

农业采摘机器人产业化进程分析与多臂高速化技术走向

刘继展^{1,2} 江应星^{1,2}

(1. 江苏大学教育部现代农业装备与技术重点实验室, 镇江 212013;

2. 江苏大学国家数字农业装备(人工智能和农业机器人)创新分中心, 镇江 212013)

摘要: 在经历了长期的摸索和积累后,全球采摘机器人的产品化进程正在不断加速。随着我国农业生产对采摘机器人需求的快速刚性化,众多企业纷纷加入,生产销售逐步展开,但作业效率不足已成为其全面产业化和生产应用的核心障碍。本文在分析我国采摘机器人效率现状的基础上,归纳了机器人采摘的提效技术模式和多臂化途径,指出了国内外采摘机器人多臂高速并行的发展态势。在总结多臂采摘机器人臂型设计、视觉技术、任务与运动规划技术发展现状的基础上,提出了采摘机器人产业化发展趋势与目标,认为从手眼高精度向综合强容差、从专用定制化向通用模块化、从专业性装备向用户型产品发展是采摘机器人产业化的技术走向。

关键词: 农业采摘机器人; 产业化; 多臂; 作业效率

中图分类号: TP242.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)10-0001-17

OSID:



Industrialization Trends and Multi-arm Technology Direction of Harvesting Robots

LIU Jizhan^{1,2} JIANG Yingxing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. National Digital Agricultural Equipment (Artificial Intelligence and Agricultural Robotics) Innovation Sub-center, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: After a long period of exploration and accumulation, the global productization process of harvesting robot is accelerating. With the increasingly irreplaceable demand for robotic harvesting in agricultural production in China, many enterprises have entered the market and gradually opened up the production and sales. However, insufficient work efficiency has become the core bottleneck for its comprehensive industrialization and production applications. Based on the analysis of the efficiency status of harvesting robots in China, the technology modes and the multi-arm approach of efficiency improvement were summarized. And with the rapid development of agricultural harvesting technology in the future, multi-arm high-speed simultaneous harvesting would become a global trend. On the basis of summarizing the development status of arm design, vision technology, task and motion planning technology of multi-arm harvesting robots, the development trend and goals of the industrialization of harvesting robots were proposed. It was believed that the technological direction for the industrialization of harvesting robots would shift from hand-eye high-precision positioning to strong comprehensive tolerance capability, from specialized customized technology model to universal modular technology solution, and from complex human involvement in professional equipment to an easy-to-use technology system for household products.

Key words: harvest robot; industrialization; multi-arm; harvesting efficiency

0 引言

在全球范围内,各类粮油作物、经济作物的一致

性收获装备获得了巨大发展。在我国,小麦、水稻、玉米机收率已分别超过 97%、94%、78%,棉花、马铃薯和加工型番茄、葡萄等果蔬的一致性收获装备

收稿日期: 2024-08-06 修回日期: 2024-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(31971795)、江苏省(现代农业)重点研发计划项目(BE2022363)和江苏省现代农机装备与技术示范推广项目(NJ2022-03)

作者简介: 刘继展(1976—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业机器人研究, E-mail: liujizhan@ujs.edu.cn

也正在发展。与之相比,鲜食鲜用果、蔬、茶、花、菌等的选择性采收仍完全依赖人工,成为全球农业持续发展的挑战和机械化的最后短板^[1]。

采摘机器人技术已经历数十年的发展历程,因长期困扰于非结构环境下的目标探测、视觉伺服、连续作业规划等而进展缓慢。近年来采摘机器人正在迎来全领域的技术重要突破和迈出产业化探索步伐。采摘机器人正迎来从前沿装备向生产型农业装备的重要转变,其中机器人的效率/成本比成为其替代农业劳动力、获得全面产业化和生产应用的瓶颈,加快采摘作业效率的大幅升级成为其技术发展的关键^[2]。

本文面向采摘机器人的产业化趋势与高效化发展需求,对采摘机器人作业效率现状、提效技术模式、多臂化途径与发展态势进行阐述,对采摘机器人产业化发展趋势、目标与技术走向进行展望。

1 采摘机器人产品化进程

1.1 全球进程

欧美农业以大农场和全面机械化为核心特征,生产规模大、栽培的标准化程度高,农业机器人产品的开发也以大型化、标准化、专用化、定制化为突出特点,主体已全面从科研为主转向以科技风投为支撑的初创企业为主,并形成了大型农业生产经营主体和企业的直接研发对接模式。如 Agrobot 直接面向加州草莓的露地大规模种植,研发配置多达 24 条臂的大型草莓采摘机器人^[3](图 1),FF Robotics 公司的苹果采摘机器人配置多达 12 条臂,均已开发出产品级系统并开展田间验证^[4](图 2)。



图 1 Agrobot 的 24 臂大型草莓采摘机器人
Fig. 1 Agrobot's 24-arm large strawberry harvesting robot



图 2 FF Robotics 的 12 臂大型苹果采摘机器人
Fig. 2 FF Robotics' 12-arm large apple harvesting robot

但是,欧美该类采摘机器人尺寸庞大,难以进入占我国绝大多数的较小规模果园、温室并良好运行,

其高昂的造价和运行成本亦难以被偏小的经营主体、农业服务主体所接受。大型化农业机器人产品目前仅在我国少数大型化农业企业和大规模化果园、温室有推广的空间。另外,欧美各类采摘机器人以草莓、苹果等高度标准化、简化的栽培模式为前提,如 FF Robotics 公司的 12 臂苹果采摘机器人面向苹果树行的墙式平面结构和果实理想化分布,Agrobot 公司的 24 臂草莓采摘机器人面向草莓的大规模露地、高架标准化栽培,末端姿态与算法单一,对于实际冠层的复杂挂果位姿差异适应性有限,导致其在经历 10 年大规模融资、研发和推广后的产业化受阻,亦难适用于我国分散化种植和生产环境、规格差异大的生产实际。

1.2 我国进程

1.2.1 生产需求的快速刚性化

目前我国果、蔬、茶、花、菌等的收获仍然严重依赖人工。根据国家统计数据^[5-6],全国苹果种植的用工量目前仍达到 450 人·日/hm² 以上,为粮食种植用工量的 7.62 倍,人工成本占总生产成本的比重超过 65% (图 3)。程亚男^[7]对河北省露地桃与设施桃种植的成本收益调研发现,2022 年露地桃与设施桃的每亩种植人工成本分别达到 4 700 元和 6 420 元,分别比 2018 年上升 11.90% 和 41.41%,分别占总生产成本的 73.03% 和 47.49%。近年来,果、蔬、茶、花等生产的地面耕整、施肥、施药、除草、授粉等环节快速实现机械化,而采收等环节仍完全依赖人工,成为最大的用工、人工成本环节,也成为我国农业全面全程机械化的最大短板和最后堡垒。随着农业人口老龄化、雇工占比与费用的不断走高,采摘机器人的需求日益迫切,已从前沿技术、未来装备快速成为当前果蔬茶产业的刚需。

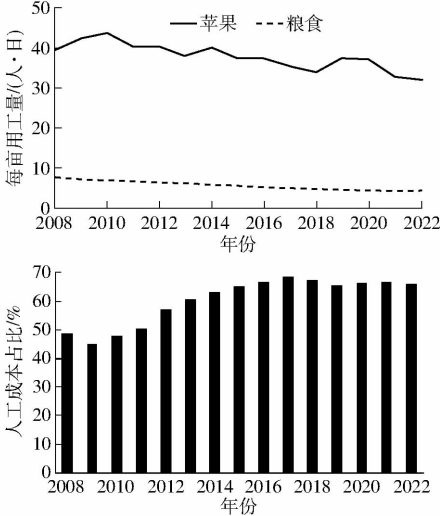


图 3 苹果种植人工投入与成本占比
Fig. 3 Proportion of labor input and cost in apple cultivation

1.2.2 企业与产品情况

我国开展采摘机器人装备研发已超过 20 年,相当长时期内主要以高校、科研院所的技术探索和实验样机开发为主^[8-11]。但是 2020 年以来,随着产业市场的打开、技术的进步,以及我国机械臂、视觉系统、导航系统等上游产业的迅猛发展,大批企业纷纷进入采摘机器人产业,新兴公司不断涌现,苏州博田、上海达闼、深圳朝闻道、杭州乔戈里、史河科技、中科原动力等企业纷纷推出各类采摘机器人产品或产品级样机(表 1),涉及番茄、葡萄、猕猴桃、苹果、荔枝、菊花等各类作物,开启了我国采摘机器人的产业化时代。

1.2.3 市场情况

根据共研网公布的数据,2022 年中国自动采摘机器人产量同比增长 32.8%,年产量从 2018 年的 25 台增长到 89 台。同时,自动采摘机器人的单价也从 65 万余元/台下降为 55.9 万元/台,我国采摘机器人产业呈现从无到有、快速增长的良好势头^[26]。

但是与美国、以色列、西班牙等发达国家相比,我国采摘机器人的产业化进程落后 5~10 年,目前从企业规模、融资金量、产品成熟度等方面已明显滞后。与发达国家直接面向农业生产应用、甚至由农业生产主体直接委托开发相比,我国目前的采摘机器人产业主要面向科研、教学、培训领域,少量用于农业展示与示范,如苏州博田自动化技术有限公司建设了上海张江镇农业机器人示范基地建设项目^[27]。

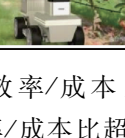
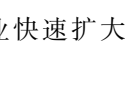
1.3 产业化进程中效率问题分析

1.3.1 效率/成本比较优势

在任何产业的“机器换人”进程中,作业效率与成本投入的比较优势是机器得到推广应用的核心。我国制造业的机器人密度从 2012 年的 23 台/万人快速提升到 2022 年的 392 台/万人,已超越美国和欧盟进入全球前列,中国工业机器人装机量占全球比例超过 50%^[28];在农业领域,根据中国农业机械流通协会发布的报告,从 2018 年到 2023 年,短短的 5 年间全国农机自动驾驶系统销量从仅 0.3 万套骤增至 12.6 万套(图 4a),无人植保机社会保有量则从 2.33 万架跃升至 18.98 万架^[29](图 4b)。工业机器人、农机自动驾驶系统和无人植保机的快速产业化与推广应用背后,首先是劳动力成本的剧增,2018 年到 2023 年全国工人工资平均增长 37.8%,农业用工的费用更急剧增加,无人种田现象日益严重;而工业机器人、农机自动驾驶系统和无人植保机在技术快速成熟、作业效率大大提高的同时,售价明

