doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.13.001

选择性收获机器人采收末端研究进展与展望

杜小强[1,2]　崔鑫佳[1]　潘　麟[1]　邓耀杰[1]　陈建能[1,3]　马锃宏[1,2]　武传宇[4]

（1. 浙江理工大学机械工程学院，杭州 310018；2. 浙江农林大学光机电工程学院，杭州 311300；
3. 全省农业智能感知与机器人重点实验室，杭州 310018；4. 浙江海洋大学，舟山 316022）

摘要：选择性收获机器人是实现农产品智能采收的重要技术途径，而由末端执行器、腕关节及其感知控制系统构成的采收末端，是决定采收成功率、损伤水平与环境适应能力的核心单元。针对当前相关研究中结构、感知与控制联系不够紧密的问题，本文面向果实、茶叶和花卉等不同采收对象，系统综述了选择性收获机器人采收末端的研究进展。首先，从采收对象生物特性、植株连接特性及冠层环境与采收空间约束出发，分析了采收末端的功能需求；其次，围绕末端执行器与腕关节结构，综述了不同接触方式末端、串联与并联腕关节构型及其适用特点；进一步总结了视觉感知、视触觉融合、关键部位识别、接触状态感知以及接近对准、柔顺抓取、分离转运控制等方面的研究现状；最后，从结构容错性、感知鲁棒性和控制自适应性等方面归纳了现存问题，并对模块化与可重构末端、多模态感知、农机农艺融合以及具身智能驱动的感知—决策—执行闭环采收发展趋势进行了展望。

关键词：选择性收获机器人；采收末端；末端执行器；腕关节；多模态感知；具身智能

中图分类号：S24　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)13-0001-24　　**OSID**：

Research Progress and Prospects of Harvesting End Unit for Selective Harvesting Robots

Du Xiaoqiang[1,2]　Cui Xinjia[1]　Pan Lin[1]　Deng Yaojie[1]　Chen Jianneng[1,3]　Ma Zenghong[1,2]　Wu Chuanyu[4]

(1. *School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou* 310018, *China*
2. *College of Optical, Mechanical and Electrical Engineering, Zhejiang A&F University, Hangzhou* 311300, *China*
3. *Zhejiang Key Laboratory of Intelligent Sensing and Robotics for Agriculture, Hangzhou* 310018, *China*
4. *Zhejiang Ocean University, Zhoushan* 316022, *China*)

Abstract: Selective harvesting robots are an important technical approach for intelligent harvesting of agricultural products. The harvesting end, which consisted of the end-effector, wrist joint, and corresponding sensing and control system, was the key unit determining harvesting success rate, damage level, and environmental adaptability. In view of the insufficient coupling among structure, sensing, and control in current studies, the research progress of harvesting ends for selective harvesting robots targeting different objects, such as fruits, tea leaves, and flowers was systematically reviewed. Firstly, the functional requirements of harvesting ends were analyzed from the aspects of biological characteristics of harvesting objects, plant attachment characteristics, canopy environment, and local spatial constraints. Secondly, focusing on end-effector and wrist-joint structures, the structural characteristics and applicability of end-effectors with different contact modes and serial/parallel wrist-joint configurations were reviewed. Furthermore, the research status of visual perception, visuotactile fusion, key-part recognition, contact-state perception, approach and alignment, compliant grasping, separation, and transfer control was summarized. Finally, the existing problems were discussed in terms of structural fault tolerance, sensing robustness, and control adaptability. Future development trends were proposed, including modular and reconfigurable harvesting ends, multimodal perception, integration of agricultural machinery and agronomy, and embodied-intelligence-driven closed-loop harvesting with perception,

收稿日期：2026-04-26　修回日期：2026-05-10

基金项目：国家重点研发计划项目(2025YFE0209300)、国家自然科学基金项目(32372004)和浙江省自然科学基金重大项目(LD24E050006)

作者简介：杜小强(1978—)，男，教授，博士，主要从事农业机器人研究，E-mail：xqiangdu@163.com

通信作者：武传宇(1976—)，男，教授，博士，主要从事农业机器人研究，E-mail：cywu@zstu.edu.cn

decision-making, and execution.

Key words: selective harvesting robot; harvesting end unit; end-effector; wrist mechanism; multimodal perception; embodied intelligence

0 引言

在非结构化环境下进行农产品选择性采收时,机器人往往面临枝叶遮挡严重、目标分布不均、姿态多变等复杂问题[1]。采收作业不仅要求机器人完成目标识别、定位与接近,还需要根据作物个体差异及环境约束,实施接触、夹持与分离等精细化操作[2]。这些操作通常由末端执行器、腕关节及相应的感知与控制系统组成的采收末端来完成。作为机器人采收作业的核心执行部件,采收末端的性能在很大程度上决定了采收成功率、损伤率与作业效率。

近年来,围绕采收末端的研究取得了显著进展,涵盖了末端结构创新、感知方法改进以及控制策略优化等多个方面[3]。然而,采收末端的能力并非某一局部部件的单独贡献,而是结构设计、感知方法和控制策略三者深度耦合的结果:结构设计决定末端对不同农产品形态特征、连接方式及狭小空间的适应能力;感知方法影响接触检测与目标状态获取的准确性与鲁棒性;控制策略则直接关系到动态不确定环境下的轨迹调整、柔顺交互与稳定采收[4]。尽管已有大量研究分别从上述 3 个维度展开,但系统性梳理三者之间内在关联、总结当前瓶颈并展望未来方向的综述工作仍相对缺乏。

为此,本文围绕农产品采收末端这一核心主题,从分析选择性收获机器人采收末端的功能需求出发,分别从结构设计、感知方法、控制策略 3 个层面系统综述近年来的研究进展,分析各层面之间的相互制约与协同关系,并在此基础上探讨面向非结构化环境的采收末端所面临的关键挑战与未来发展趋势,以期为农产品选择性收获机器人高效低损采收技术的深入研究提供参考。

1 采收末端设计需求分析

1.1 采收对象与作业环境特点

1.1.1 采收对象生物特性

不同类型农产品在物理特性、表面特征及成熟状态等方面存在显著差异,这些差异直接决定了采收末端执行采收作业的具体方式。如表 1 所示,不同采收对象的损伤敏感性受其组织结构、成熟度及采收方式等因素共同影响。因此,采收末端在设计时应针对不同对象采取差异化设计,并综合考量农产品的几何尺度、重量范围、表面状态、损伤敏感性及成熟度差异,构建与目标生物特性相匹配的结构形式、感知方式与控制策略。

表 1 部分不同类型农产品生物特性与损伤敏感性对比

Tab. 1 Comparison of biological characteristics and damage sensitivity of different types of agricultural products

典型农产品	形状特征	单果质量/g	损伤特性	成熟度影响	文献序号
苹果	近球形或椭圆形,形态较规则	98 ~ 300	易碰伤、擦伤、跌落伤	成熟后硬度下降、耐损性变化	[5]
脐橙、甜橙	近球形,外形较规则	200 ~ 500	易挤压、擦伤,果皮受损影响商品性	成熟度影响果皮强度和分离特性	[6]
大果番茄	大果型,需单果采收	150 ~ 300	易受冲击与压伤	成熟度改变硬度与表皮完整性	[7]
草莓	小型,锥形或不规则	10 ~ 30	极易压伤、表皮脆弱	成熟后软化明显、采收窗口短	[8]
葡萄	单粒小,成串分布	4 ~ 13	易脱粒、挤压伤、果粉破坏	成熟不均会影响整串采收	[9]
辣椒、甜椒	长条形、锥形或块状	20 ~ 205	易折断、局部压伤	成熟度影响硬度和果柄连接	[10]
茶鲜叶(一芽二叶)	尺度小、质量轻、空间受限	0.12 ~ 0.21	易折损、失水、挤压损伤	嫩度和成熟度对品质影响大	[11]
切花玫瑰	花冠脆弱、茎秆细长	27.6 ~ 58	易伤瓣、折茎、形态损伤	开放度影响采收品质和等级	[12]

1.1.2 采收对象与植株连接特性

不同农产品与植株之间的连接方式差异显著,直接影响采收作用方式、分离路径及损伤风险。表 2 为部分农产品与植株连接特性及分离方式对比,通过对比可以发现:连接特性随品种、成熟阶段和生长环境而变化,并受连接部位朝向及周边枝叶分布的影响。因此,连接特性是确定采收动作模式、末端构型及感知控制策略的重要依据。

1.1.3 植株冠层环境与采收空间约束

在农产品所处的冠层环境中,往往存在枝叶遮挡、目标重叠、姿态随机及分布离散等问题。在进行采收作业时,采收末端需在有限空间内完成避障、接近、对准与稳定接触等一系列动作,避免与枝条、叶片或邻近果实发生碰撞,从而防止定位误差增大、采

表 2　部分农产品与植株连接特性及分离方式对比

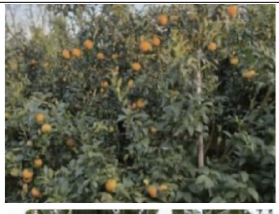
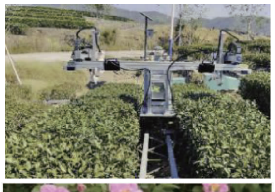
Tab. 2　Comparison of connection characteristics between agricultural products and plants, and their separation methods

典型农产品	主要连接形式	连接特征	常见分离方式	文献序号
苹果、柑橘、梨	果柄/果梗与枝条连接	果柄长度和粗细存在差异，连接强度中等，部分成熟阶段表现出弱化特征	拉脱、扭脱、剪切	[13－14]
番茄、草莓	果柄或花托与植株连接	连接部位较小，果实柔软，成熟后连接强度降低但损伤敏感性升高	轻拉分离、扭转分离、切割	[15－16]
葡萄、樱桃	单果–果梗–果穗多级连接	连接层级多、结构紧凑、相邻目标间距小	整穗剪切、单果分离	[17－18]
黄瓜、茄子、辣椒	果柄与茎秆连接	果柄长度、朝向和粗细差异较大，常伴随遮挡	拉脱、扭转、剪切	[19]
茶芽、嫩梢、叶菜	芽梢/叶柄与枝条连接	连接部位尺度小、柔性大、界限不易识别	掐摘、剪切、切割	[20－21]
玫瑰、菊花、百合	花茎与主枝连接	茎秆细长，采收位置和保留长度要求明确	剪切、切断	[22]
豆角、四季豆、秋葵	果荚与枝条连接	连接位置隐蔽，果体细长，常与枝叶交织	拉摘、扭摘	[23]
蓝莓、小番茄串	多果近距离分布连接	单体连接细小，群体密集，成熟不一致	单体摘取、分批分离	[24－25]

收失败或果实损伤。表 3 对比了不同作物冠层环境及局部空间约束对采收作业的影响，由此可以看出，复杂的作业环境对采收末端提出了更高要求：其结构尺寸应尽可能紧凑，具备良好的进入性与可达性；

表 3　不同作物冠层环境与局部空间约束

Tab. 3　Canopy environment and local spatial constraints of different crops

冠层类型	典型作物	冠层环境特征	采收空间约束	作物图像	文献序号
木本果树类	苹果、柑橘、梨	树冠层次丰富，枝条分叉多，叶幕和果实相互遮挡明显	冠层环境可见区域与可达区域不一致，末端受到干涉		[26－27]
草本–直立类	甜椒、辣椒、茄子	植株高度中等，茎秆较细，叶片和分枝较密集，果实常嵌藏于枝叶之间	作业通道窄，目标可见性受遮挡影响明显，进入方向和切割点定位受限		[28－29]
草本–藤蔓类	葡萄、番茄、黄瓜	枝蔓缠绕或沿支架悬挂生长，果实与果梗/果穗形成多级结构	目标分布离散，连接部位隐蔽，枝蔓和果穗易对末端接近和采收点定位造成干扰		[30－32]
草本–低矮匍匐类	草莓	果实接近地面或埋藏于叶丛内部，叶幕覆盖明显，局部空间低矮	可视范围小，末端作业高度受限，易受叶片和果梗遮挡干扰		[33]
茶叶类	茶芽、嫩梢	冠层致密，目标尺度小，枝叶交错且局部环境非结构化明显	采收通道细小，局部障碍密集，末端路径规划与避障难度高		[34－35]
花卉类	玫瑰	花茎细长，花体分散且开放程度不一致，目标周围构件易扰动	接近路径受花茎和周围枝条限制，采切位置和保留长度要求明确		[22]

腕部姿态调整应灵活,以适应局部狭小空间中的精细操作;同时,采收末端还应具备一定的抗干扰能力与环境适应性,以保证在非结构化场景下采收动作的稳定实施。

1.2 采收作业流程及末端关键技术

1.2.1 采收作业总体流程

从采收机器人整体作业过程来看,采收并非单一的瞬间动作,而是由多个连续子过程构成的动态操作任务。不同阶段对采收末端(含末端执行器、腕关节及感知控制系统)的功能要求各不相同。按作业执行顺序,机器人采收主要分为 3 个阶段:接近与对准、接触与抓取、脱离与转运[36]。采收末端在各阶段承担着核心执行职能,其设计、感知与控制策略需与阶段任务特征相匹配。

1.2.2 接近与对准阶段

本阶段的目标是在避免碰撞干扰的前提下,使采收末端安全接近采收目标并调整至合适的采收位姿。此时,采收末端的工作特点体现为:

(1)空间可达性与紧凑性:末端整体结构(含腕关节及执行器)应尽可能紧凑,以进入枝叶遮挡严重的狭小冠层空间,并具备沿复杂路径接近目标的能力。

(2)执行器构型匹配:末端执行器的几何形态与开口方式需适应采收目标的分布状态(如单果、簇生、串生等),避免因构型干涉而无法有效包络或夹持。

(3)腕部姿态微调能力:在机械臂完成粗定位后,腕关节承担局部精细调整任务,实现末端执行器在有限空间内的俯仰、偏摆或回转,以保证执行器能够以最优角度对准目标。

当前,机器人采收末端的接近与对准方法总体可分为开环预定轨迹、视觉引导、闭环伺服以及多模态融合等类型,其对比结果见表 4。

表 4 采收末端的接近与对准方法对比

Tab. 4 Comparison of approach and alignment methods for harvesting end units

方法	优点	缺点	文献序号
开环预定轨迹	实现简单、效率较高	对目标定位精度和环境一致性依赖较强,难以适应复杂冠层条件	[37]
视觉引导	能非接触获取目标空间位置,是当前应用最广的技术路线	易受遮挡、光照变化和深度误差影响	[38]
闭环伺服	能在运动过程中持续修正末端位姿,具有更高的对准精度和鲁棒性	对感知实时性、系统标定和控制稳定性要求较高	[39]
多模态融合	通过结合视觉、力觉、触觉及局部微调机构,在复杂环境下兼顾接近效率与对准精度,代表了当前采收机器人接近与对准技术的重要发展方向	具有比较高的系统复杂度和集成难度	[38]

1.2.3 接触与抓取阶段

当采收末端与目标发生接触后,系统的核心问题转化为如何在保证稳定性的同时抑制生物损伤。该阶段末端的工作特点突出表现为:

(1)柔顺接触机制:末端应具备力/位混合控制或被动柔顺机构(如弹性材料、柔性关节),以降低接触瞬间的冲击峰值,避免局部应力集中导致采收目标损伤。

(2)夹持力可调与自适应:末端执行器需能根据采收目标尺寸、硬度及表面摩擦特性,实时调节夹持力与接触面积,实现“稳定而不损伤”的抓取。

(3)力传递路径协同:夹持点的选择与施力方向应兼顾后续分离动作所需的力/力矩传递路径,避免因追求抓取稳定而阻碍后续脱离动作。

(4)滑移抑制与稳定支撑:末端感知系统(如触觉、力觉或接近觉传感器)应能检测微滑移,并通过控制策略及时调整夹持参数,保证在动态扰动下的稳定抓取。

1.2.4 脱离与转运阶段

本阶段是采收末端完成目标分离与后续处理的关键环节,其核心任务是通过合理的力与运动控制实现采收对象离层的精准断裂,并安全完成短距离转运与释放。该阶段对末端功能的具体要求如下:

