

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2026.01.020

怀宝宇, 熊晨焜, 雷永杰, 等. 农林采摘机器人末端执行器研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2026, 47(1): 140-146, 159

Huai Baoyu, Xiong Chenkun, Lei Yongjie, et al. Research status and development trend of end-effectors for agricultural and forestry picking robots [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2026, 47(1): 140-146, 159

农林采摘机器人末端执行器研究现状与发展趋势^{*}

怀宝宇¹, 熊晨焜¹, 雷永杰², 周建波¹

(1. 国家林业和草原局哈尔滨林业机械研究所, 哈尔滨市, 150086;

2. 东北林业大学机电工程学院, 哈尔滨市, 150040)

摘要: 我国林果、蔬菜产量居世界前列, 为实现果蔬采收降本增效, 推动机械化、自动化采收作业是必然趋势。末端执行器作为采摘功能的直接执行单元, 其性能水平对果蔬收获效率和质量有直接影响。通过介绍国内外农林采摘机器人末端执行器的结构形式以及智能控制方法在末端执行器中的应用, 分析当前末端执行器的研究现状。指出末端执行器存在缺乏针对非结构化环境下的设计与试验, 采摘过程易损伤果蔬表面, 采摘成本高等问题。针对当前问题, 从机艺融合、深化智能控制技术应用、多体协同采摘作业、提高设备通用性和实用性等方面提出建议, 以为农林采摘机器人末端执行器的发展提供参考。

关键词: 末端执行器; 采摘机器人; 智能控制; 机械化; 自动化

中图分类号: S225.93; TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-5553 (2026) 01-0140-08

Research status and development trend of end-effectors for agricultural and forestry picking robots

Huai Baoyu¹, Xiong Chenkun¹, Lei Yongjie², Zhou Jianbo¹

(1. Harbin Institute of Forestry Machinery, National Forestry and Grassland Administration, Harbin, 150086, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, 150040, China)

Abstract: Chinese forest fruit and vegetable output ranks among the top in the world, in order to achieve cost reduction and efficiency increase in fruit and vegetable harvesting, it is an inevitable trend to promote mechanized and automated harvesting operations. As a direct actuator of the picking function, the performance level of the end effector has a direct impact on the efficiency and quality of fruit and vegetable harvesting. By introducing the structure of the end-effector of agricultural and forestry picking robots at home and abroad and the application of intelligent control methods in the end-effector, the current research status of the end-effector is analyzed. The existing problems is summarized as follows: there is a lack of design and test for unstructured environments, the picking process is easy to damage the surface of fruits and vegetables, the picking cost is high. In response to the current existing challenges, recommendations are put forward from aspects such as the integration of forest machine and forest art, the application of advanced intelligent control technology, multi-body collaborative picking operations, and enhanced versatility and practicality of the equipment, with the aim of providing references for the development of end-effector for agricultural and forestry picking robots.

Keywords: end-effector; picking machinery; intelligent control; mechanization; automatization

0 引言

近年来, 我国林果和蔬菜等生产规模在不断扩大^[1-3]。随着相关产业规模的增大, 对采摘收获的效率及相应成本控制的要求也随之提高^[4], 因此采摘作业机械化、自动化和智能化是未来发展的必然趋势。

大^[1-3]。随着相关产业规模的增大, 对采摘收获的效率及相应成本控制的要求也随之提高^[4], 因此采摘作业机械化、自动化和智能化是未来发展的必然趋势。

收稿日期: 2024 年 11 月 6 日 修回日期: 2025 年 5 月 18 日

* 基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2022YFD2202100); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金项目(CAFYBB2022XA003)

第一作者: 怀宝宇, 男, 1995 年生, 黑龙江鸡西人, 硕士研究生; 研究方向为林草装备与智能化。E-mail: huaiBaoyu2021@163.com

通讯作者: 周建波, 男, 1983 年生, 四川广安人, 博士, 研究员, 博导; 研究方向为林业装备与信息化、林草智能装备。E-mail: zhoujianbol@126.com

末端执行器作为连接机械化采摘设备(机器人/机械臂)与采摘目标的媒介,承担着采摘目标的定位识别、抓取与搬运、采摘目标与其根茎的分离等关键功能。针对不同采摘目标,合理设计采摘执行器的机械结构,如手指的种类及数量、真空吸盘的有无、驱动方式的选择等,以此提高采摘质量与效率,降低采摘作业的成本。农林产品所在的高度非结构化环境^[5]不仅对末端执行器的机械结构设计要求严格,对智能控制方面的要求也逐步提高。末端执行器需对外部环境有良好感知能力,需要设计人员合理使用各类传感器并将其与深度学习等先进算法配合使用,提高末端执行器对采摘目标的定位、识别能力,规划采摘动作的最佳轨迹,减少采摘所需时间以及降低采摘过程中末端执行器对非采摘目标造成的损伤,提升采摘作业的效率与质量^[6,7]。