表 1 我国目前主要采摘机器人产品

Tab. 1 Chinese main harvesting robot productions

企业名称	产品类别	产品实物图	文献序号
苏州博田自动化技术有限公司	串番茄采摘机器人		[12]
深圳朝闻道智能信息科技有限公司	葡萄采摘机器人		[13]
杭州乔戈里科技有限公司	猕猴桃采摘机器人		[14]
史河机器人科技有限公司	苹果采摘机器人		[15]
青岛悟牛智能科技有限公司	苹果采摘机器人		[16]
广东若铂智能机器人有限公司	荔枝采摘机器人		[17]
南京熙岳智能科技有限公司	果实采摘机器人		[18]
上海点甜网络科技有限公司	果实采摘机器人		[19]
北京中科原动力科技有限公司	串番茄粒采摘机器人		[20]
深圳市越疆科技股份有限公司	葡萄采摘机器人		[21]
上海达闼机器人股份有限公司	番茄采摘机器人		[22]
上海一坤电气工程有限公司	果实采摘机器人		[23]
苏州书农科技有限公司	万寿菊采摘机器人		[24]
北京伟景智能科技有限公司	番茄采摘机器人		[25]

显下降。根据人工与机器效率/成本比变化曲线(图 5),上述机器系统的效率/成本比超过人工并快速拉大领先优势,成为其产业快速扩大和大规模应用的首要条件。

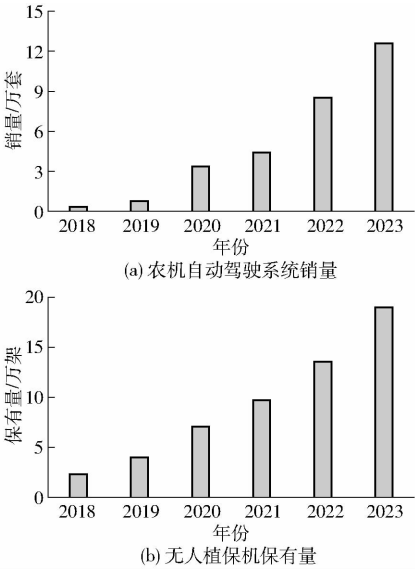


图 4 智能农机系统的快速产业化与推广数据
Fig. 4 Rapid industrialization and promotion of intelligent agricultural machinery systems

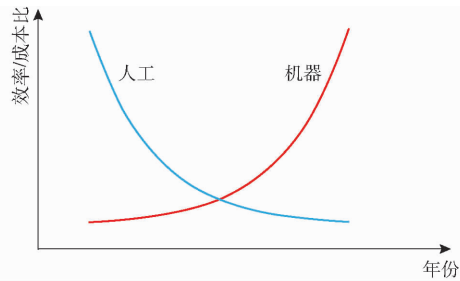


图 5 人工与机器效率/成本比变化曲线
Fig. 5 Curves of efficiency/cost ratio of labor vs. machine

采摘机器人产业化与推广应用也必然遵循上述客观规律。采摘机器人是集底盘、机械手臂和视觉、导航、传感、控制等于一体的高度复杂装备,随着主要核心部件的国产化和产能快速发展,成本正在呈指数级下降,使采摘机器人的硬件成本门槛已不再成为产业发展的限制条件。同时随着量产的展开,产品开发成本也将与目前市场的单台定制模式呈现本质的差异。在此前提下,效率成为采摘机器人产业化的核心。

1.3.2 我国采摘机器人效率水平

与发达国家以作业效率为核心、以多臂系统为主流产品相比,我国采摘机器人产品仍集中于单臂复合机器人,部分机器人产品仍处于室内仿真环境测试状态。2020 年以来,除我国第一家产品化和开展田间示范的苏州博田自动化技术有限公司以外,朝闻道、乔戈里、书农、伟景等公司的番茄、葡萄、猕猴桃、万寿菊等采摘机器人产品已快速进入田间实际试验或示范应用。但是,目前各类采摘机器人产品作业效率普遍在 150 ~ 200 果/h,明显低于人工采收作业速度,尚无法实现对劳力的替

代,与实际果蔬茶花生产的收获作业需要相比尚有比较大的距离。

在科研领域,即使在实验室、田间较理想化处理条件下,不同作物的单次平均采摘时间曾长期徘徊于 10 s/次的水平(表 2),能够实现田间实际条件下连续自主采摘的较少。2020 年以后采摘机器人技术进入快速发展阶段,双臂、四臂方案开始成为主角,作业效率实现 500 次/h 的重要突破^[39-41],蘑菇、茶叶采摘作业效率已突破 1 000 次/h^[42-43],正在向替代多个劳力的重要目标靠近(表 3)。

表 2 我国采摘机器人实验室试验性能
Tab. 2 Performance of harvesting robots in laboratory tests

年份	对象	臂数	平均单次作 业周期/s	折算效率/ (次·h ⁻¹)	成功率/ %	文献 序号
2012	草莓	1	10.99	328		[30]
2018	柑橘	1	17.98	200		[31-32]
2021	苹果	2	14.60	247	72	[33]
2021	柑橘	1	15.00	240	90	[34]
2022	猕猴桃	2	8.25	436	90	[35]
2022	猕猴桃	2	5.86	614	82.1	[36]
2022	茶叶	1	9.57	376	85	[37]
2022	苹果	1	12.53	287	82.93	[38]

表 3 我国采摘机器人田间试验性能
Tab. 3 Performance of harvesting robots in field trials

年份	对象	臂数	平均单次作 业周期/s	折算效率/ (次·h ⁻¹)	成功率/ %	文献序号
2012	草莓	1	18.54	194	88	[44]
2016	番茄	2	29.00	124	87.50	[45-46]
2018	樱桃番茄	1	8.00	450	83	[47]
2021	番茄	2	11.00	327	73.04	[48]
2022	猕猴桃	1	6.50	554	88.70	[49]
2022	樱桃番茄	1	16.63	216	87.67	[50]
2022	草腐菌	3	3.04	1 183	97	[51]
2022	葡萄	2	8.76	411	86.7	[52]
2023	苹果	4	5.80	621	79.31	[53]
2023	橙	1	10.90	330	87.20	[54]
2023	茶叶	1	2.23	1 612	53.91	[42]
2024	无花果	1	15.19	237	76.90	[31]
2024	猕猴桃	4	1.82	1 978	90.5	[55]

2 多臂采摘机器人技术现状

2.1 机器人采摘提效技术模式

2.1.1 机器人采摘耗时构成

优化作业效率是农业机器人走向应用的关键^[56]。采摘机器人作业是底盘、机械臂、末端执行器、视觉系统、导航系统等复杂协同的过程,单臂、单目标的机器人采摘是典型的 Pick-and-Place 任务,其采摘作业周期由目标识别、目标定位、机械臂靠近目

标、末端执行器摘取、机械臂返回放果过程及其中的识别定位-运动规划-运动控制算法执行和部件间通讯时间构成。机器人沿作物行的实际采摘作业耗时通常是由底盘间歇行走时间和多果实目标连续多采摘作业周期所构成,往往对其作业范围完成多果实目标的同步识别定位和采摘次序规划,再执行多周期的机械臂-末端执行器运动规划和运动控制任务。根据需要,其耗时可能还包括成熟度判别和摘取失败的再次尝试所需时间^[57]。

2.1.2 缩短机器人采摘周期途径

采摘机器人作业效率的提升,首先来自于有效压缩各环节耗时:

(1)目标识别定位的图像获取与视觉算法运行曾长期成为耗时的重要环节,但是随着相机、控制系统性能的快速提升和轻量化深度学习类算法的应用,目标识别定位在采摘作业周期中的占比已大大降低^[58]。

(2)机械臂采摘-回收的长路径往返是最大的耗时环节,目前除了与枝干等碰撞的快速感知-规划-动作尚待解决外^[59],通过软管^[60](图 6a)、负压^[42,61](图 6b)直接回收或设置传送带(图 6c)就近回收^[41]而将机械臂的连续往返路径变为多采摘目标的连续访问路径,已成为提高采摘效率的主流方式。



图 6 机器人采摘的原位回收方式

(3)末端是对果实、蘑菇等目标直接实施摘取动作的部件,传统先夹持目标再摘取的方式,为减少柔嫩目标的损伤而不得不放慢速度以避免过大的夹

持力或冲击^[62-64]。近年来,鳍条效应^[65-67]、气动^[68-73]、吸盘^[74-75]等软体手越来越多应用于采摘机器人的目标夹持当中,果(花、叶)梗的夹-剪一体式末端得到越来越多的应用^[52,76],此外不夹持目标而一次实现摘取、回收的吞咽式末端正得到持续优化和应用^[56,77],从而使末端的摘取动作耗时得到有效控制,所占比例显著降低。

(4)从机器人在田间实际采摘作业的角度,其效率实际上不仅取决于单位时间采下的目标数量,很大程度上还取决于采下果实的田间运输。对同时承担采摘、运输任务的机器人而言,由于运输的时间占用,其采摘作业效率被降低。

2.1.3 机器人采摘提效的多机与多臂化途径

对单臂采摘机器人而言,通过各环节的优化压缩采摘作业周期存在极限。为此,近年来国内外研究人员均致力于通过增加任务执行主体的数量来获得作业效率的大幅提升,主要方式包括主从机器人协作和多臂化:

(1)主从机器人协作是将传统一台采摘机器人的看、采、运等环节拆分为由不同机器人执行,构成看-采协作^[78]、采-运协作^[79-80](图 7)等不同方案。理论上,看-采协作通过机器人巡检先完成田间 3 维空间内被采摘目标的建图,能够有效解决目前采摘机器人视觉系统由于相机视野、浓密冠层内重叠遮挡所造成的目标找不全、定不准问题,并将视觉运算任务从采摘机器人本体上转移,从而实现高实时性连续作业。但是,受到田间地面不平、光照、遮挡等复杂因素影响和行走定位控制精度的限制,看-采协作在较长时期内缺乏实际应用的可能。采-运协作则成为满足生产需求的重要发展趋势,一采一运、多采一运将在不同规模、不同作物的机器人收获中得到应用。



