

赵煜, 方国艾, 李永国. 农业机械手关键技术研究进展[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(2): 404-416.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.02.021

农业机械手关键技术研究进展

赵煜, 方国艾, 李永国

(上海海洋大学工程学院, 上海 201306)

摘要: 农业机械手对实现农业现代化具有重要意义。近年来,随着传感技术、计算机视觉以及运动控制技术的快速发展,农业机械手逐渐向智能化、自主化和多功能化方向发展。本研究概述了农业机械手的研究现状及主要结构。基于农业机械手作业环境的复杂性以及作业对象的多样性和差异性,将农业机械手的关键技术归纳为末端执行器设计、传感感知技术、视觉技术和运动控制技术,进一步对末端执行器类型进行分类归纳,分析不同末端执行器的研究现状;对现阶段农业机械手领域的目标识别和定位技术进行了分析和归纳;对当前农业机械手领域的传感感知技术进行了系统总结;对农业机械手作业控制过程进行了综述。最后,针对当前农业机械手存在的问题进行了讨论,并对农业机械手的未来研究进行了展望。

关键词: 农业机械手; 末端执行器; 传感感知技术; 视觉技术; 运动控制技术

中图分类号: TP241 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)02-0404-13

Research progress of key technologies of agricultural manipulators

ZHAO Yu, FANG Guoai, LI Yongguo

(College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Agricultural manipulators are of great significance to realize agricultural modernization. In recent years, with the rapid development of sensing technology, computer vision and motion control technology, agricultural manipulators have gradually developed in the direction of intelligence, autonomy and multi-function. This paper summarizes the research status and main structures of agricultural manipulators. Based on the complexity of the operating environment of agricultural manipulators and the diversity and difference of the operating objects, the key technologies of agricultural manipulators are summarized as end-effector design, sensing and perception technology, vision technology and motion control technology. The types of end effectors are further classified and summarized, and the research status of different end effectors is analyzed. The target recognition and positioning technologies in the field of agricultural manipulators at this stage are analyzed and summarized. The sensing technologies in the field of agricultural manipulators are systematically summarized. The operation control process of agricultural manipulators is reviewed. Finally, the existing problems of current agricultural manipulators are discussed, and the future research of agricultural manipulators is prospected.

Key words: agricultural manipulators; end-effector; sensing and perception technology; vision technology; motion control technology

现代农业面临着越来越复杂的挑战,包括全球

食品需求的增长、农业劳动力不足、资源稀缺和气候变化等。自“十四五”规划以来,国家就大力推动农业现代化。农业机械手具有提高农业生产效率、降低劳动强度,为农业生产带来更大的灵活性和精确性等特点,在农田、林间、大棚种植园、人工养殖区等多种场景中得到了广泛应用^[1-2],促进了农业现代化

收稿日期:2024-06-14

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51876114)

作者简介:赵煜(1982-),女,河南三门峡人,博士,讲师,主要从事渔业工程装备研究。(E-mail)y-zhao@shou.edu.cn

通讯作者:李永国,(E-mail)yg-li@shou.edu.cn

的发展。

目前农业生产方式可分为人工劳作、传统农业装备、半自动化装备以及智能化装备等方式^[3]。大多数农业生产如采摘、修剪、喷洒、种植仍然依靠人工劳作结合传统农业装备的方式完成,不但耗费了大量劳动力,工作效率和精确性也相对较低,不能适应大规模、高效的现代农业生产需求^[4];自动驾驶拖拉机、自动植保机、智能灌溉系统等半自动化装备,通过结合自动化技术和适度的人工干预,可以提高农业生产的效率,降低劳动强度,但需要操作者具备相应的操作技术,才能够实现有效的监督和操作;以农业机械手为代表的新型全自动化装备,具有高精度的运动控制,能够适应不同农业环境的作业需求,提高了生产的灵活性,具有广阔的应用前景^[5-6]。目前已经有许多学者针对农业机械手的结构、机器视觉技术以及农业机械手的运动控制等方面做了大量的研究,但是农业的非结构化环境以及多样化的应用场景增加了农业机械手的作业难度,使得农业机械手多数仍停留在试验研究阶段,很难进行商业化的量产,因此针对这些技术研究仍需要进一步突破^[7-8]。

因此,本文对农业机械手研究现状进行概述,从农业机械手的末端执行器结构、视觉系统、传感器技术以及运动控制方面涉及的关键技术进行综述,指出当前农业机械手存在的问题与不足,并对其发展趋势进行展望。

1 农业机械手结构

农业机械手通常由机械臂、末端执行器、视觉系统、运动控制系统组成。通过视觉系统利用计算机视觉技术对目标进行识别定位,将获取到的信息反馈给运动控制系统;运动控制系统则根据收到的位置信息结合当前的环境信息对农业机械手工作轨迹进行相应的规划,进而控制机械臂和末端执行器完成既定的作业任务。

农业机械手的发展是一个逐渐智能化、自主化和多功能化的过程。早期的农业机械手主要以机械装置为主,通过配合人工操作,实现一些作业任务,如犁地、播种等。20世纪中叶,随着液压技术和气动技术的发展,使得农业机械手能够准确执行更复杂的操作,如举升、旋转和抓取,提升了农业机械手的自动化程度。进入21世纪,借助传感器和计算机控制系统,农业机械手能够执行更精确的作业任务。如:位置和

姿态传感器常用于精确定位,确保农业机械手实现精准操作;力传感器可以获取机械手作业中的力的信息,以确保在作业过程中如采摘、搬运等对作业对象和环境的损伤最小化;环境传感器用于监测农业环境条件;视觉传感器则是利用摄像头和光学传感器检测作业目标,获取目标的确切位置^[9-11]。

近些年,计算机视觉和路径规划技术的发展为农业机械手带来了重大突破,高精度的相机和图像处理系统的应用使农业机械手能够感知作业环境,准确识别作业对象,并借助路径规划准确达到作业位置进行精准作业^[12-13]。因此,针对不同作业对象的末端执行器设计、视觉技术、传感感知技术和运动控制技术越来越多地成为农业机械手领域的重点研究内容。多技术的融入和作业对象的多样化使得农业机械手发展日趋完善,种类繁多。现阶段,商业化比较成功的农业机械手有:Octinion Rubion(草莓采摘机械手)、Agrobot SW601(葡萄采摘机械手)、FFRobotics(水果采摘机械手)、Lely Discovery Collector(奶牛牛粪清理机械手)等。此外,还有根据农场、高校及研究所特定需求而设计的自制农业机械手。

目前,农业机械手的结构多为并联和串联两种^[14]。其中,并联机械手由多个机械臂并联在固定的基座上,共同作用于同一末端执行器,实现运动和位姿变换;串联机械手则由一系列机械臂通过各个关节串联组成,每个关节都依次与前一个关节相连,最终连接到基座和末端执行器,每个机械臂的运动只能在前一个机械臂的基础上进行,两种机械手结构如图1所示。