(1)分离动作模式多样:末端需支持拉脱、扭转、弯折、剪切或其组合动作,具体模式取决于作物的离层连接特性与脆性断裂机制[40]。

(2)精准施力与方向控制:末端应能输出必要的作用力/力矩,并精确控制施力方向与速度,以实现离层“精准触发”而非冲击性拉断,从而抑制枝条振动及邻近果实脱落。

(3)过程稳定性与扰动抑制:在断裂瞬间,末端控制系统需保持力/位闭环,避免因突然卸载导致果实弹跳或姿态失控[41]。

(4)转运与释放:完成分离后,末端需继续承担短距离转运与释放任务,即在搬运过程中保持目标姿态稳定,避免二次碰撞与跌落损伤,并保证与收集

装置之间的顺畅衔接[42]。

综上所述，采收末端在接近对准、接触抓取、脱离转运 3 个阶段分别承担着空间适应、柔顺交互、精准分离与安全转运等核心职能，其结构设计、感知方法与控制策略需围绕上述阶段性工作特点进行系统化协同设计。

2　采收末端结构研究现状

现有采收末端结构通常由末端执行器与腕关节组成。前者直接与果实或果柄接触，完成抓取、支撑、分离与释放；后者用于局部姿态调整和接近方向修正，以提高复杂冠层条件下的目标对准能力[43－45]。

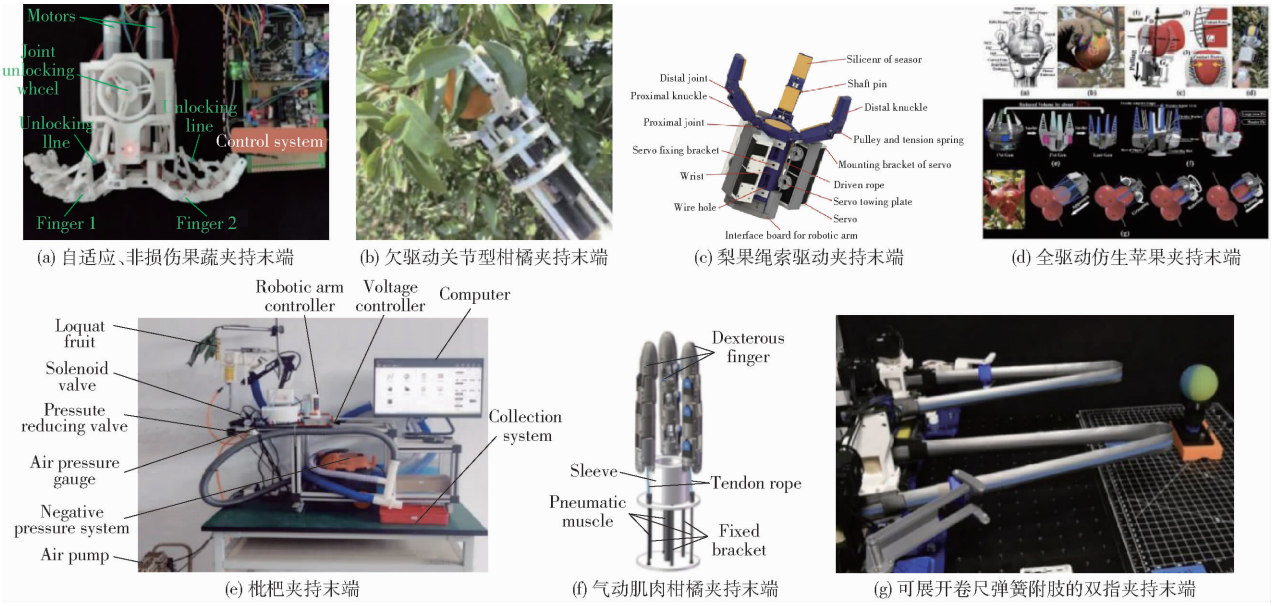
随着采收对象和作业环境复杂性的提升，末端执行器已由早期以刚性夹持为主的简单结构，逐步发展为柔性接触、吸附抓取、夹持切割复合及多功能集成等多种形式。总体上，其结构差异主要体现在两方面：末端与果实之间的接触和约束方式以及果实与植株之间的分离方式。基于此，下面从末端执行器和腕部调姿机构两方面对采收末端结构研究现状进行综述。

2.1　末端执行器

2.1.1　夹持式

夹持式末端执行器是目前研究和应用最为广泛的一类结构，通常采用两指、三指或多指机构从果实两侧或多侧施加夹持力，实现对目标果实的稳定约束[46]。该类结构具有构型相对简单、驱动明确、控制方便和动作直接等优点，适用于外形较规则、暴露程度较高且局部接近空间相对明确的采收对象，因此在苹果、柑橘、番茄、草莓等对象的采收研究中广泛采用[47－48]。

在夹持式采收末端研究中，多围绕欠驱动、自适应包络和低复杂度抓取展开。Huang 等[49]设计了一种自适应、非损伤果蔬夹持器，其核心在于关节解锁与自锁机构，可在降低控制复杂度的同时实现对不同形状果蔬的稳定抓取（图 1a）。虞浪等[50]则针对柑橘采收，设计了一种欠驱动关节型末端执行器，通过模拟人手包络采收动作实现对果实的抓取（图 1b）。除此之外，也有学者设计刚柔耦合末端提升采收质量。Li 等[51]进一步参考人手抓握方式及机器人运动模型，研发了一种用于梨果无损采收的绳索驱动自适应末端执行器，该末端具有 3 个手指，每个手指由 2 个关节组成，各关节均由伺服电机通过绳索驱动，从而实现对梨果的稳定包络抓取（图 1c）。为进一步提升末端对不同果形、不同刚度目标的适应能力，并降低抓取过程中的局部损伤风险，研究者开始将仿生设计、柔性材料和新型驱动方式引入夹持式末端，推动其向刚柔耦合与柔性夹持方向发展。Sun 等[52]提出了一种全驱动自适应苹果采收机械手，采用受鱼鳍射线效应启发的仿生锥形手指，并基于鱼鳍结构、力学建模和仿真实验对其进行了结构重构与优化（图 1d）。Cao 等[53]针对枇杷果实采收，设计了一种由气动指、两个带有板簧状纹路的夹持指、波纹管致动器及采样室组成的柔性末端（图 1e）。Wang 等[54]设计了一种气动肌肉驱动的三指柑橘采收末端执行器，提升了末端对果实抓取过程中的柔顺性与适应性（图 1f）。He 等[43]提出了一种带可展开卷尺弹簧附肢的双指操纵系统，不仅能够对番茄、柠檬、橙子等多类果蔬实现稳定抓取，还可完成平移、旋转、扭转及连续输送等操作，体



(a) 自适应、非损伤果蔬夹持末端　(b) 欠驱动关节型柑橘夹持末端　(c) 梨果绳索驱动夹持末端　(d) 全驱动仿生苹果夹持末端

(e) 枇杷夹持末端　(f) 气动肌肉柑橘夹持末端　(g) 可展开卷尺弹簧附肢的双指夹持末端

图 1　果实夹持式末端实物图与结构图

Fig. 1　Photographs and structural schematics of fruit gripping end-effectors

现出夹持式末端由单一抓取功能向多功能操作能力演进的发展趋势(图 1g)。

除了夹持农产品本体,还有一些关于夹持果柄或叶柄的研究。Ranjan 等[55]设计了一种果柄夹持式切割末端,在切割模块加了一个夹持结构,使末端能够在切断果柄的同时,减少植株晃动(图 2a)。Li 等[56]对面向番茄果柄抓取的夹持式末端进行研究(图 2b)。Choi 等[14]针对柑橘构建了自适应夹持与精确切梗一体化末端,实现了稳定抓持与近梗分离的协同作业(图 2c)。林桂潮等[57]面向名优茶采收末端作业成功率低的问题,对一款欠驱动式茶叶采收末端执行器进行了优化设计(图 2d)。Zhao 等[58]则面向茶芽采收,提出了一种双指肌腱驱动软体机器人夹持器,以适应茶芽尺度小、易损伤的作业需求(图 2e)。当前,夹持式末端的研究正由“稳定抓取”向“抓取与操作一体化”发展。



(a) 果柄夹持式切割末端 (b) 番茄果柄夹持末端 (c) 柑橘果柄夹持末端 (d) 欠驱动式茶叶夹持末端 (e) 茶芽夹持末端

图 2 果柄/叶柄夹持末端实物图

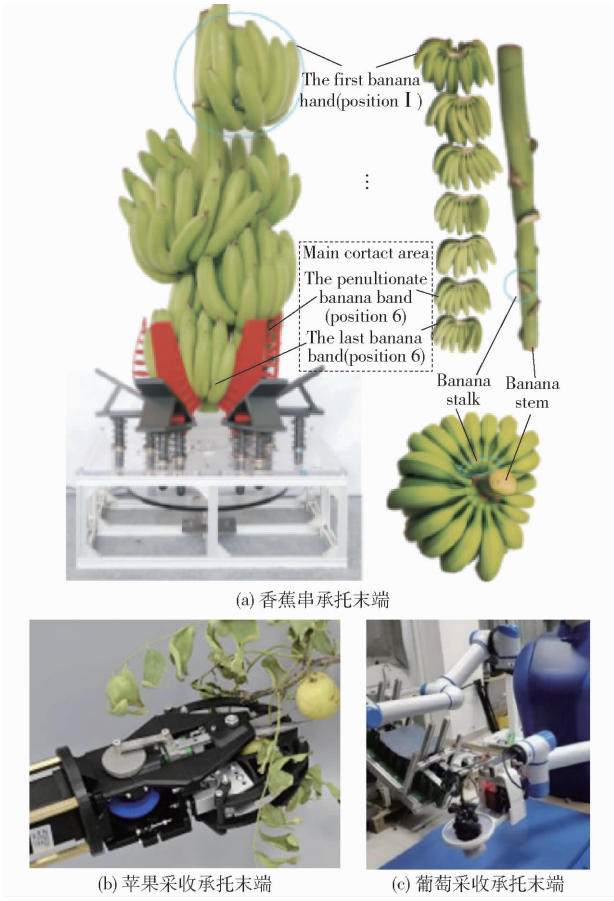
Fig. 2 Photographs of end-effectors for gripping fruit stalks and petioles

随着研究深入,夹持式末端已由传统刚性指爪逐步发展为带柔性覆层、可调姿包络或多点接触的变体,以提高对不同尺寸和表面条件目标的适应性并降低局部压伤风险。除直接夹持果实外,也有研究将夹持对象转向果柄、花梗或嫩梢等连接部位,通过夹持茎秆、果柄的方式完成采收,从而减少对果体表面的直接作用。

2.1.2 承托式

承托式末端执行器主要通过托板、托盘、弧形支撑臂或柔性承载面从果实下方或侧下方建立支撑关系,在转运、切柄或分离过程中承担目标重量并抑制掉落冲击。与单纯依赖指爪施压的方式相比,承托式更强调对果实重力载荷的分担和接触应力的重新分布,因此更适合大质量、成串或跌落损伤风险较高的采收对象。但承托式结构主要从底部提供支撑,其对果实的横向限位和姿态约束能力相对有限,单独使用时往往难以形成充分稳定的抓取状态。因此,在实际应用中,承托式末端执行器通常需要与导向、限位或轻夹持机构结合,以提高目标约束能力和分离过程稳定性。

Xie 等[59]设计一种香蕉串自适应柔性承托式末端,核心是柔性支撑手指,通过增大与香蕉表面的接触面积来实现托持与稳持(图 3a)。Wang 等[60]提出了一种适用于多种果蔬采收的末端,该末端可以切断果柄,并通过 3D 打印夹爪对果实进行承托(图 3b)。单海勇[61]针对棚架鲜食葡萄采收,设计一种“夹剪-柔性承托”末端执行器方案(图 3c)。



(a) 香蕉串承托末端

(b) 苹果采收承托末端 (c) 葡萄采收承托末端

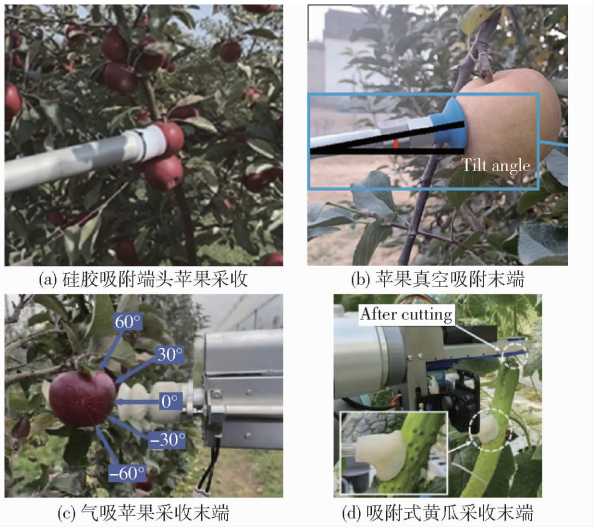
图 3 承托式末端实物图

Fig. 3 Photographs of support-type end-effectors

2.1.3 吸附式

吸附式末端执行器主要利用负压吸盘与果实表面建立吸附接触,通过调节真空压力实现抓取、牵引或保持。该类结构具有机构紧凑、接触过程相对柔和、对末端指爪空间要求较低等优点,尤其适用于表面较光滑、质量较轻或需要快速建立接触的对象。吸附式末端通常需要根据目标曲率、表面粗糙度和局部姿态调整吸盘形状、材料和吸附参数,否则容易出现吸附不稳、扭转脱附和定位误差放大等问题。

目前，吸附式末端执行器在苹果采收领域研究较多。Lu 等[62]围绕真空苹果采收机器人，设计了3 种硅胶吸附端头，并比较其真空压力、扭转脱果能力和采收成功率（图 4a）。Hua 等[63]设计苹果真空吸附末端，系统研究了吸盘直径、吸附区域、负压大小和脱果动作（图 4b）。冯青春等[64]考虑到夹持式末端执行器在作业时容易损伤苹果的问题，设计了一种气吸捕获式苹果采收末端执行器（图 4c）。除苹果采收外，Jo 等[65]针对黄瓜表面曲率大、表皮不平整的问题，设计了吸附和切割一体采收末端（图 4d）。



(a) 硅胶吸附端头苹果采收　(b) 苹果真空吸附末端

(c) 气吸苹果采收末端　(d) 吸附式黄瓜采收末端

图 4　吸附式末端实物图

Fig. 4　Photographs of suction-type end-effectors

2.1.4　包覆式

包覆式末端执行器通过对果实形成较大面积接触，以包络方式实现稳定抓取。相较于传统夹持式，包覆式在保持抓取稳定性的同时降低局部接触应力，特别适用于表皮脆弱、易擦伤或尺寸差异较大的目标。

Zhao 等[66]面向多种果蔬，提出了基于可展开剪式机构的 8 种新型采收末端方案。这些末端的共同特点是：展开后能够形成一个可开合的包容容器，用来承接并包容一个或多个果实，而且只需一个驱动（图 5a）。王睿远等[67]针对猕猴桃易刮伤的问题，提出了气动气囊包覆末端，先从果实底部接近，再利用气囊膨胀实现包覆和固定，之后完成剪切分离（图 5b）。Elfferich 等[68]设计织物管包覆式末端，通过两侧电机驱动织物管扭转，将黑莓包覆（图 5c）。马锃宏等[69]设计了一种柑橘采收末端，其原理是通过球形闭合对柑橘进行包覆，然后咬合剪切果柄（图 5d）。周科宏[70]提出一种欠驱动番茄采收末端设计方案，该末端能够自适应包覆抓取目标番茄（图 5e）。