采摘末端执行器是机械、液压、电气和控制等多学科多领域交叉结合的产物,国外对其的相关研究开展较早但仍未形成大规模的产业化应用^[8,9],本文通过查阅文献,整理归纳采摘末端执行器的结构和智能控制技术的研究现状,总结当下采摘末端执行器存在的问题,并给出相应建议以供相关研究人员参考。

1 采摘末端执行器结构的研究现状

末端执行器的采摘过程可分为两个阶段:一是采摘目标的抓取,二是采摘目标与其根、茎、梗和柄的分离。抓取动作的实现有手指夹持式、真空吸盘吸附式和两者组合使用 3 种方式,其中手指可分为刚性和柔性两种。

1.1 刚性手指末端执行器

1.1.1 电机驱动刚性手指末端执行器

Yu 等^[10]研究一种基于电机驱动的由空间弹簧凸轮机构和两根手指组成的草莓采摘末端执行器,将视觉系统与激光传感器用于草莓的识别和定位,当草莓遮挡住激光束时发出手指闭合信号,两手指相向闭合运动,并带动安置于一侧手指上的切刀切割果梗。Roshanianfard 等^[11]设计开发了基于 PLC 控制的南瓜采摘末端执行器,其包含 5 根由多连杆机构组成的手指;该末端执行器的手指末端带有橡胶滚轮和稳定器,用于更好地抓取固定南瓜,手指侧面安装有刀片,当抓取动作完成后,伺服电机驱动末端执行器旋转切断南瓜根茎;该末端执行器作业半径范围为 76.2~265 mm,作物重量范围为 1~20 kg,收割成功率超过 79%。吕辉等^[12]为油茶花的采摘研究一款末端执行器,工作时在电动推杆作用下,3 个刀爪闭合切断花柄,刀爪打开后花朵掉落进末端执行器内部,在负压作用下沿着管道进入油茶花收集装置,采摘耗时约

2.05 s/朵。Xie 等^[13]参考东方绢金龟的腿部结构设计了一款樱桃番茄采摘用末端执行器,该执行器使用电机驱动两手指成功抓取番茄后,机械臂移动产生的拖拽力使番茄与根茎分离。

1.1.2 气缸驱动刚性手指末端执行器

陈子文等^[14]设计的番茄采摘装置使用三爪式全气动末端执行器,该装置在电气伺服控制系统的调节下,采摘成功率可达 96.03%,单果采摘时间约为 5 s。Birrell 等^[15]为冰山莴苣的收获设计了一种末端执行器,其对收获目标的夹持、切割运动均由气缸驱动完成;该执行器利用皮带传动调整切割机构的高度位置,满足不同尺寸莴苣的收获要求。

1.1.3 欠驱动刚性手指末端执行器

为使目标抓取更加牢固,研究人员设计了欠驱动手指,以便手指更好地包裹果蔬外轮廓。Silwal 等^[16]开发的苹果采摘末端执行器采取了欠驱动手指的设计,其 3 根欠驱动手指可抓取具有不对称几何形状及不同空间位姿的苹果,手掌和手指上贴有聚氨酯软垫以减少对果实的磕碰损伤并增加抓取过程中的摩擦力;成功抓取后可控制采摘头实施水平拉动、倾斜拉动和扭转的组合动作扭断果柄。魏博等^[17]研究一款欠驱动三指末端执行器,其手指根部带有可主动柔性控制的旋转关节以适应不同尺寸柑橘的采摘,在抓取果实后,电机带动手指整体旋转扭断果柄;测试结果表明,该执行器采摘成功率可达 98.3%,平均采摘时间为 5.3 s。

1.1.4 其他驱动方式的刚性手指末端执行器

徐丽明等^[18]设计了带有视觉系统的脐橙采摘末端执行器,该末端执行器采用电气混合驱动的方式;吸盘在下气缸作用下接近脐橙并将其吸附,随后电机驱动手指伸出并合拢夹紧果实,最后上气缸顶出带有电机与圆形刀片的切割装置对果梗进行切割;但在使用时,若上气缸推杆推出速度过快,刀片会顶住果梗并使其倾斜,影响采摘效果。王石榴^[19]设计了香蕉采摘末端执行器的夹紧装置,在液压缸的驱动下左、右两钳收拢合紧握住香蕉假茎,随后放置在钳口上方的电锯启动切断根茎。

刚性手指末端执行器适用范围广,改变手指个数及结构便可实现对不同采摘对象的夹持动作。仿生设计和欠驱动设计的应用提高了刚性手指对采摘对象表面的包覆效果,尽管有学者提出在手指表面贴敷软垫以降低手指对果蔬表面的损伤,但是针对草莓、蘑菇等表面极易损伤的果蔬,刚性手指的夹持动作仍然会对表面造成一定的损伤。