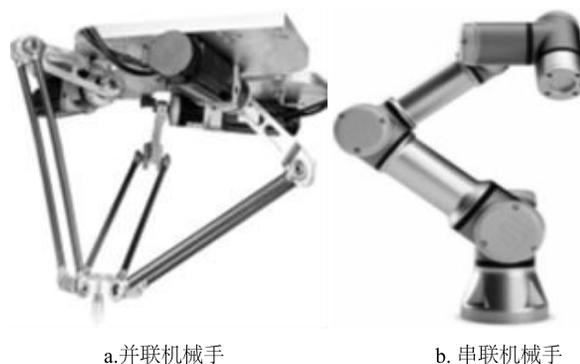


图1 两种农业机械手结构

Fig.1 The structures of two types of agricultural manipulators

结构差异使得这两种农业机械手具有不同的特点和应用场景。并联机械手由于多机械臂共同作用

于末端执行器,使得它具有高负载、高稳定性、高精度的优点,但这种结构也导致并联机械手的灵活性较差、工作空间较为局限。反之,串联机械手由于各机械臂顺次串联连接,可以自由变换方向,使其具有良好的扩展性,工作空间更加灵活;但串联的结构也导致其负载能力低,稳定性差。因此,需要根据作业任

务和作业环境选择合适的农业机械手:在作业任务简单时,常选择自由度少的串联机械手,而在作业任务复杂和工作空间较大时,则需考虑自由度更高的串联机械手;在工作空间较小或者只需在平面内运动时多选择并联机械手^[15]。两种农业机械手的部分典型应用如图 2 所示。

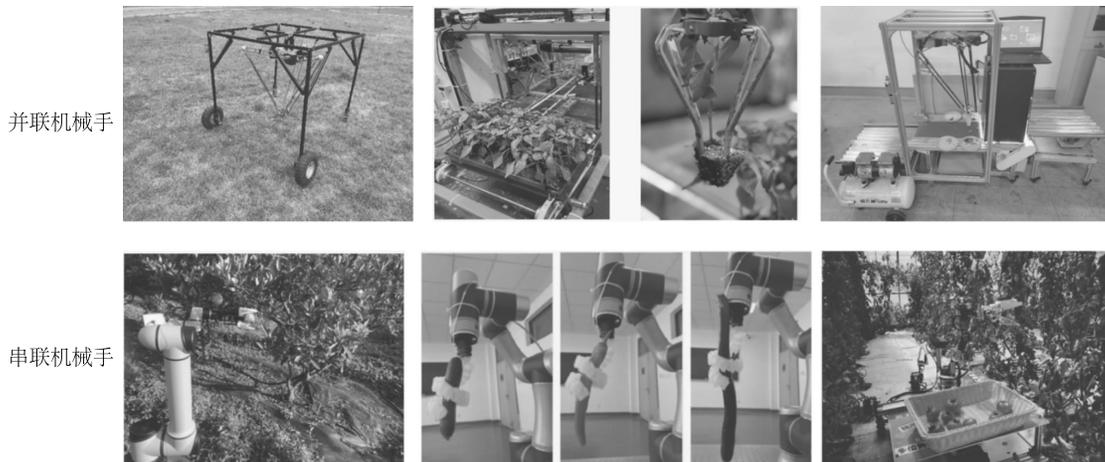


图 2 两种农业机械手的部分典型应用

Fig.2 Some typical applications of two types of agricultural manipulators

2 农业机械手关键技术

作业环境的复杂性、作业对象的多样性和差异性影响着农业机械手的选择、设计和规划控制等。目前,农业机械手研发中的关键技术主要包含:末端执行器设计,传感感知技术、视觉技术和运动控制技术。

2.1 末端执行器设计

农业机械手常通过连接在机械臂上的末端执行器来完成作业任务。农业机械手的末端执行器类型丰富,如剪刀、气泵、喷头和夹爪等。在多数情况下,农业机械手通过末端执行器完成剪切、吸附、喷洒和抓取等 1 个动作就能实现对对象的作业任务。但在复杂场景下,多种类型末端执行器配合使用能够有效提升作业效率。鉴于农业作业的场景复杂多样,对象种类繁多,农业机械手往往需要根据具体工作情况,了解对象的物理特性,并分析工作过程,对末端执行器的作业原理和结构进行设计。

2.1.1 剪切式末端执行器 剪切式末端执行器是基于剪切的理念进行设计,多用于切割、修剪、切断等作业场景。这种末端执行器可分为剪式和锯式两种。其中,剪式末端执行器多由刀片或剪刀构成,可

通过刀片或剪刀的夹持和运动来实现物体的切割或剪断;锯式末端执行器则由锯片构成,能对物体进行切割,实现分割、切断或切割物体等功能。Zhang 等^[16]设计了一种由动静刀具结合的剪式末端执行器用于枣树修剪。这种刀具具有剪切力大的优点,同时在设计时考虑了枣枝的直径、切割位置和剪口的尺寸,使得刀具具有较高的精度,但是仍存在因刀具移动不够灵活导致修剪偏枝和侧枝失败的问题。Kamandar 等^[17]使用电动树篱修剪机作为末端执行器,锯式末端执行器与工作目标的接触面积大,具有作业空间范围大的优点,在对树篱修剪时能够实现有效切割的同时提高工作效率,但是存在面对较粗的茎秆时切割困难的情况。

2.1.2 气吸式末端执行器 气吸式末端执行器通常采用气泵等吸气装置吸附目标,常用于果实的断梗和分拣。Hu 等^[18]利用真空泵的气流能够在一定距离内吸住果实的特性,设计了一种体积较小、便于穿透树冠的气吸式末端执行器,实现了果园的果实采摘。气吸式末端执行器配合并联机械臂还可以实现流水线形式的分拣任务。苑进等^[19]利用真空吸盘和并联机械臂实现了禽蛋的自动分拣;Zhang

等^[20]使用并联机械臂配合吸气装置末端执行器实现了对新鲜茶叶的分拣。然而,由于气吸式末端执行器吸力较小,多数应用于质量较小的作业对象。

2.1.3 喷洒式末端执行器 喷洒式末端执行器常使用喷雾装置、喷嘴装置和花洒等不同类型的喷洒装置来精确控制农药、肥料等物质的喷洒量,并配合机械臂完成复杂的喷洒作业,从而提高农业生产效率。Williams 等^[21]使用一种安装于机械臂末端的新颖空气辅助喷雾器,实现了对猕猴桃的机械授粉。Bao 等^[22]将 6 个自由度电缆驱动的柔性机械手和喷雾系统组合,实现了末端执行器在树冠内灵巧地移动,并有效地到达作业区域,进行精准的病虫害防治。

2.1.4 抓取式末端执行器 抓取式末端执行器是农业领域里最常见的一种,这类末端执行器常设计为夹爪和仿生手的形状,通过将作业对象包裹后实现收获、分拣、摘取等任务。Mu 等^[23]用两根仿生手指抓取猕猴桃果实,通过弯曲手指将果实从茎中分离出来,成功实现猕猴桃果实采摘。