图 7 机器人的采-运协作

Fig. 7 Robotic harvest - transport collaboration

(2)多臂采摘机器人则是通过在同一底盘上增加机械臂(末端)的数量,构建单机上的多臂协作或并行体系,从而提升机器人采摘作业效率。与主从机器人协作相比,多臂采摘机器人着重一机实现高速的目标感知、摘取与回收任务,正在成为当今采摘机器人技术攻关和产业发展的主流,并与采-运的机器人协作相融合,成为机器人高效收获作业问题的

解决方案。

2.2 多臂采摘机器人结构方案

面向采摘机器人的效率核心要求和单臂的效率极限,多臂化已成为国内外采摘机器人发展的必然趋势。多臂机器人分为多臂并行与多臂协同两类模式。

2.2.1 多臂协同采摘机器人

多臂协同技术在采摘机器人领域得到了一定探索和发展,其特征是不同臂间具有一定任务分工,其分工包括不同环节间的分工和同一环节内不同臂的分工,机器人采摘的实现依赖于臂与臂的功能或动作协同:

(1) 依赖于同一套视觉系统对目标的识别定位,由双臂(末端)协作完成特定任务是典型的人类行为模式。希腊塞萨洛尼基亚里士多德大学 STAVRIDIS 等^[81]基于人对葡萄的双手配合采摘行为,开发了抓-切组合实现采摘的机器人系统,但尚未进行试验验证;刘成良团队于 2016 年研发了两臂(末端)吸持-剪切协同的番茄采摘机器人,田间采摘成功率和作业周期分别为 87.5% 和 29 s^[45-46],法国蒙比利艾大学 GURSOY 等^[82]也提出了类似方案;美国俄勒冈州立大学 DAVIDSON 等^[83]采用两臂(末端)采-接配合的方式(图 8a),使被采果实在最近位置完成回收,避免放果的长路程往返,从而有效提高效率,并比布置回收传送带的方案更为灵活,室内协同动作试验的单果采摘周期为 9.33 s,比单臂采摘后往返放果的 20.06 s 显著缩短。

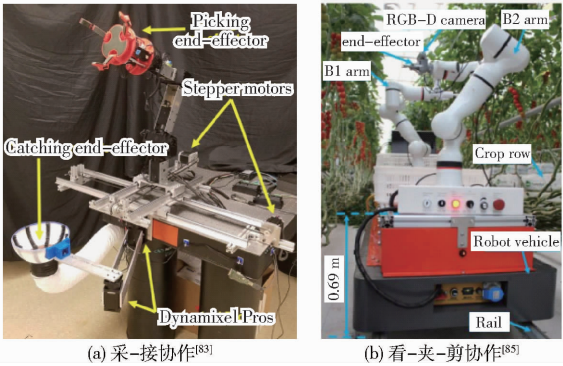


图 8 多臂协作采摘机器人

Fig. 8 Multi-arm collaborative harvesting robot

(2) 在机器人采摘中, Eye-to-hand 定点相机往往面临复杂浓密冠层内目标被遮挡问题,而在手(Eye-in-hand) 相机则存在缺乏全局信息的不足。为此设置携带相机的搜索臂协助作业臂实现采摘成为另一种多臂协同方式。美国佐治亚理工学院 AHLIN 等^[84]提出了采用此模式的双臂苹果采摘机器人方案;德国自动智能系统实验室 LENZ 等^[85]开发的三臂甜椒采摘机器人则由一臂复杂调整相机位

姿避开枝叶遮挡获得目标,另外两臂夹持、剪切协同完成采摘(图 8b),室内仿真试验采摘成功率和作业周期分别为 83.33% 和 26.95 s。

2.2.2 多臂并行采摘机器人

多臂并行采摘机器人则通过搭载多条臂(末端)同时独立执行采摘作业,以达到效率倍增的目的。在发达国家,日本东京大学 CHEN 等^[86]、日本国立农业与食品研究组织 YOSHIDA 等^[87]、西班牙自动化与机器人中心 SEPULVEDA 等^[88]、挪威生命科学大学 XIONG 等^[89]分别面向番茄、梨、苹果、茄子、草莓等对象开发了双臂并行采摘机器人,部分系统已完成田间试验,平均采摘作业周期和效率分别为 4.6 ~ 26.2 s 和 137 ~ 783 次/h。事实上,更多臂的配置已成为国际采摘机器人研发和产业化的潮流,新西兰奥克兰大学 WILLIAMS 等开发的 4 臂猕猴桃采摘机器人(图 9a),通过技术迭代采收效率从 655 次/h^[90]提升到 1 295 次/h^[91]。在企业端,除前述 Agrobot 大型草莓采摘机器人^[3]、FF Robotics 大型苹果采摘机器人^[4]外,Advanced. farm 双臂苹果采摘机器人^[92]、Fieldwork 4 臂覆盆子采摘机器人^[93]、Ripe Robotics 6 臂苹果采摘机器人(图 9b)等均在开展田间性能测试,其 Ripe Robotics 6 臂苹果采摘机器人作业效率可达 1 800 次/h^[94]。

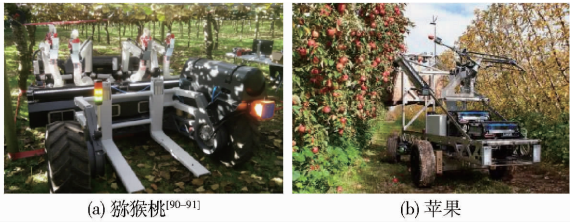


图 9 国外的多臂并行采摘机器人

Fig. 9 Multi-arm simultaneous harvesting robots from abroad

我国采摘机器人技术快速进入多臂化发展时代,但目前主要集中于高校、科研院所。在双臂并行领域,南京农业大学章永年团队^[95]、西北农林科技大学张建锋团队^[96]等开展了双臂规划与视觉伺服的预研,西北农林科技大学崔永杰^[40-41]、杨福增团队^[97]、余孝军团队^[38]等分别研发了双臂猕猴桃(图 10a)、双臂苹果采摘机器人(图 10b、10c),上海交通大学刘成良团队研发了双臂番茄机器人^[48](图 10d),南京农业大学卢伟等研发了双臂蘑菇采摘机器人^[98](图 10e),据文献与公开报道,崔永杰、余孝军、卢伟等完成了实验室内猕猴桃、苹果、褐菇双臂并行采摘验证,刘成良、杨福增等已实现番茄、苹果田间现场双臂并行采摘。笔者团队先后研发了三代双臂葡萄采摘机器人^[46](图 10f),并完成了多水平棚架葡萄园、多品种葡萄的采摘试验。与单臂

作业相比,双臂同步作业的采摘效率获得显著提升,崔永杰团队和笔者团队对猕猴桃、葡萄的双臂采摘作业效率已分别达 614 次/h^[35] 和 942 次/h^[99]。



图 10 我国的双臂并行采摘机器人

Fig. 10 Dual-arm simultaneous harvesting robots in China

为进一步提升作业效率,3 臂、4 臂采摘机器人进一步得到快速发展。上海第二工业大学杨淑珍等^[100]开发的 3 臂蘑菇采摘机器人,作业效率已达 1 183 次/h。北京农业智能装备技术研究中心冯青春团队在国内最早研发了 4 臂苹果采摘机器人(图 11a),对高纺锤苹果园的现场采摘作业效率已超过 620 次/h^[53]。笔者团队研发了我国第一台 4 臂猕猴桃采摘机器人(图 11b),并完成了多水平棚架猕猴桃园、多品种猕猴桃的采摘试验,平均作业效率和挂果密集条件下作业效率超过 1 900、2 300 次/h^[55]。阿里巴巴达摩院 XR 实验室报道了 6 臂苹果采摘机器人研发与试验情况,描述了机器人高效采摘前景。

2.2.3 多臂模式发展态势

在采摘机器人领域,多臂的协同、并行两类模式均获得了发展。两类模式各有特点:

(1)从作业性能角度,模仿人类采摘的双手协作行为(图 12),通过不同臂(末端)的托扶-摘取动

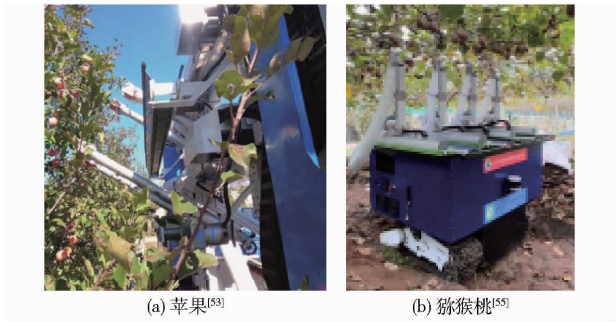


图 11 我国的 4 臂并行采摘机器人

Fig. 11 Four-arm simultaneous harvesting robots in China

作协作,可以提高机器人采摘的稳定性和安全性,尤其适合于葡萄、香蕉等大型串果的采摘;通过臂(末端)间的摘取与回收等动作协作,解决采下对象的长路径运放问题和避免输送带布置可能发生干涉的局限,能够有效提升作业效率;目标搜索臂使其所携带相机的图像获取更具灵活性,可能综合全局、局部视觉的优势,为解决采摘机器人远景全局视觉“看不清、定不准”和在手(Eye-in-hand)近景视觉“视野小、易迷失”的问题提供新的解决思路。



图 12 葡萄采摘的人类双手协作

Fig. 12 Human-hand collaboration in grape harvesting

与多臂协作模式相比,多臂并行模式由于各自独立完成采摘任务,理论上臂的配置数目可不断增加,作业效率的提升具有充分潜力,从提升效率角度更具发展优势。

(2)从技术实现角度,多臂协同模式在每个作业周期内对不同臂间的位姿、速度协同均提出了要求,其协同的实现机械臂的臂型、臂臂布置关系、自由度、运动规划有较高要求;多臂并行模式由于各臂独立执行采摘任务,其臂型具有更多灵活配置的可能,对臂间的协同控制要求远低于多臂协同模式。由此,也更适合于面向采摘作业效率核心目标进行臂型、布置和高速化运行的集成设计与控制处理。

(3)从田间适应性角度,多臂动作协同要求在每个采摘周期内不同末端需到达特定的协同位姿,在作物浓密冠层条件下往往受到限制。机械臂与末端的小型化、圆润化已成为当今采摘机器人设计的公认目标,对采摘机器人的性能提升起到了巨大的