1.2 柔性手指末端执行器

Williams 等^[20]设计一款猕猴桃采摘末端执行器,

其使用 2 个硅胶材质制成的柔性手指可减少抓取过程对果实的损伤;工作时,气缸驱动手指抓取果实并使其与手指一同旋转,依靠拖拽产生的作用力使猕猴桃与果柄分开。Chen 等^[21]设计具有恒压反馈的柔性三指苹果收获末端执行器,其采用伺服驱动,具有被动顺应性手指,可对球形物品实现包络夹持。Goulart 等^[22]在 Chen 设计的苹果收获末端执行器的基础上,增加柔性手指个数并增大开度,设计了一款芒果采摘末端执行器。Wang 等^[23]设计了一种气缸驱动具有四根柔性手指和自适应吸盘的苹果采摘末端执行器,苹果与果柄依靠拉拔力进行分离。李永强^[24]设计的黄瓜采摘末端执行器,其采用舵机驱动两柔性手指的开闭完成对黄瓜的抓取,切割动作由手指上方的切刀完成。Gao 等^[25]为樱桃番茄采摘设计了一款气动控制的末端执行器,通过伸缩气缸活塞杆的伸出带动 2 根尼龙材质的手指闭合夹紧番茄,随后旋转气缸带动控制夹紧装置旋转 270°,在扭转力作用下分离番茄与花梗。Xu 等^[26]研究设计了采摘柑橘等球形作物的三指末端执行器,当手指夹持住柑橘后,电机工作带动整个末端执行器旋转并与固定于手指之间的切刀接触,实现柑橘与茎的分离。黎梦婷^[27]设计一款带有 3 根气动软手指的柑橘采摘末端执行器,当 3 根手指抓住果实后,电机驱动手指上方的剪刀剪断果柄,实现果柄与果实的分离,单个采摘耗时 3.54 s。

柔性手指末端执行器手指材质柔软,形状可控性好。因此,柔性手指末端执行器对采摘对象表面有很好的包覆性,并且对果蔬表面起到一定的保护效果。但是针对体积和质量较大的果蔬,柔性手指的夹持效果要劣于刚性手指。

1.3 真空吸盘式末端执行器

Park 等^[28]研究设计一款集成式末端执行器,可完成切割、吸取及运输等功能;其花梗切割过程为:先由线性伺服执行器将花梗牵引至圆锯片处,然后直流电机驱动圆锯片旋转完成对花梗的切割。Yin 等^[29]研究设计一款电机驱动套筒式柑橘采摘末端执行器,该末端执行器上方带有检测柑橘位置与姿态的视觉系统和用于感知柑橘与套筒相对位置的激光传感器;当套筒底部的传感器检测到柑橘处于合适位置时,步进电机工作带动胶辊与刀片做咬合运动对柑橘进行夹持与切割。Jun 等^[30]为番茄采摘开发了一款带有吸盘的剪式末端执行器,真空吸盘将番茄吸附固定后,电机驱动执行器前端的剪刀机构切割番茄梗,但剪刀机构在运动过程中会对其余的番茄和根茎等造成损伤。Zhang 等^[31]研究了一款基于真空的苹果收获末端执行器,当执行器接触到苹果时,真空发生器产生负压将苹果吸附在位于

执行器前端的真空杯上,随后电机带动真空管旋转使苹果与果柄分离;与手指式末端执行器不同,这种真空吸盘式执行器不需要过多调整执行器位置,而且由硅胶制成的软真空杯可避免苹果在采摘过程中受到磕碰。Yang^[32]、Huang^[33]等为蘑菇的采摘设计了一款末端执行器,其前端安装的柔性吸盘在负压状态下完成对蘑菇的抓取,随后电机驱动吸盘旋转扭断蘑菇的菌柄完成蘑菇的采摘。姬江涛等^[34]为双孢菇的采摘设计了一款带有柔性仿形吸盘的末端执行器,其设计的仿形吸盘采摘成功率与损伤率分别为 98.5%、2.5%。

真空吸盘式末端执行器特别适用于蘑菇等表面柔软、易损伤的果蔬采摘作业;在负压的作用下,柔性吸盘实现对采摘对象的吸附。由于真空状态的产生需要密闭的空间,所以真空吸盘式末端执行器不适用于表面凹坑过多的不规则果蔬的采摘作业。

不同末端执行器的对比见表 1。

表 1 不同末端执行器的对比
Tab. 1 Comparison of different end-effectors

末端执行类型	适用对象	优点	存在问题
刚性手指	形状规则、表面较硬且不易损伤的果蔬	适用范围广,经济性好	手指数量增加、手指结构复杂时,相应控制难度增加、成本上升
柔性手指	表面易损伤的果蔬	对果蔬表面损伤小	手指及其材料的设计制造成本高
真空吸盘	蘑菇等表面特别柔软的果蔬	几乎对果蔬表面无损伤,可与刚性、柔性手指配合使用	成本高、适用范围窄

1.4 其他形式的末端执行器

Arad 等^[35]为甜椒采摘设计一款带有摄像头及灯具的末端执行器,其通过电机驱动刀片做摆动运动完成对甜椒的收割,掉落的甜椒由下方 6 根手指收集,手指被胶套包裹并且可围绕安装点旋转。Wang 等^[36]设计了一种基于模拟蛇头机制末端执行器,其通过气缸驱动两对称四杆联动机构,实现上下颚同时摆动,模拟蛇头的咬合机制完成切割动作,该装置在自然环境中的收获成功率为 74%。Li 等^[37]设计了用于芦笋收获的夹式末端执行器,由外壳、限位挡板和夹紧剪切机构组成。伍德林等^[38]为采摘油茶果设计一款带有 2 根梳棍轴的扭梳式末端执行器。工作时,通过电机驱动丝杠旋转调整 2 根梳棍轴的间距大小以适应不同的油茶果树,梳棍轴电机工作时带动梳棍轴上的梳齿旋转使油茶果从果树上脱离。谷新运^[39]设计了一款基于电机驱动的多果采摘末端执行器,当传感器检测到猕