然而,由于作业对象差异大,这种抓取类末端执行器的设计不仅要考虑抓手的形状,更要考虑作业对象的重量差异。当作业对象重量较小时,末端执行器的结构强度、夹持力等一般能满足作业需求,完成作业任务;但在面临重量较大的作业对象时,末端执行器的结构强度、夹持力等参数将决定其能否完成既定的工作任务^[24-25],此时,需要结合仿真等方法进行结构分析与寻优。Roshanianfard 等^[26]使用 SolidWorks 软件多次仿真模拟确定末端执行器的结构,并采用电力驱动和内部冲击抓取模式以提高抓取力,选择五指全包裹型末端执行器,以解决采摘大重量南瓜时抓取不稳定,抓取力过小的问题。虽然抓取成功,但是这种包裹型末端执行器和南瓜表面直接接触,容易造成南瓜表面破损。Islam 等^[27]利用 SolidWorks 软件进行运动学分析和模拟仿真,设计了一种具有 5 个抓手末端执行器和最佳配合长度采摘架的辣椒自动移栽机,可以减少幼苗损伤,在较低功率(最低 18.9 W)下实现稳定的成排移栽作业。Zhang 等^[28]分析了夹持结构之间的力传递和指、钵之间的力传递,并通过理论计算确定夹爪插入深度,设计了四边形插入式取苗机械手,既保证较高的移栽成功率(98%),也实现了对土壤的扰动最小化。因此,抓取型末端执行器设计时,除了充分考虑作业对象的物理特性,确保其包裹性和夹持力等关键参数外,结合仿真方法进行结构分

析和寻优也十分必要。

2.1.5 柔性末端执行器 农业机械手作业时,刚性的末端执行器往往容易造成目标损坏,尤其是针对一些比较脆弱或易损的作业对象,如草莓果实、番茄果实等。为了减少或避免对易损作业对象的破坏,这类农业机械手的末端执行器多设计为柔性末端执行器。基于仿生学的柔性抓取理论是设计这类柔性末端执行器的理论依据^[29]。柔性末端执行器多采用柔性材料制作,并设计为单指或多指结构,以保证末端执行器与作业对象的接触力更小,并且具有良好的适应性。为了实现草莓果实无损抓取,李健等^[30-31]设计了气动 4 叶片软体抓手和单指软体抓手,抓取时弯曲规律更加贴合草莓果实的轮廓,减少了对草莓果实表面的损伤,抓取成功率较高。贾江鸣等^[32]设计了一种充气式螺旋运动的软体气动抓手,通过螺旋型包裹作业对象,实现了黄瓜果实等细长果蔬的采摘。

为了扩展柔性末端执行器的应用范围,朱银龙等^[33]在 4 指软体机械手的每个手指单元内置实时检测弯曲角的柔性应变传感器,并结合不同气压作用下的弯曲角和末端输出力的数学模型,实现 4 指末端力的精准控制和对多种不同重量的易损水果的无损抓取。为了满足多样化的作业需求,赵云伟等^[34]采用气动弯曲型柔性驱动器设计了一种仿人手外形的 5 指末端执行器,能够灵活运动、自主弯曲,这种柔性末端执行器可以自由握住多种外形的作业对象。李三平等^[35]采用 HY-E620 型硅胶设计了一种 6 指包裹式的末端执行器,并通过有限元仿真分析确定每根手指的具体结构,这种末端执行器具有抓取稳定、适应性好的优点,可以应用在苹果、梨和橘子等多种果蔬的采摘上。因此,使用柔性材料设计的抓取式末端执行器,不仅能减少其对作业对象的损伤,还在一定程度上增强末端执行器的适用性。

2.1.6 多种类型配合式末端执行器 大多数的作业场景下,单一类型的末端执行器能够满足作业需要,但在一些复杂场景下,单一类型的末端执行器作业效果差且效率较低,使用多种类型末端执行器互相配合更能提高作业效率。Xiao 等^[36]在 3 指夹爪中加装一个刀片,在抓取柑橘果实时切断果梗,有效减少了夹爪的抓取力,同时提高了采摘的稳定性。Yu 等^[37]设计用于柑橘自主采摘的欠驱动采摘夹持器,仅用一个电机就能完成抓取和切割两个动作,相

较于刀片断梗提高了柑橘果实采摘的效率。陈子文等^[38]使用 3 个空间轴向均匀分布的夹爪和 1 个中心吸盘,由单一主动气缸驱动实现吸-夹的作业,既保证番茄果实采摘的平稳性和效率,又可以实现不同规格番茄果实的采摘,缺点是对较大的番茄果实采摘损伤较高。Rong 等^[39]使用热塑性聚氨酯(TPU)作为 4 指末端执行器的材料,以降低对西瓜果实表面的损伤;并采用切割刀片断梗的方式以减小摘取过程的抓取力,通过抓取与切割的配合,降低了抓取力,同时保证了采摘时对西瓜表面的保护。

2.2 视觉技术

末端执行器是农业机械手的执行部件,视觉系统作为农业机械手的眼睛,也是不可或缺的。在自然环境下,多种障碍物的阻碍以及人机交互环境等都会影响农业机械手的定位效率,进而影响其作业质量。近年来,随着识别技术、定位技术以及算法轻量化技术等视觉技术的发展,视觉技术在农业领域的应用范围越来越宽广,使得农业机械手能够在复杂的农业环境中快速准确识别目标、获取目标位置。

2.2.1 非结构化环境中的识别技术 在农业中,光线的强弱、障碍物的遮蔽以及多目标之间的互相遮挡等非结构化的因素,都影响着农业机械手的作业。因此提高视觉识别的准确性,对实现精细化作业有着重要意义。

目前,针对作业对象多运用基于颜色、形状、纹理等特征的识别技术^[40-41]。但是,基于单一特征的识别方法不能很好地克服非结构化环境带来的影响,如基于颜色的识别方法,在目标与背景具有显著差异场景中可获得较好分割效果,但目标和背景颜色相近时易

引起误判,同时颜色信息的识别系统对光照变化较为敏感;基于形状特征的目标识别通过提取目标的轮廓几何特征进行匹配以实现目标识别,可弥补基于颜色的单一特征信息识别的不足,但自然场景下目标密集、重叠及枝叶遮挡都将影响形状特征的提取;基于纹理特征的识别方法能将目标从背景图像中分割出来,且目标对象的颜色不影响纹理分析,但纹理分析同样对光照变化较敏感,在强光照下,所获取图像由于反射会丢失部分纹理信息,导致不能正常识别^[42-44]。

为克服单一特征识别方法的明显缺陷,研究者尝试将颜色、形状和纹理等多特征融合分析,以提高识别成功率。Yin 等^[45]融合形状和颜色图形,解决了番茄果实聚集和遮挡时识别困难问题;Linker 等^[46]根据颜色和纹理特征,利用 K-近邻和区域生长方法成功地检测出绿色苹果,在阳光直射下的识别准确率约为 85.0%,在没有阳光直射的情况下,识别准确率达 95.0%。这些研究结果表明,特征融合方法能够显著提高目标识别的准确性和鲁棒性,但是在自然环境中,光照条件、遮挡等干扰仍然不能完全消除,在处理复杂场景时能力有限。

近年来,基于深度学习的图像识别方法在农业机械手领域得到了应用,并取得了一定进展。针对农业机械手的应用场景,不仅要求算法识别的准确性,还需要综合考虑实际应用场景中果实大小、姿态差异、障碍物遮挡和光线变化等非结构化因素对识别效果的影响,因此,大多以通用的识别模型为基础,针对实际应用场景进行算法的改进与优化,此类代表性研究如表 1 所示。

