叠分块检测策略以提升小目标果萼的检测精度,并对比评估了主流消费级深度相机(RealSense D435、Azure Kinect、ZED 2i)的田间表现,其中 RealSense D435 取得了平均误差

18.33 mm 的最佳性能。进一步地研究中,JING 等^[35]提出一种基于 LaC-Gwc Net 与双阶段滤波的端对端立体匹配算法,以提升复杂光照条件下的冠层图像全分辨率深度估计精度,实测深度误差最低为 4.00 mm。整体来看,当前双目视觉系统结合深度学习算法已基本可实现猕猴桃果实的高精度定位,但在应对强遮挡、强光干扰等非结构化果园环境下仍需进一步提升其稳定性与实时性。

2.1.3 采摘末端执行器设计

猕猴桃采摘末端执行器作为采摘机器人的关键部件,其低损操作性能直接决定了猕猴桃采后品质以及采收成功率。猕猴桃为后熟型果实,形状呈现为较为规则的椭球状,但表皮较为粗糙,多数品种外表面附有绒毛,末端执行器的低损夹持、果实固定、果梗分离方式是影响成功采摘的关键因素^[36]。果实屈服极限力与其物料特性显著相关,分析果实的不同层生物组织的弹性模量、破坏应力和密度^[37],选择合理夹持位置对减小损伤至关重要^[38],张发年等^[39]采取正交试验验证了“海沃德”猕猴桃果实的微损伤力学特性,表明压缩量、加载位置以及压力类型是影响果实无损采收的显著因素,指出采用弹性材料同时从厚度方向夹持,能够提升末端执行器对不同大小果实的适应性。在分离力学研究方面,FANG 等^[40]分析了 5 种常见猕猴桃栽培品种的果实-果柄分离力学特性,指出旋转分离角度显著影响猕猴桃采收成功率,为分离机构参数优化提供了品种特异性数据支撑。

目前猕猴桃采摘多采用“夹持-扭转”方式完成果实与果柄的分离,围绕低损伤、高成功率及多果适配性,不同结构设计的末端执行器被广泛研究。典型方案包括基于电机驱动实现旋转动作的刚性两指结构^[41],基于反凸轮机构的下拉式两指结构^[42]等,这些装置普遍于田间验证了旋转或拉脱角度对分离成功率的影响,对于“海沃德”“红阳”等主栽品种的试验采摘成功率普遍达到 80% 以上。傅隆生等^[43]设计的三自由度两指仿生弧形猕猴桃采摘末端执行器,可从底部以接近、夹持和旋转分离完成毗邻果实的包络与采摘田间测试采摘成功率超过 96.00%。驱动方式方面,充气式执行器因其结构简单、控制响应快受到关注,但固定尺寸设计在应对果径变化时存在局限^[44]。为提高末端操作柔顺性,WILLIAMS 等^[45]提出了线驱多连杆曲柄旋转机构以模拟人手操作过程完成果实抓取与果柄旋转动作;面向簇生果快速采摘,已有研究采用包络切割式结构实现多果并行采收^[46],或结合气囊柔性夹爪与剪切分离方式提升多果采摘效率^[47],最高采摘成功率达 95.00%。部分研究还提出了使用柔性材料、触觉感知以及仿形设计等无损夹持方案,结合硬度感知以及成熟度估计,有望进一步提升猕猴桃智能低损采摘应用^[48-51]。

2.1.4 采摘路径规划

在猕猴桃智能化采摘中,路径规划是确保机器人高效准确作业的核心环节,需兼顾果实与障碍物分布、机器人运动特性及效率。按作业对象和目的,路径规划可分为采收顺序规划和机械臂避障运动规划。采收顺序规划旨在确定机器人在完成多个果实采摘任务时的最优作业次序,实现高效、合理的采摘过程。为避免采摘器碰撞邻近果实造成损伤,WILLIAMS 等^[32,45]将检测到的果

实按分布密度聚类为簇,采用簇内“从远到近”策略采摘,并利用动态调度算法使机械臂在采完一个果实后自动接近最近邻果,直至完成区域采收。实际田间作业中,果实常被铁丝、树枝或其他果实遮挡,仅针对果实规划易导致执行器碰撞风险。为此,SUO等^[52]提出基于YOLOv4的猕猴桃多分类检测方法,将遮挡果视为不可采摘,引导执行器优先采摘无遮挡果,不采摘遮挡果。SONG等^[53]应用DeepLabV3+模型对冠层图像进行语义分割,重建果实、枝条和钢丝目标,为机械臂避障路径规划提供支持,有效防止执行器与树体及棚架结构发生干涉损伤。

机械臂的运动避障规划是指为机械臂从初始位置到目标位置确定一条满足特定约束条件的最优运动轨迹,确保其安全高效移动,同时避免与周围环境中的障碍物发生碰撞。近年来,基于多目标优化的路径规划方法研究取得较大进展。靳惠婷等^[54]针对多关节机械臂初始/目标角加速度非零易引发的振动问题,改进三次样条插值法确保关节角度、速度及加速度连续变化,提升运行平稳性。崔永杰等^[55]建立双臂工作空间等效模型,基于机械臂空间分布及果实位姿构建层约束,采用多目标粒子群优化算法求解采摘平台空间布局参数。此外,针对果园环境高自由度避障难题,基于采样的RRT(rapidly-exploring random tree,快速探索随机树)算法应用广泛,研究者针对其均匀采样效率低的问题进行改进,包括基于采样状态实时引导随机树扩展^[56]、基于高斯混合模型与人工势场策略采样^[57]等。




除机械臂在非结构化环境下的路径规划外,随着能并行完成采摘工作的多机械臂设备的出现,如何通过区域划分避免机械臂之间路径交叉和重复也是一大难点。BARNETT等^[58]结合果实数量分布与空间属性(单果/簇生果),提出采摘序列动态调整方法实现机械臂路径静态规划与动态优化,田间测试双机械臂平均任务分配平衡度为0.94。HE等^[59]将猕猴桃双臂采摘作业规划为多旅行商问题,以头脑风暴优化算法优化采摘顺序,建立双臂参数模型求解机械臂运动和关节位置,利用包围盒空间数学关系检测碰撞,实现双臂协同采摘与动作避障。采用空间分区、动态任务调度与实时碰撞检测成为提升多臂协同效率的技术关键,为多臂高效采摘机器人开发提供了理论支撑。

2.1.5 猕猴桃采摘机器人

猕猴桃采摘机器人是一项高度集成的系统工程,涵盖机械结构、视觉识别、运动控制、末端执行等模块,需应对果园非结构化环境中复杂光照、枝叶遮挡及果实空间分布等挑战。早在2009年,新西兰研究人员SCARFE等^[60]就提出了猕猴桃采收机器人的设想,后由奥克兰大学联合怀卡托大学基于此设计基础开发了搭载三自由度四连杆工业机械臂的采摘机器人原型^[32],设备优化后果园实地测试平均采收成功率为86%,单果平均采收时间为2.78 s^[45,61]。国内研究团队广泛采用工业机械臂开展研究,如西北农林科技大学崔永杰团队基于UR5六轴机械臂研制的采摘机器人,田间实地采摘测试下,单臂采摘成功率达88.70%,单果采摘时间约为6.50 s^[62];进一步研究中,该团队开发了双机械臂采摘作业系统,室内台架试验测试平均采摘成功率提升至93.3%^[55,59]。江苏大学刘继展团队构建了猕猴桃线式四机械臂采摘机器人,采用吞咽切割方法实现果柄同枝蔓分离实现采摘作业,平均作业效率可达1 900次/h^[63-64]。尽管多关节工业机械臂被广泛应用于猕猴桃采摘研究,但其串联结构呈球形工作空间,难以覆盖果实垂直分布的棚架空间,且多机械臂协作中易出现作业空间重叠、资源浪费等问题,仍需开展更契合猕猴桃冠层结构的专用机器人架构设计,并注意果实损伤问题。

为提升猕猴桃采摘效率同时满足行内作业空间覆盖要求,研究人员开始结合猕猴桃生长场景进行专用作业机器人架构研发。BARNETT等^[58]等针对传统关节式机械臂工作空间重叠度低,导致多机协同效率受限的问题,提出了笛卡尔双机械臂采摘架构,采用线性运动模式简化了路径规划的时间与难度,且重叠空间内可动态分配任务,大大提高了采收效率,田间实地测试较双关节机械臂采摘效率提升30.35%,采摘任务分配平衡度提升28.4%。西北农林科技大学傅隆生团队针对猕猴桃种植特点以及果实冠层分布特性,开发了双笛卡尔并联机械臂猕猴桃采摘机器人,基于同步带并联驱动结构设计能够实现一次行域作业覆盖,采用可伸缩Z轴设计有效提升了机器人可用作业空间利用率,田间实地采摘成功率为88.00%,采摘速度约为2 s/个^[65]。不同猕猴桃采摘机器人结构分类与技术特征如表2所示。