(a) 可展开剪式机构果蔬采收末端

(b) 气动气囊包覆末端　(c) 织物管包覆式末端

(d) 柑橘采收末端　(e) 欠驱动番茄采收末端

图 5　包覆式末端实物图

Fig. 5　Photographs of wrapping-type end-effectors

2.1.5　复合式

复合式末端执行器是在单一接触方式难以同时满足抓取稳定性、低损伤性和环境适应性要求的背景下发展起来的一类结构[71]。该类结构通常将夹持、包络、承托、吸附等两种或多种接触方式进行有机组合，以充分发挥不同接触模式的优势。从目前研究情况看，复合式末端执行器在适应不同采收对象、降低机械损伤和提升抓取可靠性方面展现出较大潜力，已成为采收末端结构研究的重要方向[72]。但与此同时，其仍存在机构与控制更复杂、传动链更长、体积和集成难度增大以及参数整定工作量较大等问题。

现有研究中，复合式末端多围绕刚性复合末端展开。Yin 等[73]研究了用于芒果采收的集成剪切与抓持末端（图 6a）。Kang 等[74]结合西兰花形态参数和切割试验，提出了夹持与切割一体的末端（图 6b）。Mishra 等[75]设计了草莓采收紧凑型五指软体末端，每个手指最大弯曲角可达 240°，并集成了多模态感知功能（图 6c）。Wang 等[76]针对苹果采收，提出了一种由 4 个锥形软体手指和 1 个多模式吸盘组成的软体末端，可实现扭转和牵拉同步运动（图 6d）。Fang 等[77]设计了刚柔耦合末端，可对番茄果柄离层施加弯折、扭转和牵拉的复合作用。当前，复合式末端的研究正由抓取—分离向抓取—分离—转运一体化拓展（图 6e）。Park 等[78]提出了



(a) 芒果采收剪切与夹持末端 (b) 西兰花夹持与切割末端 (c) 五指软体末端

(d) 四指与多模式吸盘软体末端 (e) 刚柔耦合末端 (f) 采收收集一体旋转式两工位末端

图 6 复合式末端实物图

Fig. 6 Photographs of hybrid end-effectors

一种集抓取、切割和转运于一体的末端,并通过实验室和现场试验验证了各模块性能。陈建能等[79]设计了一种采收收集一体旋转式两工位名优茶采收末端,执行器两端软体采收手指通过正反转循环分别处于采收与收集工位,从而实现采收与收集协同(图 6f)。总体来看,复合式末端执行器正由简单的多功能集成,逐步走向面向复杂场景和连续作业流程的系统化设计。

表 5 对不同类型采收末端执行器的接触方式、结构与材料特征、性能表现、优势和局限进行了对比。总体来看,采收末端执行器已由早期以刚性夹持为主的单一结构,逐步发展为夹持、承托、吸附、包覆和复合式并存的多类型结构体系,并呈现出柔性化、复合化和自适应化的发展趋势。不同类型末端在抓取稳定性、低损伤性、结构紧凑性和环境适应性方面各有侧重,其性能不仅取决于结构形式,也与接触材料密切相关。对于果蔬、茶叶等鲜食或高商品性对象,还应进一步考虑材料的食品接触安全性、可

表 5 各类型末端执行器对比

Tab. 5 Comparison of different types of end-effectors

类型	采摘对象	主要接触	典型结构特征与材料	典型性能指标	主要优势	主要局限
夹持式	果实夹持:柑橘[50,54]、梨[51]、苹果[52]、枇杷[53]以及多类果蔬[43,49];果柄/植株夹持:柑橘[14]、芒果[55]、番茄[56]、茶叶[57-58]等	指爪夹持果实、果柄或植株	两指/三指/多指;刚性骨架配橡胶、硅胶或柔性指面	采摘成功率较高;效率较高;复杂度较低	结构简单,控制直接,易配合拉拔、扭转和切割	接触应力集中;对定位误差和夹持力敏感
承托式	香蕉串[59]、棚架葡萄[61]和其它易损果实[60]	底部承接、托持或容纳	托盘/托指、柔性支撑面;常用软垫、橡胶或弹性材料	损伤率较低;效率中等;复杂度中	接触温和,适合重果、成串果和易损对象	横向约束弱;占用空间较大
吸附式	苹果[62-64]、黄瓜[65]等	负压吸附果面	单/多吸盘、软吸盘;常用硅胶、橡胶等密封材料	效率较高;复杂度中;成功率受密封影响	结构紧凑,侧向挤压小,适合快速接触	受果面形态、湿度和对位精度影响大
包覆式	猕猴桃[67]、黑莓[68]、柑橘[69]、番茄[70]和多类果蔬[66]	包覆、兜袋或咬合约束	气囊、织物管、膜式包络、咬合结构;多用柔性薄膜或织物	低损性较好;复杂度中等偏高;节拍偏慢	接触面积大,应力分散,适应不规则果形	结构相对复杂,易受空间限制
复合式	芒果[73]、西兰花[74]、苹果[76]、番茄[77]、茶叶[79]和多类果蔬[75,78]	多种接触/持取方式集成	多种接触/持取方式集成,刚性材料或刚柔材料复合	综合性能较好;复杂度高;成本较高	稳定性、适应性和低损性兼顾	机构复杂,集成难度高,调参工作量大

清洁性、耐久性和制造成本。因此，采收末端性能评价不宜仅采用采摘成功率单一指标，还应综合考虑无损率、结构复杂度、材料适用性、制造成本等多种因素，并结合具体作物特性、冠层环境和采收方式开展综合优化。

2.2　腕关节

由于农产品在植株上的生长姿态具有明显差异性，同一植株上的目标果实、花朵或芽梢在空间位置、朝向角度以及与枝叶的相对关系上往往并不一致，因此采收机器人在完成接近与采收时，对末端姿态具有较高要求[80]。尤其在枝叶遮挡明显、局部空间狭窄和目标连接部位方向不确定的非结构化环境中，仅依靠机械臂整体运动往往难以同时兼顾作业效率、姿态灵活性和环境扰动控制[81]。为此，在末端执行器与机械臂之间引入腕关节，已成为提升采收末端局部调姿能力和环境适应能力的重要途径。根据腕关节的构型设计方式，可以将腕关节分为两类：串联腕关节和并联腕关节。

2.2.1　串联式

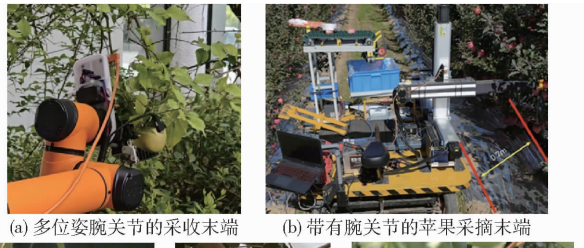
串联腕关节通常具有 1 或 2 个旋转自由度，用于在机械臂末端进行小范围的俯仰、偏摆或定向修正。这类构型的核心优势在于，通过较低的机构复杂度显著提升末端的局部姿态适应性，使机械臂不必通过大幅度重规划即可完成精细对准。

王亚薇等[82]针对番茄采收环境复杂、可移动空间小等问题，设计了一种带有多位姿腕关节的采收末端，实现多位姿多方位的扭转采收（图 7a）。Du 等[83]设计了一种偏置安装的绳驱三指采摘末端，应用于苹果采收（图 7b）。Yaguchi 等[84]开发了一台自主番茄采收机器人，末端采用扭转式夹持的方式，通过手指抓住果实，再利用旋转关节完成旋拧式摘取（图 7c）。穆龙涛[85]设计了猕猴桃采收机器人，末端执行器通过扭转的方式将猕猴桃果实与果柄分离，实现了“抓取—采收—分离”的连贯动作（图 7d）。虞浪等[50]设计了一种欠驱动关节型柑橘采收末端执行器，模拟人手包络动作，并明确采用扭转与拉拔相结合的方式摘取果实（图 7e）。

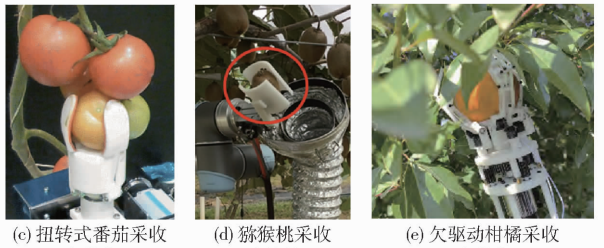
2.2.2　并联式

相较于串联式腕部调姿机构，并联腕关节在采收机器人中的应用研究相对较少，尚未形成成熟、系统的结构谱系，但其在高刚度、低惯量和高精度局部调姿方面表现出的潜在优势，已使其逐渐受到关注。

并联机构目前在农业采收领域应用最多的是 Delta 机构，考虑到 Delta 机构具备结构紧凑、速度快、重复精度好的优点，该机构在草莓采收[86]、茶叶采收[87-88]领域应用较多。Shafei 等[89]针对椰子采收作业环境，设计了一种 4RRR 并联机构作为采收腕关节（图 8a）。赵戬[90]参考温室大棚番茄的生长环境，将机械臂和 3 - RRS 机构形成串联设计出番茄混联机械手。李志鹏[91]以脐橙的采收环境为设计指导，研究一种含有并联腕关节的脐橙采收混联机械手。张立昌[92]设计了一种用于罗汉果采收的混联采收机器人（图 8b）。李月婵等[93]针对草莓采收机器人作业中跟踪精度低、柔顺性差等问题，设计了 RPU - RPR - UPR 解耦并联腕关节（图 8c）。



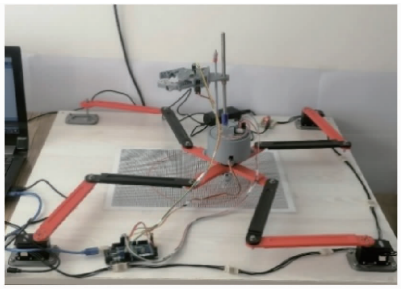
(a) 多位姿腕关节的采收末端　(b) 带有腕关节的苹果采摘末端



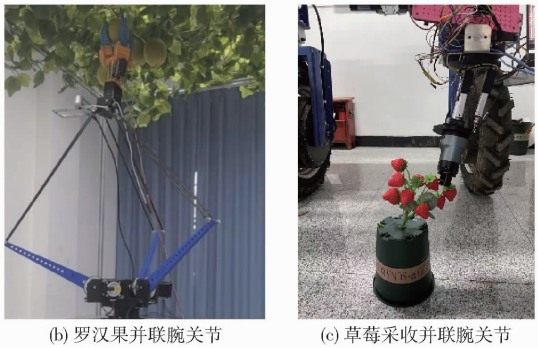
(c) 扭转式番茄采收腕关节　(d) 猕猴桃采收腕关节　(e) 欠驱动柑橘采收腕关节

图 7　串联腕关节

Fig. 7　Serial wrist mechanisms



(a) 4RRR并联采收腕关节



(b) 罗汉果并联腕关节　(c) 草莓采收并联腕关节

图 8　并联腕关节

Fig. 8　Parallel wrist mechanisms

串联式腕关节构型适用于目标方向变化有限、但仍需一定局部修正能力的采收场景，兼具结构紧凑、实现相对简便和工程可用性较强等特点；但其姿

态调节能力受自由度数量和布局方式限制,在多方向随机目标、严重遮挡或狭小空间复杂绕障等任务中,往往难以满足更高水平的近场灵巧操作需求。对于果蔬采收这类兼具近场精细操作、姿态快速修正和抗扰动要求的作业场景,并联腕关节有望在末端局部调姿、狭小空间定向进入以及抓取—分离过程中的稳定支撑等方面发挥作用。串联式与并联式腕关节对比见表 6。

表 6 不同构型腕关节对比

Tab. 6 Comparison of different wrist mechanism configurations

腕关节构型	机构特点	主要优势	主要局限
串联腕关节	由一个或多个转动关节串联组成,运动学建模清晰,工作空间相对较大,姿态调整直观	结构设计成熟,控制实现较直接,易与现有机械臂系统集成,对目标朝向变化适应较好	近端转动带来的惯量累积较明显,局部刚度和抗扰性相对受限,狭小空间内可能引入额外干涉
并联腕关节	多支链闭环机构实现局部姿态调整,通常具有较高刚度、较快响应和较紧凑的局部结构	适合在有限空间内实现高精度、高刚度局部调姿,对定向切割、扭转分离和小扰动调姿更有优势	工作空间通常较小,机构设计与标定复杂,驱动/控制耦合较强,工程实现门槛较高

3 采收末端多模态感知技术

在非结构化农业环境中,枝叶遮挡与多变光照使得传统开环控制的刚性采收末端难以适应复杂作业条件,极易造成果实与植株的机械损伤[46]。因此,赋予末端高级感知能力,使其在物理交互中自主获取关键信息,已成为实现柔顺无损采收的核心前提。针对农产品显著的生物脆弱性与形态非标性,将依次围绕接触力感知、几何形貌感知[63]以及多源融合的抓取位姿感知 3 个递进维度,系统梳理当前采收末端感知技术的研究现状并对比分析。

3.1 接触力感知技术

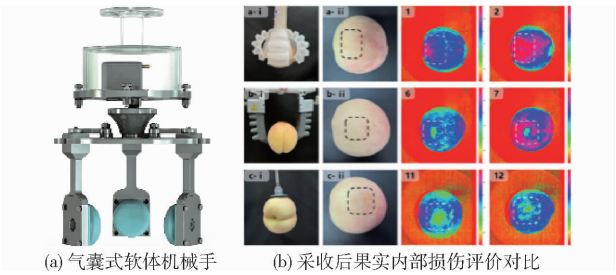
接触力感知是破解采收末端“力大伤果、力小滑落”困境的核心。为适应新鲜果蔬易损的非线性物理特性,必须引入力觉闭环控制,根据接触状态动态调节夹持力,从而实现柔顺无损采收[94]。本节将按照基于传感的直接测力、基于模型的间接估算以及基于视触的力场重构 3 种技术途径,对现有的接触力感知研究现状进行系统梳理。

3.1.1 基于传感的直接测力

在采收末端物理表面直接集成敏感元件是获取接触力最基础的手段,其本质是将物理形变直接转化为电信号。早期的物理触觉感知高度依赖底层硬件的微型化集成,例如 Dahiya 等[95]探讨了将片上触觉传感阵列直接贴附于机器人末端的机制,为采收末端获取果蔬表皮细微压觉响应提供了高密度的硬件基础,是实现对极易损作物精细力控的前提。在具体采收应用中,张伟[96]通过在苹果采收夹爪的指腹内侧嵌入压力传感器,利用压敏元件的电学响应,实现了对果实抓取瞬间物理接触信号的实时捕捉。针对极易损的球形果蔬,鲍秀兰等[97]在多指灵巧手表面集成了接触力感知模块,通过对底层触觉信号的滤波与解耦,精确提取出接触区域的局部应力,从而为末端以最小作用力实现无损包络提供了高频的底层力学数据支撑。

3.1.2 基于模型的间接估算

为了避免物理传感器在复杂农业环境中因直接物理碰撞而失效,或难以在软体执行器表面稳固贴合,部分研究提出通过监测驱动端的状态量,结合力学模型反推末端接触力,如图 9a 所示。针对气动柔性采收末端,付敏等[98]设计了面向油桃采收的气囊式软体机械手,其感知机制摒弃了传统的表面贴片传感,转而通过实时监测气囊内部的驱动气压波动特征。通过建立内部气压与末端输出力之间的非线性映射模型,在算法层面剔除软体材料自身的弹性形变阻力,间接解析出末端对果实的实际挤压强度。这种间接估算方式使传感单元脱离了物理接触,极大提升了感知系统的硬件鲁棒性与使用寿命,从而有效降低了采收造成的果实早期机械损伤(图 9b)。