表 1 针对实际应用场景的算法改进优化

Table 1 Algorithm improvements for real-world scenarios

场景	使用算法	改进优化	效果	文献
番茄侧枝修剪点识别	Mask R-CNN	ResNet50 替换为 MobileNetv3-Large	平均准确率 82.9%	[47]
解决授粉过程中番茄花朵小、姿态朝向各异	YOLOv5s	添加 CBAM 模块并采用加权框融合	准确率 95.7%,召回率 94.2%	[48]
提高遮挡小番茄果实识别	YOLOv4	将 CBAM 集成到骨干网络;Mish 激活函数替代 ReLU 激活函数;使用密集连接的卷积网来加强全局特征融合	平均精度均值 97.9%	[49]
苹果叶片病虫害识别	Faster R-CNN	Res 2Net 和特征金字塔网络架构作为特征提取网络;RoIAlign 取代 RoIPool	平均精度为 63.1%	[50]
解决树枝、树叶等覆盖的花椒果实识别	YOLOv5s	CBF 模块作为骨干网络;Specter 模块代替瓶颈 CSP 模块	平均精度均值 94.5%	[51]
密集种植的甜椒果实识别	YOLOv4	嵌入 CBAM 模块	平均 F1 评分和定位准确率分别为 91.84%和 89.55%	[52]

F1:精确率和召回率的调和平均数。

此外,由于农业机械手在作业时需要有对图像进行识别处理的能力,多数视觉技术需要集成到农业机械手上。因此,在保证图像识别准确率的前提下,还需要尽量减少识别模型的大小,降低识别推理时间,以便于视觉识别算法在农业机械手上的高效部署。

目前视觉识别算法轻量化的方法主要有两种:轻量化算法改进和剪枝蒸馏。轻量化算法改进主要是使用检测速度快、模型大小较小的小型算法模型以及轻量化模块,在保证检测精度的同时降低模型大小,为模型部署提供便利。王金鹏等^[53]将 YOLOv7-tiny 模型与其他常用的目标检测模型进行对比,综合对比了检测精度和模型大小,选择检测精度和推理时间都比较优秀的 YOLOv7-tiny 模型,并将其部署到 Jetson Xavier NX 开发板来检测不同姿态的火龙果果实,再配合机械臂采摘时准确率达 90%。龙洁花等^[54]使用 CSP-ResNet50 为主干的改进 Mask R-CNN 模型,减少了反向传播中的重复特征信息,降低了模型的计算量。模型部署到农业机械手上后对温室环境下不同成熟度的番茄果实进行检测,识别准确率达 90%。虽然使用轻量化的模块能减少模型大小,但多数轻量化模块在降低参数数量的同时也增加了模型的推理时间。相较之下,使用剪枝和蒸馏技术能够在保障模型精度的同时,大规模地降低模型大小,同时并不会延长模型的推理时间。熊俊涛等^[55]以 YOLOv5-Lite 模型为基础,去除 Focus 层,减少 C3 层层数以释放内存提高运算速度,使用 ShuffleNetv2 减少计算量,并对 FPN+PAN 进行剪枝,改进后的模型大小仅为 11.3 MB,剪枝后的模型对自然环境下木瓜果实检测的平均精度均值(*mAP*)为 92.4%,检测时间仅 7 ms,满足轻量化部署的需要。

2.2.2 复杂环境条件下的定位技术 在复杂环境

条件下准确获取目标对象的地理坐标,从而实现目标物体的精确定位,是农业机械手视觉系统的另一项关键技术。目前,农业机械手中常用的目标定位方法有 3 种:单目视觉定位法^[41]、双目视觉定位法^[43]和深度相机定位法^[44]。

单目视觉定位法只需要一个摄像头或图像传感器即可实现目标定位和跟踪,结构相对简单、成本低廉,但其存在对光照条件的依赖性较强,对目标的遮挡和复杂环境的适应性相对较差等缺点,且这种方法获取目标的深度信息困难,定位精度误差大,易造成末端执行器的损坏。因此,随着双目视觉定位法和深度相机定位法技术的不断发展,这种方法逐渐被替代。

双目视觉定位法使用两个摄像头同时拍摄同一场景,通过两幅图像之间的视差及相机在场景中的位置和姿态信息,从而获取目标物体的三维坐标。双目视觉定位法通过计算视差和三角测量可以提取目标的深度信息,通过比较两个视点之间的差异,还可以降低光变化和纹理缺失对测量结果的影响。因此,这种方法具有更高的测量精度和稳定性。但是,双目视觉对双目传感器标定精度要求较高,并且定位计算复杂,耗时较长,在实时应用和大规模数据处理时可能会面临挑战^[56]。

深度相机使用特殊的红外投射和接收技术,通过测量光线从相机到物体的行程时间,可以计算出物体与相机之间的距离,从而获取目标的深度信息。深度相机定位法通过校准深度相机的内部参数和外部参数矩阵,使深度图像和彩色图像对应,使用算法对深度图像进行处理和分析,如点云匹配、三维重建等,以得到每个像素对应的三维坐标,再结合彩色图像和三维坐标信息,计算出目标在场景中的位置。深度相机定位法目前在农业机械手领域应用较多,不同深度相机定位法使用场景及效果如表 2 所示。

表 2 不同深度相机定位方法使用场景及效果

Table 2 Scenarios and effects of camera positioning methods with different depths

应用领域	相机类型	场景	效果	文献
确定分拣目标	Kinect V2	鸡蛋捡拾	成功率为 91.57%	[57]
果蔬三维坐标重建	RGB-D	石榴果实三维数据重建	定位位置误差小于 5 mm	[58]
	RealSense D435i	番茄串果实三维重建与定位	关键点检测的成功率为 85.77%,达到预期的精度和重建率为 70.05%	[59]
采摘坐标点定位	RealSense SR300	果蔬采摘	X、Y、Z 方向的平均定位精度为 3.51 mm、2.79 mm、3.35 mm	[60]
	RealSense D435i	番茄串果实采摘	识别成功率为 93.83%,采摘点深度误差±3 mm	[61]
	RGB-D	茶叶采摘	定位成功率 78.90%	[62]

相较于单目视觉定位法和双目视觉定位法,深度相机定位法可以直接获取目标的三维位置和深度信息,不需要依赖视差计算或其他间接方法,这可以提供更精确的目标定位结果。对于光照变化、纹理缺失和背景干扰具有较强的鲁棒性,通过直接测量目标到相机的距离,相对于基于图像特征的方法更具鲁棒性。

2.3 传感感知技术

农业机械手依靠传感感知技术实时获取复杂的作业环境、作业状态及自身状况等动态信息,从而实现精准作业,提高作业效率。依据感知对象和感知目的,当前农业机械手领域的传感感知技术大体可分为:环境感知技术、位姿感知技术、接触感知技术。其中,农业机械手依靠环境感知获取目标、障碍物等环境信息,依靠位姿感知实现位置监测和姿态控制,依靠接触感知进行精准作业。

2.3.1 环境感知技术 环境感知技术是农业机械手领域十分重要的非接触式传感技术。依靠环境感知技术,农业机械手可以实现障碍物检测、目标感知、抓取点确定、目标定位和周围环境感知等诸多功能。其主要通过视觉传感器、激光雷达(LiDAR)、红外传感器和超声波传感器等捕捉环境的信息^[24,42]。

在白天或者光线较好的情况下,农业机械手多借助基于视觉传感器的视觉系统或 LiDAR 获取丰富的图像数据、深度信息和环境的三维结构,以识别作业对象、目标物体以及障碍物等。如 Bu 等^[63]借助基于 ZED 双眼视觉传感器的立体相机实时检测苹果果实,并据此运用三维空间定位算法获取苹果果实坐标;Tsoulias 等^[64]使用 3D LiDAR 根据后向散射反射强度和几何特征成功检测果园中的苹果果实。