支撑作用,而对同样采摘任务多臂动作协同的运行空间需求要大得多,田间适应性成为其主要劣势,也成为效率无法释放的瓶颈。

综合以上因素,在多臂协同、并行两类模式中,多臂协同采摘模式将在特定作物对象、栽培模式和环境条件下得到发展,但从采摘机器人向全面生产应用落地的高效作业核心发展目标来看,多臂并行已成为采摘机器人高速增效的发展方向与行业快速落地的必然要求。

2.3 多臂化的效率提升核心技术

2.3.1 多臂采摘机器人技术复杂性

多臂配置适宜于目标较为密集、量大的采摘场景,多臂机器人为实现高效连续采摘作业,通过在机器人行进方向、目标分布横向或高度方向等布置多条臂(末端)同步执行采摘任务。与单臂机器人相比,其技术流程(图 13)具有以下特点:

(1)为保证视场范围与多臂作业范围的同步扩大,往往相机数量增加,多相机姿态关系和在手(Eye-in-hand)、手外(Eye-to-hand)关系更趋复杂化,带来多图像的同步采集、目标匹配、坐标对齐等技术需要;随着同步识别与定位目标量的成倍增加,算力消耗也显著增加。

(2)多臂面对众多采摘目标使任务分配成为其核心问题,与单臂采摘的采序决策相比,多臂间的任务分配往往与不同臂的采序决策交织于一体构成复杂的任务规划问题,三维空间内高度随机的目标分布使任务规划极具挑战,并随着目标和臂(末端)数量的增加而呈指数级增长,构成强 NP 难题(多项式复杂程度的非确定性问题)。

(3)与单臂的运动规划相比,多臂运动规划不仅考虑各臂自身的路径最短及与果、枝等的不干涉等目标,还必须纳入臂与臂在关节空间与操作空间的时空重合性、不同臂任务执行的快慢等因素,实现不同臂互相协同的运动规划。

(4)与单臂采摘机器人的行走控制仅需与单臂(末端)构建握手协议相比,多臂采摘机器人的行走控制需要建立与不同臂(末端)间的信息沟通。

面对高度随机性、不确定性的采摘任务和上述复杂的技术流程,机器人的臂数每增加 1 条,无论是其结构复杂性、感知复杂性还是控制复杂性均呈指数级增加。多臂采摘机器人的作业效率不会与臂数成正比增加,缺乏核心技术支撑将导致其面临大量的“走-看-采”冲突和臂-臂、臂-眼等干涉,效率更无从发挥。以色列 EDAN 等^[101]对输送线甜瓜采摘的仿真分析中发现,当臂数超过 3 后,臂间的碰撞等问题突出,作业效率提高的潜力

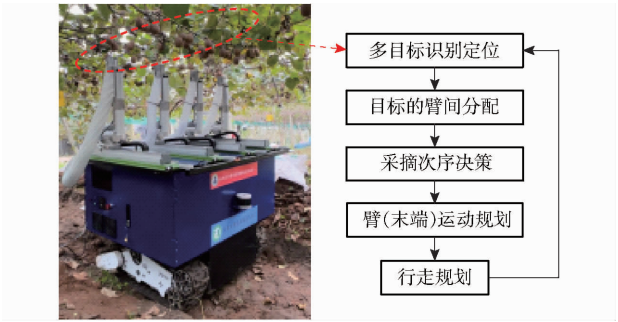


图 13 机器人多臂并行采摘技术环节

Fig. 13 Technical components of robotic multi-arm simultaneous harvesting

已不足 1%。WILLIAMS 等^[91]在田间试验中发现,4 臂的猕猴桃采摘效率仅比同型单臂提升 17.0%。面向多臂高效作业的臂型设计、视觉方案、任务规划、行走控制等成为当前及今后采摘机器人研究的重点。

2.3.2 多臂采摘机器人的臂型设计

国内外的采摘机器人研究一直有基于商用臂和机械臂自研两种研发路线,标准的商用 6、7 关节臂因其量大成熟、适应广泛和具有标准的运动学模型、控制器配套而得到广泛应用,杨福增^[79]、崔永杰等^[41]、刘成良等^[48]、STAVRIDIS 等^[81]、YOSHIDA 等^[103]、CURSOY 等^[82]、LENZ 等^[85]研究团队所开发的双臂、3 臂式苹果、猕猴桃、番茄、甜椒采摘机器人,以及笔者团队开发的双臂葡萄、4 臂苹果采摘机器人均采用了商用多关节臂方案。但是对于多臂采摘机器人,当不同臂存在共享作业空间时,商用多关节臂间很容易发生相互碰撞^[40,101]。为避免不同臂关节或末端间的碰撞,商用多关节臂的协同运动规划较为复杂^[31],在各臂特定任务区域内其过多的自由度往往存在冗余,在臂间防碰撞、采摘位姿双重约束下易造成规划的巨大困难,更成为机械臂提速的巨大限制。

在多臂采摘机器人研发中不同的臂型方案不断得到应用,面对床栽蘑菇、床栽甜瓜、水平棚架猕猴桃、高架栽培草莓、吊蔓番茄、纺锤树形苹果等水平、竖直 2D 化的目标分布,适合平面任务且规划、控制更为简单的直角坐标^[51,55,88,104-105]得到了较多应用。此外,针对特定采摘任务的多臂机器人开发,刘成良团队^[45-46]、卢伟团队^[98]分别构建了类 SCARA 臂型、WILLIAMS 等^[90]构建了平面四连杆式臂型。Ripe Robotics 公司为其多臂苹果采摘机器人先后设计了五连杆式和 RPPRP 5 自由度机械臂^[94](图 14),既保证了机械臂的快速性,又将相邻臂的碰撞可能限制在末端,极大降低了臂间防碰问题的复杂性。

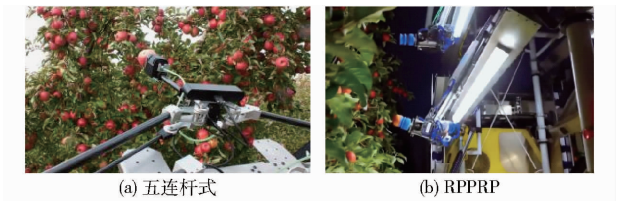


图 14 Ripe Robotics 公司多臂苹果采摘机器人的创新臂型
Fig. 14 Ripe Robotics' innovative arm for multi-arm apple harvesting robot

2.3.3 多臂采摘机器人的视觉技术

非结构化冠层环境下的果实目标准确识别定位一直是机器人采摘的实现基础和技术难点。在相当长时间内,果实识别研究停留在特定图像中的果实等目标检出,而不考虑机器人对图像获取的角度与手眼关系、复杂冠层背景下目标的淹没等问题,使图像处理算法难以支持采摘机器人的田间实际作业。

目前,果实识别定位研究正在加速向机器人采摘作业的现场运行需求转变,面向机器人多臂采摘的实际冠层大视场下多果同步识别、多位姿图像拼接与匹配、基于可采性的选择性识别等正成为研究的热点。

在多臂机器人系统中,根据多臂工作空间、视场范围及臂-相机遮挡情况,可构建为 (One eye)-to-(multi-hand)^[52,57,106]、(Multi-eye)-to-(multi-hand)^[101]、Multi (eye-to-hand)^[55,89]、Multi (eye-in-hand)^[41,107] 等多种手眼模式。对 (One eye)-to-(multi-hand) 模式,手外单视点图像的视野和点云有限,面对特定环境和对象能达到较理想的效果^[52],但很多情况下其对被遮挡目标容易漏检,因而多视点图像的融合很有必要^[88]。

目前在深度学习框架下,多模态图像的融合则有图像数据融合-卷积、图像卷积-特征融合两类模式。崔永杰团队^[108]比较了 RGB 和近红外图像分别输入深度学习网络同时进行卷积、将 RGB 和近红外图像卷积后的目标识别结果进行匹配融合的性能,发现图像数据融合-卷积更快且对重叠、遮挡果实的检出率更高。多数量图像的融合则有图像拼接-卷积、图像卷积-匹配两类模式。冯青春团队^[105]基于 YOLO v8 模型构造了多任务果实识别模型, YOSHIDA 等^[103]应用了单点多盒检测器(SSD)来完成每相机图像的果实识别进而获得各果实坐标,并均采用设置空间距离阈值来对不同相机中的重复果实目标进行归一。但空间距离阈值设置过大和过小可能带来漏检和假阳性等问题^[105]。多视点图像先拼接、再卷积是另一类可行方式,并在巡检等领域获得广泛应用^[109]。

2.3.4 多臂采摘机器人的任务与运动规划

任务分配是提升多臂采摘作业效率的关键^[55,102]。按空间区域进行分配是最直接的方式,冯青春团队^[32,53]将作业空间按照单臂独立、双臂公共、4 臂公共划分为 9 个作业区,笔者团队^[55]与 WILLIAMS 等^[90]的 4 臂猕猴桃采摘均采用了横向 4 等分区的方案。按区域划分在面对更平面型任务和臂型时能达到较好的成功率和效率^[110],但理论上对每条臂均匀分配任务负担是提升作业效率的更好方案^[102,111],这在农业非结构环境内往往难以实现。BARNETT 等^[104]以未遮挡果实为优先、并将同一聚类的果实目标分配给同一机械臂(图 15a),但其是否适用与各臂的工作空间有关,并影响了各臂的任务负担均匀性^[108],为此杨淑珍团队^[51]提出基于任务负担均匀性原则将聚类中的目标分配给不同臂(图 15b)。

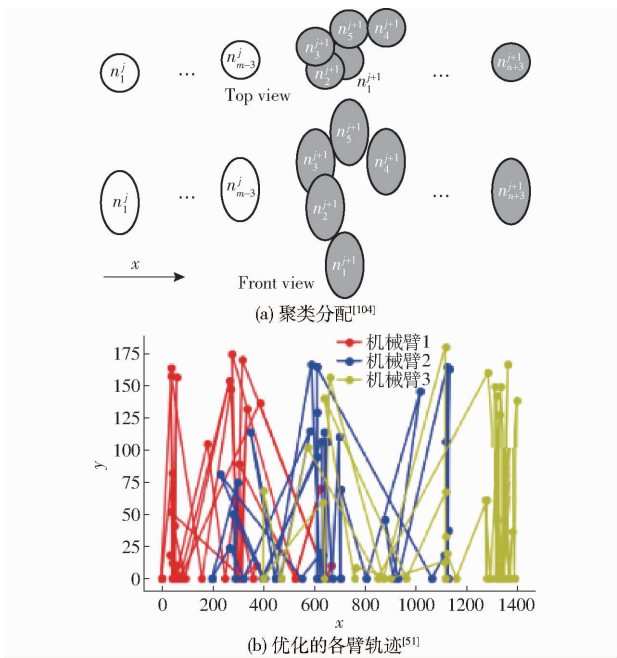


图 15 多臂的任务分配与采摘顺序规划
Fig. 15 Task assignment and pick sequence planning for multi-arm