表 2 猕猴桃智能采摘机器人总结
Table 2 Summary of intelligent harvesting robot for kiwifruit

采摘机器人类型 Types of harvesting robot	优点 Advantages	缺点 Disadvantages	典型机器人示意图 Diagram of typical robot
多关节串联机械臂式	灵活性高,便于多角度末端执行器位姿调节;多采用工业机械臂模组,可扩展性强	工作空间为球形,面向猕猴桃矩形冠层空间浪费严重;逆运动学求解复杂,复杂冠层下采摘效率受限	
PRP 直线机械臂式	运动学模型解算简单,轨迹规划效率高;线性滑轨运动精准,维护与制造成本低	直线模组与电动推杆密封要求高,室外粉尘环境设备部件磨损度高;自由度有限,采收成功率随簇生果实密度影响严重	
笛卡尔并联机械臂式	三轴直角导轨或同步带驱动,刚性强且可负载性好;矩形工作空间支持多臂阵列式布局,扩展性好且可作业空间广	直角坐标系自由度低,作业灵活性受限;不同轴向刚度不均,轻量化结构易受加速度振动影响	

2.2 猕猴桃智能授粉技术与装备

授粉是猕猴桃生产过中的重要环节, 直接影响果实的结实率以及潜在的发育能力。由于猕猴桃大多为雌雄异株, 自然授粉依赖性强, 但受限于风媒与昆虫授粉效率低、不稳定, 因此需借助辅助授粉实现规模化高品质生产需求^[66]。根据授粉实施手段的不同, 猕猴桃辅助授粉可简易分为人工授粉、机械授粉以及智能授粉三类。其中, 手持电动授粉器已基本取代传统毛笔点授, 成为最为常用的半机械化授粉方式; 大型机械喷粉设备虽效率高, 但存在授粉不均、花粉浪费等问题^[67-68]。为提高作业精度与效率, 智能授粉技术逐步兴起, 围绕花朵识别定位、末端机构设计及花粉精量控制等展开研究, 朝着自主感知与精准传粉方向发展。

2.2.1 花朵识别

花朵识别是猕猴桃智能授粉作业中的首要环节, 其精度与效率直接决定后续作业质量。针对棚架栽培中花朵簇生且朝下开放的农艺特性, 现有研究普遍采用自底向上成像策略, 以准确获取花朵形态与空间信息。深度神经网络凭借其深层特征提取能力, 在复杂背景及光照波动下展现强泛化性, 已成为主导技术。刘浩洲等^[69]通过 K-means 聚类将冠层图像分割为花蕊、花瓣、枝叶及天空 4 类, 再经 CNN 分类识别, 在光照均匀条件下实现 92.50% 识别成功率, 但对重叠度高的雌蕊识别精度有限。LIM 等^[70]对比了基于 Inception V2/NAS 的 SSD 与 Faster R-CNN 模型性能, 跨光照与拍摄距离数据集测试表明, Faster R-CNN Inception V2 以 90.80% 精度最优。然而, 猕猴桃授粉窗口期短 (通常 3~5 d) 且开花不同步, 冠层内花朵开发状态不一, 早期单一类别识别策略仅聚焦花朵与背景区分, 难以满足实际授粉需求。

为避免花朵重复授粉以及非最佳花期授粉造成额外资源浪费, 需要对冠层同时刻花朵的物候期以及不同授粉状态加以区分。LI 等^[71]基于 YOLOv4 提出了一种面向花苞与开放花朵的二分类检测方法, 取得了 91.49% 的平均检测精度, 随后构建了基于 YOLOv5l 的 8 个类别花朵识别框架, 结合欧氏距离实现花簇空间分布判断与花期评估^[72]。针对性别识别需求, PINHEIRO 等^[73]基于 DETR 实现了 94% 的检测精度, 显著优于 YOLOv5n 与 YOLOv8n。为增强对遮挡、粘连情况下的检测能力, 研究人员引入注意力机制^[74-75]、频域与空间域特征融合^[76]、多尺度信息提取结合动态上采样^[77]等方法以改进 YOLO 系列网络, 在区分授粉状态与不同花朵物候方面取得了 94.50% 的最佳检测精度。

2.2.2 花朵定位

花朵定位是实现精准靶向授粉的核心环节, 关键在于获取花朵的二维姿态与三维空间坐标, 为授粉执行器提供作业基准。根据定位目的与技术方案不同, 花朵定位可分为二维姿态估计和三维空间定位, 前者多用于评估花朵自然开放朝向, 后者则用于获取相对于授粉装置的空间坐标。针对花朵密集分布与重力作用导致的姿态偏移, LI 等^[78]提出基于 YOLOv4 与重心拟合的朝向估计法, 通过连接花瓣与花蕊轮廓中心点确定指向。进一步研究中^[79], 其结合节间重叠度定位花簇, 采用 MobileNetV2 检测花瓣重心及花蕊关键点, 最终通过簇内朝向均值估

算花簇整体姿态, 为复杂冠层下的花朵朝向分析提供了可行方案。

猕猴桃花朵三维空间定位多利用双目立体视觉或主动视觉技术, 得到冠层花朵的深度值或空间三维坐标。WILLIAMS 等^[80]搭建了基于 Baslar ac1920-40uc 高动态 RGB 传感器的双目视觉系统, 通过匈牙利算法匹配左右视图检测到花朵目标以实现立体定位。李果^[81]为解决自然光干扰导致的像素深度丢失问题, 提出基于花朵中心与邻域像素的均值深度修正方法, 使用 RealSense D435 测得平均误差为 2.97 mm。总体来看, 现有三维定位普遍采用先在彩色图像中检测花朵, 再将二维坐标映射至深度图获取三维位置, 所得精度基本满足授粉需求。然而, 光照变化与枝叶遮挡等田间干扰因素仍对算法鲁棒性构成挑战, 相关研究正致力于从室内可控环境向实际果园场景的算法迁移与优化^[82-83]。

2.2.3 授粉末端执行器设计

花朵充分授粉是猕猴桃优质果实生产的基础。由于花粉价格高昂且活性易受时间限制而衰减, 除需在适宜花期内授粉外, 还需通过优化末端执行器结构与施粉参数, 实现高效、精准且低损耗的授粉作业。目前主要采用液态湿粉喷施和风送干粉喷施两种技术路径。液态湿粉喷施以调配花粉液作为传输介质, 通过液压或气压方式喷洒至目标花部区域。双流式喷雾是主流方案之一, 通过引入辅助气流提高雾滴雾化效果, 使花粉分布更均匀且射程更远^[84]。石复习等^[85]分析了液体压力、空气压力、喷孔直径等因素对花粉沉积量和分布的影响, 表明气体压力同雾化后花粉液的雾滴粒径直接相关; 当液流量与喷雾距离一定时, 花蕊区域的雾滴覆盖率随气压增加而减小, 而花瓣区域的覆盖率变化不大。针对精量花粉喷施需求, 部分研究引入高精度光栅尺精准控制喷施量^[86], 或配套花粉回收装置防止设备腐蚀^[87], 提升系统稳定性以及沉积效率, 实现资源节约。

针对猕猴桃花朵簇生且不规则分布的生长特性, 多喷头授粉结构被广泛研究用于提升冠层覆盖率与施粉效率, 以期提升授粉效率。相较于单喷头系统, 多喷头设计能更有效覆盖复杂冠层结构, 减少授粉盲区, 提高一次作业的有效花粉喷施面积。现有多喷头数量为 3~20, 基于果园冠层中花簇直径与高度的测量数据, 采用横向排列^[88]、阵列布置^[89]、升降式分布^[80]等结构, 具备可调节喷嘴间距、角度和高度等多维调控能力, 可根据不同树体结构与花位分布灵活调节喷雾形态, 实现对空间变化的高度适应。然而, 液态授粉方式虽在喷施均匀性与沉积控制方面具备优势, 但存在花粉活性随时间快速下降的问题^[90], 尤其在高温、长时间作业环境下更为明显。这使得花粉液的施用受到配比时间、喷施时间与作业效率等多因素制约, 必须在有限时间内完成授粉任务, 否则将影响授粉质量与坐果率。

风送干粉喷施授粉的基本原理同风媒授粉相似, 通过将干燥花粉同稀疏物混合, 机械化作业多采用风机为动力来源, 将花粉颗粒输送至花蕊完成授粉。现有研究针对干粉储存和喷射机制进行优化, 避免了花粉在液体环境中可能出现的团聚或变质问题, 适用于一些对花粉保存条件要求较高的场景。SUN 等^[91]基于计算流体力学

技术仿真并分析了执行器结构参数和输送风速对花粉颗粒沉积和分布的特性的影响,表明不稳定的湍流气相流场会使得花粉颗粒输送发散,导致花粉沉积降低,经台架试验与田间测试确定了风送式干粉授粉器的最佳作业参数并取得了 33.88% 的沉积率。风送干式授粉在花粉施用保存时间以及活性保持方面具有优势,但由于花粉颗粒体积小、质量轻,风送干粉受自然风干扰程度较大,相较于液体湿粉施用面临着更为严重的花粉耗散问题,授粉时需要贴近花蕊区域,对于作业精准度要求更加严格。