在夜间或光线不足时,视觉信息可能受限。此时就需要红外传感器和超声波传感器等对光线条件不敏感的环境感知技术来提供额外的数据支持。Lin 等^[65]使用带有 RGB 和红外摄像头的 Kinect V2 传感器对田间柑橘果实进行检测,成功克服了光照变化对视觉的影响。

近年来,学者们还尝试将多种环境感知技术进行融合,以提升农业机械手的环境适应性。如视觉传感器提供的图像和深度信息与红外传感器等的低光敏数据相融合;激光雷达生成的三维环境地图与红外传感器检测到的热能图叠加,以提供更准确的

植物健康状态信息和作物热应激状况^[24,42]。融合环境感知技术有着良好的互补性,使农业机械手能够在不同的环境条件下,保持高精度的操作,提升作业的全面性和可靠性。

2.3.2 位姿感知技术 农业机械手通过环境感知技术获取环境与作业信息后,通过位姿感知技术实现位置监测和姿态控制。现阶段用于位姿感知的传感器主要包含位置传感器和姿态传感器两种,其在实现高精度操作和有效控制中具有关键作用。其中,位置监测主要通过位置传感器,如:霍尔效应传感器、光电编码器、位置编码器和接近传感器等,以确保农业机械手在复杂农业环境下进行播种、施肥和收割等作业过程中的精确定位。而姿态控制则大多通过惯性传感器中的陀螺仪、加速度计和磁力计等监控末端执行器的角度和动态姿态,以提供实时的动态数据。位置监测和姿态控制多为协同感知,如 Zhang 等^[66]通过北斗导航、惯性传感器(IMU)、导航控制器和伺服电机组成系统,当喷洒机械手以 0.4 m/s 的速度在果园中移动时,系统能准确地确定喷洒机械手的位置,最大偏移误差小于 10.77 cm。

2.3.3 接触感知技术 农业机械手获取环境和位姿信息后,为了确保末端执行器准确作业,需要通过接触感知技术获取末端执行器与作业对象的接触状态。目前,接触感知技术多通过安装在末端执行器的力传感器、触觉传感器、压力传感器及电容式触摸传感器等接触传感器,以物理接触作业对象的方式来获取接触信息^[67],如压力、抓取力、扭矩、振动等^[68]。其中,接触传感器对于力的测量和检测应用最为广泛,常用于抓取、剪切和扭断等作业过程中,以此来调整末端执行器的操作力度,避免对易损作业对象的伤害,提升作业效果。Vu 等^[69]设计了一种用于番茄果实收获的 4 指夹持末端执行器,通过在指尖上装入压力传感器和橡胶垫,以真空方式吸取番茄果实,避免对番茄果实的损伤;Roshanianfard 等^[26]在 5 指全包裹型末端执行器的每个手指都配备了两个数字触摸传感器来检测重量大的作业对象,以控制抓取力,确保抓取稳定。

借助环境感知技术、位姿感知技术以及接触感知技术的综合运用,农业机械手才能在复杂的农业环境中,实现全面的环境感知、高精度的定位与姿态控制及精细的作业处理。这种综合运用不仅提升了农业机械手的操作精度和可靠性,减少了误操作和

作业对象损伤,还增强了其在复杂农业环境中的适应性,提高了作业效率和作业质量。

2.4 运动控制技术

农业机械手通过传感感知技术和视觉技术获取整体、末端执行器以及作业对象的位置和环境信息后,需要通过运动控制技术实现作业控制。目前,运动控制技术主要包括驱动控制、轨迹规划和避障规划 3 个方面。

2.4.1 驱动控制 农业机械手通过驱动控制将运动控制命令转化为具体操作。高效的驱动控制系统将直接影响机械手的操作精度、效率和稳定性。根据控制系统的原理,农业机械手的驱动控制通常可以分为:电动控制、液压控制和气动控制^[70]。其中,电动控制通过使用电机直接或间接产生力和力矩,以控制农业机械手运动,这种控制方式应用较多^[71-72];液压控制利用液压油的不可压缩性,通过压力传递提供高精度、大力矩的输出^[73],多用于大

载荷或需要稳定、平滑控制的场合^[74-75];气动控制以压缩空气为动力源,能够提供快速、重复性的直线或旋转运动,其结构较简单、成本低廉,适用于分拣、采摘、搬运等中低负载的操作^[34,38,76]。

2.4.2 轨迹规划 农业机械手通过传感感知技术和视觉技术获取工作目标的坐标位置后,需要以此为位置终点,以农业机械手初始位置为位置起始点建立局部点到点的工作轨迹规划。这种局部点到点的工作轨迹规划通常先采用曲线插值方式得到轨迹,再根据工作要求对得到的曲线进行最优规划或者二次规划^[77-78]。目前,基于农业作业环境的复杂性,多使用 S 曲线、B 样条曲线和五次多项式曲线等曲线插值方法。由于五次多项式曲线插值既能保证位移和速度的连续性,又能实现加速度的连续,进而使得工作轨迹更加灵活,在现阶段农业机械手中应用较多。不同曲线插值方法使用情况如表 3 所示。

表 3 曲线插值方法在农业机械手中的应用

Table 3 The application of curve interpolation method in agricultural manipulators

机械手类型	插值方法	优点	缺点	效果	文献
并联除草机械手	S 曲线	平滑性好,抗干扰能力强	拟合程度差,控制点选择不精确	轨迹最大偏差 11.58%,每 2.8 s 完成 1 次任务	[79]
串联水果采摘机械手	B 样条曲线	平滑性好,运动振动少	灵活性差,局部拟合严重	平均采摘时间为 25.5 s,准确率为 96.67%	[80]
串联水果采摘机械手	五次多项式曲线	控制精准,实现简单,拟合程度好	易出现振荡现象,轨迹不够平滑	仿真环境下单次果实采摘的时间约为 17 s	[81]
串联水果采摘机械手	五次多项式曲线	控制精准,实现简单,拟合程度好	易出现振荡现象,轨迹不够平滑	收获准确率为 88%,收获番茄果实的周期为 20 s	[82]
串联授粉机械手	五次多项式曲线	控制精准,实现简单,拟合程度好	易出现振荡现象,轨迹不够平滑	授粉准确率为 85%,单朵花平均授粉时间为 5 s	[83]

通过插值方法可以获得满足作业要求的农业机械手工作轨迹,但并未考虑农业机械手的工作效率。为了减少农业机械手的工作时间,提高农业机械手工作的稳定性和效率,需要对农业机械手的轨迹进一步优化。针对不同结构的农业机械手,学者们研究的侧重点不同。目前,并联机械手轨迹优化大多集中在优化工作顺序,缩短运动轨迹方面。Zhang 等^[84]提出一种改进蚁群算法(ACA)来规划红花采摘轨迹,对 \cap 形轨迹进行了改进,将距离相近的红花合并采摘进二次规划;与传统 ACA 规划的固定平面 \cap 型轨道相比,减少了 3 个采摘点,路径总长度缩短 74.3%。Li 等^[62]在 \cap 采摘轨迹的基础上,通过规定并联机械手每次上升到相同高度,并结合遗传算

