

果蔬采摘机器人的现状及发展综述

万乾程¹ 卢泽民¹ 高星星¹ 吕程辉¹ 罗欣¹ 廖剑¹

万傲^{1,2} 庞雄斌¹ 谢敬波¹

1. 武汉市农业科学院,湖北 武汉 430065 2. 武汉轻工大学,湖北 武汉 430023

摘要:果蔬采摘自动化、智能化、无人化是果蔬产业发展的最终目标,但果蔬采摘机器人的技术及市场应用仍是制约果蔬产业发展的重要瓶颈。对果蔬采摘机器人在国内外的研究现状和发展趋势进行了阐述与剖析,指出了目前果蔬采摘机器人发展存在的问题,结合果蔬产业应用场景和发展要求,提出农机与农艺应更广泛地深度融合。同时,针对采摘机器人存在的成本高、维护难、操作技术要求高等问题,对研制与生产高性能、高效率、高可靠的果蔬机器人采收装备提出了发展建议。

关键词:果蔬;采摘机器人;现状;综述

中图分类号:TP242.3;S225

DOI: 10.3969/j.issn.2097-065X.2024.03.007

0 引言

20世纪以后,设施农业的规模迅速扩大,并快速发展起来。目前,国际上已普遍采用温室大棚进行果蔬的工厂化设施种植。果蔬工厂化设施种植是一个典型的劳动密集型产业,当前果蔬的耕、种、管

基金项目:湖北省重点研发计划项目(2023BBB041);武汉市农业科学院青年创新项目(QNCX202312)

等环节已基本实现机械化,但新鲜果蔬采摘收获机械化程度不高,需要大量劳动力高强度作业,其成本高、季节性强,同时也是最难实现机械化的一个关键环节。在国外,尽管设施农业很多环节已经实现了高度机械化,但其收获环节机械化程度低,仍然需要大量的劳动力来完成,实现果蔬工厂化设施种植收获环节的机械化是其发展的现实需要。为此,国内外已有许多学者对其进行了深入的研究,并取得了

和人力管理成本。通过自动化和高效管理,可以降低单位产品的劳动成本30%。

3.4 环保节能

通过合理的饲养管理和粪便处理系统等手段可以减少粪便污染对环境的影响,实现环保养殖的目的。

4 结语

肉鸽机械化高效养殖新技术对提升肉鸽产业水平、发展农村经济和增加农民收入等方面具有积极作用。

一是促进产业升级。通过引入机械化高效养殖新技术,可以直接推动肉鸽产业升级,使得广大养殖户能够更加科学地进行饲养管理,提高养殖水平。有助于提升当地肉鸽产业的整体竞争力,促进地方经济的发展。

二是促进农民增收,助力精准扶贫。通过肉鸽机械化高效养殖新技术的应用,可以实现规模化、标准化养殖,提高肉鸽产量和质量。有助于增加农民的收入,提高农民的生活水平。同时,随着肉鸽产业的不断发展壮大,还可以带动饲料加工、兽药生产、

屠宰加工等相关产业的发展,进一步拓宽农民的增收渠道。所以,推广和应用肉鸽机械化高效养殖新技术具有广阔的前景。

参考文献:

- [1] 陈益填. 优质肉鸽的育种与生产[J]. 中国禽业导报, 2008,25(21):10-11.
- [2] 张丽萍. 肉鸽养殖的关键技术与实践[J]. 畜牧兽医科技信息, 2022(1):15-16.
- [3] 沙文锋等. 肉用种鸽平衡颗粒的研制与应用[J]. 江苏农业科学, 2001(2):63-64.
- [4] 朱娟,陈启康,等. 肉鸽营养需要与饲料研究进展[J]. 湖北农学院学报, 2002,22(1):86-89.
- [5] 方依根,秦永康,李汉华,等. 鸽蛋人工孵化技术和管理要点[J]. 畜牧兽医杂志, 2008,27(5):64-65.
- [6] 刘海燕. 肉鸽规模化养殖的环境控制技术[J]. 当代畜禽养殖业, 2021(3):15-16.
- [7] 王志强. 肉鸽规模化养殖的营养饲料选择[J]. 畜牧兽医科技信息, 2023(2):15-16.