(a) 气囊式软体机械手 (b) 采收后果实内部损伤评价对比

图 9 接触力感知硬件集成与无损采收效果对比

Fig. 9 Comparison of contact force sensing hardware integration and non-destructive harvesting effects

3.1.3 基于视触的力场重构

近年来,结合柔性光学介质与计算机视觉的视触觉融合感知,成为突破传统离散测力局限的前沿方向。其核心机制是在透明弹性体内部嵌入摄像单元,将受压后的物理形变转化为高维图像信号。Zhang 等[99]提出了 PneuGelSight 软体视触觉传感器,利用内置视觉模块捕捉柔顺交互界面的微观形

变图像流，实现了本体姿态与外部触觉的同步感知。Ma 等[100]基于 GelSlim 传感器，结合有限元逆向分析（inverse FEM），通过追踪接触面图像中密集标记点的空间位移场，精准估算出了连续、分布式的接触力大小与方向。这种高维度的力学解析能力，在杨亮亮[101]针对精密交互任务设计的视觉-力觉融合末端中也得到了验证。视触觉重构技术不仅能获取法向作用力，还能解析切向滑移趋势与微观纹理，使执行器实现了对物理交互界面的全维度感知。

3.2　几何形貌感知技术

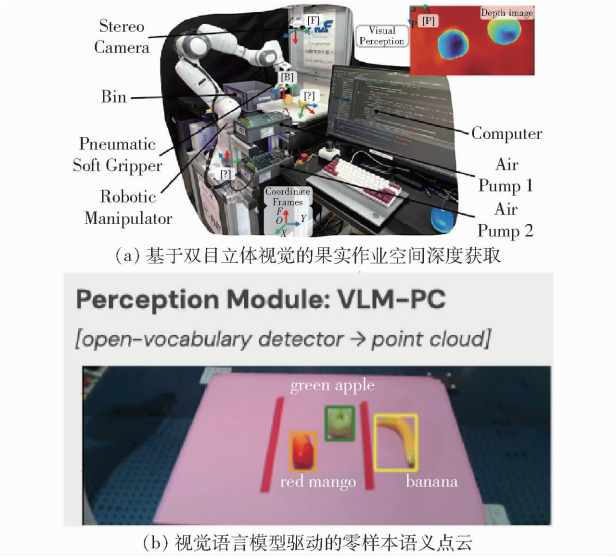
在采收末端作业中，几何形貌感知是实现目标离散提取、环境建模及抓取决策的先验基础。鉴于农业环境的非结构化特征，目标常与枝梗高度交叠，仅依靠质心定位坐标难以满足避障与包络规划的需求。因此，获取目标及其邻域的空间形貌，是确定最优抓取位姿并规避物理碰撞的关键空间约束。本节将从视觉三维感知和多源信息融合两个维度，系统梳理其技术研究现状。

3.2.1　视觉三维感知

视觉感知是获取目标几何形貌的主流技术。立体视觉通过多维特征提取与匹配实现空间信息的恢复，Williams 等[102]在猕猴桃采收研究中，利用双目相机获取视差图，并结合全卷积网络（FCN）对目标进行语义分割，通过建立像素级掩码（Mask）与三维坐标的映射关系，实现了果实与藤蔓、铁丝等背景干扰的物理分离。

在单目视觉应用方面，研究重点在于通过几何约束补全深度信息。Shaw 等[103]提出一种“眼在手上（Eye-in-Hand）”感知方案，通过记录机械臂末端位移获取多帧图像序列，利用 SURF 算法提取目标几何特征点，并基于三角测量原理计算目标的六自由度空间位姿。Yeshmukhametov 等[104]则通过简化感知链路，基于小孔成像模型，利用果实半径的先验尺寸作为几何约束，实现了从二维像素坐标向三维空间距离的非线性反推。为提升感知系统的响应速度，Ribeiro 等[105]引入了轻量化深度学习架构，通过卷积神经网络直接从 RGB 图像中回归五维抓取矩形特征（位置、尺寸及偏转角），在算法层面实现了目标检测与抓取几何描述的并行解析。这类轻量化架构显著降低了对高性能计算硬件的依赖，极大地提升了感知系统在计算资源受限的田间嵌入式作业平台上的实用性。

从形貌感知的演进路径来看，技术正从传统的宏观几何重构向大模型驱动的语义解析跨越。通过双目视觉技术可以恢复果实作业空间的宏观深度特征（图 10a）；而针对非标目标的精准提取需求，进一步提出了视觉语言模型驱动的零样本学习算法，实现了从复杂农业背景中对目标形貌的高纯度语义“剥离”（图 10b）。这种感知维度为后续末端执行器的精确包络提供了更可靠的空间约束。



（a）基于双目立体视觉的果实作业空间深度获取

（b）视觉语言模型驱动的零样本语义点云

图 10　宏观深度成像与微观语义点云解析技术对比

Fig. 10　Comparison between macroscopic depth imaging and microscopic semantic point cloud parsing

3.2.2　多源信息融合

多传感器融合通过互补不同模态的感知优势，是提升系统在极端环境下鲁棒性的关键。针对视觉在光照剧烈变化或反光场景下的局限，Feng 等[106]提出了视觉识别与激光测距融合的感知策略，通过 R－G 颜色分量增强目标特征，在利用模板匹配锁定果串区域后，引入激光测距信息对三维坐标进行精度补偿，构建了“粗定位 + 精测距”的多级感知模型。

为弥补近场范围内视觉点云缺失的盲区，Jiang 等[107]研发了基于声学原理的预接触（Pre-touch）感知技术，通过在指尖集成声学腔体并实时检测环境噪声的频谱变化，利用声波受物理距离影响的频移特性获取近距离物体的表面形貌，为末端在物理接触前的微调提供了关键的近场形貌反馈。Zhang 等[108]在综述中指出，多源信息的有效融合需解决传感器间的时空同步与坐标标定问题，通过引入贝叶斯估计或卡尔曼滤波等算法对视觉、触觉及测距信息进行状态最优估计，能够显著提升感知系统在作物冠层遮挡、自然光剧烈变化等典型农业场景下的空间形貌重构能力，从而支撑末端在非结构化果园环境中完成高难度的抓取决策。

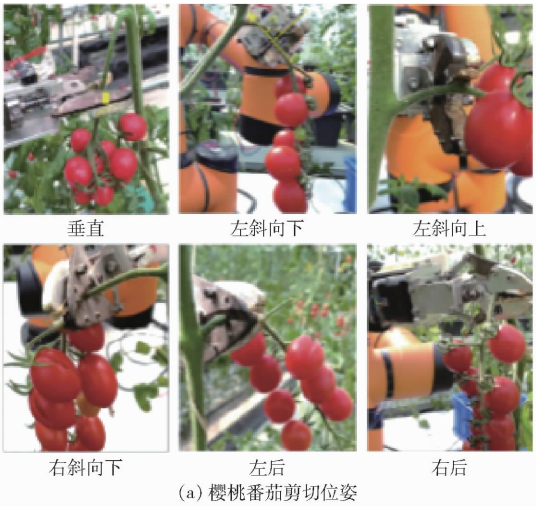
3.3　抓取位姿感知技术

抓取位姿感知是采收末端将环境特征转化为执行逻辑的关键环节。在获取目标几何边界与力学约

束的基础上,位姿感知通过建立末端坐标系与目标局部坐标系间的空间映射关系,为执行器的趋近路径与包络动作提供参数导引。针对农业目标生长的随机性,准确的位姿估计能够有效消除物理交互过程中的不确定性,是实现柔顺采收与规避机械干涉的前提。

3.3.1 视觉引导的全局位姿估计

视觉引导的位姿估计凭借其非接触、大视场的优势,被广泛应用于执行器的趋近路径规划。在宏观姿态确立方面,胡凯莹等[109]基于三维点云数据,利用 RANSAC 算法对果实局部球面与邻近枝条的直线特征进行拟合,以球心至枝条的垂线方向作为接近姿态,避免了采收初期的机械干涉。针对精细化剪切任务,张勤等[110]利用实例分割技术提取果梗区域的拓扑骨骼线,结合深度信息将其映射为执行器的剪切偏航角与俯仰角。如图 11a 所示,该研究通过定义末端工具与作业目标之间的几何关系,展示了樱桃番茄的不同剪切位姿。在应对环境遮挡时,毕松等[111]通过点云局部平面拟合与法向量射线交点搜索逆向估计目标空间位姿,并引入分类器量化遮挡程度以提升决策鲁棒性。图 11b 给出了草莓位姿估计结果,通过在不同遮挡状态的果实点云上标注 X、Y、Z 三维坐标轴,直观呈现了目标的空间位姿状态。此外,朱立学等[112]利用改进的 U - Net 网络提取果实质心坐标与生长点方向向量,并将其与全局三维边界框融合,实现了复杂附着结构下的姿态解算。



(a) 樱桃番茄剪切位姿

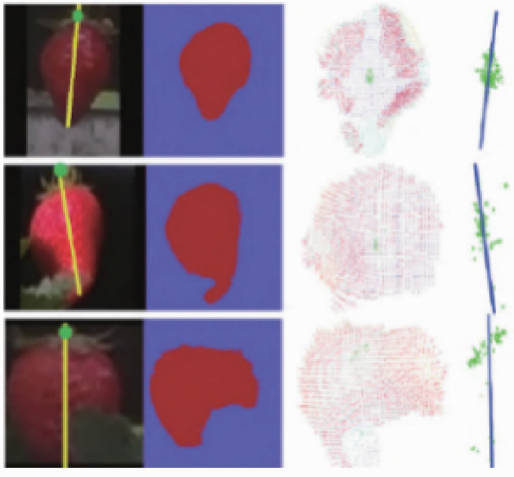

(b) 草莓位姿估计结果

图 11 典型采收目标位姿与估计结果

Fig. 11 Typical harvesting target poses and estimation results

3.3.2 视触融合的交互位姿解析

视触融合感知针对接触瞬间及手内作业阶段的精细位姿修正,解决了视觉盲区下的感知断层问题。马锃宏等[113]通过手眼标定将接触瞬间获取的局部高分辨率点云统一至全局坐标系,采用主成分分析(PCA)与迭代最近点(ICP)算法匹配三维模板库,实现了果轴空间旋转向量的实时解算。在闭环修正层面,Su 等[114]利用集成在气动软体手中的微型相机针孔成像模型,重构接触面三维微观形貌,通过接触质心偏移量反馈实现了抓取姿态的自主调平。对于未知物体的精细操作,Ward-Cherrier 等[115]基于柔性夹爪结合无模型感知算法,在无需先验模型的情况下实现了在线位姿重定向。这对于缺乏标准几何模型且生理形状各异的自然果蔬目标具有极强的自适应能力,有效解决了非标农产品在包络过程中的姿态不确定性问题。针对交互中的离群噪声,Cui 等[116]配合概率点集配准方法有效克服了传统算法对噪声的敏感性。面对极端盲抓场景,Hogan 等[117]提出基于触觉模拟变换的重抓取策略,通过模拟生成候选姿态下的触觉预测图像,启发式搜索最优位姿调整动作,显著提升了末端在不可预知物理交互中的自主决策能力,尤其为应对果蔬表面粘弹性导致的意外滑移或位姿突变提供了冗余的补救方案。

3.4 多模态感知综合对比与演进趋势

综上所述,果蔬自动化采收末端的感知技术正经历从单一模态向多源信息融合的跨越。接触力感知由刚性表面的离散测量,转向软体内部的高维力场重构。几何形貌与位姿解析,则从全局视觉的宏观规划,深度拓展至“视触融合”与“手内闭环微调”。表 7 系统总结了当前主流感知技术路线的应用特性与局限。

为了进一步直观展现上述感知模态在不同物理交互空间下的协同关系,图 12 梳理了智能采收末端感知技术的演进路径。随着末端执行器由远及近地贴近果实,系统的核心感知流正从“宏观纯视觉”向“微观视触觉深度融合”跨越。

空间的微缩更体现在对目标认知层次的跃迁。

表 7　智能采收末端多模态感知技术路线与特性对比

Tab. 7　Comparison of multimodal perception technology routes and characteristics for intelligent harvesting end units

感知模态	感知信息维度与物理参数	典型软硬件方案	智能采收作业中的核心优势	局限性与瓶颈
外部视觉全局感知	宏观三维坐标、轮廓边界、初始接近位姿	RGB－D/双目相机[102]、Eye-in-hand 单目[103]、RANSAC 拟合[109]、实例分割[110,112]	视野广、非接触；能提前引导机械臂全局定位并规避枝干干涉	极易受果园遮挡、反光干扰；在末端贴近目标的瞬间会产生“视觉盲区”
表面物理接触触觉	夹紧力极值、离散单点压力、接触安全阈值	贴片式薄膜压力传感器[97]、气囊压力监测[98]、多目标寻优控制(NSGA－Ⅱ)[97]	控制逻辑相对简单，系统成本低廉；能有效防止果实发生机械挤压损伤	获取信息维度单一(仅标量力)，无法感知果实的三维几何形状与滑移状态
高分辨率视触觉融合	高分辨率三维力场、微观形貌、真实位姿旋转角	GelSlim[100]、TacTip[115]、PneuGelSight[99]、ICP/PCA 配准算法[113,116]	完美弥补视觉盲区；实现“力-形-位姿”解耦与手内高精度闭环微调	硬件集成难度极大；软体非线性标定困难；多模态数据处理延迟较高
近距邻近与感知	抓取前的微小距离、局部曲率与接近状态	声学共振(海螺效应)[107]、激光三角测量/主动测距[106]	针对透明/强反光目标效果极佳；在复杂遮挡下实现“未触先知”的主动避障	有效探测范围极窄(通常小于 10 mm)；多源传感器的时空同步要求极高

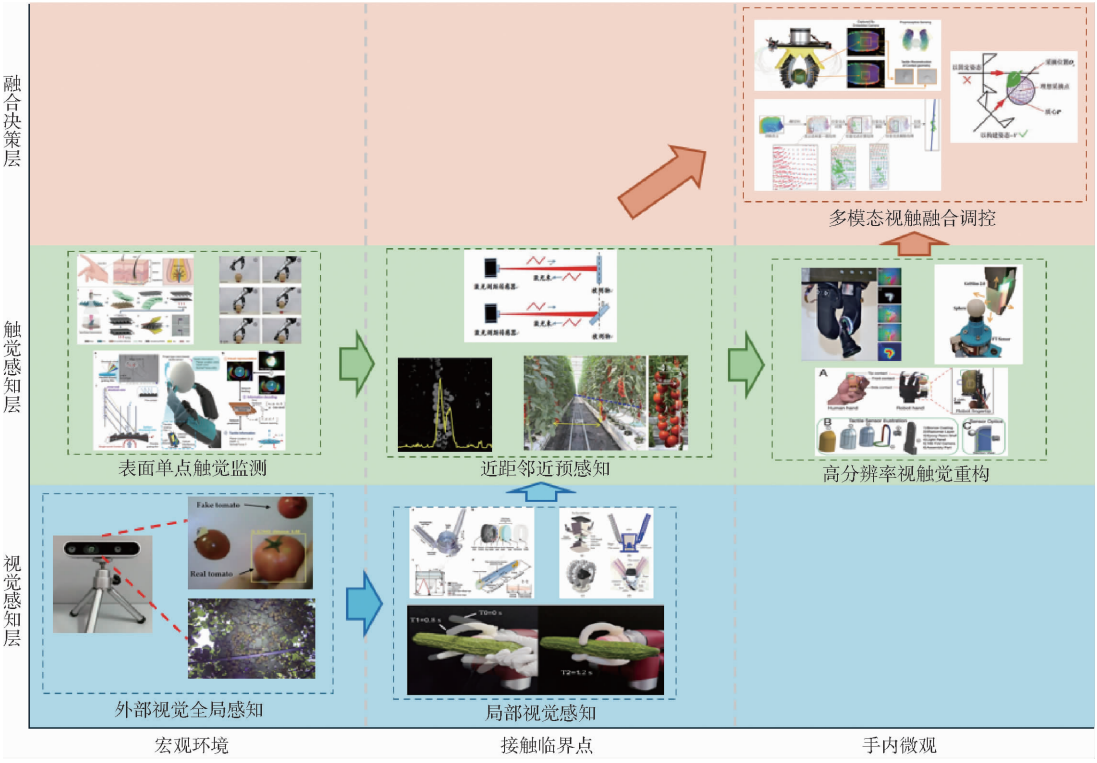


图 12　智能采收末端多模态感知技术演进路径图

Fig. 12　Evolution path of multi-modal perception technology for intelligent harvesting end units