2.2.4 猕猴桃授粉机器人

相较于传统人工对花点授劳动强度大,机械化广域喷施授粉存在花粉严重浪费的问题,以靶向式喷施授粉为技术特征的智能机器人授粉被提出作为创新性解决方案。根据设备结构以及对靶策略的不同,猕猴桃授粉机器人可以分为升降或旋转平台对靶以及机械臂式对靶两种实现方式。升降或旋转平台式授粉机器人结构相对简单,成本较低,且多采用移动式授粉作业模式,在一些对灵活性要求不高、种植环境较为规整的果园具有一定适用性。奥克兰大学 WILLIAMS 等^[80,92]开发的移动授粉机器人采用双目视觉识别冠层花朵,调节升降平台控制喷头距花距离,在 3.5 km/h 行驶速度下田间授粉成功

率为 79.50%。西华大学董霖团队研制的压力旋流式喷雾授粉机器人通过调节喷嘴角度实现花簇靶向授粉,2 km/h 速度下模拟测试授粉成功率达 85.00%^[88]。该类平台能够一定程度上调整喷施距离以控制授粉覆盖度,但在地面不平整的果园行进授粉时,其作业的精准度和适应性整体较差。

机械臂式授粉机器人则具备更高灵活性与环境适应性,可根据花朵空间位置与朝向动态调整作业姿态,实现更精准的授粉操作。西北农林科技大学崔永杰团队^[82,93]针对猕猴桃精准液体授粉作业要求,开发了一种六自由度机械臂式授粉机器人,可根据花朵位姿实时调整机械臂作业轨迹与喷头位姿,田间实地测试平均有效授粉率为 81.43%,单花授粉时间为 5 s/朵。西北农林科技大学傅隆生团队充分考虑猕猴桃不同花期花朵的授粉接受度与花朵分布,开发了三自由度串联机械臂式双流单喷头对靶授粉机器人,可实现簇内花朵择优授粉,优化枝条的果实承载量,田间测试对靶授粉坐果率为 88.50%,授粉速度为 2 s/朵,较手持喷雾器广域授粉花粉消耗减少 42.10%,坐果率提高 10.70%^[81];为提升授粉效率,该团队还开发了多喷头花簇对靶授粉机器人,田间测试授粉速度为 1 s/朵,坐果率较单喷头对靶授粉提高 0.48%^[83,89]。不同猕猴桃授粉机器人结构分类与技术特征如表 3 所示。

表 3 猕猴桃智能授粉机器人总结
Table 3 Summary of intelligent pollination robot for kiwifruit

授粉机器人类型 Types of pollination robot	优点 Advantages	缺点 Disadvantages	典型机器人示意图 Diagram of typical robot
升降平台对靶式	结构简单,制造成本低,单次作业可覆盖空间广;移动平台可连续作业,授粉效率高	灵活性有限,仅可实现对靶喷头高度调节,移动授粉受地形限制,易因惯性导致喷雾偏移	
旋转平台对靶式	响应速度快,动态对靶适应性强;机构紧凑,可在一定范围内调整喷头喷施角度,实现定向授粉	旋转部件精度受平台振动影响显著,同步控制要求性较高	
机械臂平台对靶式	具备多自由度,可实现授粉过程中灵活避障;多采用工业机械臂模组,对靶作业精度较高	机械臂运动解算复杂,单位时间授粉效率受限;机械臂驱动与控制系统结构复杂,整体设备投资较高	

2.3 猕猴桃花果智能化管理技术与装备

猕猴桃花果管理是提升产量与品质的核心措施,对产业发展具有重要意义。猕猴桃产业所面临的单产低、优果率低的问题,需要进行科学花果管理以调控果实大小,改善口感与营养品质,提高商品果率和市场竞争力,增加果农收益。疏蕾作为花期管理的关键措施,直接决定坐果分布与果实品质。植株生殖发育具有阶段性特征,从花芽分化至幼果膨大需持续消耗贮藏养分。若花量过大,势必引发养分竞争性消耗,使花穗发育不良、坐果率显著下降^[94]。同时过量的养分消耗还将抑制新梢生长与光合效能,造成幼果期营养短缺,加剧生理落果与单果重降低的恶性循环^[95]。猕猴桃因花量大、花期短且无生理落花,加之疏花窗口期短且要求高,致使人工作业难以有效实施。

相较之下,猕猴桃蕾期更长,花蕾分布相对疏散,作业时机早于花期,使得疏蕾比疏花、疏果更能节省养

分,成为猕猴桃花果管理的首要手段。猕猴桃疏蕾农艺要求去除基部侧蕾,保留顶生花蕾,以获得优质果实^[96]。然而,当前疏蕾主要依赖人工判断,主观性强且标准化难度大;部分手持剪类工具虽提升操作便捷性,但仍未降低人工依赖^[97-98]。化学疏蕾虽能干扰花蕾发育,但其作用机理尚不清晰,且受绿色有机生产要求制约^[99]。因此,研发高效、精准、可控的智能化机械疏蕾装备成为提升作业效率和品质控制的关键。

与疏蕾不同,疏果多在幼果膨大初期进行,主要目的是剔除低质量或过密果实,平衡树体负载,提升果实品质和商品率。猕猴桃坐果率高,若前期花量控制不当,果实过密会导致单果质量下降并增加病害风险。人工疏果效率低、强度大,化学疏果的适用性和安全性仍有待验证。因此,基于视觉感知与智能算法的自动疏果技术成为重要发展方向。通过图像系统识别果实大小、位置和负荷,结合柔性执行器可实现自动去除畸形果、病果、

密集果,提升疏果效率与均衡性。已有研究基于深度学习算法,在苹果^[100-102]、梨^[103]、椰枣^[104]、桃^[105]、葡萄^[106]、石榴^[107-108]等果树上实现了幼果识别,以气吸式与剪切式执行器实现幼果疏除^[109-110]。但猕猴桃幼果与枝条连接紧密,未形成自然分离层,底部成像下果柄遮挡严重,已有执行机构难以满足猕猴桃疏果需求,需结合其生长特性开展适配性分离机制与新型末端结构设计研究。

目前,猕猴桃智能化疏蕾与疏果技术仍处于初步探索阶段,多为概念验证样机,主要由国内科研单位原创开发,国外尚未见系统性研究。南京林业大学程玉柱团队^[111]提出一种人手仿生疏蕾爪,融合 YOLOv8 与 Mask-RCNN 检测结果确定花蕾位置与角度,利用吸附爪与仿生螺纹结构实现精准摘除侧蕾,展示出良好的应用潜力。西北农林科技大学傅隆生团队^[112]构建了集成视觉识别与激光击穿的非接触式疏蕾机器人,采取分块检测方法结合尺寸评估对簇生花蕾进行功能性区分^[113],并通过激光器靶向击穿实现高效作业,实测单花蕾处理时间约 2 s。同时,该团队还开发了基于视觉感知与双刃剪切的猕猴桃疏果机器人^[114],通过目标识别、实例分割及枝条长势判断,结合机械臂由下向上作业实现果实精准疏除与密度调控,有望实现智能化疏果应用。

3 猕猴桃全程智能化生产发展展望

中国猕猴桃产业迅猛发展,总种植面积以及总产量均居世界首位,但果品质量以及单位面积产量稍显劣势,同新西兰、意大利等猕猴桃产业强国相比仍有较大差距。当前,国内猕猴桃生产主体仍以个体散户和家庭经营为主,农艺管理操作粗放,建园分散且大多标准缺失,产业基层“散、乱、弱”问题长期存在。部分老旧果园藤架系统行向紊乱、树形结构郁闭度高,阻碍机械设备通行,同时严重抑制了作业效率,生产关系的碎片化同作业机器人的系统性需求之间的矛盾突出。面对猕猴桃单产水平亟待提升的现实需求,产业整体生产与管理智能化水平不足的根本现状,以及山地果园快速扩张的发展态势,需从生产系统的底层逻辑出发,构建“空间适配-生物适配-技术适配”三位一体的创新框架与智能生产体系。针对目前猕猴桃作业机器人多为单一作业环节样机,落地性差的现实局面,不仅需要先进技术支持,更依赖于农机与农艺的深度融合,通过果园空间重构、植株生长调控与装备性能优化的协同创新,形成适应中国猕猴桃产业特点的智能化生产范式。

3.1 果园宜机化适配

果园作为猕猴桃种植的基础空间与智能化生产的物理载体,其空间布局与地形特征直接影响智能机器人的作业效率与适应性。特别是猕猴桃优良主产区多位于山地丘陵,实现果园的宜机化改造是猕猴桃全程智能化作业体系建设的重要突破口。当前中国猕猴桃产业虽已同世界接轨,但广泛经营的个体农户果园多存在基础设施陈旧、道路狭窄且冠高一致性较差等问题,严重阻碍了农机设备的顺畅通行。因此,针对传统旧式果园改造的首要任务是对道路系统进行升级,依据果园地形地貌设计合理路线,提升作业设备的可通过性。同时,对老旧果园的灌溉系统也亟待改进,传统的大水漫灌方式既浪费

水资源,又难以精准满足果树需求。引入智能化滴灌、喷灌系统,借助土壤湿度传感器、气象监测设备等,实现按需灌溉,提高水资源利用效率,避免因土壤松散、湿滑等问题影响智能化设备的稳定行进与作业效果。