作者简介:唐正国,男,1979年生,助理农艺师,教练员。研究方向为农业机械化。

一定的成果。

1 果蔬采摘机器人研究现状

1.1 国外研究现状

20 世纪中后叶,国外农业发达国家开发的采摘机器人主要有机械震摇式和气动震摇式等纯机械结构形式。由于受当时科学技术发展水平的限制,仅靠单一机械式结构的采摘机器人来完成果蔬采摘,往往工作效率不高且极易造成果实的破损。但 1980 年以后,随着网络技术、计算机技术、机器学习和人工智能等技术的逐步发展,采摘机器人也在工业先进技术的加持下更加自动化和智能化,工作效率和应用场景得到了进一步扩大^[1]。

日本冈山大学 Kondo 等^[2]研发制造的番茄采摘机器人(图 1),由移动底盘、机械臂、末端执行器和视觉定位装置等组成,主要用于温室栽培的不同品种的番茄采摘。工作时先通过双目视觉系统识别和定位成熟的番茄,然后依靠具有柔软衬垫的末端执行器在腕关节处将番茄果柄与果实分离后,通过吸入的方式完成番茄采摘与收集。该机器人的主要组成部件和采摘作业流程成为此后采摘机器人研究的重要参考,以移动底盘、机械手和视觉组合成为采摘机器人的基本结构形式。试验结果表明,该采摘机器人的采摘成功率为 70%,单个果实的平均采摘时间为 15 s。



图 1 番茄采摘机器人

日本农业机械化研究所 Hayashi 等^[3]开发了一种高架基质栽培的草莓采摘机器人(图 2),主要由机械臂、末端执行器、机器视觉单元、存储和移动单元等组成。该机器人基于夜间作业、果梗切割和人机互动的开发理念,克服了以往研究中存在的机器人工作效率低、成功率低、果实受损、复杂光照下难以检测和成本高等问题。末端执行器由抓取和切割一体化的夹具、固定果实的气吸装置和检测目标的光电传感器组成。机器视觉识别成功率

为 60%,对成熟度在 80%以上的草莓进行采摘时,在剪切果柄前使用气泵吸附草莓果实,成功收获率为 41.3%,而当没有使用气泵装置吸附时,成功收获率则为 34.9%。单个草莓果实从采摘到转移至果盘需 11.5 s。



图 2 草莓采摘机器人

日本农研机构 Yamamoto 等^[4]研制了一种将轨道移动平台与机械臂相结合的草莓采摘机器人,该机器人的末端执行器可以在采摘时将相邻的草莓分开,执行器上安装了白色、红色和绿色的发光二极管,以便更准确地进行颜色识别。田间试验得出,该机器具有 67.1%的采摘成功率,去除果柄率为 88.0%,每个果实的平均采摘时间为 22.2 s。

美国的 Sarabu 等^[5]研制了一种苹果采摘机器人,该机器人采用双机械臂协同作业来提高识别成功率和采摘成功率。根据作业特点,双机械臂分别具有搜索和抓取功能,抓取臂上安装有末端执行器。

Williams 等^[6]设计了一种多臂猕猴桃采摘机器人,该机器人由四个专门为猕猴桃采摘而设计的机械臂组成,每个机械臂都有一个新颖的末端执行器,以确保猕猴桃的无损采摘。在田间作业环境中,利用深度神经网络和立体视觉最新技术实现猕猴桃的可靠检测和定位。此外,构建了一套新的动态果实调度系统,该系统在整个收获过程中规划四个机械臂协同作业。在果园环境中进行全面的田间试验,结果表明,该机器人的采收成功率为果园内猕猴桃总数的 51.0%,单个果实平均周期时间为 5.5 s。