次序决策一直是采摘机器人规划的核心问题,国内外基于 TSP(旅行商问题)并结合其求解提出了多种方法。显然,多臂的同步采摘构成了多 TSP 问题,同时必然与臂间的任务划分问题融为一体而使复杂度成倍增加。以色列 ZION 等^[112]较早开展了面向地面种植甜瓜的 4 臂采摘次序的理论分析,作为二维平面问题提出了一种基于启发式和局部搜索的近似算法最优分配算法;并进一步将其视为最大化 K-图着色问题,设计了一种贪心算法实现各臂任务等量分配的采序决策^[55]。杨淑珍团队^[100]将聚类目标的特定采序与多臂间的分配结合,构建了多旅

行商问题的遗传算法。

在多臂的实际采摘作业中,臂与臂的碰撞一直是多臂采摘机器人的突出问题^[100],防止臂间碰撞是难题和关键^[45,87],为避免臂与臂的碰撞,建模式碰撞检测方法获得了发展,崔永杰团队^[113]、张亮^[96]、YOSHIDA 等^[103]分别构建应用了包围盒碰撞检测方法,每果采摘的双臂避碰检测耗时达到 $(3.95 \pm 0.83) \text{ s}$ ^[113]。目前避免臂间碰撞发生的通用方式,一种是各臂均从同侧方向开始作业^[102],从而保持作业过程中各臂的目标距离和末端安全距离;另一种是划分主、从臂,当检测到碰撞风险时令从臂重新规划^[95]或等待^[25,31,101,110]。目前避碰仍然是多臂同步采摘的技术短板,耗时的碰撞检测和为了避碰而不得不躲让、等待,使多臂作业的效率大打折扣;同时,当臂数从 2 进一步增加时,无论碰撞检测还是躲让、等待处理的耗时和复杂度也将指数级放大。

在采摘机器人控制中,多臂任务分配、采序规划、运动规划相互关联,共同构成了多臂采摘机器人的最复杂技术,是实现其高速无碰撞采摘作业的根本保障。现有研究尽管已取得一定进展,但任务分配、采序规划、运动规划的融合研究远远不足,并存在三者规划目标的冲突,亟待深化面向机器人实际性能的研究。

3 面向产业化的多臂高速采摘机器人技术走向

3.1 产业化发展趋势与目标

采摘机器人技术在经历了数十年的艰苦探索后,正迎来全面爆发的历史时刻。机械臂、激光雷达、伺服电机、锂电池等核心部件全面国产化和价格大幅下降,根据核心部件成本走势的乐观估计,未来 3 年多臂高速采摘机器人小批量制造的硬件成本将下降到 10 万元左右(图 16),使成本不再成为采摘机器人走向产业化的关键障碍,效率已成为采摘机器人走向全面产业化的核心。

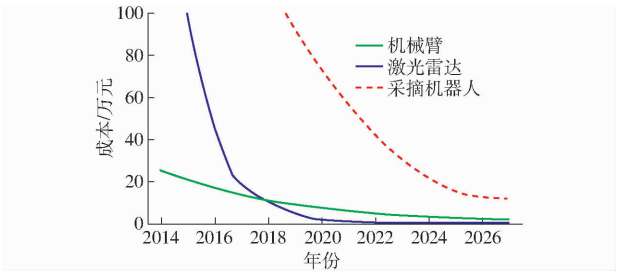


图 16 多臂采摘机器人的核心部件与整机成本走势

Fig. 16 Cost trends of core components and overall machine of multi-arm harvesting robots

据此,笔者提出了采摘机器人产业发展的“双 10”标准^[114],即 10 万元级、可替代 10 个人工。与现阶段的采摘机器人效率水平和其高度复杂的技术构成、应用环境条件相比,这一目标的挑战性较大。但是,“双 10”标准是在我国现阶段采摘机器人作为一类农机装备获得大范围推广的客观要求。以需求为导向,其应成为现阶段采摘机器人领域技术攻关和产业发展的目标。

按照“替代 10 个人工”的目标,面向不同作物,葡萄、荔枝等较大串果的机器人采摘效率约应达到 1 000 串/h,苹果、桃、梨、柑橘等中型果的机器人采摘效率约应达到 2 500 果/h,水平棚架条件下猕猴桃等的机器人采摘效率则应达到 5 000 果/h 以上,名优茶机器人采摘效率则应达到 30 000 芽/h 以上。按照“双 10”标准,采摘机器人的效率/成本比将达到市场现有产品的 30 倍以上,完全具备了全面产业化和商业化的条件。

根据目前的技术发展趋势,在较宜机的栽培模式下,葡萄的机器人采摘能够尽快达到该效率目标,苹果、桃、梨、柑橘、猕猴桃等国内外报道最高水平仅为该效率目标的 40% 左右。而名优茶由于芽叶轻小,效率挑战巨大。据媒体报道浙江理工大学的第六代采茶机器人已完成田间测试^[115],其从 2 条机械臂增加到 4 条机械臂,每台机器能代替 1.5 个人工,每天可采摘干茶 0.75 kg,代表了采茶机器人发展的最高水平。但是,按照近年来我国采摘机器人技术和性能提升不断加速的态势来看,有理由乐观估计未来 3~4 年 4 臂采摘机器人将成为科技攻关的主流,主要作物的机器人采摘效率水平将迎来重大突破。

在市场、成本、效率性能、政策环境等的全面利好下,采摘机器人产业将加速形成,未来 3~4 年相关业务企业数将倍增,部分领军企业将进入小批量生产和面向农业生产的销售应用阶段。在 2021 年、2024 年分别成为复合机器人和人形机器人元年以后,采摘机器人产业化元年即将到来。

3.2 采摘机器人产业化技术走向

3.2.1 从手眼高精度走向综合强容差

工业机器人面向结构化产线环境和标准化对象,以严苛的加工、装配为作业目标,依赖于极高的机器人手-眼定位精度。而采摘机器人多面向高度非结构化环境和尺寸、形状、颜色、软硬、位姿、遮挡等个体差异巨大的果实等目标,对严格目标特征、避障路径规划、过高定位精度的依赖不仅导致其对田间现场的适应性过差、成功率无法保证,更导致其更依赖于低速、谨慎的感知-运动控制完成采摘过程,

作业效率受到极大限制。

采摘机器人的高速化必然以足够高的成功率为保证。从手眼高精度走向综合强容差,是采摘机器人实现高效高成功率的客观要求。容差体现在机器人感知与控制过程能够容许承受可较大范围的目标与障碍个体差异和位-姿-力等测量偏差,机器人臂-末端的定位控制偏差等,从而达到在复杂农业环境下高可靠采摘效率释放。

采摘机器人强容差体现在:

(1)传统采摘机器人方案对果实、果梗的夹持依赖于精准的手-眼定位精度,如正在葡萄、草莓、芦笋、串番茄等采摘中获得广泛应用的夹剪一体式方案,其成功率依赖于对纤细果梗的视觉定位与机械臂-末端定位,围绕果梗识别与采摘点精确定位开展了诸多研究^[116-121]。面对番茄、甜椒等果梗的姿态不一问题,更进一步加强了果梗位姿精确估计^[122-124]和机械臂-末端精确位姿控制研究^[125-126](图 17)。

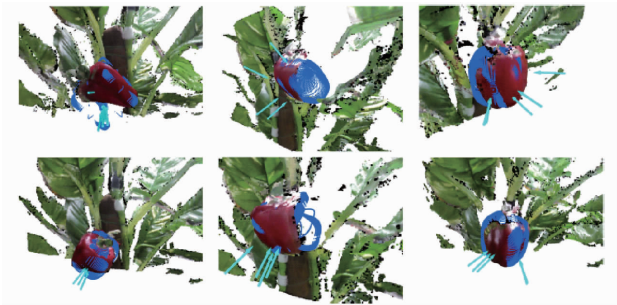


图 17 不同的抓取姿态
Fig. 17 Different gripping postures

但是纤细且多被遮挡果梗的精确视觉定位困难,其 3 维姿态估计和相应的机械臂精准对姿算法偏于环节多而复杂,并在枝叶遮挡下往往定位可靠性、可采性严重下降,效率无从保证。笔者团队近年来尝试发展了 RGB-D 融合的果梗推测式粗定位方法^[127-128],并结合大容差式夹剪一体^[52]、圆盘刀式切割^[123](图 18)实现葡萄的高效高成功率采摘;发展了 RGB-D 融合的果实形心粗定位和吞咽切割一体末端结合方案^[55],实现对水平棚架密集猕猴桃果实的瓜果高度、尺寸、形状、软硬的强容差高效采摘。对于挂果分布更为复杂的苹果、桃等采摘,需要进一步升级具有较强容差能力的新方案。

(2)传统避障路径规划依赖对环境的预建图或视觉的实时感知,以严格防碰为目标做出可通行路径与机械臂运动的规划。浓密树层内的大量果实随机分布,使末端到达果实的路径中存在大量枝叶障碍,摘取目标果实而不与相邻枝叶发生碰撞是一个重大的挑战。尽管国内外已开展了诸多研究,避障

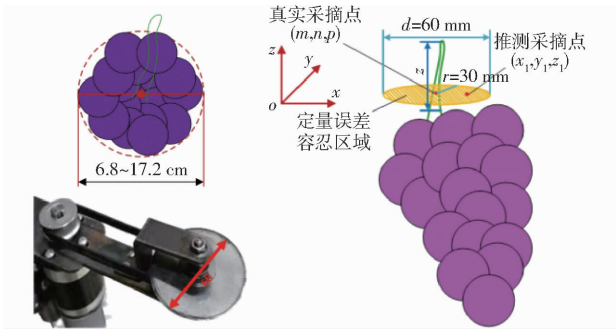


图 18 视觉推测粗定位与圆盘刀式容差采摘^[127]
Fig. 18 Visual inferred coarse positioning and disc-knife type tolerance picking