新建果园的规划则要以高起点、高标准的智能化理念为引领。在果园上山下滩的现实发展趋势下,需要综合考量地形、土壤、气候以及交通条件等因素,优先选择地势相对平坦、土壤肥沃、水源充足且靠近交通干线的区域。开展微地形重塑以构建连续作业带,以应对地形破碎、坡度多变等不利地理条件对于机械化与智能化作业的限制;运用先进的测绘技术和地理信息系统,对果园进行精确的地形分析和功能分区,将种植区分成不同的区块,以便根据猕猴桃品种、生长周期实施差异化管理;设置专门的农机停放和维护区域,方便设备的存放与保养;规划合理的仓储物流区域,配备现代化的保鲜和运输设备,确保果实能够高效存储和流通。通过系统化规划,实现从“设备适应地形”向“果园匹配装备”的转变,创造果园空间与装备功能深度匹配的可行条件。

3.2 果树标准化栽培

果树作为实现智能化生产的作业对象与生物主体,其形态结构对作业机器人的识别、定位与作业成效影响显著。小农生产模式下,多存在树形混乱、间距不均、冠层紊乱等现象,使花、果、枝等器官在空间中分布无序,严重影响机器视觉感知与末端执行器路径规划的准确性与精度。因此,需推进基于作业适配需求的标准化栽培模式,按照不同猕猴桃品种的生理特性与管理需求,科学设置株距、行距与冠高,确保果实优质发育的同时为设备提供清晰、可操作的作业路径。

针对粗放式管理导致的果品质量不佳与单产低下,需要构建“生长需求-农艺操作-机械响应”的闭环调控体系,形成贯穿猕猴桃全生长周期的规范化农艺管理新模式。推行农机-农艺协同互作,推动树形结构向标准开放式棚架模式转型;对主枝开张角度、结果母枝间距等植株生长参数进行精确控制,引导并规划枝条有序生长,使冠层中花朵与果实等作业目标呈梯度有序分布,为机器人作业空间适配以及轨迹规划提供生物参考基准;借助智能机器人的感知能力实时获取树体多模态信息,评估植株长势与枝条负载量,反向优化疏花疏果、养分调控、剪枝规划等农艺决策;推动种植模式从“经验主导”向“机艺耦合”转型,形成“农艺需求驱动技术迭代,机械约束引导农艺优化”的双向赋能机制,推动解决植株形态异质化导致的作业效率及质量损失问题。

3.3 设备产业化推进

智能设备作为连接果园空间属性与果树生物特性的工程化媒介,是实现猕猴桃全程智能化生产的核心支撑。针对中国猕猴桃产业高端优质果品比例少、种植品种多样的产业现实,设备研发需突破“精准-柔性-经济”的技术约束,通过智能化升级实现装备性能与产业效益的协同跃升。

1) 一机多用: 模块化架构设计与全周期作业适配

猕猴桃作为典型的多年生果树,其生产周期贯穿全年,各关键作业环节窗口期短,管理作业具有显著的时效性要求。然而,现阶段猕猴桃作业机器人的研发多聚

焦于单一作业环节, 单机使用成本高且需重复购置, 严重影响其在实际生产中的推广与应用。从果树栽培特性来看, 标准化猕猴桃果园已普遍采用藤架式栽培模式, 为多功能作业模块的物理兼容与集成应用提供了一定的结构基础。此外, 猕猴桃不同农事作业在生长周期中具有明显的时间错峰特征, 例如春季疏蕾与授粉、夏季疏果、秋季采摘及冬季修剪等操作在时间上互不重叠, 为实现同一平台设备的模块更换和功能轮作提供了充足的时间冗余。在结构设计层面, 可采用“通用智能底盘+可换作业模块”的架构模式, 底盘集成导航定位、环境感知与能源管理系统, 通过标准化机械/电气接口兼容授粉、采摘、花果管理、枝条修整等功能模块; 开发快速换接技术, 配置电磁快装接头、液压自锁装置、稳定锁紧机构等快接模块, 简化末端执行器的拆装流程, 以缩短作业功能切换时间。实现一机多用能有效减少设备采购成本, 后期维护成本也因设备数量减少而降低, 既满足小农经济的成本敏感特性, 又可通过全周期作业覆盖提升设备利用率。西北农林科技大学傅隆生团队近年针对猕猴桃全程智能化作业的产业需求, 设计了一种结合猕猴桃分时作业目标与多阶段树形结构特征的通用多臂作业机器人, 开展了疏蕾、授粉、疏果、采摘等环节的田间实地测试 (图 2), 仅通过更换不同末端执行器与相匹配作业算法, 即可实现一套架构全作业流程可用, 有望广泛推用于中小规模果园, 助力智能作业机具普及与技术转型。此外, 该智能平台适配猕猴桃树体生长空间分布, 采用的底部正视成像方式在冠层分布特征以及枝条结节形态提取方面具有显著优势, 结合由下向上的作业规划模式, 具备技术迁移并拓展至枝条管理 (修剪、抹芽、定梢) 等全场景智能作业的应用潜力。

2) 精准高效: 智能决策与协同控制的技术突破

打造“感知-决策-执行”的全链路智能闭环, 推动关键技术由单点突破向系统协同演进, 促进智能化作业更加精准高效。针对猕猴桃果园作业目标小、遮挡多、光照复杂等问题, 需强化多源异构数据融合与多尺度目标感知能力。在感知层, 通过激光雷达、深度传感器以及光谱成像设备的协同使用与多模态数据融合, 构建云端跨时空知识图谱, 实现植株器官 (蕾、花、果、枝等) 的毫米级定位与生理状态解析; 在决策层, 结合深度强化学习算法、区块链等技术手段构建动态可跟踪作业模型, 结合数字孪生技术实时映射物理果园的三维生长状态, 利用高精度传感器采集的花朵、果实空间梯度分布、枝条负载阈值等生物参数, 通过多智能体协同优化算法自主规划采摘路径与作业优先级, 实现资源最优分配; 在执行层, 开发适配棚架式种植结构的低成本机械臂与仿生末端执行器, 结合力-位混合控制技术, 开展多臂协同高效作业, 提升作业效率与作业空间覆盖能力。针对山地果园地形复杂性, 可建立装备集群的分布式协同网络, 通过 5G 边缘计算实现多机任务分配与避障响应的高效协同, 解决单机作业覆盖不足与效率受限的痛点。

3) 多品种适配: 农艺驱动与机械柔性控制需求的动态平衡

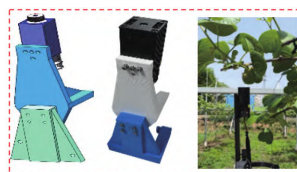
中国猕猴桃种植品种多样, 从中华系的软毛品种到美味系的硬毛品种均有广泛种植, 其枝蔓承载特性、最

佳授粉量需求、果实分离力学特性、果实尺寸及表皮物料特性等差异显著, 因此作业机器人设计需建立“生物特性-机械参数”的量化映射模型, 满足不同品种需要。联合农艺与植物学领域专家, 探明不同猕猴桃品种生理特性以及生长特征, 规划授粉、留果指标; 开发不同品种光截获模型以优化藤架结构, 指导机器人结构设计, 使其作业空间与花朵、果实等直接作业对象的空间分布相匹配; 开展不同品种猕猴桃的果梗物料特性测定、多尺寸果实包络性分析、果实表面摩擦度与物料特性探究, 开发基于触觉、力矩反馈的柔性夹持机构, 设计控制算法动态调节夹持力阈值, 优化执行器与机械臂轨迹规划, 实现果实低损高效分离。坚持农机农艺协同创新设计, 构建“以艺定机、以机促艺”的双向调适机制, 形成品种、农艺与机具的标准化接口, 破解品种多样性带来的通用性困境, 支撑作业机器人在复杂品种体系中的可用性与广泛部署。



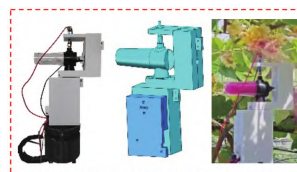
a. 全程智能作业平台

a. Full intelligent operation platform



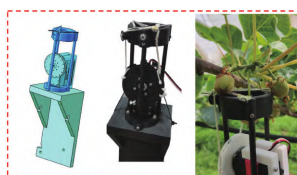
b. 激光疏蕾

b. Bud thinning by laser



c. 静电授粉

c. Pollination by electrostatic powder



d. 剪切疏果

d. Fruit thinning by blade cutting



e. 仿生采收

e. Fruit picking by bionic twisting

图 2 猕猴桃“一机多用”智能作业平台与部分末端执行器

Fig.2 Multifunctional operation platform with partial end-effectors for kiwifruit intelligent operation platform

4 结 论

机器人化智能作业是推动猕猴桃产业现代化、提升生产效率的关键路径。中国猕猴桃产业历经多年发展, 已形成较为完整的规模化种植格局, 并在多个地区建立了特色产区, 栽培模式正从传统经验型走向现代精细化, 其中关键生产环节智能化突破正成为驱动产业提质增效的核心着力点。本文围绕当前猕猴桃生产中人工依赖程度高、智能化需求最为迫切的采摘、授粉、疏蕾、疏果等靶向性精准作业环节, 分析了智能感知系统的精度与鲁棒性、末端执行器的柔性控制能力以及作业机器人的