以色列本·古里安大学 Arad 等^[7]对温室内甜椒采摘机器人进行研发、设计和验证(图 3)。该机器人安装在温室自带动力的轨道小车上,包含一个六自由度机械臂,并配有针对甜椒设计的末端执行器、RGB-D 相机、带图形处理功能的计算机、可编程逻辑控制器和一个集果器等。重点开展了水果检测和定位、抓取姿态和运动控制的算法研究,同时对温室内不同品种及生长条件下的甜椒开展田间试验。试验结果表明,平均采摘周期时间为 24 s。运输等大约占采摘时间的 50%(平台移动 4.7 s,果蔬卸货 7.8 s);机器人及机械手加速运行,可以将循环时间减少到 15 s。理想的作物生长条件下,收获成

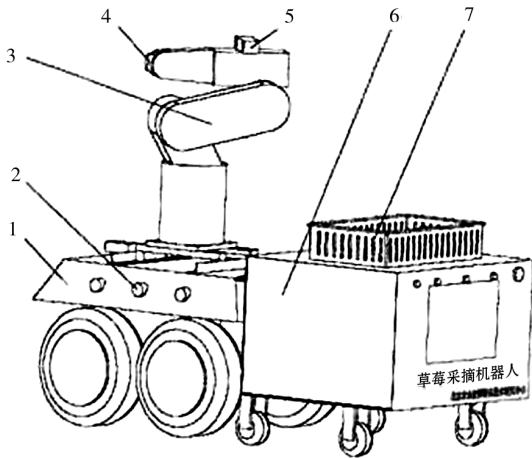
功率为 61%，结果表明适宜的作物条件和作物品种对于机器人成功采收果蔬非常重要。



图 3 甜椒采摘机器人

1.2 国内研究现状

国家智能装备工程技术研究中心冯青春等^[8]研发了一种高架栽培草莓采摘机器人系统(图 4)，为提高工作效率，该机器人系统可进行双侧高效无线遥控采摘。机器人输入设备有双目视觉相机、路标识别相机以及声呐传感器，用于平台巡航行走及果实识别和空间定位。末端执行器对果实吸附、果柄夹持和切割由关节型机械臂进行运动控制与定位，以达到对果实的自动抓取和自主导航。通过末端执行器的柔性结构设计和电热切割方式，实现了果实的无损伤采摘。实验结果表明，该采摘机械人系统末端平均定位误差为 2.2 mm，且随着果实与机械臂之间距离的增加，定位精度略有下降。机器人系统完成单个果实收获平均耗时为 10.99 s。



1.移动平台 2.声呐传感器 3.采摘机械臂 4.末端执行器
5.双目视觉相机 6.控制箱 7.果实箱

图 4 草莓采摘机器人示意图

中国农业大学张铁中研究团队^[9]开发了一种应用于温室高架栽培模式的草莓采摘机器人，通过调用导航和运动控制两种不同类型的程序，对履带行走、机械臂高精度运动定位以及具有剪切和夹持功能的末端执行器进行闭环控制。末端执行器由压缩空气驱动，实现草莓果柄的可靠夹持与剪切。实地试验结果表明，在温室环境下，该机器人的采摘性能非常出色。能够准确识别和定位成熟草莓，并实现无损伤采摘。采收成功率高达 88%，单个草莓的采摘时间约为 18.54 s。

由中国农业大学李伟研究团队^[10]研发的番茄、黄瓜和草莓等采摘机器人，主要包括：履带式底盘、机械臂、夹持剪切一体的两指气动式末端执行器以及双目视觉系统。试验结果表明，该夹持剪切结构的采摘成功率达 86%，一个采摘周期需要 28 s。采摘失败的主要原因有：阴影、亮斑和遮挡导致图像中水果区域信息不完整，难以获得较为准确的采摘点三维坐标；作物果实与枝叶交叉生长，末端执行器易接触到与目标对象紧邻的果实茎叶或其他果实，使目标果实被挤出手指包络范围；部分品种果蔬的果柄机械特性超过了末端执行器切割力的极限，机械臂拉拽致使果蔬脱落。

江苏大学刘继展等^[11-14]科研人员在温室大棚内进行了大量的机器人采摘研究工作。重点以番茄为对象，研制了一种番茄智能采收机器人末端执行器。该执行器的执行机构、传感器、控制和动力驱动是整个系统的核心组成部分，通过真空吸盘来完成目标番茄的分离，夹持机构则用来保证番茄的可靠抓取，并利用激光切断番茄的果柄。其质量只有 1.2 kg，每一次摘取只需 3 s。