规划已从 2 维向 3 维发展^[129],但无论基于障碍物结构化或预建图的路径搜寻^[130],还是冠层内局部环境感知的视觉伺服^[131],其适应性和实时性均与实际冠层复杂环境的高效采摘作业存在较大的差距,在多臂采摘中复杂避障运动规划的低效和易碰撞更难以满足高速同步作业的需要。

从多臂高效采摘目标出发,除了推进农艺的进一步平面化、标准化从而大大简化采摘作业的冠层环境、大大降低避障感知规划需求以外,可能的容差技术路径有:在已实施的从外侧向内部采摘顺序基础上^[129,132],进一步发展冠层多目标的分层识别与采摘融合策略,并与多臂机器人的多视点识别定位、任务分配和采序规划结合,使重叠、遮挡缩短带来的识别、避障问题得到简化;根据冠层内立架结构物、枝干、树叶等的软硬性质和碰撞概率进行分级,提出差异化的感知与避让策略,从而有效简化避障感知规划的复杂性^[123];从刚性臂向柔性臂、刚柔耦合农用臂发展,并发展抗挡扰末端,实现“障碍碰即顺应、果实触即采到”。

从“手眼高精度”转向“综合强容差”,将成为面向采摘机器人产业化需要、实现高效作业的核心技术走向。

3.2.2 从专用定制化走向通用模块化

传统采摘机器人研究针对特定作物、特定品种和特定现场条件而形成的末端、机械臂、底盘等各自的机械结构和目标识别、导航、伺服控制等算法,尤其适合于欧美超大规模、高标准化农业生产的专用化设计。但是,面向我国“大国小农”国情下的标准化不足、规格多、品种多等特点,专用化设计方案的推广和应用将受到极大限制。另一方面,在当前条件下企业主要面向科教、示范的单台定制模式,使针对特定用户、特定作物和农艺的算法、软硬件架构等各异,研发周期长、研发投入大,远远不能满足生产型装备量产和效率/成本比的需要,成为其走向产业化的最大瓶颈。

核心部件通用化是产业化的基本规律,面向多臂采摘机器人的机-电-感-控复杂构成和复杂多样的作业环境、对象,机械臂、末端、视觉等核心部件和感知、导航、控制算法通用化的核心是泛化性,尽可能扩大其应用环境、对象和机器人装备上的通用、兼用性。可能的途径有:

(1)基于模块化高性能回转与直动关节,发展面向不同农艺模式与采摘对象、不同多臂机器人架构的机械臂构型自主配置、运动学自标定解算与快速重构技术,在解决目前田间环境非结构化严重、农艺类型与规格多样而商用多关节臂性能受限问题的同时,摆脱针对特定需要重新设计新臂型的局面。

(2)末端执行器是采摘机器人的核心部件,但目前商用鳍条效应手爪应用于农作物采摘的性能有限,而国内外特定开发的采摘末端执行器达数百种之多,在技术创新活跃的同时尚未形成产业化模式。为此应发展统一通讯协议下的多末端“结构-控制算法”快换技术,和发展低成本、实用化的农业多目标通用灵巧手,解决跨多作物兼用的问题。

(3)发展满足不同采摘机器人视场、视角、多手眼配置和数据输出要求,对光线变化、重叠遮挡等现场条件具有强适应性的模块化视觉系统;发展大数据和自学习融合的跨作物、跨品种、跨特定发育期的农业目标通用稳健识别模型与算法,形成通用性强的采摘机器人视觉集成解决方案。

(4)面向乔化、吊蔓、棚架、篱壁、纺锤、槽栽、垄栽等差异巨大的作物行环境,研究大差异栽培模式与作物行共性特征与行线提取的低像素、轻量化方法,发展更广泛通用的作物行感知与导航技术,形成模块化作物行通用感知与导航系统方案。

3.2.3 从专业性装备走向用户型产品

采摘机器人复杂性远远超过其他农机装备与机器人系统。在作业性能提升的同时,目前采摘机器人在田间的作业,较依赖于专业人员的环境配置、机械臂初始化、标定校准、视觉与导航算法加载等,难以直接面向普通用户的操作使用。

从专业性装备走向用户型产品,要求多臂高速采摘机器人系统面向“易用”目标的技术进一步升级:

(1)发展田间工况下机器人开机的系统自检、精度自检、自主标定校准或无门槛辅助标定校准技术,实现在田间现场对普通用户的机器人工况校准。

(2)发展自主采摘作业的一键启动技术,实现普通用户一键触发的环境配置、机械臂初始化、视觉与导航算法加载的自主连续执行,进一步与开机自检自校准融合形成多臂高速采摘机器人的傻瓜式上线方案。

(3)发展满箱、到头、意外等工况融合的自主报警停机与续接作业技术,实现多臂采摘机器人的自主安全作业运行和运行过程中普通用户极简的介入、退出。

与植保无人机、农机自动驾驶等智能农业装备的快速产业化相比,采摘机器人的超复杂性既使其成为农机智能化发展水平的衡量尺度,成为国内外竞相追逐的热点,又成为其打开产业化大门的关键障碍,成为社会、产业对其热盼却驻足的根本原因。但是,在经历了长时间的摸索之后,采摘机器人进入产业化发展全新阶段的态势已不可阻挡,面向产业化规律、面向产品化形态、面向生产作业性能需求,成为其技术攻关的核心目标和必然走向,该领域将在今后 3~4 年内迎来跨越式的重大突破。

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.
LIU Chengliang, GONG Liang, YUAN Jin, et al. Current status and development trends of agricultural robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(7):1-22,55. (in Chinese)

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

[3] AGROBOT. Meet the E-Series—the first pre-commercial robotic harvesters for gently harvest strawberries[EB/OL]. [2024-07-20]. <https://www.agrobot.com/e-series>.

[4] FF Robotics[EB/OL]. [2024-07-20]. <https://www.ffrobotics.com>.

[5] 中国农业年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2009-2023.

[6] 中国农村统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2009-2022.

[7] 程亚男. 河北省露地桃与设施桃种植成本收益比较研究[D]. 保定:河北农业大学, 2022.
CHENG Ya'nan. Comparative study on the cost-benefit of open-air peach and protected peach in Hebei Province[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[8] 尚书旗,李成鹏,何晓宁,等. 高酸苹果振动式采摘机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(3):115-125,168.
SHANG Shuqi, LI Chengpeng, HE Xiaoning, et al. Design and experiment of high-acid apple vibrating picker[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3):115-125,168. (in Chinese)

[9] 方建军. 采摘机器人开放式控制系统设计[J]. 农业机械学报, 2005, 36(5): 83 – 86.
FANG Jianjun. Open architecture control system of harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(5): 83 – 86. (in Chinese)

[10] 熊俊涛, 叶敏, 邹湘军, 等. 多类型水果采摘机器人系统设计与性能分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 1): 230 – 235.
XIONG Juntao, YE Min, ZOU Xiangjun, et al. System design and performance analysis on multi-type fruit harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1): 230 – 235. (in Chinese)

[11] 李长勇, 房爱青, 谭红, 等. 高架草莓采摘机器人系统研究[J]. 机械设计与制造, 2017(6): 245 – 247, 251.
LI Changyong, FANG Aiqing, TAN Hong, et al. Elevated strawberry picking robot system research[J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(6): 245 – 247, 251. (in Chinese)

[12] 博田机器人. 番茄串采机器人[EB/OL]. [2024 – 07 – 20]. https://www.szbotian.com/Pr_d_gci_60_id_47_typeid_1.html.

[13] 朝闻道智能信息科技有限公司[EB/OL]. [2024 – 07 – 20]. <https://www.taobotics.com/taobotics%20rs-agr.html>.

[14] 乔戈里科技[EB/OL]. [2024 – 07 – 20]. https://qogori.net/solutions/smartfarming_Corp_Farming.

[15] 史河机器人[EB/OL]. [2024 – 07 – 20]. https://www.robotplusplus.com.cn/MMX5_shjqrgw.

[16] 青岛悟牛智能科技有限公司[EB/OL]. [2024 – 07 – 20]. <https://www.chinaagv.com/shop/2328/sell/>.

[17] 广东若铂智能机器人有限公司[EB/OL]. [2024 – 07 – 20]. <http://www.robigt.com/?/goods/id-23/index.html>.

[18] 熙岳智能[EB/OL]. [2024 – 07 – 20]. <https://www.njxyzn.cn/product-item-6.html>.

[19] 新浪财经. 机器人农场绘就智慧农业新图景[EB/OL]. (2023 – 02 – 01) [2024 – 07 – 20]. <https://finance.sina.com.cn/jjxw/2023-02-01/doc-imyeeens9944435.shtml>.

[20] 中科原动力[EB/OL]. [2024 – 07 – 20]. <https://www.aiforcetech.com/productinfo/2054213.html?templateId=1602114>.

[21] 越疆机器人. 炎炎夏日, 告别流汗! 越疆协作机器人摘葡萄, 开启“智慧果园”模式! [EB/OL]. (2021 – 06 – 22) [2024 – 07 – 20]. <https://www.douyin.com/video/6976561162443934980>.

[22] 达闼科技. 机器人进温室: 达闼采摘机器人助力农业无人化[EB/OL]. (2022 – 05 – 10) [2024 – 07 – 20]. <https://www.dataarobotics.com/zh/blog/news-293.html>.

[23] 上海一坤电气有限公司[EB/OL]. [2024 – 07 – 20]. http://www.sensorobotics.cn/navbar_list/solution/pick.

[24] 农业机器人-书农科技. 万寿菊采摘机器测试期回放, 有需要的欢迎交流[EB/OL]. (2024 – 05 – 13) [2024 – 07 – 20]. https://www.douyin.com/user/MS4wLjABAAAAMgbBfnTyvvrxoC31S3X_bSvYnmIuieMkEcrtTBT7QA?modal_id=7368375877442211084.

[25] 伟景智能. 伟景智能率先推出智能人形采摘机器人, 应用于农业采摘, 并开放预订[EB/OL]. (2024 – 07 – 02) [2024 – 07 – 20]. <http://www.vizumtech.com/detail/247.html>.