场景适应性。智能感知系统通过深度学习算法已在目标识别以及三维定位取得一定进展, 但多基于静态场景构建, 动态干扰下泛化能力仍需强化; 执行系统多处于原型开发阶段, 柔性控制与复杂姿态适配能力面向多猕猴桃品种应用尚显不足; 现有作业机器人多聚焦单一作业功能开发, 只有极少数研究针对猕猴桃特有生长模式和农艺需求开展结构优化与功能集成设计; 多机械臂协同作业、地形自适应控制等集成创新处于起步阶段。实现猕猴桃全程智能化生产仍面临一系列挑战:

1) 基础条件适配不足。亟需推进果园宜机化改造与果树标准化栽培, 优化果园空间布局、道路规划及灌溉系统, 提供保障智能化设备高效作业的基础; 通过合理种植设计与生长调控, 为设备提供适配的作业空间与精细化操作条件。

2) 装备适应能力有待提升。需推动一机多用、多品种适配、精准高效等集成创新, 深化农机与农艺融合, 优化设备功能与适配性, 确保其在不同地形与气候条件下的广泛适用性。通过果园空间重构扩大智能机器人可作业空间, 采用植株标准化栽培定义机械操作规范, 以智能化技术为导向约束农艺流程设计, 最终形成农机-农艺协同进化的智能生产体系, 为猕猴桃产业从规模扩张向质量效益转型提供核心驱动力。

[参 考 文 献]

- [1] 钟彩虹, 黄文俊, 赵婷婷, 等. 基于国内外期刊论文分析全球猕猴桃研究与应用进展[J]. *植物科学学报*, 2023, 41(6): 820-834.
ZHONG Caihong, HUANG Wenjun, ZHAO Tingting, et al. Analysis of global Actinidia research and application progress based on domestic and international journal papers[J]. *Plant Science Journal*, 2023, 41(6): 820-834. (in Chinese with English abstract)
- [2] 中华人民共和国农业农村部, 2022 年全国农业机械化发展统计公报: 农业机械化情况 2023(36)[EB/OL]. (2024-06-18)[2025-04-02]. http://www.njhs.moa.gov.cn/nyjxhqk/202406/t20240618_6457395.html.
- [3] 窦汉杰, 陈震宇, 翟长远, 等. 果园智能化作业装备自主导航技术研究进展[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(4): 1-22.
DOU Hanjie, CHEN Zhenyu, ZHAI Changyuan, et al. Research progress on autonomous navigation technology for orchard intelligent equipment[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(4): 1-22. (in Chinese with English abstract)
- [4] MU L, LIU H, CUI Y, et al. Mechanized technologies for scaffolding cultivation in the kiwifruit industry: A review[J]. *Information Processing in Agriculture*, 2018, 5: 401-410.
- [5] Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAOSTAT: Crops and livestock products[EB/OL]. (2025-06-11)[2025-07-17]. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>.
- [6] 李大卫, 黄文俊, 钟彩虹. 中国猕猴桃产业现状及“十五五”发展建议[J]. *果树学报*, 2024, 41(11): 2149-2159.
LI Dawei, HUANG Wenjun, ZHONG Caihong. Current status of China's kiwifruit industry and development recommendations for the “15th Five-Year Plan” [J]. *Journal of Fruit Science*, 2024, 41(11): 2149-2159. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李兰, 杨娜, 程大伟, 等. 猕猴桃栽培架形分析[J]. *中国南方果树*, 2024, 53(3): 295-300.
LI Lan, YANG Na, CHENG Dawei, et al. Analysis on the trellis types of kiwifruit cultivation[J]. *South China Fruits*, 2024, 53(3): 295-300. (in Chinese with English abstract)
- [8] 陕西省果业中心: 猕猴桃十大栽培技术要点[EB/OL]. (2024-10-25)[2025-06-17]. <http://www.guoye.sn.cn/fwzd/42914.jhtml>
- [9] 高文杰, 张锋伟, 戴飞, 等. 果园机械化装备研究进展与展望[J]. *林业机械与木工设备*, 2021, 49(12): 9-20.
GAO Wenjiem, ZHANG Fengwei, DAI Fei, et al. Research progress and prospects of orchard mechanized equipment[J]. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 2021, 49(12): 9-20. (in Chinese with English abstract)
- [10] 苑严伟, 白圣贺, 牛康, 等. 林果机械化采收技术与装备研究进展[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(9): 53-63.
YUAN Yanwei, BAI Shenghe, NIU Kang, et al. Research progress on mechanized harvesting technology and equipment for forest fruit[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(9): 53-63. (in Chinese with English abstract)
- [11] 赵春江, 范贝贝, 李瑾, 等. 农业机器人技术进展、挑战与趋势[J]. *智慧农业 (中英文)*, 2023, 5(4): 1-15.
ZHAO Chunjiang, FAN Beibei, LI Jin, et al. Agricultural robots: Technology progress, challenges and trends[J]. *Smart Agriculture*, 2023, 5(4): 1-15. (in Chinese with English abstract)
- [12] FU L, WANG B, CUI Y, et al. Kiwifruit recognition at nighttime using artificial lighting based on machine vision[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2015, 8(4): 52-59.
- [13] 傅隆生, 孙世鹏, VÁZQUEZ-ARELLANO Manuel, 等. 基于果萼图像的猕猴桃果实夜间识别方法[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(2): 199-204.
FU Longsheng, SUN Shipeng, VÁZQUEZ-ARELLANO Manuel, et al. Kiwifruit recognition method at night based on fruit calyx image[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(2): 199-204. (in Chinese with English abstract)
- [14] FU L, TOLA E, AL-MALLAHI A, et al. A novel image processing algorithm to separate linearly clustered kiwifruits[J]. *Biosystems Engineering*, 2019, 183: 184-195.
- [15] 陈礼鹏, 穆龙涛, 刘浩洲, 等. 基于猕猴桃果萼图像的多目标果实识别方法[J]. *计算机工程与设计*, 2018, 39(6): 1738-1744.
CHEN Lipeng, MU Longtao, LIU Haozhou, et al. Multi-target fruit recognition method based on kiwifruit calyx image[J]. *Computer Engineering and Design*, 2018, 39(6): 1738-1744. (in Chinese with English abstract)
- [16] LIU D, SHEN J, YANG H, et al. Recognition and localization of actinidia arguta based on image recognition[J]. *Eurasip*

- Journal on Image and Video Processing, 2019(1): 1-8.
- [17] 詹文田, 何东健, 史世莲. 基于 Adaboost 算法的田间猕猴桃识别方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 140-146.
ZHAN Wentian, HE Dongjian, SHI Shilian. Recognition of kiwifruit in field based on Adaboost algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(23): 140-146. (in Chinese with English abstract)
- [18] 傅隆生, 冯亚利, ELKAMIL Tola, 等. 基于卷积神经网络的田间多簇猕猴桃图像识别方法[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 205-211.
FU Longsheng, FENG Yali, ELKAMIL Tola, et al. Image recognition method of multi-cluster kiwifruit in field based on convolutional neural networks[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(2): 205-211. (in Chinese with English abstract)
- [19] LIU Z, WU J, FU L, et al. Improved kiwifruit detection using pre-trained VGG16 with RGB and NIR information fusion[J]. IEEE Access, 2020, 8: 2327-2336.
- [20] 穆龙涛, 高宗斌, 崔永杰, 等. 基于改进 AlexNet 的广域复杂环境下遮挡猕猴桃目标识别[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 24-34.
MU Longtao, GAO Zongbin, CUI Yongjie, et al. Kiwifruit detection of far-view and occluded fruit based on improved AlexNet[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 24-34. (in Chinese with English abstract)
- [21] ZHOU Z, SONG Z, FU L, et al. Real-time kiwifruit detection in orchard using deep learning on AndroidTM smartphones for yield estimation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 179: 105856.
- [22] FU L, FENG Y, WU J, et al. Fast and accurate detection of kiwifruit in orchard using improved YOLOv3-tiny model[J]. Precision Agriculture, 2021, 22(2): 754-776.
- [23] ZHOU J, HU W, ZOU A, et al. Lightweight detection algorithm of kiwifruit based on improved YOLOX-S[J]. Agriculture, 2022, 12: 993.
- [24] WANG J, XU L, MEI S, et al. Fast and accurate detection of kiwifruits in the natural environment using improved YOLOv4[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2024, 17(5): 222-230.
- [25] GAO J, DAI S, HUANG J, et al. Kiwifruit detection method in orchard via an improved light-weight YOLOv4[J]. Agronomy, 2022, 12: 2081.
- [26] YANG Y, SU L, ZONG A, et al. A new kiwi fruit detection algorithm based on an improved lightweight network[J]. Agriculture, 2024, 14: 1823.
- [27] 刘博文, 徐卫平, 徐钦, 等. 基于改进 YOLOX 的猕猴桃分类识别与空间定位[J]. 国外电子测量技术, 2024, 43(4): 133-142.
LIU Bowen, XU Weiping, XU Qin, et al. Classification identification and spatial localization of kiwifruit based on the improved YOLOX[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2024, 43(4): 133-142. (in Chinese with English abstract)
- [28] SUN W, TIAN Y, WANG Q, et al. Improved detector in orchard via top-to-down texture enhancement and adaptive region-aware feature fusion[J]. Complex and Intelligent Systems, 2024, 10: 2811-2823.
- [29] 王滨, 陈子啸, 傅隆生, 等. 基于 Kinect 传感器的猕猴桃果实空间坐标获取方法[J]. 农机化研究, 2016, 38(5): 232-236, 241.
WANG Bin, CHEN Zixiao, FU Longsheng, et al. A method of acquiring kiwi fruit coordinate in space based on Kinect[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(5): 232-236, 241. (in Chinese with English abstract)
- [30] FU L, GAO F, WU J, et al. Application of consumer RGB-D cameras for fruit detection and localization in field: A critical review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 177: 105687.
- [31] LI L, HE Z, LI K, et al. Object detection and spatial positioning of kiwifruits in a wide-field complex environment[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 223: 109102.
- [32] WILLIAMS H, JONES M, NEJATI M, et al. Robotic kiwifruit harvesting using machine vision, convolutional neural networks, and robotic arms[J]. Biosystems Engineering, 2019, 181: 140-156.
- [33] GAO C, JIANG H, LIU X, et al. Improved binocular localization of kiwifruit in orchard based on fruit and calyx detection using YOLOV5x for robotic picking[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 217: 108621.
- [34] LIU X, JING X, JIANG H, et al. Performance evaluation of newly released cameras for fruit detection and localization in complex kiwifruit orchard environments[J]. Journal of Field Robotics, 2024, 41(4): 881-894.
- [35] JING X, JIANG H, NIU S, et al. End-to-end stereo matching network with two-stage partition filtering for full-resolution depth estimation and precise localization of kiwifruit for robotic harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 225: 109333.
- [36] 谷新运, 崔永杰. 猕猴桃果实相向运动采摘模式的研究[J]. 农机化研究, 2018, 40(5): 215-219, 224.
GU Xinyun, CUI Yongjie. Study on picking pattern of kiwifruit relative movement[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(5): 215-219, 224. (in Chinese with English abstract)
- [37] LI Z, HE Z, HAO W, et al. Kiwifruit harvesting damage analysis and verification[J]. Processes, 2023, 11: 598.
- [38] 钟金鹏, 陈丰, 童以, 等. 椭球型蔬果采摘力学特性分析[J]. 安徽科技学院院报, 2023, 37(5): 51-56.
ZHONG Jinpeng, CHEN Feng, TONG Yi, et al. Experimental analysis of mechanical characteristics of ellipsoidal fruit and vegetable picking[J]. Journal of Anhui Science and Technology University, 2023, 37(5): 51-56. (in Chinese with English abstract)
- [39] 张发年, 李楨, 王滨, 等. 猕猴桃果实物理参数与损伤因