法优化采集顺序,缩短茶叶采摘的运动路径。串联机械手轨迹优化则多从插值过程入手,通过优化工作时间、能量、冲击等参数获得最优轨迹。Cao 等^[85]使用 B 样条曲线规划机械手的运动轨迹,并用改进的多目标粒子群优化算法(GMOPSO)对采摘机械臂的运动轨迹进行了多目标优化,得到时间、能量、冲击三者最优的优化轨迹。

2.4.3 避障规划 农业机械手在完成轨迹规划工作任务时,工作路径中可能会遇到遮挡,如工作目标被枝干、树叶遮挡以及多个农业机械手协作工作时可能会发生相互碰撞等场景,进而导致农业机械手无法顺利到达工作目标作业,因此农业机械手局部避障规划也十分必要。

农业机械手局部避障规划主要以人工势场法和随机搜索树算法(RRT)为基础。其中,人工势场法通过引力势场和斥力势场结合形成总势场,根据总势场的梯度方向进行移动,来引导农业机械手躲避障碍物到达指定目标;RRT 算法则通过不断地随机采样和扩展树的节点,逐步扩大搜索空间,直到找到一条可行路径或达到最大迭代次数。由于采样点是随机的,RRT 算法能够快速探索整个搜索空间,并且在扩展树的过程中避开障碍物^[86-87]。人工势场

法和 RRT 算法能够较好地解决单个农业机械手局部工作中的枝干、树叶遮挡问题,但当作业过程需要多个农业机械手协同工作时,农业机械手之间的碰撞问题仍无法避免。针对多个农业机械手协同作业,现阶段学者们主要采用遗传算法、粒子群算法等智能算法规划农业机械手工作顺序,以解决多个农业机械手同时作业可能发生的碰撞问题。农业机械手局部避障规划的典型研究如表 4 所示。

表 4 农业机械手局部避障规划典型研究

Table 4 Typical research on local obstacle avoidance planning of agricultural manipulators

应用领域	方法	应用	效果	文献
机械手自然条件下避障	人工势场法	公路绿篱修剪	消除局部最小点,灵活顺利避障	[88]
		苹果果实采摘	灵活躲避障碍物,并且机械手在整个避障过程中的时间小于 10 s	[89]
	RRT 算法	苹果树修剪	能够避开障碍物、非目标分支到达修剪点	[90]
		果树修剪	比改进前路径规划时间和路径长度分别减少约 55%和 60%,并且能够躲避障碍物	[91]
机械手内部避障	遗传算法	果蔬采摘	采样点减少 92.9%,时间减少 86.1%,速度提升 48.4%,采摘成功率提升 2.1%	[92]
		三臂采摘蘑菇	三臂成功回避,整体采摘效率提升 20%~40%	[93]
	粒子群算法	双臂采摘猕猴桃果实	双臂位置合理,平均果实采摘成功率为 82.10%	[94]

3 存在问题

目前虽然国内外学者针对农业机械手开展了大量研究,但是大多数研究仍停留在实验室阶段,距离大规模商业化应用还有一定的差距,主要存在以下问题:

1) 末端执行器通用性低:现有农业机械手的末端执行器通常为特定任务设计,缺乏足够的通用性。这种高度定制化的设计增加了设计成本与系统复杂度,难以满足不同作业对象和任务的需求,限制了末端执行器的应用范畴。

2) 视觉系统环境适应性差:农业机械手所处的作业环境复杂多变,视觉系统容易受到天气、光照、季节等外界因素的影响,导致目标检测误差增大和定位不准确。尽管高性能摄像头和图像处理单元可以改善视觉系统的性能,但其高成本和易损性限制了其在农业机械手中的广泛应用。

3) 传感感知技术不足:农业机械手依赖的传感器在复杂环境条件下的稳定性和精度仍存在不足。在应对地形变化、高密度作物及大型障碍物等复杂

情况时,传感感知系统的局限性显著凸现,影响了农业机械手的整体感知能力和任务执行效率。

4) 驱动控制灵活性和精度不够,轨迹规划和避障能力不足:农业机械手的驱动控制系统在复杂环境中难以保持灵活的高精度控制,导致效率低下,很难快速准确地完成作业任务。同时,现有的轨迹规划和避障系统在应对不规则地形和动态障碍物时,实时性和灵活性不足,影响了机械手的整体作业效率和安全性。

5) 能耗高:农业机械手在执行任务时的能耗较高,尤其是在运动控制、感知和避障过程中。相关设备的节能技术还比较匮乏,这限制了农业机械手的长时间连续作业能力。

4 发展趋势

针对现阶段农业机械手存在的问题,未来研究可以从以下方面展开:

1) 提升农业机械手灵活性:通过轻量化结构设计和灵活、可重构的驱动机制,提升机械手的运动速度和精度,减少能耗,增强其在不同作业环境中的适

应性和通用性。

2)末端执行器多功能化:针对农业作业需求,开发多功能末端执行器,使农业机械手能够执行采摘、修剪、喷洒等多种任务,减少设备的数量和使用成本,提高经济效益和应用范围。

3)多感知技术融合:为增强农业机械手在复杂环境中的感知能力,未来应重点推进多模态传感器融合技术的研究。通过整合视觉、红外、激光雷达等传感器数据,提高系统在不同环境下的鲁棒性和感知精度,实现更为精准的环境感知与决策支持。

4)优化运动控制与避障策略:未来研究应着重开发高效节能的驱动系统,并结合智能控制算法,提升农业机械手的响应速度与操作精度。同时,通过优化轨迹规划算法和避障策略,确保机械手在复杂环境下的高效、安全作业。

5)融合新兴技术:将大数据、农业物联网和人工智能技术与农业机械手相结合,实时获取并分析作业数据,提升机械手的智能化水平和农业生产管理效率。

6)多个农业机械手协同作业:未来研究应探索多个农业机械手的协同作业模式,形成机械手集群,以提高作业效率,推动农业生产的规模化和智能化发展。

参考文献:

- [1] 刘成良,贡亮,苑进,等. 农业机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. 农业机械学报,2022,53(7):1-22,55.
- [2] REN G Q, LIN T, YING Y B, et al. Agricultural robotics research applicable to poultry production: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2020,169:105216.
- [3] OLIVEIRA L F P, MOREIRA A P, SILVA M F. Advances in agriculture robotics: a state-of-the-art review and challenges ahead[J]. Robotics,2021,10(2):52.
- [4] COLUCCI G, BOTTA A, TAGLIAVINI L, et al. Kinematic modeling and motion planning of the mobile manipulator Agri. Q for precision agriculture[J]. Machines,2022,10(5):321.
- [5] 刘成良,林洪振,李彦明,等. 农业装备智能控制技术现状与发展趋势分析[J]. 农业机械学报,2020,51(1):1-18.
- [6] THOMASSON J A, BAILLIE C P, ANTILLE D L, et al. Autonomous technologies in agricultural equipment: a review of the state of the art[C]//AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. 2019 agricultural equipment technology conference. St. Joseph, Michigan, USA: American Society of Agricultural and Biological Engineers,2019:1-17.
- [7] BLACKMORE S, STOUT B, WANG M, et al. Robotic agriculture-the future of agricultural mechanisation? [M]//DE GRUYTER BRILL. Proceedings of the 5th european conference on precision agriculture. Wageningen, The Netherlands: Wageningen Academic Publishers, 2005: 621-628.
- [8] 赵春江. 智慧农业的发展现状与未来展望[J]. 华南农业大学学报,2021,42(6):1-7.
- [9] BAC C W, VAN HENTEN E J, HEMMING J, et al. Harvesting robots for high-value crops: state-of-the-art review and challenges ahead[J]. Journal of Field Robotics,2014,31(6):888-911.
- [10] BECHAR A, VIGNEAULT C. Agricultural robots for field operations: concepts and components [J]. Biosystems Engineering, 2016,149:94-111.
- [11] VOUGIOUKAS S G. Agricultural robotics[J]. Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems,2019,2(1):365-392.
- [12] 仇裕洪,黄振楠,阮昭,等. 机器视觉技术在农业生产智能化中的应用综述[J]. 机械研究与应用,2019,32(2):202-206.
- [13] HUA Y B, ZHANG N R, YUAN X, et al. Recent advances in intelligent automated fruit harvesting robots[J]. The Open Agriculture Journal,2019,13(1):101-106.
- [14] TINOCO V, SILVA M F, SANTOS F N, et al. An overview of pruning and harvesting manipulators[J]. Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application,2022,49(4):688-695.
- [15] MESHRAM A T, VANALKAR A V, KALAMBE K B, et al. Pesticide spraying robot for precision agriculture: a categorical literature review and future trends[J]. Journal of Field Robotics,2022,39(2):153-171.
- [16] ZHANG B, CHEN X G, ZHANG H M, et al. Design and performance test of a jujube pruning manipulator[J]. Agriculture,2022,12(4):552.
- [17] KAMANDAR M R, MASSAH J, JAMZAD M. Design and evaluation of hedge trimmer robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2022,199:107065.
- [18] HU G R, CHEN C, CHEN J, et al. Simplified 4-DOF manipulator for rapid robotic apple harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2022,199:107177.
- [19] 苑进,李扬,刘雪美,等. 禽蛋自动捡拾系统结构设计及机械手运动规划[J]. 农业工程学报,2016,32(8):48-55.
- [20] ZHANG X C, WU Z M, CAO C M, et al. Design and operation of a deep-learning-based fresh tea-leaf sorting robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2023,206:107664.
- [21] 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.
- [22] BAO X L, NIU Y X, LI Y S, et al. Design and kinematic analysis of cable-driven target spray robot for Citrus orchards[J]. Applied Sciences,2022,12(18):9379.
- [23] MU L T, CUI G P, LIU Y D, et al. Design and simulation of an integrated end-effector for picking kiwifruit by robot[J]. Informa-

- tion Processing in Agriculture, 2020, 7(1): 58-71.
- [24] YANG Q H, DU X Q, WANG Z H, et al. A review of core agricultural robot technologies for crop productions[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 206: 107701.
- [25] LI Z Y, YUAN X J, WANG C Y. A review on structural development and recognition-localization methods for end-effector of fruit-vegetable picking robots[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2022, 19(3): 17298806221104906.
- [26] ROSHANIANFARD A, NOGUCHI N. Pumpkin harvesting robotic end-effector[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 174: 105503.
- [27] ISLAM M N, IQBAL M Z, ALI M, et al. Kinematic analysis of a clamp-type picking device for an automatic pepper transplanter [J]. Agriculture, 2020, 10(12): 627.
- [28] ZHANG N, ZHANG G Z, LIU H P, et al. Design of and experiment on open-and-close seedling pick-up manipulator with four fingers[J]. Agriculture, 2022, 12(11): 1776.
- [29] HOU Z L, LI Z G, FADIJI T, et al. Soft grasping mechanism of human fingers for tomato-picking bionic robots[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 182: 106010.
- [30] 李 健, 戴楚彦, 王扬威, 等. 面向草莓抓取的气动四叶片软体抓手研制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(1): 105-113.
- [31] 李 健, 戴楚彦, 王扬威, 等. 基于草莓轮廓曲线的单指软体采摘抓手设计与优化[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(6): 1088-1096, 1134.
- [32] 贾江鸣, 叶玉泽, 程培林, 等. 细长果蔬采摘软体气动抓手设计与参数优化[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 26-34.
- [33] 朱银龙, 赵 虎, 苏海军, 等. 四指软体机械手机械特性分析与抓取试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 434-442.
- [34] 赵云伟, 耿德旭, 刘晓敏, 等. 气动柔性果蔬采摘机械手运动学分析与实验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 31-42.
- [35] 李三平, 孙腾佳, 袁龙强, 等. 气动软体采摘机械手设计及实验研究[J]. 工程设计学报, 2022, 29(6): 684-694.
- [36] XIAO X, WANG Y N, JIANG Y M. End-effectors developed for Citrus and other spherical crops[J]. Applied Sciences, 2022, 12(15): 7945.
- [37] YU Z J, YUAN J J, GUO D Z, et al. Underactuated picking gripper for grasping and cutting Citrus[C]//IEEE. 2021 IEEE international conference on robotics and biomimetics (ROBIO). New Jersey: IEEE Computer Society, 2021: 1935-1940.
- [38] 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.
- [39] RONG J C, FU J, ZHANG Z Q, et al. Development and evaluation of a watermelon-harvesting robot prototype: vision system and end-effector[J]. Agronomy, 2022, 12(11): 2836.
- [40] 郑太雄, 江明哲, 冯明驰. 基于视觉的采摘机器人目标识别与定位方法研究综述[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(9): 28-51.
- [41] 苟园旻, 闫建伟, 张富贵, 等. 水果采摘机器人视觉系统与机械手研究进展[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(9): 13-26.
- [42] MONTOYA-CAVERO L E, DÍAZ DE LEÓN TORRES R, GÓMEZ-ESPINOSA A, et al. Vision systems for harvesting robots: produce detection and localization[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 192: 106562.
- [43] CHENG C, FU J, SU H, et al. Recent advancements in agriculture robots: benefits and challenges[J]. Machines, 2023, 11(1): 48.
- [44] ZHAO Y S, GONG L, HUANG Y X, et al. A review of key techniques of vision-based control for harvesting robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127(C): 311-323.
- [45] YIN H P, CHAI Y, YANG S X, et al. Ripe tomato recognition and localization for a tomato harvesting robotic system[C]//IEEE. 2009 international conference of soft computing and pattern recognition. New Jersey: IEEE Computer Society, 2009: 557-562.
- [46] LINKER R, COHEN O, NAOR A. Determination of the number of green apples in RGB images recorded in orchards[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 81: 45-57.
- [47] 梁喜凤, 章鑫宇, 王永维. 基于改进 Mask R-CNN 的番茄侧枝修剪点识别方法[J]. 农业工程学报, 2022, 38(23): 112-121.
- [48] 余贤海, 孔德义, 谢晓轩, 等. 基于深度学习的番茄授粉机器人目标识别与检测[J]. 农业工程学报, 2022, 38(24): 129-137.
- [49] 杨 坚, 钱 振, 张燕军, 等. 采用改进 YOLOv4-tiny 的复杂环境下番茄实时识别[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 215-221.
- [50] GONG X L, ZHANG S J. A high-precision detection method of apple leaf diseases using improved faster R-CNN[J]. Agriculture, 2023, 13(2): 240.
- [51] XU Z B, HUANG X P, HUANG Y, et al. A real-time *Zanthoxylum* target detection method for an intelligent picking robot under a complex background, based on an improved YOLOv5s architecture [J]. Sensors, 2022, 22(2): 682.
- [52] NING Z T, LUO L F, DING X M, et al. Recognition of sweet peppers and planning the robotic picking sequence in high-density orchards[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 196: 106878.
- [53] 王金鹏, 周佳良, 张跃跃, 等. 基于优选 YOLOv7 模型的采摘机器人多姿态火龙果检测系统[J]. 农业工程学报, 2023, 39(8): 276-283.
- [54] 龙洁花, 赵春江, 林 森, 等. 改进 Mask R-CNN 的温室环境下不同成熟度番茄果实分割方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(18): 100-108.
- [55] 熊俊涛, 韩咏林, 王 潇, 等. 基于 YOLO v5-Lite 的自然环境木瓜成熟度检测方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(6): 243-252.
- [56] 徐天成, 吴 敏, 贺冬仙, 等. 机器视觉在农业工程中的应用[J]. 农业工程, 2021, 11(8): 40-48.
- [57] JOFFE B P, USHER C T. Autonomous robotic system for picking up floor eggs in poultry houses[C/OL]//AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. 2017 ASABE annual international meeting. St. Joseph, Michigan, USA: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2017. DOI: 10.13031/aim.201700397.