[26] 共研网. 2023 年中国自动采摘机器人行业现状分析: 随着人口的不断增长, 需求量同比增长 29.7% [EB/OL]. (2023 – 07 – 25) [2024 – 07 – 20]. <https://www.gonyn.com/industry/1528092.html>.

[27] 机器人. 上海市委常委、浦东新区区委书记朱芝松一行考察浦东张江镇农业机器人示范基地[EB/OL]. (2023 – 11 – 27) [2024 – 07 – 20]. <https://www.leaderobot.com/news/2896>.

[28] 新华网. 工信部: 中国制造业机器人密度达每万名工人 392 台[EB/OL]. (2023 – 08 – 18) [2024 – 07 – 20]. <http://www.xinhuanet.com/info/20230818/e37e5e7233ac4048a02ddcc107210a88/c.html>.

[29] 中国农业机械年鉴编辑委员会. 2023 年中国农业机械工业年鉴[M]. 北京: 机械工业出版社, 2023.

[30] 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 robotic hand-arm cooperative damage-free harvesting system for trellis grapes[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021. (in Chinese)

[31] 马利. 猕猴桃双机械臂采摘平台设计及关键技术[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
MA Li. Design and key technologies of the kiwifruit picking platform equipped with dual robotic arms[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023. (in Chinese)

[32] 冯青春, 赵春江, 李涛, 等. 苹果四臂采摘机器人系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(13): 25 – 33.
FENG Qingchun, ZHAO Chunjiang, LI Tao, et al. Design and test of a four-arm apple harvesting robot[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(13): 25 – 33. (in Chinese)

[33] LI Y, WU S, HE L, 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.

[34] 张俊. 面向工厂化褐菇种植的智能蘑菇采摘机器人设计[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
ZHANG Jun. Design of intelligent picking mushroom robot for industrial brown mushroom cultivation[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[35] 冯青春, 郑文刚, 姜凯, 等. 高架栽培草莓采摘机器人系统设计[J]. 农机化研究, 2012, 34(7): 122 – 126.
FENG Qingchun, ZHENG Wen'gang, JIANG Kai, et al. Design of strawberry harvesting robot on table-top culture[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(7): 122 – 126. (in Chinese)

[36] 高杨. 基于 RealSense 的短程式采摘机器人设计与运动规划[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.

- GAO Yang. Design and motion planning of short-range picking robot based on RealSense[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018. (in Chinese)
- [37] 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.
JIN Yucheng, GAO Yang, LIU Jizhan, et al. Hand-eye coordination planning with deep visual servo for harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021, 52(16): 18–25,42. (in Chinese)
- [38] YU X, FAN Z, WANG X, et al. A lab-customized autonomous humanoid apple harvesting robot[J]. Computers & Electrical Engineering, 2021, 96: 107459.
- [39] HU X, YU H, LV S, et al. Design and experiment of a new citrus harvesting robot[C]//2021 International Conference on Control Science and Electric Power Systems (CSEPS). IEEE, 2021: 179–183.
- [40] 张莎莎. 猕猴桃双机械臂协调采摘方法研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
ZHANG Shasha. Control method of dual arm picking robot for kiwifruit[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)
- [41] 崔永杰,马利,何智,等. 基于最优空间的猕猴桃双臂并行采摘平台设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(8):132–143.
CUI Yongjie, MA Li, HE Zhi, et al. Design and experiment of dual manipulators parallel harvesting platform for kiwifruit based on optimal space[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 132–143. (in Chinese)
- [42] 蒋宗祥. 多臂协同的名优茶单芽精准采摘机器人研究[D]. 济南:山东大学,2022.
JIANG Zongxiang. Research on the precise picking robot of high-quality tea sprout with multi-arm coordination[D]. Ji'nan: Shandong University, 2022. (in Chinese)
- [43] ZHONG M, HAN R, LIU Y, et al. Development, integration, and field evaluation of an autonomeus Agaricus bisporus picking robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 220: 108871.
- [44] 张凯良,杨丽,王粮局,等. 高架草莓采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报,2012,43(9):165–172.
ZHANG Kailiang, YANG Li, WANG Liangju, et al. Design and experiment of elevated substrate culture strawberry picking robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(9): 165–172. (in Chinese)
- [45] LING X, ZHAO Y, GONG L, et al. Dual-arm cooperation and implementing for robotic harvesting tomato using binocular vision[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2019, 114: 134–143.
- [46] ZHAO Y, GONG L, LIU C, et al. Dual-arm robot design and testing for harvesting tomato in greenhouse[J]. IFAC-Papersonline, 2016, 49(16): 161–165.
- [47] 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.
- [48] GONG L, WANG W, WANG T, et al. Robotic harvesting of the occluded fruits with a precise shape and position reconstruction approach[J]. Journal of Field Robotics, 2022, 39(1): 69–84.
- [49] MA L, HE Z, ZHU Y, et al. A method of grasping detection for kiwifruit harvesting robot based on deep learning[J]. Agronomy, 2022, 12(12): 3096.
- [50] LIU L, YANG Q, HE W, et al. Design and experiment of nighttime greenhouse tomato harvesting robot[J]. Journal of Engineering and Technological Sciences, 2024, 56(3): 340–352.
- [51] YANG S, JIA B, YU T, et al. Research on multiobjective optimization algorithm for cooperative harvesting trajectory optimization of an intelligent multiarm straw-rotting fungus harvesting robot[J]. Agriculture, 2022, 12(7): 986.
- [52] JIANG Y, LIU J, WANG J, et al. Development of a dual-arm rapid grape-harvesting robot for horizontal trellis cultivation[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 881904.
- [53] LI T, XIE F, QIU Q, et al. Multi-arm robot task planning for fruit harvesting using multi-agent reinforcement learning[C]//2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2023: 4176–4183.
- [54] YIN H, SUN Q, REN X, et al. Development, integration, and field evaluation of an autonomous citrus-harvesting robot[J]. Journal of Field Robotics, 2023, 40(6): 1363–1387.
- [55] 金煜杰. 四臂猕猴桃采摘机器人的吞咽切割式手臂设计与高速并行规划[D]. 镇江:江苏大学,2024.
JIN Yujie. Swallowing and cutting arm design and high-speed parallel planning control of four-arm kiwi picking robot[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2024. (in Chinese)
- [56] MANN M P, ZION B, SHMULEVICH I, et al. Combinatorial optimization and performance analysis of a multi-arm cartesian robotic fruit harvester-extensions of graph coloring[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2016, 82: 399–411.
- [57] 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.
- [58] GONGAL A, AMATYA S, KARKEE M, et al. Sensors and systems for fruit detection and localization: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 116: 8–19.
- [59] TAO Y, DONGBO Z, LUFENG L, et al. View planning for grape harvesting based on active vision strategy under occlusion[J]. IEEE Robotics and Automation Letters,2024, 9(3): 2535–2542.
- [60] RONG J, WANG P, WANG T, et al. Fruit pose recognition and directional orderly grasping strategies for tomato harvesting

robots[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 202: 107430.

[61] 周宇杰,吴强,贺磊盈,等.名优茶采摘机器人的系统设计与试验[J].机械工程学报,2022,58(19):12-23.
ZHOU Yujie, WU Qiang, HE Leiyong, et al. Design and experiment of intelligent picking robot for famous tea[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(19): 12-23. (in Chinese)

[62] JI W, HE G, XU B, et al. A new picking pattern of a flexible three-fingered end-effector for apple harvesting robot[J]. Agriculture, 2024, 14(1): 102.

[63] 苗玉彬,郑家丰.苹果采摘机器人末端执行器恒力柔顺机构研制[J].农业工程学报,2019,35(10):19-25.
MIAO Yubin, ZHENG Jiafeng. Development of compliant constant-force mechanism for end effector of apple picking robot[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(10): 19-25. (in Chinese)

[64] JI W, ZHANG J, XU B, et al. Grasping mode analysis and adaptive impedance control for apple harvesting robotic grippers [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 186: 106210.

[65] XIAO X, WANG Y, JIANG Y. End-effectors developed for citrus and other spherical crops[J]. Applied Sciences, 2022, 12(15): 7945.

[66] CHEN K, LI T, YAN T, et al. A soft gripper design for apple harvesting with force feedback and fruit slip detection[J]. Agriculture, 2022, 12(11): 1802.

[67] 易伯阳,周俊,张震,等.鳍条效应软体采摘机械手建模与试验[J].应用力学学报,2024,41(2):318-329.
YI Boyang, ZHOU Jun, ZHANG Zhen, et al. Modeling and experiment of soft robotic picking hand based on fin ray effect[J]. Journal of Applied Mechanics, 2024, 41(2): 318-329. (in Chinese)

[68] 卢伟,王鹏,王玲,等.褐菇无损采摘柔性手爪设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(11):28-36.
LU Wei, WANG Peng, WANG Ling, et al. Design and experiment of flexible gripper for mushroom non-destructive picking [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 28-36. (in Chinese)

[69] 姬江涛,李梦松,赵凯旋,等.双孢菇柔性仿形采摘末端执行器设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(1):104-115.
JI Jiangtao, LI Mengsong, ZHAO Kaixuan, et al. Design and experiment of flexible profiling picking end-effector for *Agaricus bisporus*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 104-115. (in Chinese)

[70] 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.
ZHAO Yunwei, GENG Dexu, LIU Xiaomin, et al. Kinematics analysis and experiment on pneumatic flexible fruit and vegetable picking manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 31-42. (in Chinese)

[71] 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 on pneumatic flexible gripper for picking globose fruit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 30-43. (in Chinese)

[72] BROWN J, SUKKARIEH S. Design and evaluation of a modular robotic plum harvesting system utilizing soft components[J]. Journal of Field Robotics, 2021, 38(2): 289-306.

[73] 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.

[74] 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.

[75] HU G, CHEN C, CHEN J, et al. Simplified 4-DOF manipulator for rapid robotic apple harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 199: 107177.

[76] 陈燕,蒋志林,李嘉威,等.夹剪一体的荔枝采摘末端执行器设计与性能试验[J].农业机械学报,2018,49(1):35-41.
CHEN Yan, JIANG Zhilin, LI Jiawei, et al. Design and testing of litchi picking end-effector integrated clamping and cutting performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 35-41. (in Chinese)

[77] ZHANG H, LI X, WANG L, et al. Construction and optimization of a collaborative harvesting system for multiple robotic arms and an end-picker in a trellised pear orchard environment[J]. Agronomy, 2023, 14(1): 80.