通过集成大语言模型(LLM)与视觉语言模型(VLM)，末端执行器已展现出理解非专业指令并动态重构作业任务的具身认知能力[118]。针对自然生长的非标果蔬，利用视觉语言模型引导的点云处理技术与点云变换器(PCT)，末端表现出卓越的零样本学习(Zero-shot learning)能力，无需大规模田间标注即可实现对未知变异目标的精准识别与位姿预测[119]。这种“大脑-身体-环境”的闭环交互范式，赋予了采收系统在开放世界复杂工况下持续自我进化的潜力[120]。

感知机制的终极形态将是理化信息的高度一体化，尤其是赋予末端“手内感知成熟度”的能力。通过在触觉传感层集成近红外(NIR)光谱系统，新型光/电人工皮肤使末端在接触果实的瞬间即可同步解析其分子特征[121]。该技术不仅能实时监测抓取力，更能非破坏性地评估果实的含糖量、硬度梯度及生理成熟度，从根本上解决了传统视觉感知难以穿透表皮获取内在品质信息的难题。结合数字孪生(Digital twin)与增强智能(Augmented intelligence)架构，未来的感知体系将由机器人承担高强度的理化解析任务，而人类作为高层监督者通过语义引导全局策略，从而构建起安全、可信且具备“理化视知觉”的现代化智能采收模式[122]。

4 采收末端运动控制方法

精准的多模态感知技术为获取目标位姿提供了信息源,而以此为基础实现采收对象的低损稳定收集与高效脱离则依赖于采收末端的运动控制方法。为适应采收对象生长位姿的各向异性,在机械臂提供全局粗定位的基础上,末端需进一步进行局部姿态微调的空间轨迹规划,此动态过程主要涵盖收集与脱离两个核心控制阶段。其中,收集控制旨在实现末端对采收对象的精准定位与低损的稳定抓取,依据末端与目标建立物理约束方式的不同,主要分为夹持、承托与包覆控制方法。而脱离控制则侧重于高效解除果实与植株间的物理连接,依据施加外载荷方向与断柄机理的差异,可进一步细分为拖拽、旋转、切割与掰折脱离控制方法。在上述作业中,采收对象收集时需闭环协调位移轨迹与接触力以避免表面损伤。采收对象脱离时必须妥善处理末端与柔性植株间的刚柔耦合动力学问题,保证运动轨迹与果柄自然生长位姿的运动学协调性,从而有效抑制受力突变引起的冠层激振与非期望运动干涉,规避枝叶撕裂与二次碰撞,最终在复杂环境中实现低损、高可靠的采收作业。

4.1 采收对象抓取控制方法

4.1.1 夹持控制方法

在采收对象收集阶段,夹持控制是构建稳定物理约束的核心策略。夹持式末端通常依赖两指或多指机构从多侧径向逼近果实,利用摩擦力或形封闭建立稳定物理约束,主要适用于柑橘、苹果等具有一定抗压强度但易受局部挤压损伤的类球形果实。其运动学核心特征在于各接触点轨迹的高度空间对称性与时间同步性。在对心夹持中,各触点运动轨迹须向同一几何中心聚拢,以确保接触瞬态的受力均衡,防止果实发生非期望偏转或滑脱。在此过程中,需快速响应果径变化形成适形的收集空间,其次必须严格约束末端的最大张角及闭合轨迹,以规避茂密冠层中枝叶的物理干涉。同时,在准备施加脱离载荷时,需妥善处理刚柔耦合动力学问题,在防滑脱与防压伤之间实现接触力的平衡。

针对上述作业要求与技术难点,为了在保证快速响应果径变化的同时规避冠层空间干涉,相关研究引入了多种运动与力位协同控制策略。虞浪等[50]采用改进遗传算法对欠驱动关节末端的运动学参数进行寻优,在控制逻辑中设定单根末端指节的最大位移偏移量为 61.4 mm,确保对不同果径柑橘实现快速响应与收集,同时有效抑制了过度张开引起的枝叶干涉(图 13a)。在末端整体逼近果实的路径控制上,Du 等[83]利用多级同步伸缩机构规划末端空间运动轨迹,使末端能够沿着精确约束的轴向直线路径穿透茂密冠层,从而实现对目标果实的逼近与稳固收集(图 13b)。此外,仿生与柔性末端在逼近与收集果实时的运动则呈现出多自由度分段弯曲或连续大变形的特征,其控制更侧重于姿态自适应与被动顺应。Li 等[51]设计的绳索驱动仿生末端,通过指内侧的抓取力感知与指关节姿态反馈,动态调节拉索张力,使得各指节在收集过程中能像人手般进行分段弯曲运动,自适应贴附梨果的不规则表面(图 13c)。针对番茄、嫩茶芽等极易损目标,收集阶段的运动控制进一步演化为基于底层力学模型的形变指导。Zhao 等[58]引入静力学模型(图 13d),An 等[72]引入伪刚体模型,对柔性末端在接触目标后的连续弯曲大变形行为进行建模。此类方法在完成收集的动作中,利用柔性材质的被动几何形变特

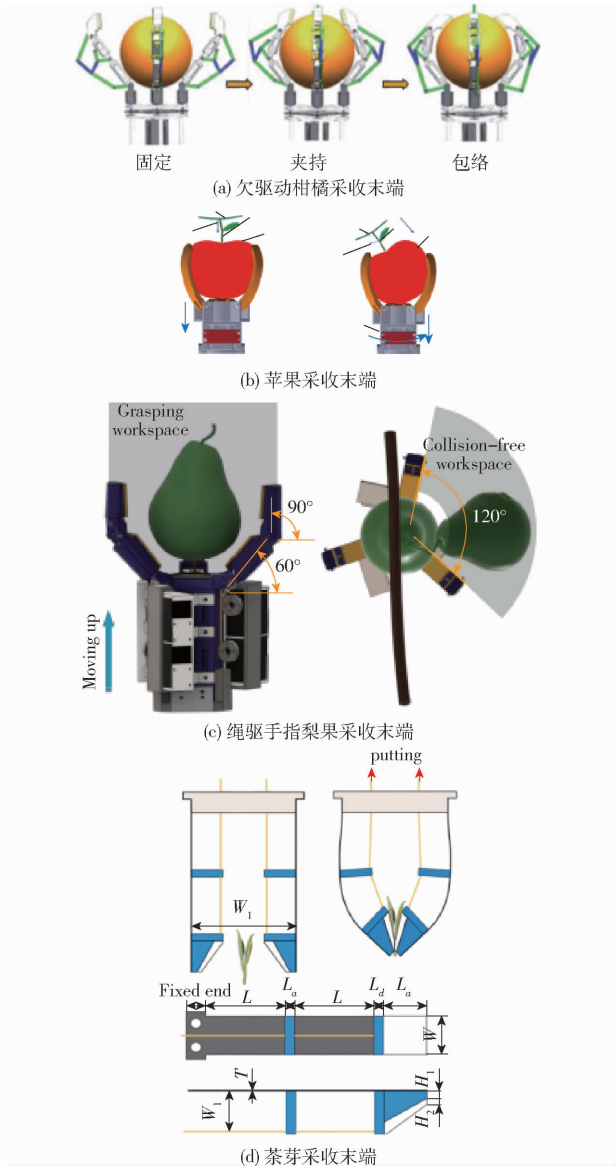


图 13 夹持式末端运动控制

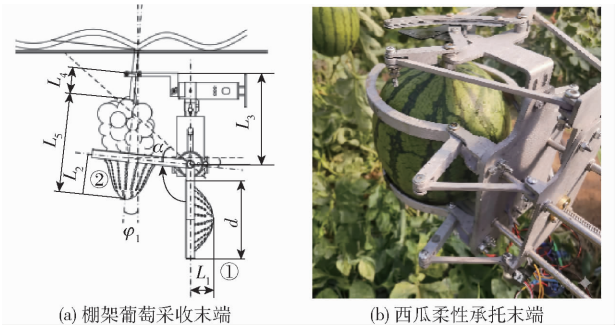
Fig. 13 Motion control of clamping end effector

性，自动顺应果实轮廓完成收集运动。

4.1.2　承托控制方法

承托控制方法旨在通过采收末端自下而上贴合并半包围采收对象，构建以法向支撑力主导的物理约束，从而实现对目标重力的稳定接管与姿态固定。该方法主要适用于质量大、表皮娇嫩或呈串状丛生的果实。在末端开始运动到完成包络的收集阶段，要求精确对齐目标质心垂线，执行平稳的自下而上进给贴合。此阶段典型运动特征为沿特定轴向的直线平动，或多执行单元的同步收拢包络。为保障接触过程的力柔顺过渡，控制系统需协调末端进给速度、托举位移与目标悬垂姿态的动态关系，有效规避表皮损伤及冠层非期望振荡。

在单一自由度或规则空间操作中，末端收集常表现为直线平移特征。针对大质量、长轴距的棚架葡萄，单海勇[61]设计了手-臂协同的进给控制策略。在机械臂完成粗定位后，驱动末端丝杠执行自下而上进给，并通过协调控制机械臂向下运动以精确补偿托盘向上位移，实现对果穗底部的平稳托举（图 14a）。面对质量较大或形态不规则的果实，部分研究采用多机构协同收拢收集。如大质量且易损的吊蔓西瓜，屈慧星[123]提出了一种多柔性指同步收拢的承托控制策略。在末端自下而上进给对齐果实底部后，控制系统驱动多根柔性指顺应西瓜球面轮廓同步向内闭合，通过提供均匀的底部托力，在避免局部应力集中的同时实现了对果实重力的无损收集（图 14b）。为规避不可控挤压损伤，Xie 等[59]将接触力学约束引入收集控制中。在承托机构向内收拢闭合贴合香蕉果穗时，系统以接触应力不超过损伤临界值为物理约束，调节末端的柔顺动作。这种基于力学约束的策略，保障了末端在动态贴合期平顺建立支撑。



(a) 棚架葡萄采收末端　　(b) 西瓜柔性承托末端

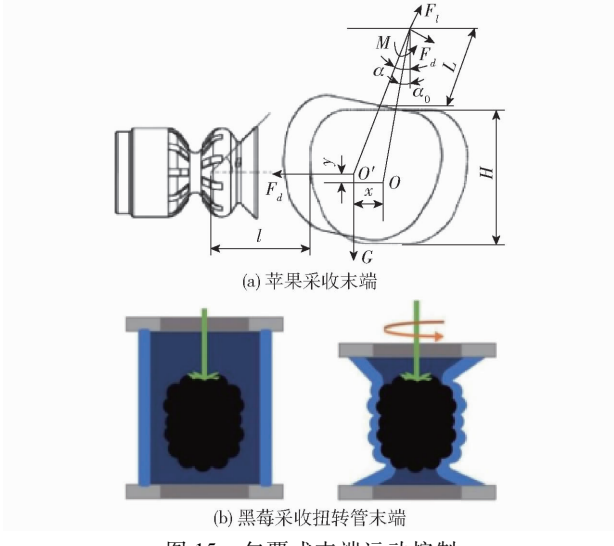
图 14　承托式末端运动控制

Fig. 14　Motion control of supporting end effector

4.1.3　包覆控制方法

包覆式采收的核心在于建立末端与采收对象间大面积、共形贴合的柔性约束。从切入工作空间到完成收集的准备阶段，运动控制需克服非结构化环境下的刚柔耦合非线性形变，规划执行部件的运动轨迹与形态演变，以规避初期碰撞损伤并实现稳定收集。依据轨迹差异，此阶段运动主要表现为向心收敛、轴向贴合与复合轨迹包覆 3 种特征。其中，向心收敛与仿形弯曲运动是气囊或软体末端最显著的特征，其轨迹并非整体刚性平移，而是多点同步向心弯曲的非线性收敛。王睿远等[67]在猕猴桃包裹作业中，利用气压传感器构建反馈回路动态调节气压，驱动柔性气囊沿果实轮廓发生平滑的向心收缩直至完全贴合。

轴向伸展与自适应贴合运动主要见于气吸或柔性吸盘，表现为沿果实法向的逼近及接触瞬间的局部自适应延展。冯青春等[64]在捕获苹果时，依据位姿反馈动态调控真空度，引导吸盘产生受控的轴向伸展以主动适应不规则曲率（图 15a）。Jo 等[65]采用位移与吸力协同策略，驱动吸盘在接触瞬间径向展开并高强度包裹黄瓜。针对特定脆弱果实，末端常采用复合轨迹包裹。姬江涛等[124]在双孢菇采收中规划了先挤压后锁定的路径，引导末端精准轴向向下挤压，在包裹半球面的瞬间快速抽气触发介质相变，瞬间固化仿形形态。Elfferich 等[68]则为黑莓设计了螺旋扭转轨迹，精确控制柔性织物套筒的旋转以产生均匀的径向收缩（图 15b）。



(a) 苹果采收末端

(b) 黑莓采收扭转管末端

图 15　包覆式末端运动控制

Fig. 15　Motion control of enveloping end effector

4.2　采收对象脱离控制方法

4.2.1　拖拽脱离控制方法

拖拽式末端主要通过构建执行器与对象间的纯轴向力学关联，沿特定方向施加平动拉力，使果实-植株连接处在单向受拉破坏机制下发生分离。此类方法尤为适用于具备显著分离层且抗拉强度低于抗弯强度的采收对象，或需将其从基座中直接轴向抽离的特种作物。从收集目标至其完全脱离植株的动

态过程中,拉拔式末端的运动轨迹通常呈现为沿目标自然生长主轴退行的空间直线。在此周期内,末端夹爪或吸盘上各点的运动学特征表现为高度一致的平行移动,即维持初始抓取姿态向外作纯平动拉伸。

通过动态测量试验,Gao 等[125]比较了 4 种樱桃番茄采收模式,其中拉拔式(图 16b)为沿水平方向拉拽果实,其路径可以描述为沿果柄主轴方向的直线射线。而在红花采收作业中,陈棒棒等[126]设计的三角对切-拉拔式末端在完成前期夹持后,主要依靠多工作段凸轮机构使运动状态转化为沿作物法向的单向平移退行轨迹,从而物理上实现花丝的顺畅抽拔。若径向路径偏移或拉力突变超越植株弹性屈服极限,极易产生非期望侧向弯矩。为了深入解析该现象,Hu 等[13]通过有限元仿真与试验分析了不同收集模式对同枝相邻果实的振动影响,发现不当的受力方向会引发柔性枝茎剧烈的振动,进而增加相邻果实的掉落。针对这一脱离过程的控制难点,部分研究通过逆运动学求解与轨迹规划来保证平动动作的准确性。Silwal 等[127]在苹果采收机器人的系统集成研究中,重点结合了视觉定位反馈与机械臂逆运动学求解,通过严格的空间轨迹控制引导末端精确到达目标位姿,随后沿设定的拉拔路径平稳后退执行拉拔动作,以实现果实与植株的有效脱离。