- [58] YU T, HU C H, XIE Y N, et al. Mature pomegranate fruit detection and location combining improved F-PointNet with 3D point cloud clustering in orchard[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 200: 107233.
- [59] ZHANG F, GAO J, ZHOU H, et al. Three-dimensional pose detection method based on keypoints detection network for tomato bunch[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 195: 106824.
- [60] 金玉成, 高杨, 刘继展, 等. 采摘机器人深度视觉伺服手-眼协调规划研究[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(6): 18-25, 42.
- [61] 张勤, 陈建敏, 李彬, 等. 基于RGB-D信息融合和目标检测的番茄串采摘点识别定位方法[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(18): 143-152.
- [62] LI Y T, WU S K, HE L Y, et al. Development and field evaluation of a robotic harvesting system for plucking high-quality tea[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 206: 107659.
- [63] BU L X, CHEN C K, HU G R, et al. Design and evaluation of a robotic apple harvester using optimized picking patterns[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 198: 107092.
- [64] TSOULIAS N, PARAFOROS D S, XANTHOPOULOS G, et al. Apple shape detection based on geometric and radiometric features using a LiDAR laser scanner[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(15): 2481.
- [65] LIN G C, TANG Y C, ZOU X J, et al. In-field citrus detection and localisation based on RGB-D image analysis[J]. *Biosystems Engineering*, 2019, 186: 34-44.
- [66] ZHANG L, ZHU X H, HUANG J J, et al. BDS/IMU integrated auto-navigation system of orchard spraying robot[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(16): 8173.
- [67] 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.
- [68] 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.
- [69] VU Q, RONZHIN A. A model of four-finger gripper with a built-in vacuum suction nozzle for harvesting tomatoes[M]//RONZHIN A, SHISHLAKOV V. *Proceedings of 14th international conference on electromechanics and robotics Zavalishin's Readings*. Singapore: Springer Singapore, 2019: 149-160.
- [70] XIE D B, CHEN L, LIU L C, et al. Actuators and sensors for application in agricultural robots: a review[J]. *Machines*, 2022, 10(10): 913.
- [71] CHEN J Q, QIANG H, WU J H, et al. Navigation path extraction for greenhouse cucumber-picking robots using the prediction-point Hough transform[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 180: 105911.
- [72] ZHANG C L, YONG L Y, CHEN Y, et al. A rubber-tapping robot forest navigation and information collection system based on 2D LiDAR and a gyroscope[J]. *Sensors*, 2019, 19(9): 2136.
- [73] KOIVUMÄKI J, ZHU W H, MATTILA J. Energy-efficient and high-precision control of hydraulic robots[J]. *Control Engineering Practice*, 2019, 85: 176-193.
- [74] LI J X, LI S J, ZHANG Y L, et al. Development and test of hydraulic driven remote transporter[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2021, 14(2): 72-80.
- [75] ROSHANIANFARD A, NOGUCHI N, KAMATA T. Design and performance of a robotic arm for farm use[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2019, 12(1): 146-158.
- [76] MATA AMRITANANDAMAYI DEVI, UDUPA G, SREEDHARAN P. A novel underactuated multi-fingered soft robotic hand for prosthetic application[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2018, 100: 267-277.
- [77] 龙樟, 李显涛, 帅涛, 等. 工业机器人轨迹规划研究现状综述[J]. *机械科学与技术*, 2021, 40(6): 853-862.
- [78] DU Y X, CHEN Y H. Time optimal trajectory planning algorithm for robotic manipulator based on locally chaotic particle swarm optimization[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2022, 31(5): 906-914.
- [79] BO B C, ZHANG S, LIU W, et al. Simulation of workspace and trajectory of a weeding mechanism[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2022, 61(2): 1133-1143.
- [80] CAO X M, YAN H S, HUANG Z Y, et al. A multi-objective particle swarm optimization for trajectory planning of fruit picking manipulator[J]. *Agronomy*, 2021, 11(11): 2286.
- [81] 张晴晖, 孔德肖, 李俊菽, 等. 基于逆运动学降维求解与YOLO-v4的果实采摘系统研究[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(9): 15-23.
- [82] WANG D, DONG Y X, LIAN J, et al. Adaptive end-effector pose control for tomato harvesting robots[J]. *Journal of Field Robotics*, 2023, 40(3): 535-551.
- [83] LI K, HUO Y J, LIU Y N, et al. Design of a lightweight robotic arm for kiwifruit pollination[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 198: 107114.
- [84] ZHANG H, GE Y, SUN C, et al. Picking path planning method of dual rollers type safflower picking robot based on improved ant colony algorithm[J]. *Processes*, 2022, 10(6): 1213.
- [85] CAO X M, ZOU X J, JIA C Y, et al. RRT-based path planning for an intelligent litchi-picking manipulator[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 156: 105-118.
- [86] YE L, DUAN J L, YANG Z, et al. Collision-free motion planning for the litchi-picking robot[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 185: 106151.
- [87] HE Z, MA L, WANG Y C, et al. Double-arm cooperation and implementing for harvesting kiwifruit[J]. *Agriculture*, 2022, 12(11): 1763.
- [88] 罗天洪, 唐果, 马翔宇, 等. 高速公路绿篱修剪机器人手臂避障路径规划[J]. *工程科学学报*, 2019, 41(1): 134-142.
- [89] LI J Y. A new trajectory planning method of 6-DOF apple picking manipulator[J]. *Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering*, 2022, 16(5): 777.

- [90] ZAHID A, HE L, CHOI D D, et al. Collision free path planning of a robotic manipulator for pruning apple trees[C]//AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. 2020 ASABE annual international virtual meeting. St. Joseph, Michigan, USA: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2020. DOI:10.13031/aim.202000439.
- [91] CHEN Y Y, FU Y X, ZHANG B, et al. Path planning of the fruit tree pruning manipulator based on improved RRT-Connect algorithm[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(2):177-188.
- [92] 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.
- [93] JIA B C, YANG S Z, YU T. Research on three picking arm avoidance algorithms for Agaricus mushroom picking robot[C]//IEEE. 2020 IEEE international conference on advances in electrical engineering and computer applications (AEECA). New Jersey: IEEE Computer Society, 2020:325-328.
- [94] 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.

(责任编辑:石春林)