- 素的研究[J]. *农机化研究*, 2014, 36(11): 141-145.
- ZHANG Fanian, LI Zhen, WANG Bin, et al. Study on kiwifruit physical parameters and damage factors[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2014, 36(11): 141-145. (in Chinese with English abstract)
- [40] FANG W, WU Z, LI W, et al. Fruit detachment force of multiple varieties kiwifruit with different fruit-stem angles for designing universal robotic picking end-effector[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 213: 108225.
- [41] 陈军, 王虎, 蒋浩然, 等. 猕猴桃采摘机器人末端执行器设计[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(10): 151-154, 199.
- CHEN Jun, WANG Hu, JIANG Haoran, et al. Design of end-effector for kiwifruit harvesting robot[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(10): 151-154, 199. (in Chinese with English abstract)
- [42] MU L, CUI G, LIU Y, et al. Design and simulation of an integrated end-effector for picking kiwifruit by robot[J]. *Information Processing in Agriculture*, 2020, 7: 58-71.
- [43] 傅隆生, 张发年, 槐岛芳德, 等. 猕猴桃采摘机器人末端执行器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(3): 1-8.
- FU Longsheng, ZHANG Fanian, GEJIMA Yoshinori, et al. Development and experiment of end-effector for kiwifruit harvesting robot[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(3): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [44] HE Z, LI Z, DING X, et al. Design and experiment of end effect for kiwifruit harvesting based on optimal picking parameters[J]. *INMATEH-Agriculture Engineering*, 2023, 69(1): 325-334.
- [45] WILLIAMS H, TING C, NEJATI M, et al. Improvements to and large-scale evaluation of a robotic kiwifruit harvester[J]. *Journal of Field Robotics*, 2020, 37: 187-201.
- [46] FU M, GUO S, CHEN A, et al. Design and experimentation of multi-fruit envelope-cutting kiwifruit picking robot[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1338050.
- [47] 王睿远, 王佳虹, 晏毓, 等. 包覆式猕猴桃气动无损采摘机构设计与试验[J]. *中国农机化学报*, 2024, 45(6): 26-31, 41.
- WANG Ruiyuan, WANG Jiahong, YAN Yu, et al. Design and experiment of pneumatic non-destructive picking mechanism for coated kiwi fruit[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2024, 45(6): 26-31, 41. (in Chinese with English abstract)
- [48] JIN L, WANG Z, TIAN S, et al. Grasping perception and prediction model of kiwifruit firmness based on flexible sensing claw[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 215: 108389.
- [49] SUN Y, ZHANG Q, CHEN X. Design and analysis of a flexible robotic hand with soft fingers and a changeable palm[J]. *Advanced Robotics*, 2020, 34(16): 1041-1054.
- [50] HAN Y, YU K, BATRA R, et al. Learning generalizable vision-tactile robotic grasping strategy for deformable objects via transformer[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2025, 30(1): 554-566.
- [51] ERUKAINURE F, PARQUE V, HASSAN M, et al. Estimating the stiffness of kiwifruit based on the fusion of instantaneous tactile sensor data and machine learning schemes[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 201: 107298.
- [52] SUO R, GAO F, ZHOU Z, et al. Improved multi-classes kiwifruit detection in orchard to avoid collisions during robotic picking[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 182: 106052.
- [53] SONG Z, ZHOU Z, WANG W, et al. Canopy segmentation and wire reconstruction for kiwifruit robotic harvesting[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 181: 105933.
- [54] 靳惠婷, 林蜀云, 梁勇, 等. 基于改进 RRT 算法的六轴机械臂路径规划[J]. *机械设计与制造工程*, 2025, 54(2): 36-40.
- JIN Huiting, LIN Shuyun, LIANG Yong, et al. Path and trajectory planning of six-axis manipulator based on improved RRT algorithm[J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2025, 54(2): 36-40. (in Chinese with English abstract)
- [55] 崔永杰, 马利, 何智, 等. 基于最优空间的猕猴桃双臂并行采摘平台设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(8): 132-143.
- CUI Yongjie, MA Li, HE Zhi, et al. Design and experiment of dual manipulators parallel harvesting platform for kiwifruit based on optimal space[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(8): 132-143. (in Chinese with English abstract)
- [56] 崔永杰, 王寅初, 何智, 等. 基于改进 RRT 算法的猕猴桃采摘机器人全局路径规划[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(6): 151-158.
- CUI Yongjie, WANG Yinchu, HE Zhi, et al. Global path planning of kiwifruit harvesting robot based on improved RRT algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(6): 151-158. (in Chinese with English abstract)
- [57] LI X, LV H, ZENG D, et al. An improved multi-objective trajectory planning algorithm for kiwifruit harvesting manipulator[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 65689-65699.
- [58] BARNETT J, DUKE M, AU C, et al. Work distribution of multiple cartesian robot arms for kiwifruit harvesting[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 169: 105202.
- [59] HE Z, MA L, WANG Y, et al. Double-arm cooperation and implementing for harvesting kiwifruit[J]. *Agriculture*, 2022, 12: 1763.
- [60] SCARFE A, FLEMMER R, BAKKER H, et al. Development of an autonomous kiwifruit picking robot[C]// 2009 4th International Conference on Autonomous Robots and Agents. Wellington, New Zealand: IEEE, 2009: 380-384.
- [61] AU C, LIM S, DUKE M, et al. Integration of stereo vision system calibration and kinematic calibration for an autonomous kiwifruit harvesting system[J]. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 2023, 7: 350-369.
- [62] MA L, HE Z, ZHU Y, et al. A method of grasping detection for kiwifruit harvesting robot based on deep learning[J].