猴桃进入限定区域,斜面推板将果实聚成排然后凸轮转动使猕猴桃在剪切力作用下脱落,并经果实分流装置进入下方的波纹管内收集起来。王铮^[40]设计了单果采摘和多果采摘 2 种猕猴桃采摘用末端执行器,其中单果采摘用末端执行器在电机驱动下两手指夹持猕猴桃并旋转扭断果柄;多果采摘用末端执行器则是在电机驱动下完成多个果实的同时固定,并在拉力作用下扯断果柄。许丽佳等^[41]设计了一款茶叶采摘末端执行器,通过舵机驱动 2 个夹持组件合拢完成对茶叶的采摘。张跃跃等^[42]为火龙果的自动化采摘研究了一款气缸驱动末端执行器,当传感器检测到火龙果时,气缸活塞杆伸出带动两侧刀片做相向交错咬合运动剪断果柄,采摘成功率为 85%,单果采摘耗时 0.43 s。Xiong 等^[43]开发设计一款电缆驱动的草莓采摘末端执行器,其电机位置远离采摘头,增大了采摘与存储草莓的空间;在手指闭合后,通过隐藏于手指背后的刀片快速旋转使草莓与果柄分离。

手指夹持式的应用范围最广泛,可完成绝大多数产品的采摘,手指个数视采摘目标的种类及体积重量而定,可有两个、三个及多个;真空吸盘吸附式多用于蘑菇等目标材质较为柔软的林下经济作物采摘,为避免末端执行器与果蔬直接接触对其表面造成损伤,也会采用真空吸盘对其进行抓取。果实—果梗、果实—果柄的分离有利用外部工具(刀片等)分割与扭转、拖拽果实分离等两种方式,外部工具分割的运动方式有平动、旋转、剪切及模拟生物咬合运动等。此外,电机、气动、液压或其组合驱动方式在采摘末端执行器中均有广泛应用。

2 采摘末端执行器智能控制技术研究现状

智能控制技术在末端执行器的结构优化设计、目标果蔬的识别定位及采摘路径的规划方面均有体现。

2.1 结构优化设计

虞浪等^[44]为优化欠驱动柑橘采摘末端执行器的手指连杆设计参数,开发了基于遗传算法的参数化设计系统;对优化后的机构用 ADMAS 进行运动学仿真验证,并进行了实地采摘试验;试验表明其单果平均包络时间约 3.2 s,采摘成功率可达 92.9%。苗玉彬等^[45]为苹果采摘设计的恒力柔顺末端执行器,采用序列二次规划算法(SQP)优化计算夹持机构的形状函数,保证夹持机构的恒力输出维持在 7.9 N 左右。Wang 等^[46]为解决末端执行器在非灵巧工作空间中难以接触到西红柿的问题,利用遗传算法(GA)控制番茄采摘机器人末端执行器的姿态;结构优化后,其工作半径可达到 550~800 mm,工作空间扩大了 208%,

单个抓取任务完成周期为 20 s。Visentin 等^[47]将机器视觉与机器学习算法应用到所开发的柔性采摘末端执行器上,用以识别定位目标对象并估计采摘草莓等小型水果或植物所需的夹持力。Liu 等^[48]应用顺序学习的思想对抓取动作的数量进行简化,基于强化学习框架实现抓取动作的生成;所设计的柔性末端执行器可抓取水果、杯子等外形不规则的物体。

将智能控制技术应用用于采摘末端执行器机械结构的尺寸优化、形状优化及拓扑优化等方面,有助于提高末端执行器的结构设计效率、提升结构设计质量;随着 AI 技术的快速发展,将 AI 技术应用用于采摘末端执行器的结构设计将会是未来的趋势。

2.2 采摘目标识别定位

Williams 等^[49]应用基于深度神经网络的视觉系统完成对猕猴桃的识别及定位,结合提出的多臂动态调度算法将猕猴桃从树冠上分离,将对树冠或猕猴桃的干扰或损坏降至最低;采收试验结果表明,所提出的收割机能够成功采收果园内猕猴桃总数的 51.0%,平均循环时间为 5.5 s/果。Kim 等^[50]提出深度学习网络:Deep-ToMaToS,实现对目标果实进行三级成熟度分类和 6D 姿态(3D 平移+3D 旋转)的同时估计;Deep-ToMaToS 输出的 6D 姿态作为机器人系统切割模块的插入位置;经试验表明基于 Deep-ToMaToS 的番茄采摘机器人在智慧农场的环境中表现良好,Deep-ToMaToS 果实和侧茎的 6D 位姿估计精度分别高达 96.90%、96.83%。Coll-Ribes 等^[51]提出一种基于卷积神经网络(CNN)的图像处理技术,识别图像中的葡萄串并找到薄弱的花梗与分支。Mao 等^[52]采用多路径卷积神经网络(MPCNN)对黄瓜区域进行检测,从正确识别率、误识别率等方面评估对黄瓜区域检测的质量,试验结果表明,该方案的正确识别率大于 90%,误识别率低于 22%。