[78] CHEN M, TANG Y, ZOU X, et al. 3D global mapping of large-scale unstructured orchard integrating eye-in-hand stereo vision and SLAM[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 187: 106237.

[79] MAO W, LIU H, HAO W, et al. Development of a combined orchard harvesting robot navigation system [J]. Remote Sensing, 2022, 14(3): 675.

[80] LYTRIDIS C, BAZINAS C, KALATHAS I, et al. Cooperative grape harvesting using heterogeneous autonomous robots[J]. Robotics, 2023, 12(6): 147.

[81] STAVRIDIS S, PAPAGEORGIOUS D, DROUKAS L, et al. Bimanual crop manipulation for human-inspired robotic harvesting [J]. Arxiv Preprint, arxiv:2209.06074, 2022.

[82] GURSOY E, NAVARRO B, COSGUN A, et al. Towards vision-based dual arm robotic fruit harvesting[C]//2023 IEEE 19th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). IEEE, 2023: 1-6.

[83] DAVIDSON J R, HOHIMER C J, MO C, et al. Dual robot coordination for apple harvesting[C]//2017 ASABE Annual International Meeting, 2017.

- [84] AHLIN K J, HU A P, SADEGH N. Apple picking using dual robot arms operating within an unknown tree[C]//2017 ASABE Annual International Meeting, 2017.
- [85] LENZ C, MENON R, SCHREIBER M, et al. HortiBot: an adaptive multi-arm system for robotic horticulture of sweet peppers[J]. arXiv Preprint, arXiv:2403.15306, 2024.
- [86] CHEN X, CHAUDHARY K, TANAKA Y, et al. Reasoning-based vision recognition for agricultural humanoid robot toward tomato harvesting[C]//2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2015: 6487 – 6494.
- [87] YOSHIDA T, ONISHI Y, KAWAHARA T, et al. Automated harvesting by a dual-arm fruit harvesting robot[J]. Robomech Journal, 2022, 9(1): 19.
- [88] SEPULVEDA D, FERNANDEZ R, NAVAS E, et al. Robotic aubergine harvesting using dual-arm manipulation[J]. IEEE Access, 2020, 8: 121889 – 121904.
- [89] XIONG Y, GE Y, GRIMSTAD L, et al. An autonomous strawberry-harvesting robot: design, development, integration, and field evaluation[J]. Journal of Field Robotics, 2020, 37(2): 202 – 224.
- [90] 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.
- [91] WILLIAMS H, TING C, NEJATI M, et al. Improvements to and large-scale evaluation of a robotic kiwifruit harvester[J]. Journal of Field Robotics, 2020, 37(2): 187 – 201.
- [92] Advanced. farm[EB/OL]. [2024 – 07 – 20]. <https://advanced.farm>.
- [93] Fieldwork Robotics[EB/OL]. [2024 – 07 – 20]. <https://fieldworkrobotics.com>.
- [94] Ripe Robotics[EB/OL]. [2024 – 07 – 20]. <https://www.riperobotics.com>.
- [95] 黄嘉鹏. 基于双目视觉的多臂番茄采摘系统设计与研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2022.
HUANG Jiapeng. Design and research of multi-arm tomato picking system based on binocular vision[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [96] 张亮. 主从苹果采摘机械臂路径规划研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
ZHANG Liang. Research on path planning of master-slave apple picking manipulator[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023. (in Chinese)
- [97] MAO W, LIU H, HAO W, et al. Development of a combined orchard harvesting robot navigation system[J]. Remote Sensing, 2022, 14(3): 675.
- [98] 施浩楠. 移动式仿人双孢菇采摘机器人设计[D]. 南京: 南京农业大学, 2021.
SHI Haonan. Design of mobile robot for picking bisporus mushroom[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [99] 新华社. 百闻不如一见! 劳动节! 看神奇机器人在“新工位”上的新作为[EB/OL]. [2024 – 05 – 01]. <https://h.xinhuanet.com/vh512/share/11996283?d=134d875&channel=weixin>.
- [100] YANG S, JIA B, YU T, et al. Research on multiobjective optimization algorithm for cooperative harvesting trajectory optimization of an intelligent multiarm straw-rotting fungus harvesting robot[J]. Agriculture, 2022, 12(7): 986.
- [101] EDAN Y, MILES G E. Design of an agricultural robot for harvesting melons[J]. Transactions of the ASABE, 1993, 36(2): 593 – 603.
- [102] 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.
- [103] YOSHIDA T, ONISHI Y, KAWAHARA T, et al. Automated harvesting by a dual-arm fruit harvesting robot[J]. Robomech Journal, 2022, 9(1): 19.
- [104] BARNETT J, DUKE M, AU C K, et al. Work distribution of multiple Cartesian robot arms for kiwifruit harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 169: 105202.
- [105] LI T, XIE F, ZHAO Z, et al. A multi-arm robot system for efficient apple harvesting: perception, task plan and control[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 211: 107979.
- [106] SEPULVEDA D, FERNANDEZ R, NAVAS E, et al. Robotic aubergine harvesting using dual-arm manipulation[J]. IEEE Access, 2020, 8: 121889 – 121904.
- [107] DAI N, FANG J, YUAN J, et al. 3MSP2: sequential picking planning for multi-fruit congregated tomato harvesting in multi-clusters environment based on multi-views[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 225: 109303.
- [108] LIU Z, WU J, FU L, et al. Improved kiwifruit detection using pre-trained VGG16 with RGB and NIR information fusion[J]. IEEE Access, 2019, 8: 2327 – 2336.
- [109] 赵升焱. 全自主单株抽样式草莓病虫害巡检机器人技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2023.
ZHAO Shengyi. Fully autonomous single-plant pumping style strawberry pest inspection robot technology research[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2023. (in Chinese)
- [110] PUEYO SVOBODA N C. Improving fruit harvesting speed with multi-armed robots[D]. University of California Davis, 2024.
- [111] XIE F, SUN N, LI J, et al. Fruit distribution acquisition with multi-vision for multi-arm harvesting robots[C]//2023 8th

International Conference on Control, Robotics and Cybernetics (CRC). IEEE, 2024; 7 – 13.

[112] ZION B, MANN M, LEVIN D, et al. Harvest-order planning for a multiarm robotic harvester[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 103: 75 – 81.

[113] HE Z, MA L, WANG Y, et al. Double-arm cooperation and implementing for harvesting kiwifruit[J]. Agriculture, 2022, 12(11): 1763.

[114] 新华网客户端. 我国农业机器人走向商业化[EB/OL]. (2024 – 03 – 05)[2024 – 07 – 20]. <https://h.xinhuaxmt.com/vh512/share/11919460?d=134d7b1&channel=wxixin>.

[115] 光明日报客户端. 浙江理工大学: 茶园忙, 新款采茶机器人来帮忙[EB/OL]. (2024 – 03 – 30)[2024 – 07 – 20]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1794943532300942648&wfr=spider&for=pc>.

[116] LUO L, TANG Y, LU Q, et al. A vision methodology for harvesting robot to detect cutting points on peduncles of double overlapping grape clusters in a vineyard[J]. Computers in Industry, 2018, 99: 130 – 139.

[117] YOSHIDA T, FUKAO T, HASEGAWA T. Cutting point detection using a robot with point clouds for tomato harvesting[J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2020, 32(2): 437 – 444.

[118] RONG J, DAI G, WANG P. A peduncle detection method of tomato for autonomous harvesting[J]. Complex & Intelligent Systems, 2022, 8(4): 2955 – 2969.

[119] YU Y, ZHANG K, LIU H, et al. Real-time visual localization of the picking points for a ridge-planting strawberry harvesting robot[J]. IEEE Access, 2020, 8: 116556 – 116568.

[120] COLL-RIBES G, TORRES-RODRÍGUEZ I J, GRAU A, et al. Accurate detection and depth estimation of table grapes and peduncles for robot harvesting, combining monocular depth estimation and CNN methods[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 215: 108362.

[121] LI J, TANG Y, ZOU X, et al. Detection of fruit-bearing branches and localization of litchi clusters for vision-based harvesting robots[J]. IEEE Access, 2020, 8: 117746 – 117758.

[122] LEHNERT C, MCCOOL C, PEREZ T. In-field peduncle detection of sweet peppers for robotic harvesting; a comparative study[J]. arXiv Preprint, arXiv:1709.10275, 2017.

[123] CI J, WANG X, RAPADO-RINCON D, et al. 3D pose estimation of tomato peduncle nodes using deep keypoint detection and point cloud[J]. Biosystems Engineering, 2024, 243: 57 – 69.

[124] WANG W, YANG L, NOGUCHI N. Development of a grape-harvesting robot using a multi-step detection method based on AI and a position-estimation algorithm[J]. Smart Agricultural Technology, 2024: 100574.

[125] LEHNERT C, SA I, MCCOOL C, et al. Sweet pepper pose detection and grasping for automated crop harvesting[C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2016: 2428 – 2434.

[126] ZHANG Q, LIU F, LI B. A heuristic tomato-bunch harvest manipulator path planning method based on a 3D-CNN-based position posture map and rapidly-exploring random tree[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 213: 108183.

[127] XU Z, LIU J, WANG J, et al. Realtime picking point decision algorithm of trellis grape for high-speed robotic cut-and-catch harvesting[J]. Agronomy, 2023, 13(6): 1618.

[128] JIN Y, LIU J, WANG J, et al. Far-near combined positioning of picking-point based on depth data features for horizontal-trellis cultivated grape[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 194: 106791.

[129] LIN G, ZHU L, LI J, et al. Collision-free path planning for a guava-harvesting robot based on recurrent deep reinforcement learning[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 188: 106350.

[130] WANG H, ZHAO Q, LI H, et al. Polynomial-based smooth trajectory planning for fruit-picking robot manipulator[J]. Information Processing in Agriculture, 2022, 9(1): 112 – 122.

[131] ZAPOTÉZNY-ANDERSON P, LEHNERT C. Towards active robotic vision in agriculture; a deep learning approach to visual servoing in occluded and unstructured protected cropping environments[J]. IFAC-Papers OnLine, 2019, 52(30): 120 – 125.

[132] NING Z, LUO L, 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.