- Agronomy*, 2022, 12: 3096.
- [63] 金煜杰. 四臂猕猴桃采摘机器人的吞咽切割式手臂设计与高速并行规划控制[D]. 镇江: 江苏大学, 2024.
JIN Yujie. Swallowing and Cutting Arm Design and High-Speed Parallel Planning Control of Four-arm Kiwi Picking Robot[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2024. (in Chinese with English abstract)
- [64] 刘继展, 江应星. 农业采摘机器人产业化进程分析与多臂高速化技术走向[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(10): 1-17.
LIU Jizhan, JIANG Yingxing. Industrialization trends and multi-arm technology direction of harvesting robots[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(10): 1-17. (in Chinese with English abstract)
- [65] 房文泰. 基于机器视觉的双笛卡尔并联机械臂猕猴桃采摘机器人研发[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
FANG Wentai. Machine Vision-based Dual Cartesian-Parallel-Arm Kiwifruit Harvester[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024. (in Chinese with English abstract)
- [66] 赵艳丽, 李春游, 李鑫. 猕猴桃授粉方法与标准化发展[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(7): 24-27.
ZHAO Yanli, LI Chunyou, LI Xin. Standardization-based pollination methods of kiwifruit[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45(7): 24-27. (in Chinese with English abstract)
- [67] ASTEGGIANO L, GIORDANI L, BEVILACQUA A, et al. Ten years of research on complementary pollination of kiwifruit[J]. *Acta Horticulturae*, 2011, 913: 615-620.
- [68] TACCONI G, MICHELOTTI V, CACIOPPO O, et al. Kiwifruit pollination: The interaction between pollen quality, pollination systems and flowering stage[J]. *Journal of Berry Research*, 2016, 6(4): 417-426.
- [69] 刘浩洲, 陈礼鹏, 穆龙涛, 等. 基于 K-means 聚类的猕猴桃花朵识别方法[J]. *农机化研究*, 2020, 42(2): 22-26.
LIU Haozhou, CHEN Lipeng, MU Longtao, et al. A recognition method of kiwifruit flowers based on K-means clustering[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2020, 42(2): 22-26. (in Chinese with English abstract)
- [70] LIM J, AHN H, NEJATI M, et al. Deep neural network based real-time kiwi fruit flower detection in an orchard environment[EB/OL]. arXiv: 2006.04343(2020-06-08). <https://arxiv.org/pdf/2006.04343>.
- [71] LI G, SUO R, ZHAO G, et al. Real-time detection of kiwifruit flower and bud simultaneously in orchard using YOLOv4 for robotic pollination[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 193: 106641.
- [72] LI G, FU L, GAO C, et al. Multi-class detection of kiwifruit flower and its distribution identification in orchard based on YOLOv5l and Euclidean distance[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 201: 107342.
- [73] PINHEIRO I, MOREIRA G, MAGALHÃES S, et al. Deep learning based approach for actinidia flower detection and gender assessment[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 24452.
- [74] 龚惟新, 杨珍, 李凯, 等. 基于改进 YOLOv5s 的自然环
境下猕猴桃花朵检测方法[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(6): 177-185.
GONG Weixin, YANG Zhen, LI Kai, et al. Detecting kiwi flowers in natural environments using an improved YOLOv5s[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(6): 177-185. (in Chinese with English abstract)
- [75] 于强, 石复习. 基于轻量化改进 YOLOv5s 的猕猴桃花期识别方法[J]. *中国农机化学报*, 2025: 46 (5): 106-114.
YU Qiang, SHI Fuxi. Kiwifruit flowering recognition method based on lightweight improved YOLOv5s[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2025, 46(5): 106-114. (in Chinese with English abstract)
- [76] PAN F, HU M, DUAN X, et al. Enhancing kiwifruit flower pollination detection through frequency domain feature fusion: A novel approach to agricultural monitoring[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1415884.
- [77] 刘健江, 李书琴. 基于改进 YOLOv8n 的密集分布猕猴桃花期检测方法[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(12): 172-181.
LIU Jianjiang, LI Shuqin. Method for detecting densely distributed kiwifruit flowering period based on improved YOLOv8n[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2025, 41(12): 172-181. (in Chinese with English abstract)
- [78] LI K, ZHAI L, PAN H, et al. Identification of the operating position and orientation of a robotic kiwifruit pollinator[J]. *Biosystems Engineering*, 2022, 222: 29-44.
- [79] LI K, GONG W, SHI Y, et al. Predicting positions and orientations of individual kiwifruit flowers and clusters in natural environments[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 211: 108039.
- [80] WILLIAMS H, NEJATI M, HUSSEIN S, et al. Autonomous pollination of individual kiwifruit flowers: Toward a robotic kiwifruit pollinator[J]. *Journal of Field Robotics*, 2020, 37(2): 246-262.
- [81] 李果. 基于视觉感知和双流式喷雾的猕猴桃精准授粉装置研发[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
LI Guo. Accurate Pollination Device of Kiwifruit Based on Vision Perception and Air-Liquid Spray[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [82] 李凯. 猕猴桃精准对靶喷雾授粉方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
LI Kai. Precision Target Spray Pollination Method of Kiwifruit[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024. (in Chinese with English abstract)
- [83] 高常青. 基于花朵分布和多喷头对靶的猕猴桃授粉机器人及执行策略研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
GAO Changqing. Multi-Nozzle Targeting Kiwifruit Pollination Robot Based on Flower Distribution and Execution Strategy[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024. (in Chinese with English abstract)
- [84] 朱余乐, 吴玉新, 冯乐乐, 等. 双流体雾化喷嘴的液膜模型[J]. *清华大学学报 (自然科学版)*, 2017, 57(11):

- 1228-1232.
ZHU Yule, WU Yuxin, FENG Lele, et al. Liquid film model for the flow in a twin-fluid atomization nozzle[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2017, 57(11): 1228-1232. (in Chinese with English abstract)
- [85] 石复习, 蒋宗谨, 马驰, 等. 双流体喷嘴靶向授粉沉积量控制参数研究[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(12): 115-124. SHI Fuxi, JIANG Zongjin, MA Chi, et al. Controlled parameters of targeted pollination deposition by air-liquid nozzle[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(12): 115-124. (in Chinese with English abstract)
- [86] HAO W, DING X, HE Z, et al. Development and evaluation of precision liquid pollinator for kiwifruit[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 213: 108193.
- [87] GAO C, HE L, FANG W, et al. A novel pollination robot for kiwifruit flower based on preferential flowers selection and precisely target[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 207: 107762.
- [88] 曾高升, 董霖, 任洋, 等. 压力旋流喷嘴靶向喷雾猕猴桃授粉机器研究[J]. *四川农业与农机*, 2023, 6: 31-34, 37.
- [89] GAO C, HE L, DING Y, et al. A novel multinozzle targeting pollination robot for clustered kiwifruit flowers based on air-liquid dual-flow spraying[J]. *Journal of Field Robotics*, 2025, 42(5): 2136-2150.
- [90] HE L, LIU X, DING Y, et al. Advancements in artificial pollination of crops : From manual to autonomous[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2025, 231: 110067.
- [91] SUN J, WANG D, XIAO X, et al. Study of pollen deposition performance of an airflow-assisted targeted pollinating device for kiwi fruit flower[J]. *Biosystems Engineering*. 2025, 251: 31-47.
- [92] WILLIAMS H, BELL J, NEJATI M, et al. Evaluating the quality of kiwifruit pollinated with an autonomous robot[J]. *Field Robotics*, 2021, 1(1): 231-252.
- [93] LI K, HUO Y, LIU Y, et al. Design of a lightweight robotic arm for kiwifruit pollination[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 198: 107114.
- [94] 王男麒, 彭良志, 邢飞, 等. 柑橘落花落果的营养元素含量及其脱落损耗[J]. *园艺学报*, 2013, 40(12): 2489-2496. WANG Nanqi, PENG Liangzhi, XING Fei, et al. Nutrient element content in dropped flowers and young fruits and nutrient losses caused by their drops in citrus[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2013, 40(12): 2489-2496. (in Chinese with English abstract)
- [95] MAZINANI M, ZARAFSHAN P, DEGHANI M, et al. Design and analysis of an aerial pollination system for walnut trees[J]. *Biosystems Engineering*, 2023, 225: 83-98.
- [96] 金方, 敖学, 冯世华. 疏花疏果对猕猴桃果实大小和产量的影响[J]. *贵州农业科学*, 2004, 32(5): 10-11. JIN Fang, AO Xue, FENG Shihua. Effects of thinning flower and fruit on fruit weigh and yield of Chinese gooseberry[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2004, 32(5): 10-11. (in Chinese with English abstract)
- [97] 张宇文, 毋万来, 赵保平, 等. 新型果树疏花疏果双口剪和双体剪[J]. *落叶果树*, 2020, 52(2): 68.
- [98] 张宇文, 毋万来, 孟庆立, 等. 一种猕猴桃疏蕾疏花并体剪: 201921343557. X[P]. (2020-07-28)[2025-06-18].
- [99] 张珩, 王潇, 朱红红, 等. 阔实在‘农大金猕’猕猴桃上的疏蕾应用研究[J]. *果蔬资源学报*, 2023, 4(5): 27-31. ZHANG Heng, WANG Xiao, ZHU Honghong, et al. Effect of bud thinning of Kuoshi on ‘Nongda Jinmi’ kiwifruit[J]. *Journal of Fruit Resources*, 2023, 4(5): 27-31. (in Chinese with English abstract)
- [100] HUSSAIN M, HE L, SCHUPP J, et al. Green fruit segmentation and orientation estimation for robotic green fruit thinning of apples[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 207: 107734.
- [101] 宋怀波, 马宝玲, 尚钰莹, 等. 基于 YOLOv7-ECA 模型的苹果幼果检测[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(6): 233-242. SONG Huaibo, MA Baolin, SHANG Yuyin, et al. Detection of young apple fruits based on YOLOv7-ECA model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(6): 233-242. (in Chinese with English abstract)
- [102] 宋怀波, 江梅, 王云飞, 等. 融合卷积神经网络与视觉注意机制的苹果幼果高效检测方法[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(9): 297-303. SONG Huaibo, JIANG Mei, WANG Yunfei, et al. Efficient detection method for young apples based on the fusion of convolutional neural network and visual attention mechanism[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(9): 297-303. (in Chinese with English abstract)
- [103] LU Y, DU S, JI Z, et al. ODL Net: Object detection and location network for small pears around the thinning period[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023, 212: 108115.
- [104] BAR-SHIRA O, COHEN Y, SHOSHAN T, et al. Artificial medjool date fruit bunch image synthesis: Towards thinning automation[J]. *Journal of the ASABE*, 2023, 66(2): 275-284.
- [105] FAN J, SALAM M, RONG X, et al. Peach fruit thinning image detection based on improved YOLOv8 and data enhancement techniques[J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 191199-191218.
- [106] 张传栋, 高鹏, 亓璐, 等. 基于 SAW-YOLOv8n 的葡萄幼果轻量化检测方法[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(10): 286-294. ZHANG Chuandong, GAO Peng, QI Lu, et al. Lightweight detection method for young grape cluster fruits based on SAW-YOLOv8n[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(10): 286-294. (in Chinese with English abstract)
- [107] WANG J, LIU M, DU Y, et al. PG-YOLO: An efficient detection algorithm for pomegranate before fruit thinning[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2024, 134: 108700.
- [108] DU Y, HAN Y, SU Y, et al. A lightweight model based on you only look once for pomegranate before fruit thinning in