采摘目标识别算法的应用对于提高采摘末端执行器的采摘效率及质量有很大的帮助,针对不同的采摘对象、不同的采摘环境,应考虑与之相适应的识别算法;未来进行识别算法研究时,可考虑将识别算法与识别策略相结合,提高室外非结构化环境下枝条、枝叶等遮挡采摘目标时对采摘目标的识别质量。

2.3 采摘路径规划

荀一等^[53]将视觉伺服控制与改进 RRT 算法相结合,提高采摘机械臂轨迹规划质量并减小定位误差,在实验室环境下对胡柚进行采摘试验,发现该方法可用于机械化采摘,可以提高采摘机械臂的性能。为实现甜瓜采摘机器人的多臂协同作业并合理分配单臂应采摘的果实量,Zion 等^[54]提出了一种“taxis dispatcher”

算法,可实现给定数量的机械臂收集最多数量的甜瓜,为多臂采摘机器人的协同采摘控制提供一种新手段。郑嫦娥等^[55]提出一种DDPG算法规划机械臂在非结构化环境下的采摘轨迹,并在仿真环境下对无障碍及多障碍场景下轨迹规划效果进行分析,验证其提出算法的可行性。

研究人员采用多种算法来优化采摘末端执行器的轨迹规划,提高采摘效率;为多臂采摘作业的协同控制提供解决方法。但是相关研究多是在实验室环境下进行,缺乏在非结构化环境下对相关算法的试验验证。

3 存在问题与展望

3.1 存在问题

当前对采摘末端执行器的研究成果很多,但是试验的开展多处于实验室环境内,在室外等非结构化自然环境下的采摘效果欠佳,实现规模的产业化应用仍存在诸多问题。

1) 缺乏针对非结构化环境下的设计与试验。当前的研究多是基于结构化、标准化的理想环境,缺乏在真实的非结构化的自然农林环境内对末端执行器的设计与试验。在理想环境下末端执行器对目标的采摘成功率很高、采摘效率高,但是在非结构化的自然环境中采摘质量则会严重下降,主要表现在两个方面:(1)对采摘目标的识别与定位耗时更长,在自然光照、相邻果蔬、附近枝叶等多种干扰因素共存的非结构化环境内相应识别与定位的算法需要考虑的因素增加;非标准化的种植方式也会对采摘路径的规划造成消极的影响。(2)采摘速度降低,现有末端执行器大多只能实现单次单果采摘,单果采摘时间短。但是对苹果等单一植株上具有多个分散果实的采摘对象,要完成对整棵果树乃至果园的采摘过程,单果采摘整体耗费时间过长。

2) 采摘过程中易损伤果蔬表面。苹果和草莓等在采摘过程中其外表面易受损伤的原因有:抓取过程中夹持力的大小难以控制,夹持力过小无法成功采摘,过大则会损伤采摘对象外表面;末端执行器的移动过程中由于自身结构尺寸限制及识别与定位误差的存在,末端执行器自身本体结构及切刀等附属设备会对采摘目标及其相邻待采摘目标造成损伤。

3) 采摘成本高。果蔬的收获具有季节性,其采摘设备的使用周期很短。特别对采用伺服/液压驱动或安装有视觉系统和高精度传感器的末端执行器,其昂贵的造价结合较低的使用率增加了使用者的生产成本。

3.2 展望

1) 机艺结合。提高采摘作业环境的标准化、结构化程度,从种植间距、植株修剪等方面入手,降低对采

摘目标的遮挡,提高末端执行器对采摘目标的识别、定位效率;降低采摘路径规划难度、减少采摘末端执行器采摘过程中的移动时间。通过机艺结合为采摘机械化作业营造良好的环境,提高采摘作业效率。

2) 深化智能控制技术应用。一方面,进一步优化深度学习算法。采取引入注意力机制模块、优化特征提取模块等方法提高对采摘目标识别与定位的质量;增加采摘目标不同状态的分类识别功能,为采摘目标在被遮挡状态下的采摘路径规划提出解决方案。另一方面,多传感器集成应用。将力传感器、距离传感器等各类传感器合理安置在末端执行器上,与视觉系统等配合,完成对采摘目标的位姿确定、夹持力反馈等任务。提高采摘作业效率、减轻甚至消除夹持、移动过程中对果蔬外表面的损伤,提升采摘末端执行器在复杂环境下的作业质量。

3) 多体协同采摘作业。在已有单体采摘末端执行器的研究基础上考虑开展多末端执行器协调采摘作业的研究,优化末端执行器本体机械结构设计,在满足使用要求的前提下减轻末端执行器的体积与重量;优化协同作业规划算法,完善多个采摘末端执行器的协作机制,提高采摘设备的作业能力和采摘效率。