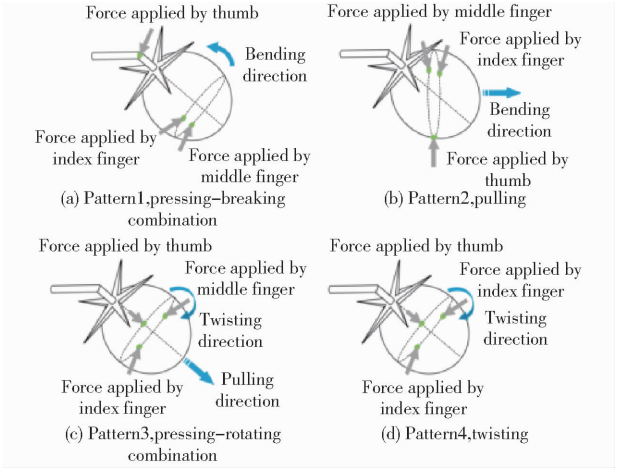


图 16 4 种樱桃番茄采收模式

Fig. 16 Four harvesting methods for cherry tomatoes

4.2.2 旋转脱离控制方法

相较于易引起冠层激振的直接拉拔,旋转脱离控制方法是指在末端建立对目标的稳定物理约束后,沿果实-果柄连接轴线或植株上的特定空间旋转中心施加旋转力矩,使果柄在扭转剪切载荷作用下发生断裂脱离。此类运动控制方法主要适用于果柄较细、抗扭强度较弱,且拉拔力过大易造成枝叶撕裂与果实损伤的采收对象,其运动轨迹通常要求以果实自身中轴线或果柄结合点为旋转中心,末端夹爪、吸盘等与果实的接触点随之呈同心圆弧轨迹运动。在这一动态脱离过程中,必须保证末端的旋转轴线与果柄自然生长位姿的运动学协调性,从而有效避免因受力轴线偏移而导致的非期望运动干涉或二次碰撞损伤。

为克服上述技术难点并满足低损高效的采收,旋转脱离控制需要闭环协调末端的旋拧角度、速度与动态接触力。在具体的运动机构与轨迹规划上,部分研究通过在末端内部集成独立的旋转单元来实现脱离动作。严童杰等[128]针对苹果设计的吸附-夹持-旋拧执行器,在吸盘与夹爪完成收集后,旋拧电机驱动末端绕果实中轴线进行原位自旋,该过程采用驱控一体化位置闭环控制,实现了旋拧角度与速度的定点控制。Yaguchi 等[84]开发的番茄采收末端(图 17a)以及 Gao 等[129]设计的温室樱桃番茄采收末端(图 17b)也采用了类似思路,通过旋转关节或旋转气缸带动果实自旋,降低了脱离阻力与冠层扰动。此外,Williams 等[102]在猕猴桃采收研究中,依托多臂系统并结合轨迹规划控制末端执行器执行旋转-拉拔复合动作,利用末端旋转产生的空间位姿变换使果柄断裂(图 17c)。虞浪等[50]设计的柑橘欠驱动末端,利用机械臂的冗余自由度来实现协同扭转,在完成自适应指型收集后,直接通过机械臂末端腕部关节沿预设的空间姿态偏转,带动执行器整体完成扭转断柄。

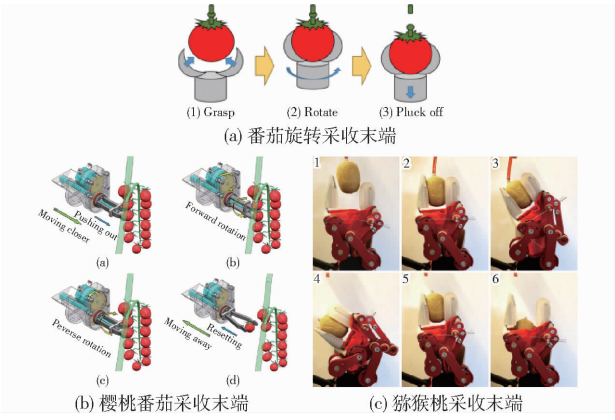


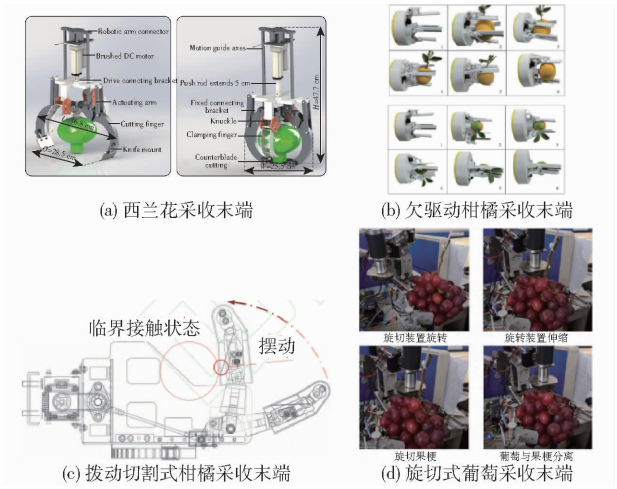
图 17 旋转式末端运动控制

Fig. 17 Motion control of rotating end effector

4.2.3 切割脱离控制方法

作为实现采收对象脱离最直接的方式,切割脱离控制主要通过末端搭载的刀具对植物组织产生局部高剪切应力,强制切断果柄或茎秆,多适用于果柄韧性强或强行拉拽易引发冠层剧烈激振的采收对象。传统的切割末端多依靠基于时间序列的开环控制或常规的位置闭环控制,赵雄等[130]结合朝天椒果梗的生物力学特性建立动态静力数学模型,在位置控制的基础上设定了剪切入刀斜角范围,从而实

现了外部驱动力最小的轨迹切入。为了精准把控剪切时机以抑制受力突变引起的非期望位移，Yao 等[131]依托视觉-触觉融合技术，利用指间触觉阵列实时捕捉果柄进入夹持区域的触觉时序，并通过状态机模型动态触发刀片的交叉闭合动作。为了确保末端刀具在复杂冠层中切入的安全性与准确性，Kang 等[74]设计的西兰花采收末端（图 18a），将轻量化语义分割网络的精准定位与机械臂运动规划相融合，为采收末端实时提供安全的局部切入位姿，有效引导整个末端无干涉地完成对粗壮茎秆的定位与平稳切断。



(a) 西兰花采收末端　(b) 欠驱动柑橘采收末端

(c) 拨动切割式柑橘采收末端　(d) 旋切式葡萄采收末端

图 18　切割式末端运动控制

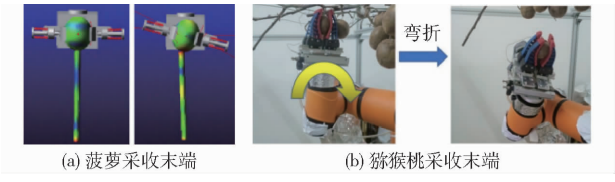
Fig. 18　Motion control of cutting end effector

为了精细化剪切动作，针对柑橘与荔枝等单生果实，Yu 等[132]设计的夹剪一体式末端（图 18b），夹持模块首先沿圆弧向内收集果实，随后通过接触阻力自适应切换或机械机构的几何位移联动触发切割动作，带动刀片沿固定中心划出圆弧切割轨迹。面对枝叶遮挡严重的复杂环境，蒲应俊等[133]将电机旋转转化为 V 型刀具高频往复的直线与微小圆弧复合轨迹（图 18c）。马锃宏等[69]则创新性地提出了采用球形空间闭合轨迹的咬合式末端，刀片随半球壳呈三维空间啮合运动，大幅提升了拢果与剪切的容差。此外，针对葡萄、荔枝等大体积或簇生果实，尹建军等[134]设计了抓持-旋切末端（图 18d）。

4.2.4　掰折脱离控制方法

掰折脱离是指在采收末端完成对采收对象的收集约束后，围绕特定的旋转中心驱动末端转动，通常位于植株外，通过对果柄施加弯矩，使其在受拉一侧的应力率先超过其屈服极限从而发生断裂。此类末端适合具备显著天然离层或果柄横截面存在结构突变、材质较脆的采收对象特征。由于此类果实的果柄抗弯能力普遍较弱，利用弯矩脱离不仅断柄高效，且能大幅降低实现分离所需的外部载荷。针对植株各向异性的生长位姿，该控制过程的技术难点在于如何通过运动学规划确保弯折应力精准作用于目标断裂区，同时有效抑制因力矩突变引起的柔性冠层激振，规避枝叶撕裂等非期望损伤。

针对菠萝果茎连接处的截面突变特征，俞亚新等[135]设计了一种折断分离式机构（图 19a），利用直线与曲线导向套的组合驱动，将末端的直线运动转化为仿人掰折的复合弧线轨迹，通过优化机构传力比参数实现了接触力与折断力矩的有效协调。Sun 等[136]通过量化分析菠萝茎-果连接处的力学响应特性，为弯折脱离控制中临界偏转角与折断转矩等核心运动参数的设定提供了试验支撑。针对棚架栽培的猕猴桃采收，由于作业空间的限制，末端运动需与机械臂全局空间定位高度协同。高建波[137]提出采用柔性末端执行器完成果实低损收集，并依托机械臂或末端手爪的局部偏转，规划特定角度的弯折复合路径以破坏果柄维管束（图 19b）。



(a) 菠萝采收末端　(b) 猕猴桃采收末端

图 19　掰折式末端运动控制

Fig. 19　Motion control of bending end effector

4.3　运动控制方法研究成果分析

采收对象的包络控制是实现低损、稳定抓取并为后续脱离作业奠定力学基础的核心环节。面对自然环境下非结构化的枝叶遮挡、果实形态差异及物理特性的多样性，夹持式、承托式与包覆式这 3 种包络控制方法在约束构建机制与核心控制策略上各有侧重。在作业初期，三者均高度依赖视觉伺服控制以克服环境干扰，实现空间平滑接近与目标精准对准。而在受限接触与约束建立阶段，夹持控制重点应用闭环抓取控制与力位混合控制，通过多指协调与力学反馈平衡抓取稳定性与果实损伤临界点；承托控制强调严格的顺序动作控制与接触瞬态的力位控制，以化解大惯量目标带来的冲击力；包覆控制则在此基础上，进一步结合多驱动通道时序协同与刚柔耦合的力位闭环控制，以应对柔性大变形带来的非线性难题。

而采收对象脱离是收获作业的最终环节，其核心目标是在维持末端稳定收集约束的前提下，通过施加合理的外载荷，高效且低损地解除果实与植株间的物理连接。不同的脱离方式在作用机理上分别对应着果实所在枝条在轴向拉伸、扭转剪切、局部切削和弯矩作用下的断裂特性，因此也面临着非结构化环境干扰与刚柔耦合动力学挑战。在脱离动作初

期,4 种脱离方式均高度依赖视觉伺服控制与严密的顺序动作控制,以确保拉拔矢量、旋转中心或切割轨迹的精准对齐,并稳固维持初始的收集约束。而在脱离载荷施加与断柄瞬态响应阶段,拖拽脱离方法重点应用力位混合控制与基于力反馈的闭环抓取,通过自适应枝条弯曲轨迹来化解拉力突变及冠层激振;旋转式强调基于滑移反馈的闭环抓取与基于多模态信息的决策控制,以防止果实在旋拧阻力下擦伤,并及时应对断柄瞬间的力矩释放;切割式高度依赖顺序动作协同与基于视觉-触觉融合的闭环控制,以规避刀具切入的物理干涉与高频冲击;掰折式则在此基础上,进一步结合视觉引导的力臂锁定与顺应受力的力位混合控制,并趋向利用基于强化学习的智能控制自主寻优断柄角度与阈值。

综上所述,面向目前农产品低成本、低损伤、高效率和高成功率的采收需求,运动控制方法应由单一动作控制向采收全过程协同优化发展。通过轻量化视觉模型、多模态融合和边缘计算部署,可在降低系统成本的同时提升复杂环境下的识别鲁棒性;结合采收可行性评价、目标优先级排序和路径规划,可减少无效接近与重复调姿,提高作业效率;进一步融合力/位混合控制、阻抗控制、触觉反馈、强化学习和模仿学习等方法,可实现抓取力、接近姿态与脱离动作的在线调整,从而降低损伤并提高采收成功率。由此,采收控制将逐步由单次闭环走向多次闭环自适应调控,为具身智能驱动的自主采收提供支撑。

5 存在问题分析与发展展望

从采收末端整体研究来看,现有研究仍以单项技术突破和特定场景验证为主,在复杂非结构化农业环境下的工程实用性仍然有限。采收末端在实际作业中仍面临结构容错性不足、感知维度有限以及控制柔顺性与自适应性不足等问题。未来需要围绕结构、感知和控制 3 个层面,推动采收末端由单一功能部件向结构—感知—控制闭环协同的智能采收操作系统发展。

(1)由结构容错性不足向专用化、模块化与农机农艺协同设计方向发展

当前采收末端在结构层面的突出问题是结构容错性不足。现有末端多针对某一典型果实尺寸、姿态或局部环境进行设计,在实验条件下能够实现较高采收成功率,但面对同类农产品内部存在的尺寸波动、成熟度差异、连接方式变化和局部遮挡时,仍容易出现抓取不稳、分离失效或损伤增加等问题。同时,不同农产品在物理特性、连接特性和冠层环境方面差异显著,决定了采收末端不宜片面追求“一种结构适用于所有作物”,而应以同类农产品专用化为主,在专用化基础上提升对个体差异和环境变化的容错能力。

未来在结构层面应从以下方向深入研究:①推动采收末端向模块化、可重构、刚柔耦合和高灵巧方向发展,通过末端执行器、腕关节及其他功能模块的组合,提高采收末端对同类作物不同生长状态和局部环境变化的适应能力。②进一步强化末端执行器、腕关节和机械臂的一体化设计,使末端能够在较小扰动空间内获得更优采收姿态,提高复杂冠层中的可达性和作业稳定性。③结构优化不能脱离种植模式和作业对象特性单独进行,未来需要更加重视农机农艺融合与作业规范化,通过优化树形、整枝方式、果实分布和作业通道,降低环境随机性,为专用化采收末端提供更加稳定的作业条件。

(2)由单一视觉与局部感知向多维感知、全手感知与高鲁棒融合方向发展

当前采收末端在感知层面的主要问题是感知维度不够、感知部位有限且鲁棒性不高。现有研究仍以视觉感知为主,主要完成果实识别、空间定位和局部姿态估计,但对果柄、花梗、接触力、滑移、支撑状态和脱离状态等近场交互信息获取不足,导致系统更多停留在“看见目标”的层面,而难以准确判断抓取是否稳定、接触是否安全以及动作是否需要调整。同时,当前传感器布局多集中于末端局部区域,尚未形成面向整只末端或关键操作区域的分布式感知能力,在复杂冠层、遮挡环境和动态接触过程中,其鲁棒性仍然有限。

未来采收末端感知应由单一视觉感知逐步走向视触觉融合和多模态信息融合:①在继续提高视觉系统对遮挡、反光、密集分布和复杂背景适应能力的基础上,加强触觉、力觉、滑移觉和接触状态感知,使机器人能够获取果实、连接部位与末端之间的实时交互状态。②感知布局应由局部传感走向全手任意位置感知或关键区域分布式感知,提高末端对接触位置、接触面积和接触力变化的综合感知能力。③感知系统应与农艺标准化相配合,通过改善采收对象暴露度、减少极端遮挡和增强关键部位可见性,为多模态感知提供更稳定的输入条件。

(3)由单次闭环走向多次闭环自适应调控,并最终落脚于具身智能

当前采收末端在控制层面的核心问题是柔顺性与自适应性不足。许多系统仍采用识别、定位、接近、抓取和分离的单次闭环流程,依赖预设轨迹、经验阈值或固定动作模板完成操作,对目标位置偏差、

姿态变化、局部碰撞和分离失败等情况缺乏足够的在线修正能力。尤其是在缺少力反馈和触觉反馈的情况下，末端往往难以根据接触状态动态调整抓取力、接近方向和分离方式，导致采收过程中的柔顺性不足、失败恢复能力较弱，难以适应复杂非结构化场景。