- complex environment[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2024, 137: 109123.
- [109] JANGALI R, MCGUINNESS B, LIM H, et al. Development of a novel multipurpose robotic end effector for fruitlet thinning and fruit harvesting of apples[C]// 2024 IEEE 20th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Bari, Italy: IEEE, 2024: 2073-2078.
- [110] HUSSAIN M, HE L, SCHUPP J, et al. Green fruit removal dynamics for development of robotic green fruit thinning end-effector[J]. *Journal of the ASABE*, 2022, 65(4): 779-788.
- [111] 程玉柱, 李赵春, 余伟, 等. 一种猕猴桃仿生疏蕾爪及其控制方法: 202311407040.3[P]. (2024-06-21)[2025-06-18].
- [112] 傅隆生, 党浩杰, 刘国良, 等. 一种基于机器视觉与激光的猕猴桃精准疏蕾机器人: 202322075272.5[P]. (2024-03-29)[2025-06-18].
- [113] DANG H, HE L, SHI Y, et al. Growth characteristics based multi-class kiwifruit bud detection with overlap-partitioning algorithm for robotic thinning[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2025, 229: 109715.
- [114] 傅隆生, 史宇飞, 李瑞. 一种基于视觉感知与双刃剪切的猕猴桃疏果机器人: 202410231107.0[P]. (2024-02-29)[2025-06-18].

Research progress of the kiwifruit operation robots and prospects for fully intelligent production

HE Leilei¹, GU Yu¹, XIA Man¹, LI Rui¹, ZHANG Qin², FU Longsheng^{1,3*}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Center for Precision & Automated Agricultural System, Washington State University, Washington 99350, USA; 3. Key Laboratory of Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling 712100, China)

Abstract: Kiwifruit is recognized as a favorite fruit crop in China, due to the significant economic and nutritional value. However, the large-scale production has still remained largely on the manual labor, particularly in the key operations, such as the pollination, pruning, thinning, and harvesting. Efficiency and quality are often required in its rapid industrial expansion in recent years, due to the highly labor-intensive and time-sensitive. It is a pressing need for the labor-saving, precise, and reliable alternatives in industry, with the increasing cost of seasonal labor. Among them, the agricultural robots have received growing attention in kiwifruit production. As a representative direction of smart agriculture, the agricultural robots can typically integrate the machine vision, intelligent decision-making, and automated execution. The broad application prospects can also improve the precision for the standardized management of the orchards throughout the year. Multi-degree-of-freedom manipulators, and environment-aware perception modules can also suitable for the complex environment of field orchard. This study aims to systematically review the recent technologies in the kiwifruit robots, particularly on their system structures, perception strategies, motion planning, and end-effector designs. The robot enabling technology was also examined to clarify the current research landscape and development bottlenecks in intelligent horticulture. Special emphasis was placed on the robotic applications during pollination and harvesting. The system performance was evaluated to fully meet the short operation windows and high accuracy requirements. Meanwhile, the intelligent robotic equipment was integrated into the broader context of fully intelligent kiwifruit production (such as bud and young fruit thing, as well as branch pruning). The entire production cycle was involved the sensing, decision-making, execution, and feedback. The selective operation techniques were further enhanced the production efficiency. The targeted interventions were employed to manage only the necessary fruits, flowers, or buds. This selective process was optimized the resource use for the overall productivity without excessive input. Furthermore, a comprehensive framework was also proposed to adapt the intelligent technologies in real-world orchards, including the spatial compatibility between robotic equipment and orchard infrastructure, biological coordination with the phenological development of crops, and the modularity in equipment design to accommodate diverse operational scenarios. The need was highlighted to coordinate the planning in orchard, the standardization in cultivation practices, and equipment innovation. An integrated production was fully met the demands of modern fruit farming. Representative case studies and experimental results were presented to assess the feasibility, efficiency, and practical challenges after robotic deployment in kiwifruit production. Strategic guidance can also provide for the future innovation, standardization, and industrial application, ultimately supporting the transition toward a fully automated, efficient, and sustainable kiwifruit production.

Keywords: kiwifruit; intelligentization; standardization; agricultural robots; artificial intelligence

西北农林科技大学猕猴桃全程智能化生产团队

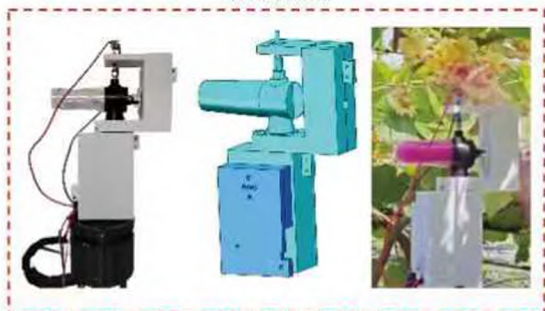
团队致力于果园全程智能化生产的关键技术与装备研究，在猕猴桃疏蕾、授粉、疏果、采摘、剪枝等自动作业机器人及低成本农用机械臂等方面取得显著成果。针对猕猴桃棚架栽培、利于机械化作业特点，团队深度调研猕猴桃生产与农艺现状，提出人指仿生的猕猴桃采摘机理及“快速连贯-多机械手协同”采摘方法、基于花粉颗粒静电吸附与优势花朵选择的猕猴桃精量授粉方法、基于侧蕾空间分布与能量最优富集的激光穿透式对靶疏蕾方法、基于枝条负载评估和果实长势判别的线驱动环割疏果方法、基于冬芽分布与枝条长势判别的双刃力反馈式剪枝方法，开发契合猕猴桃植株生长的“竖直向上”取像方式和多分类精准目标识别方法，创制基于笛卡尔结构的多臂协同机器人作业平台与基于机械手快拆设计的农用低成本猕猴桃果园作业机械臂，实现一套架构全作业流程可用。团队还在果园智能信息感知与智慧精准管理方面取得了多项创新成果：面向猕猴桃果实品质评估与实地分级需求，设计基于机器视觉的小型移动式在线检测与品质评估系统、基于重量检测与果形评估的小型就地分级系统；契合农业数字化发展，开发手机为新农具服务三农生产，实现了猕猴桃与苹果的果实计数、品种判别、智能测产与表型评估。此外团队结合无人机平台，构建多源与多尺度数据融合方法，实现猕猴桃叶片黄化检测评级、马铃薯表型测定，服务农业低空经济发展。



环割疏果执行器



激光疏蕾执行器



静电授粉执行器



人手仿生采摘执行器



猕猴桃智能作业机器人



猕猴桃就地分级系统



傅隆生，教育部长江学者奖励计划青年学者，西北农林科技大学教授、博士生导师，中国农业大学本硕博、日本北海道大学博士、美国华盛顿州立大学博士后，中科院一区 Top 期刊 Computers and Electronics in Agriculture (IF5: 9.3) 主编、中科院基础版一区 Top 期刊 Precision Agriculture (IF5: 7.4) 副主编、中国 SCI 期刊 International Journal of Agricultural and Biological Engineering (IF5: 2.4) 栏目编辑，农业电子的国际、国家标准委员会委员。发表一作/通讯 SCI 论文 52 篇 (ESI 高被引 8 篇)，授权国际专利 2 项、中国发明专利 14 项，制定标准 2 项，获省部级科技奖 2 项。入选 World top 2% scientists (全球前 2% 科学家榜单)、爱思唯尔“中国高被引学者”榜单、中国知网高被引学者 Top1%、陕西省高校青年杰出人才、北京优秀毕业生。主持国家自然科学基金等国家级项目 8 项、陕西省重点研发计划特色产业创新链 (群) 项目等省部级项目 6 项、企业横向项目 9 项。兼任陕西省猕猴桃产业体系智能机械岗位专家、西安市农业机械化服务体系农机智能化岗位专家。