4) 提高设备通用性。根据采摘目标的外形、尺寸、重量及不同生长位置等因素,考虑实现末端执行器的模块化设计提高设备的通用性。比如通过更换夹持手指的数量与结构增加执行器采摘作业的适用范围,更改识别、定位及采摘路径规划算法以适应不同品种在不同环境下的机械化采摘作业,实现“一机多用”。

5) 从室内走向室外。农林采摘机器人末端执行器的设计以解决实际生产中的需求为目标,在实验室等结构化环境下的研究基础上,一方面将现有成果推广扩展到自然状态下的非结构化环境中;另一方面更有针对性地开展户外作业环境下采摘机器人末端执行器的研究设计。将先进的技术应用到农林生产实际问题的解决中,使采摘作业更加机械化、自动化和智能化,提高采摘作业生产效率与质量。

4 结语

当前采摘末端执行器的结构形式丰富多样,主要有刚性、柔性手指夹持式,真空吸盘吸附式和两者组合使用3种方式。刚性手指夹持式适用范围广,具有较好的经济性,但存在容易损伤果蔬表皮和控制难度、成本随手指数量增加而升高的情况;柔性手指夹持式弥补刚性手指容易对果蔬表皮损伤的缺陷,但其设计制造的成本较高,经济性较差;真空吸盘吸附式成本最高,因此一般用于采摘蘑菇等表面特别柔软的果蔬。

现阶段我国对果蔬采摘机器人末端执行器的研究水平较低,产品实用性有待提高。相关研究主要在实验室等结构化环境内进行,难以满足户外作业条件下对采摘质量、采摘效率的要求。开展果蔬采摘机器人末端执行器的研究对提升林业机械化水平、提高林业机械现代化程度、促进林草业高质量发展具有重大现实意义。随着以信息技术、工业4.0等为特征的新一轮科技革命的发展,对末端执行器的研究要紧贴人工智能等新兴产业,提高智能化水平。本文对当前存在的问题从机艺结合、深化智能控制技术应用、多体协同采摘作业、提高设备通用性等方面给出建议,为后续采摘末端执行器的设计研究提供参考。

参 考 文 献

- [1] 丁海凤, 范建光, 贾长才, 等. 我国蔬菜种业发展现状与趋势[J]. 中国蔬菜, 2020(9): 1-8.
- [2] 邓秀新. 中国水果产业供给侧改革与发展趋势[J]. 现代农业装备, 2018(4): 13-16.
- [3] 张放. 2020年我国水果生产统计简析[J]. 中国果业信息, 2021, 38(12): 29-39.
- [4] 陈昕, 华超, 朱银龙, 等. 水果采摘机器人末端执行器的研究进展[J]. 林业机械与木工设备, 2020, 48(9): 4-10. Chen Xin, Hua Chao, Zhu Yinlong, et al. Research progress in fruit picking robot end effectors [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2020, 48(9): 4-10.
- [5] Zhang B, Xie Y, Zhou J, et al. State-of-the-art robotic grippers, grasping and control strategies, as well as their applications in agricultural robots: A review [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 177: 105694.
- [6] 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.
- [7] 柳军, 周成钢, 皮杰, 等. 农业机器人感知关键技术研究现状与发展趋势[J]. 农机化研究, 2025, 47(5): 1-8.
- [8] 李会宾, 史云. 果园采摘机器人研究综述[J]. 中国农业信息, 2019, 31(6): 1-9.
- [9] Han C Y, Lü J H, Dong C J, et al. Classification, advanced technologies, and typical applications of end-effector for fruit and vegetable picking robots [J]. Agriculture, 2024, 14(8): 1310.
- [10] Yu Y, Zhang K, Liu H, et al. Real-time visual localization of the picking points for a ridge-planting strawberry harvesting robot [J]. IEEE Access, 2020, 8: 116556-116568.
- [11] Roshanianfard A, Noguchi N. Pumpkin harvesting robotic end-effector [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 174: 105503.
- [12] 吕辉, 李立君, 赵青, 等. 剪切式油茶花采摘末端执行器设计与实验[J]. 农机化研究, 2024, 46(4): 134-139, 144.
- [13] Xie H, Kong D, Wang Q. Optimization and experimental study of bionic compliant end-effector for robotic cherry tomato harvesting [J]. Journal of Bionic Engineering, 2022, 19: 1314-1333.
- [14] 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 Ziwen, Yang Mingjin, Li Yunwu, 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.
- [15] Birrell S, Hughes J, et al. A field-tested robotic harvesting system for iceberg lettuce [J]. Journal of Field Robotics, 2020, 37(2): 225-245.
- [16] Silwal A, Davidson J R, Karkee M, et al. Design, integration, and field evaluation of a robotic apple harvester [J]. Journal of Field Robotics, 2017, 34(6): 1140-1159.
- [17] 魏博, 何金银, 石阳, 等. 欠驱动式柑橘采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 120-128. Wei Bo, He Jinyin, Shi Yang, et al. Design and experiment of underactuated end-effector for citrus picking [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 120-128.
- [18] 徐丽明, 刘旭东, 张凯良, 等. 脐橙采摘机器人末端执行器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 53-61. Xu Liming, Liu Xudong, Zhang Kailiang, et al. Design and test of end-effector for navel orange picking robot [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(12): 53-61.
- [19] 王石榴. 香蕉采摘末端执行器夹持装置设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- [20] 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(2): 187-201.
- [21] Chen K, Li T, Yan T, et al. A soft gripper design for apple harvesting with force feedback and fruit slip detection [J]. Agriculture, 2022, 12(11): 1802.
- [22] Goulart R, Jarvis D, Walsh K B. Evaluation of end effectors for robotic harvesting of mango fruit [J]. Sustainability, 2023, 15(8): 6769.
- [23] Wang X, Kang H, Zhou H, et al. Development and evaluation of a robust soft robotic gripper for apple