面向低成本、低损伤、高效率和高成功率的采收需求，未来智能算法应贯穿感知、决策和执行全过程，并推动控制方式由单次闭环向多次闭环自适应调控发展。通过轻量化目标检测、模型压缩、边缘计算部署和低成本传感器融合，可降低系统硬件与计算成本；结合采收可行性评价、目标优先级排序和路径规划算法，可减少无效接近和重复运动，提高单位时间采收效率；进一步引入力/位混合控制、阻抗控制、触觉反馈控制、强化学习和模仿学习等方法，可实现抓取力、接近姿态和分离动作的在线调整，从而降低果实损伤风险并提高复杂环境下的采收成功率。在此基础上，采收机器人应在作业过程中持续感知目标、环境和交互状态，持续判断当前动作是否合理，并根据视觉、触觉和力反馈不断修正动作策略，逐步形成偏差可修正、抓取不稳可调整、分离失败可重试的自适应能力。从整体来看，采收末端的发展将逐步向具身智能靠拢，即由感知获取目标与环境信息，由控制完成状态判断与动作决策，由结构执行具体采收行为，最终形成感知—决策—执行闭环系统，使机器人能够在与作物和环境的持续交互中实现自学习、适应新环境并完成新任务。

总体而言，选择性收获机器人采收末端的发展方向，已经由单一部件优化逐步转向系统级协同演进。未来只有在结构上提升专用化基础上的容错能力，在感知上实现多维信息融合与全局-局部协同获取，在控制上建立持续闭环、自适应调控与具身学习机制，并同步推进农机农艺融合与作业规范化，才能真正推动采收末端从实验室验证走向复杂农业场景下的稳定应用，为精准、低损和高效的智能采收提供支撑。

参　考　文　献

[1] 谭励，余煌，杜小强，等. 基于稳定夹持的类球形果实采收末端执行器优化设计与试验[J]. 机械工程学报，2026，62(3)：353－365.
Tan Li, Yu Huang, Du Xiaoqiang, et al. Optimal design and experiment of end-effector for harvesting quasi-spherical fruits based on stable grasping[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2026, 62(3): 353－365. (in Chinese)

[2] 贾江鸣，王登艺，赵新雨，等. 名优茶采收一体式末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报，2026，57(7)：274－284.
Jia Jiangming, Wang Dengyi, Zhao Xinyu, et al. Design and experiment of an integrated end-effector for premium tea harvesting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(7): 274－284. (in Chinese)

[3] 中共中央，国务院. 中共中央 国务院关于锚定农业农村现代化 扎实推进乡村全面振兴的意见[EB/OL]. [2026－02－03]. https://www.gov.cn/zhengce/202602/content_7056931.htm

[4] 中共中央，国务院. 加快建设农业强国规划(2024—2035 年)[EB/OL]. (2025－04－07)[2026－02－03]. https://www.gov.cn/zhengce/202504/content_7017469.htm

[5] Zeroual I, Benaziza A, Adjal F, et al. Evaluation of morphological characteristics in some apple varieties (Malus pumila Mill.) from northeastern Algeria[J]. Annals of Valahia University of Targoviste. Agriculture, 2024, 16(1):1－6.

[6] 蒲应俊，李澳，王淑明，等. 脐橙挤压损伤力学特性及其参数辨识方法[J]. 农业工程学报，2024，40(22)：273－282.
Pu Yingjun, Li Ao, Wang Shuming, et al. Mechanical characteristics of compression damage in navel orange and its parameter identification method[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(22): 273－282. (in Chinese)

[7] Lopez A C, Nix M, Hickey T, et al. Improved tomato breeding lines adapted to organic farming systems have enhanced flavor, yield, and disease resistance[J]. HortScience, 2024, 59(9): 1299－1307.

[8] 徐健. 高架草莓采收机器人原地转向移动平台设计与试验研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2025.
Xu Jian. Design and experimental study on in-situ steering mobile platform for elevated strawberry harvesting robot[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2025. (in Chinese)

[9] Im D, Hur Y Y, Noh J H, et al. Shooting star: a new seedless table grape with sweet aroma and cold tolerance[J]. HortScience, 2025, 60(11): 2079－2081.

[10] Jiménez-Pérez M, Adalid-Martínez A M, Moreno-Peris E, et al. Response of sweet pepper varieties to low-input conditions and microbial biostimulant application[J]. Horticulturae, 2025, 11(10): 1207.

[11] Zheng X Q, Zhang X H, Zhang J G, et al. Effects of photovoltaic-integrated tea plantation on tea field productivity and tea leaf quality[J]. Agriculture, 2026, 16(1): 125.

[12] Yin X, Chen J, Ye Y, et al. Optimizing bent branch numbers improves transpiration and crop water productivity of cut rose (*Rosa hybrida*) in greenhouse[J]. Agricultural Water Management, 2024, 296: 108795.

[13] Hu G, Zhou J, Chen Q, et al. Effects of different picking patterns and sequences on the vibration of apples on the same branch[J]. Biosystems Engineering, 2024, 237: 26－37.

[14] Choi D W, Park J H, Yoo J H, et al. AI-driven adaptive grasping and precise detaching robot for efficient citrus harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 232: 110131.

[15] Weng W, He M, Zheng Z, et al. Tomato pedicel physical characterization for fruit-pedicel separation tomato harvesting robot[J]. Agronomy, 2024, 14(10): 2274.

[16] Parsa S, Debnath B, Khan M A, et al. Modular autonomous strawberry picking robotic system[J]. Journal of Field Robotics,

2024, 41(7): 2226 - 2246.
[17] Zhou X, Zou X, Meng H, et al. Multi-task perception and three-dimensional picking point localization method for grapes based on structural constraints and geometric analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 238: 110814.
[18] Tanigaki K, Fujiura T, Akase A, et al. Cherry-harvesting robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63(1): 65 - 72.
[19] Liu T, Liu Z, Wang J, et al. Green pepper harvesting robot system based on multi-target tracking with filtering and intelligent scheduling[J]. Horticulturae, 2026, 12(4): 464.
[20] Han C, Lv J, Li H, et al. From microstructure to multivariate prediction models: decoding the biomechanical properties of tea stems via PLSR-ridge regression and multifactorial orthogonal design[J]. Industrial Crops and Products, 2025, 230: 121143.
[21] Liu R, Dong M, Xiao Q, et al. Design, analysis, and experiment of an automatic lettuce-harvesting mechanism[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2025, 38(1): 175.
[22] Fatehi F, Bagherpour H. Design, construction, and evaluation of an autonomous robot for harvesting damask roses, equipped with a specialized end-effector[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2025, 24: 102432.
[23] Kolhalkar N R, Krishnan V L, Pandit A A, et al. Design and performance evaluation of a novel end-effector with integrated gripper cum cutter for harvesting greenhouse produce[J]. International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration, 2021, 8(84): 1479.
[24] Wu N, Wu J, Wang Z, et al. Maturity detection and counting of blueberries in real orchards using a novel STF - YOLO model integrated with ByteTrack algorithm[J]. Frontiers in Plant Science, 2025, 16: 1682024.
[25] Rong J, Hu L, Zhou H, et al. A selective harvesting robot for cherry tomatoes: design, development, field evaluation analysis [J]. Journal of Field Robotics, 2024, 41(8): 2564 - 2582.
[26] Villacrés J, Vougioukas S. Assessing a multi-camera system to enhance fruit visibility for robotic harvesting in a V-trellised apple orchard[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 224: 109164.
[27] Ma N, Sun Y, Li C, et al. AHG - YOLO: multi-category detection for occluded pear fruits in complex orchard scenes[J]. Frontiers in Plant Science, 2025, 16: 1580325.
[28] Lian J, Pan Q, Wang D. A two-stage recognition and planning approach for grasping manipulators and design of end-effectors [J]. Journal of Field Robotics, 2026, 43(1): 230 - 256.
[29] Wang P, Luo W, Liu J, et al. Real-time semantic SLAM-based 3D reconstruction robot for greenhouse vegetables[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 237: 110582.
[30] Luo L, Liu B, Chen M, et al. DRL-enhanced 3D detection of occluded stems for robotic grape harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 229: 109736.
[31] Matache M G, Marin F B, Persu C I, et al. Autonomous tomato harvesting system integrating AI-controlled robotics in greenhouses[J]. Agriculture, 2026, 16(8): 847.
[32] Park Y, Seol J, Pak J, et al. Human-centered approach for an efficient cucumber harvesting robot system: harvest ordering, visual servoing, and end-effector[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 212: 108116.
[33] 刘旭赞, 崔浩, 马于雯, 等. 垄作草莓双臂采收机器人系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2026,57(5): 71 - 81,148.
Liu Xuzan, Cui Hao, Ma Yuwen, et al. Design and experiment of a dual-arm strawberry harvesting robot system for ridge cultivation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(5): 71 - 81, 148. (in Chinese)
[34] Huang Z, Yang D, Cheng Z, et al. Towards autonomous premium tea harvesting: a high-efficiency and high-quality path planning based on optimized IABFMT algorithm in unstructured canopies[J]. Smart Agricultural Technology, 2025, 12: 101317.
[35] 贾江鸣, 王登艺, 贺磊盈, 等. 名优茶采收机器人整机机械技术研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2025, 56(8): 193 - 206.
Jia Jiangming, Wang Dengyi, He Leiying, et al. Research progress and prospects of mechanical technologies for premium tea harvesting robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(8): 193 - 206. (in Chinese)
[36] Zhang J, Kang N, Qu Q, et al. Automatic fruit picking technology: a comprehensive review of research advances[J]. Artificial Intelligence Review, 2024, 57(3): 54.
[37] Gao R, Zhou Q, Cao S, et al. Apple-picking robot picking path planning algorithm based on improved PSO[J]. Electronics, 2023, 12(8): 1832.
[38] Huang Y, Xu S, Chen H, et al. A review of visual perception technology for intelligent fruit harvesting robots[J]. Frontiers in Plant Science, 2025, 16: 1646871.
[39] Chen M, Chen Z, Luo L, et al. Dynamic visual servo control methods for continuous operation of a fruit harvesting robot working throughout an orchard[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 219: 108774.
[40] 荣佳诚, 熊梓茗, 元嘉策, 等. 复合机械臂构型番茄采收机器人设计与试验[J]. 农业机械学报, 2026, 57(5): 61 - 70,94.
Rong Jiacheng, Xiong Ziming, Yuan Jiace, et al. Design and experiment of a tomato harvesting robot with hybrid manipulator configuration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(5): 61 - 70, 94. (in Chinese)
[41] He G, Sparks C, Gravish N. Grasping and rolling in-plane manipulation using deployable tape spring appendages[J]. Science Advances, 2025, 11(15): eadt5905.
[42] 钟燚, 钟永祺, 张耿明, 等. 基于视触觉传感的草莓夹持法向力与接触区域感知方法[J]. 农业工程学报, 2025, 41(21): 174 - 182.
Zhong Yi, Zhong Yongqi, Zhang Gengming, et al. Perception method of normal clamping force and contact area for strawberries based on visuotactile sensing[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(21): 174 - 182. (in Chinese)
[43] He L, Sun Y, Chen L, et al. Advance on agricultural robot hand-eye coordination for agronomic task: a review[J].

Engineering, 2025, 51(8): 263 – 279.
[44] Rajendran V, Debnath B, Mghames S, et al. Towards autonomous selective harvesting: a review of robot perception, robot design, motion planning and control[J]. Journal of Field Robotics, 2024, 41(7): 2247 – 2279.
[45] 刘晓敏, 田德宝, 宋懋征, 等. 气动球果采摘柔性手爪设计与实验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 30 – 43.
Liu Xiaomin, Tian Debao, Song Maozheng, et al. Design and experiment of a pneumatic flexible gripper for cone picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 30 – 43. (in Chinese)
[46] Ao J, Ji W, Yu X, et al. End-effectors for fruit and vegetable harvesting robots: a review of key technologies, challenges, and future prospects[J]. Agronomy, 2025, 15(11): 2650.
[47] Zhang D, Zhang W, Yang H, et al. Application of soft grippers in the field of agricultural harvesting: a review[J]. Machines, 2025, 13(1): 55.
[48] Navas E, Shamshiri R R, Dworak V, et al. Soft gripper for small fruits harvesting and pick and place operations[J]. Frontiers in Robotics and AI, 2024, 10: 1330496.
[49] Huang H, Wang R, Huang F, et al. Analysis and realization of a self-adaptive grasper grasping for non-destructive picking of fruits and vegetables[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 232: 110119.
[50] 虞浪, 俞高红, 吴浩宇, 等. 欠驱动关节型柑橘采收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 an underactuated joint-type end-effector for citrus harvesting[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(17): 29 – 38. (in Chinese)
[51] Li M, Liu P. A bionic adaptive end-effector with rope-driven fingers for pear fruit harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 211: 107952.
[52] Sun J, Sun L, Zhao G, et al. Triboelectric force feedback-based fully actuated adaptive apple-picking gripper for optimized stability and non-destructive harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 237: 110725.
[53] Cao M, Zhu X, He Q, et al. Flexible clamping fingers with a leaf spring-like pattern in the pneumatic end-effector for loquat harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 239: 110901.
[54] Wang L, Xu P, Li J, et al. Stability analysis of human hand grasping for the design of pneumatic muscle-driven end effector targeting citrus picking[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 239: 110942.
[55] Ranjan A, Machavaram R, Patidar P. Design and development of a peduncle-holding end effector for robotic harvesting of mango[J]. Cogent Engineering, 2024, 11(1): 2403706.
[56] Li Y, Feng Q, Zhang Y, et al. Peduncle collision-free grasping based on deep reinforcement learning for tomato harvesting robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 216: 108488.
[57] 林桂潮, 郑晓鑫, 曾文勇, 等. 欠驱动式茶叶采收末端执行器优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(1): 133 – 140.
Lin Guichao, Zheng Xiaoxin, Zeng Wenyong, et al. Optimal design and experiment of an underactuated end-effector for tea harvesting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 133 – 140. (in Chinese)
[58] Zhao X, He L, Li Y, et al. Kinetostatic modeling of clamping force in a tendon-driven soft robotic gripper for tea shoot plucking[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 236: 110441.
[59] Xie B, Wu X, Lu G, et al. A support end-effector for banana bunches based on contact mechanics constraints[J]. Agronomy, 2025, 15(12): 2907.
[60] Wang J, Li J, Li J, et al. Robotic harvesting of delicate fruit: design and implementation of an under-actuated disturbance-resistant gripper[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2025, 11(1): 194 – 201.
[61] 单海勇. 棚架葡萄机器人手–臂协同无损采收系统设计与实验[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
Shan Haiyong. Design and experiment of hand-arm coordinated non-destructive harvesting system for trellis grape robot[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021. (in Chinese)
[62] Lu R, Dickinson N, Lammers K, et al. Design and evaluation of end effectors for a vacuum-based robotic apple harvester[J]. Journal of the ASABE, 2022, 65(5): 963 – 974.
[63] Hua W, Zhang W, Zhang Z, et al. Vacuum suction end-effector development for robotic harvesters of fresh market apples[J]. Biosystems Engineering, 2025, 249: 28 – 40.
[64] 冯青春, 胡亚然, 鲁文桥, 等. 气吸捕获式苹果采收末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2026, 57(5): 50 – 60.
Feng Qingchun, Hu Yaran, Lu Wenqiao, et al. Design and experiment of an air-suction capture end-effector for apple harvesting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(5): 50 – 60. (in Chinese)
[65] Jo Y, Park Y, Son H I. A suction cup-based soft robotic gripper for cucumber harvesting: design and validation[J]. Biosystems Engineering, 2024, 238: 143 – 156.
[66] Zhao Y, Jin Y, Jian Y, et al. Kinematic design of new robot end-effectors for harvesting using deployable scissor mechanisms [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 222: 109039.
[67] 王睿远, 王佳虹, 晏毓, 等. 包覆式猕猴桃气动无损采收机构设计与试验[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 a wrapped pneumatic non-destructive harvesting mechanism for kiwifruit[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(6): 26 – 31, 41. (in Chinese)
[68] Elfferich J F, Shahabi E, Della Santina C, et al. Berrytwist: a twisting-tube soft robotic gripper for blackberry harvesting[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2024, 10(1): 429 – 435.
[69] 马锃宏, 余煌, 谭励, 等. 咬合式柑橘采收末端执行器优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 106 – 115,125.
Ma Zhenghong, Yu Huang, Tan Li, et al. Optimal design and experiment of a bite-type end-effector for citrus harvesting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 106 – 115, 125. (in Chinese)
[70] 周科宏. 番茄抓取机器人末端执行器研究与设计[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.