- harvesting [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 204: 107552.
- [24] 李永强. 黄瓜采摘机械手的定位与采摘研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
Li Yongqiang. Research on the positioning and picking of cucumber picking robot [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [25] Gao J, Zhang F, Zhang J, et al. Development and evaluation of a pneumatic finger-like end-effector for cherry tomato harvesting robot in greenhouse [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 197: 106879.
- [26] Xu X, Wang Y, Jiang Y. End-effectors developed for citrus and other spherical-crops [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(15): 7945.
- [27] 黎梦婷. 柑橘采摘软体末端执行器的设计与试验[D]. 雅安: 四川农业大学, 2022.
- [28] Park Y, Seol J, Pak J, et al. A novel end-effector for a fruit and vegetable harvesting robot: mechanism and field experiment [J]. *Precision Agriculture*, 2023, 24: 948–970.
- [29] Yin H, Sun Q, Ren X, et al. Development, integration, and field evaluation of an autonomous citrus-harvesting robot [J]. *Journal of Field Robotics*, 2023, 40(6): 1363–1387.
- [30] Jun J, Kim J, Seol J, et al. Towards an efficient tomato harvesting robot: 3D perception, manipulation, and end-effector [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 17631–17640.
- [31] Zhang K, Lammers K, Chu P Y, et al. An automated apple harvesting robot: From system design to field evaluation [J]. *Journal of Field Robotics*, 2024, 41(7): 2384–2400.
- [32] Yang S, Ji J, Cai H X, et al. Modeling and force analysis of a harvesting robot for butt-on mushrooms [J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 78519–78526.
- [33] Huang M, He L, Choi D, et al. Picking dynamic analysis for robotic harvesting of *Agaricus bisporus* mushrooms [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 185: 106145.
- [34] 姬江涛, 李梦松, 赵凯旋, 等. 双孢菇柔性仿形采摘末端执行器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(1): 104–115.
Ji Jiangtao, Li Mengsong, Zhao Kaixuan, et al. Design and experiment of flexible profiling picking end-effector for *agaricus bisporus* [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(1): 104–115.
- [35] Arad B, Balendnock J, Barth R, et al. Development of a sweet pepper harvesting robot [J]. *Journal of Field Robotics*, 2020, 37(6): 1027–1039.
- [36] Wang Y, Yang Y, Yang C H, et al. End-effector with a bite mode for harvesting ci-trus fruit in random stalk orientation environment [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 157: 454–470.
- [37] Li J, Liu X, Zou L L, et al. Analysis of the interaction between end-effectors, soil and asparagus during a harvesting process based on discrete element method [J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 196: 127–144.
- [38] 伍德林, 袁嘉豪, 李超, 等. 扭梳式油茶果采摘末端执行器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(4): 21–33.
Wu Delin, Yuan Jiahao, Li Chao, et al. Design and experiment of twist-comb end effector for picking camellia fruit [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(4): 21–33.
- [39] 谷新运. 基于相向运动采摘模式的猕猴桃多果采摘末端执行器研制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [40] 王铮. 果柄分离式猕猴桃采摘末端执行器的研制[D]. 南京: 南京林业大学, 2022.
- [41] 许丽佳, 刘琦, 代建武, 等. 茶叶嫩梢采摘末端执行器的设计研究[J]. *茶叶科学*, 2021, 41(5): 705–716.
Xu Lijia, Liu Qi, Dai Jianwu, et al. Design of end effector for picking tea shoots [J]. *Journal of Tea Science*, 2021, 41(5): 705–716.
- [42] 张跃跃, 田嘉全, 王文祥, 等. 火龙果采摘机器人末端执行器设计与试验[J]. *林业工程学报*, 2023, 8(4): 144–150.
Zhang Yueyue, Tian Jiaquan, Wang Wenxiang, et al. Design and experiments of end-effector for dragon fruit picking robot [J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2023, 8(4): 144–150.
- [43] Xiong Y, Peng C, Grimstad L, et al. Development and field evaluation of a strawberry harvesting robot with a cable-driven gripper [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 157: 392–402.
- [44] 虞浪, 俞高红, 吴浩宇, 等. 欠驱动关节型柑橘采摘末端执行器设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(17): 29–38.
Yu Lang, Yu Gaohong, Wu Haoyu, et al. Design and experiment of the end-effector with underactuated articulars for citrus picking [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(17): 29–38.
- [45] 苗玉彬, 郑家丰. 苹果采摘机器人末端执行器恒力柔顺机构研制[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(10): 19–25.
Miao Yubin, Zheng Jiafeng. Development of compliant constant-force mechanism for end effector of apple picking robot [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(10): 19–25.
- [46] Wang D, Dong Y, Lian J, et al. Adaptive end-effector pose control for tomato harvesting robots [J]. *Journal of Field Robotics*, 2023, 40: 535–551.
- [47] Visentin F, Castellini F, Muradore R. A soft, sensorized gripper for delicate harvesting of small fruits [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 213: 108202.

(下转第 159 页)

- 滴沉积效果的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(4): 442-446.
- Li Jiyu, Lan Yubin, Peng Jin. Effect of droplet size spraying by unmanned aerial vehicle on droplet deposition in rice canopy [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2018, 44(4): 442-446.
- [11] Qin W C, Qiu B J, Xue X Y, et al. Droplet deposition and control effect of insecticides sprayed with an unmanned aerial vehicle against plant hoppers [J]. Crop Protection, 2016(86): 79-88.
- [12] Chen P C, Lan Y B, Huang X Y, et al. Droplet deposition and control of planthoppers of different nozzles in two-stage rice with a quadrotor unmanned aerial vehicle [J]. Agronomy, 2020, 10: 303.
- [13] 曾文, 邓继忠, 高启超, 等. 用 P20 型植保无人机减量施药防治稻纵卷叶螟[J]. 农业工程学报, 2021, 37(15): 53-59.
- Zeng Wen, Deng Jizhong, Gao Qichao, et al. P20 plant protection UAV to control cnaphalocrocis medinalis by reduced pesticide application [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(15): 53-59.
- [14] 张亚莉, 高启超, 邓继忠, 等. M45 型多旋翼植保无人机减量施药对稻飞虱防治效果的影响[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 36-42.
- Zhang Yali, Gao Qichao, Deng Jizhong, et al. Effects of reduced pesticide application on rice planthopper control by M45 multi-rotor plant protection UAV [J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 36-42.
- [15] 陆明红, 周丽丽, 尹丽, 等. 2019 年我国稻飞虱发生特点及原因分析[J]. 中国植保导刊, 2020, 40(5): 52-57.
- [16] 何月平, 陈利, 陈建明, 等. 吡蚜酮对水稻褐飞虱取食行为的影响[J]. 中国水稻科学, 2010, 24(6): 635-640.
- [17] 兰波, 杨迎青, 陈建, 等. 无人飞机低容量喷雾中影响药剂对水稻纹枯病和二化螟防治效果的因素分析[J]. 农药学报, 2020, 22(3): 543-549.
- Lan Bo, Yang Yingqing, Chen Jian, et al. Analysis of factors affecting control effects of pesticide applications against rice sheath blight and Chilo suppressalis in low-volume spray by unmanned aerial vehicle [J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2020, 22(3): 543-549.
- [18] Zhu H P, Salyani M, Fox R D, A portable scanning system for evaluation of spray deposit distribution [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011(76): 38-43.
- [19] GB/T 17980.2-2000, 《农药田间药效试验准则(一)杀虫剂防治稻纵卷叶螟》[S].
- (上接第 146 页)
- [48] Liu F, Sun F, Fang B, et al. Hybrid robotic grasping with a soft multimodal gripper and a deep multistage learning scheme [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2023, 39(3): 2379-2399.
- [49] 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.
- [50] Kim J, Pyo H, Jang I, et al. Tomato harvesting robotic system based on Deep-ToMaToS: Deep learning network using transformation loss for 6D pose estimation of maturity classified tomatoes with side-stem [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 201: 107300.
- [51] Coll-Ribes G, Torres-rodríguez I J, Grau A, et al. Accurate detection and depth estimation of table grapes and peduncles for robot harvesting, combining monocular depth estimation and CNN methods [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 215: 108362.
- [52] Mao S, Li Y, Ma Y, et al. Automatic cucumber recognition algorithm for harvesting robots in the natural environment using deep learning and multi-feature fusion [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 170: 105254.
- [53] 荀一, 李道政, 王勇, 等. 基于 VS-IRRT 算法的采摘机械臂路径规划[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 129-138.
- Xun Yi, Li Zhengdao, Wang Yong, et al. Motion planning of harvesting manipulator based on VS-IRRT algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 129-138.
- [54] Zion B, Mann M, Levin D, et al. Harvest-order planning for a multiarm robotic harvester [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 103: 75-81.
- [55] 郑嫦娥, 高坡, Gan Hao, 等. 基于分步迁移策略的苹果采摘机械臂轨迹规划方法[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 15-23.
- Zheng Chang'e, Gao Po, Gan Hao, et al. Trajectory planning method for apple picking manipulator based on stepwise migration strategy [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 15-23.