Zhou Kehong. Research and design of end-effector for tomato harvesting robot[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022. (in Chinese)
[71] Zhao Y, Zhao W, Song M, et al. Self-adaptive, untethered soft gripper system for efficient agricultural harvesting[J]. Journal of Field Robotics, 2025, 42(8): 4353 - 4367.
[72] An B, Choi T, Kim U. Linkage integrated fin ray gripper capable of safe adaptive grasping for tomato harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 232: 110118.
[73] Yin C, Huang J, Xia Y, et al. Design, development, integration and field evaluation of a dual robotic arm mango harvesting robot[J]. Journal of Field Robotics, 2025, 42(7): 3705 - 3725.
[74] Kang S, Long S, Li D, et al. Design, integration, and field evaluation of a selective harvesting robot for broccoli[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 227: 109654.
[75] Mishra A K, Ramaswami A, Shree V, et al. Sensor fusion of touch & vision in soft manipulators for fruit picking[J/OL]. Nature Communications. [2026 - 02 - 03]. https://doi.org/10.1038/s41467-026-70588-9.
[76] 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.
[77] Fang J, Dai N, Xin Z, et al. Design and interaction dynamics analysis of a novel hybrid bending-twisting-pulling end-effector for robotic tomato picking[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 231: 110011.
[78] 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(3): 948 - 970.
[79] 陈建能, 陈倩雯, 刘林敏, 等. 旋转式两工位名优茶采收收集一体末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 136 - 144.
Chen Jianneng, Chen Qianwen, Liu Linmin, et al. Design and experiment of a rotary two-station integrated end-effector for premium tea harvesting and collection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 136 - 144. (in Chinese)
[80] Zhao D, Lv J, Ji W, et al. Design and control of an apple harvesting robot[J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(2): 112 - 123.
[81] 董乃深, 程泓超, 应仇凯, 等. 垄作草莓双臂采收机器人设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊 1): 29 - 40, 50.
Dong Naishen, Cheng Hongchao, Ying Qiukai, et al. Design and experiment of a dual-arm strawberry harvesting robot for ridge cultivation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(S1): 29 - 40, 50. (in Chinese)
[82] 王亚薇, 何津立, 林熙淼, 等. 温室番茄采收机器人伸缩式机械臂设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊 1): 18 - 28.
Wang Yawei, He Jinli, Lin Ximiao, et al. Design and experiment of a telescopic manipulator for greenhouse tomato harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(S1): 18 - 28. (in Chinese)
[83] Du X, Meng Z, Wang Y, et al. Multistage synchronous telescopic manipulator with end-effector-biased rotating-pulling mode for damage-free robotic picking[J]. Journal of Field Robotics, 2025, 42(5): 2297 - 2317.
[84] Yaguchi H, Nagahama K, Hasegawa T, et al. Development of an autonomous tomato harvesting robot with rotational plucking gripper[C]//2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). New York: IEEE, 2016: 652 - 657.
[85] 穆龙涛. 全视场猕猴桃果实信息感知与连贯采收机器人关键技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
Mu Longtao. Research on key technologies of full-field kiwifruit information perception and continuous harvesting robot[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)
[86] Tituaña L, Gholami A, He Z, et al. A small autonomous field robot for strawberry harvesting[J]. Smart Agricultural Technology, 2024, 8: 100454.
[87] 吴强. 名优茶采收机械臂的设计与运动控制[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2022.
Wu Qiang. Design and motion control of manipulator for premium tea harvesting[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2022. (in Chinese)
[88] 李亚涛. 茶叶采收机器人的视觉检测与定位技术研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2022.
Li Yatao. Research on visual detection and localization technology for tea harvesting robot[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2022. (in Chinese)
[89] Shafei A M, Shamsi M, Zahedi A. Development and evaluation of a robotic mechanism for automated palm crop harvesting [J]. Results in Engineering, 2025, 27(9): 107029.
[90] 赵戬. 串并联番茄采收机械臂结构设计与分析[D]. 郑州: 河南农业大学, 2023.
Zhao Jian. Structural design and analysis of a serial-parallel tomato harvesting manipulator[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2023. (in Chinese)
[91] 李志鹏. 脐橙采收机械手的设计与研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
Li Zhipeng. Design and research of navel orange harvesting manipulator[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020. (in Chinese)
[92] 张立昌. 基于深度视觉与混联机械臂的罗汉果采收技术及装置研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2025.
Zhang Lichang. Research on harvesting technology and device of *Siraitia grosvenorii* based on deep vision and hybrid manipulator[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2025. (in Chinese)
[93] 李月婵, 马锃宏, 杜小强. 基于 RPU - RPR - UPR 并联腕关节草莓断柄采收柔顺控制研究[J]. 农业机械学报, 2026, 57(4): 128 - 137.
Li Yuechan, Ma Zhenghong, Du Xiaoqiang. Research on compliant control of strawberry pedicel-breaking harvesting based on RPU - RPR - UPR parallel wrist joint[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(4):

128 – 137. (in Chinese)
[94] Vrochidou E, Tsakalidou V N, Kalathas I, et al. An overview of end effectors in agricultural robotic harvesting systems[J]. Agriculture, 2022, 12(8): 1240.
[95] Dahiya R S, Cattin D, Adami A, et al. Towards tactile sensing system on chip for robotic applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(12): 3216 – 3226.
[96] 张伟. 苹果目标识别与夹紧力可感知采摘夹爪研究[D]. 南京：南京林业大学, 2025.
Zhang Wei. Research on apple target recognition and clamping-force-perceivable picking gripper[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2025. (in Chinese)
[97] 鲍秀兰, 任梦涛, 马萧杰, 等. 基于最小作用力的球形果蔬采摘灵巧手接触力优化[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 1 – 12.
Bao Xiulan, Ren Mengtao, Ma Xiaojie, et al. Contact force optimization of a dexterous hand for spherical fruit and vegetable picking based on minimum action force[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 1 – 12. (in Chinese)
[98] 付敏, 崔小曼, 赵鑫庆, 等. 面向油桃采摘的气囊式软体机械手设计与试验[J]. 农业工程学报, 2026, 42(2): 52 – 60.
Fu Min, Cui Xiaoman, Zhao Xinqing, et al. Design and experiment of an airbag soft gripper for nectarine picking[J]. Transactions of the CSAE, 2026, 42(2): 52 – 60. (in Chinese)
[99] Zhang R, Yoo U, Li Y, et al. PneuGelSight: soft robotic vision-based proprioception and tactile sensing[PP/OL]. V2. arXiv. (2026 – 01 – 26)[2026 – 05 – 10]. http://doi.org/10.48550/arXiv.2508.18443.
[100] Ma D, Donlon E, Dong S, et al. Dense tactile force estimation using GelSlim and inverse FEM[C]//2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). New York: IEEE, 2019: 5308 – 5314.
[101] 杨亮亮. 面向精密装配的机器人视觉–力觉融合末端执行器设计[J]. 电子元器件与信息技术, 2025, 9(10): 1 – 5.
Yang Liangliang. Design of robot vision-force fusion end-effector for precision assembly[J]. Electronic Components and Information Technology, 2025, 9(10): 1 – 5. (in Chinese)
[102] Williams H A M, Jones M H, Nejati M, et al. Robotic kiwifruit harvesting using machine vision, convolutional neural networks, and robotic arms[J]. Biosystems Engineering, 2019, 181: 140 – 156.
[103] Shaw J, Cheng K Y. Object identification and 3-D position calculation using eye-in-hand single camera for robot gripper[C]//2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). New York: IEEE, 2016: 1622 – 1625.
[104] Yeshmukhametov A, Koganezawa K, Yamamoto Y, et al. Development of continuum robot arm and gripper for harvesting cherry tomatoes[J]. Applied Sciences, 2022, 12(14): 6922.
[105] Ribeiro E G, Mendes R Q, Grassi V J. Real-time deep learning approach to visual servo control and grasp detection for autonomous robotic manipulation[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2021, 139: 103757.
[106] Feng Q, Zou W, Fan P, et al. Design and test of robotic harvesting system for cherry tomato[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(1): 96 – 100.
[107] Jiang L T, Smith J R. Seashell effect pretouch sensing for robotic grasping[C]//2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). New York: IEEE, 2012: 2851 – 2858.
[108] 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.
[109] 胡凯莹, 高瑞龙, 桂鹏辉, 等. 基于三维视觉的苹果采摘姿态估计算法研究[J]. 电子制作, 2023(2): 61 – 63.
Hu Kaiying, Gao Ruilong, Gui Penghui, et al. Research on apple picking pose estimation algorithm based on three-dimensional vision[J]. Electronic Production, 2023(2): 61 – 63. (in Chinese)
[110] 张勤, 庞月生, 李彬. 基于实例分割的番茄串视觉定位与采摘姿态估算方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 205 – 215.
Zhang Qin, Pang Yuesheng, Li Bin. Visual localization and picking pose estimation method for tomato trusses based on instance segmentation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 205 – 215. (in Chinese)
[111] 毕松, 隗朋峻, 刘仁学. 温室高架栽培草莓空间姿态识别与采摘点定位方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 53 – 64.
Bi Song, Wei Pengjun, Liu Renxue. Spatial pose recognition and picking point localization method for greenhouse elevated-cultivation strawberries[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 53 – 64. (in Chinese)
[112] 朱立学, 赖颖杰, 张世昂,等. 基于改进 UNet 的火龙果采摘图像分割和姿态估计方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(11): 180 – 188.
Zhu Lixue, Lai Yingjie, Zhang Shiang, et al. Image segmentation and pose estimation method for pitaya picking based on improved UNet[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 180 – 188. (in Chinese)
[113] 马锃宏, 谭励, 曾伟, 等. 基于视触觉感知的番茄尺寸和姿态解析方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 223 – 232.
Ma Zhenghong, Tan Li, Zeng Wei, et al. Tomato size and pose analysis method based on visuotactile perception[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 223 – 232. (in Chinese)
[114] Su M, Huang D, Guan Y, et al. Soft tactile sensing for object classification and fine grasping adjustment using a pneumatic hand with an inflatable palm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(4): 3873 – 3882.
[115] Ward-Cherrier B, Rojas N, Lepora N F. Model-free precise in-hand manipulation with a 3D-printed tactile gripper[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2017, 2(4): 2056 – 2063.
[116] Cui S, Wang R, Hu J, et al. In-hand object localization using a novel high-resolution visuotactile sensor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(6): 6015 – 6024.
[117] Hogan F R, Bauza M, Canal O, et al. Tactile regrasp: grasp adjustments via simulated tactile transformations[C]//2018

IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). New York: IEEE, 2018: 2963 - 2970.
[118] Souza L M P, Deshmukh A, Rajpathak K, et al. Embodied AI agent framework for (re)programming robotic tasks in flexible assembly using LLMs and VLMs[J]. Procedia CIRP, 2026, 139: 59 - 65.
[119] Varley J, Singh S, Jain D, et al. Embodied AI with two arms: zero-shot learning, safety and modularity[C]//2024 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). New York: IEEE, 2024: 3651 - 3657.
[120] Ren L, Dong J, Liu S, et al. Embodied intelligence toward future smart manufacturing in the era of AI foundation model[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2025, 30(4): 2632 - 2646.
[121] Dai B, Zheng Y, Qian Y, et al. An optical/electronic artificial skin extends the robotic sense to molecular sensing[J]. NPJ Flexible Electronics, 2025, 9: 87.
[122] Yao T, Lu B, Kowarschik M, et al. Advancing embodied intelligence in robotic-assisted endovascular procedures: a systematic review of AI solutions[J]. IEEE Reviews in Biomedical Engineering, 2026, 19: 248 - 266.
[123] 屈慧星. 吊蔓西瓜采摘机器人末端执行器设计与试验[D]. 泰安: 山东农业大学, 2024.
Qu Huixing. Design and experiment of end-effector for hanging-watermelon harvesting robot[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2024. (in Chinese)
[124] 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 a flexible profiling end-effector for *Agaricus bisporus* harvesting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 104 - 115. (in Chinese)
[125] Gao J, Zhang F, Zhang J, et al. Picking patterns evaluation for cherry tomato robotic harvesting end-effector design[J]. Biosystems Engineering, 2024, 239: 1 - 12.
[126] 陈棒棒, 姚其军, 刘向东, 等. 红花采收三角对切—拉拔式末端执行器的设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2026, 47(2): 129 - 137.
Chen Bangbang, Yao Qijun, Liu Xiangdong, et al. Design and experiment of a triangular opposite-cutting and pulling end-effector for safflower harvesting[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2026, 47(2): 129 - 137. (in Chinese)
[127] 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): 1141 - 1159.
[128] 严童杰, 冯青春, 郭鑫, 等. 驱控一体的旋拧式果实采摘执行器设计与试验[J]. 农机化研究, 2025, 47(3): 48 - 55.
Yan Tongjie, Feng Qingchun, Guo Xin, et al. Design and experiment of a drive-control integrated twisting fruit-picking actuator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(3): 48 - 55. (in Chinese)
[129] 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.
[130] 赵雄, 张号号, 傅鸿妃, 等. 切割脱离式鲜食朝天椒采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 126 - 135.
Zhao Xiong, Zhang Haohao, Fu Hongfei, et al. Design and experiment of a cutting-detachment end-effector for fresh chili pepper picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 126 - 135. (in Chinese)
[131] Yao Z, Xiong J, Yang J, et al. Design and verification of a litchi combing and cutting end-effector based on visual-tactile fusion[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 232: 110077.
[132] Yu Z, Yuan J, Guo D, et al. Underactuated picking gripper for grasping and cutting citrus[C]//2021 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). New York: IEEE, 2021: 1935 - 1940.
[133] 蒲应俊, 罗锦艳, 张贵贤, 等. 仿手指拨动切割式柑橘采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2025, 41(24): 63 - 73.
Pu Yingjun, Luo Jinyan, Zhang Guixian, et al. Design and experiment of a finger-like flicking and cutting end-effector for citrus picking[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(24): 63 - 73. (in Chinese)
[134] 尹建军, 陈永河, 贺坤, 等. 抓持-旋切式欠驱动双指手葡萄采摘装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 12 - 20.
Yin Jianjun, Chen Yonghe, He Kun, et al. Design and experiment of an underactuated two-finger gripper with grasping and rotary-cutting for grape picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 12 - 20. (in Chinese)
[135] 俞亚新, 王强, 潘一隆, 等. 折断分离式菠萝采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2026, 57(8): 153 - 160.
Yu Yaxin, Wang Qiang, Pan Yilong, et al. Design and experiment of a breakage-detachment end-effector for pineapple picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(8): 153 - 160. (in Chinese)
[136] Sun H, Zhang W, Li H, et al. Design and optimization of a biomimetic pineapple harvester device based on the mechanical properties of the stem-fruit junction[J]. Agriculture, 2025, 15(24): 2562.
[137] 高建波. 猕猴桃采摘机器人目标识别与采摘方法研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2024.
Gao Jianbo. Research on target recognition and picking method of kiwifruit harvesting robot[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2024. (in Chinese)