2020 年，张凯良团队^[15-16]为了提高机器视觉在草莓采摘机器人中的果实检测性能，采用 Resnet50 作为骨干网，利用 FPN 结构进行特征提取。结果表明，模型准确率为 95.78%，模型召回率为 95.41%。大样本量模型的预测结果表明，平均误差为 ±1.2 mm。采用 YOLO (R-YOLO)，Mobilenet-V1 作为骨干特征提取网络，平均识别率 94.43%，召回率 93.46%。每秒处理 18 帧，采收成功率达到 84.35%。

沈阳农业大学于丰华等^[17]研发的番茄采摘机器人使用具有 6 自由度全向移动底盘结构，该采摘机器人适用于日光温室下的番茄采摘作业。采摘机械臂搭载在 4 个麦克纳姆轮组成的平台上，末端执行器设计有薄膜压力传感器，反馈抓取和剪切力。通过机器视觉识别和 STM32 控制器对机械臂运动

轨迹进行规划和控制。

江西理工大学程鹏胜等^[18]研制了一种草莓采摘机器人,采用麦克纳姆轮全向底盘和 4 自由度机械臂。最终整机调试实验结果表明,完成一个采摘周期约 7 s,平均采摘成功率为 90.32%。

西华师范大学陈俊丞^[19]研制了一台草莓自巡采摘机器人样机。平均无损采摘率为 90%,平均单颗草莓采摘时间为 20.342 s,草莓采摘机器人增加了自巡新功能并设计了整机控制系统,使得高架草莓采摘机器人的整体智能性有所提升。

2 果蔬采摘机器人存在的问题

目前,国内外学者对果蔬采摘机器人进行了大量的研究,分别对采摘机器人的运动结构形式、视觉定位、控制方法以及末端执行器等进行了深入的探索和研究。但采摘机器人普遍具有成本高、维护难、操作技术要求高的特点,此外,一些采摘机器人不能全方位行走;在视觉识别上速度快但算法抗干扰能力较弱。大部分果蔬采摘机器人尚处于实验和研究阶段,未能达到替代人工进行采摘的要求,仍存在以下问题。

2.1 果蔬采摘机器人的识别率和采摘成功率较低

根据当前的国内外研究进展,目前的识别率约为 90%,同时采摘成功率也仅为 90%。果蔬采摘作业要求采摘机器人必须具备准确识别并区分成熟和非成熟果实的能力。当前,果蔬识别方法主要利用几何形状特征、灰度阈值和颜色特征等指标。然而,采用灰度阈值和颜色特征容易受到光照干扰,从而导致图像噪声和识别准确率的下降。此外,几何形状特征的方法依赖于果蔬外形的完整性,但由于果实与茎叶的重叠以及边界的模糊性,很难有效区分果蔬的具体形状。同时,在识别过程中,机器人容易受到光照等环境因素的影响,导致对成熟果实的识别率较低。因此,为了提高果蔬采摘机器人的识别准确性,需要进一步研究和改进识别方法。可以探索新的光谱特征提取方法,减少光照对图像质量的影响。此外,可以考虑使用深度学习算法提取更丰富的特征,以提高果蔬识别的能力。还可以结合机器人的定位和运动控制技术,引入 3D 视觉感知,增强对果蔬形状和位置的理解能力。总之,改进果蔬识别方法是提高采摘机器人性能的关键途径,通过技术创新和改进,可以进一步提高识别准确率,并提升果蔬采摘机器人在实际应用中的效率和可靠性。

2.2 采摘环境的复杂非结构性

由于果蔬在自然环境下生长,很多果实会被茂

密的枝叶所遮挡。即使在温室大棚人工环境中,采摘机器人所处的环境也比较复杂且非结构化,果实和枝叶还会相互重叠在一起,虽然机器能够识别出果实,但采摘机械臂和末端执行器的灵活性不够,欠缺高度的灵敏性,难以接近准确采摘的位置,造成采摘失败。

2.3 机器人各系统的融合能力欠缺

通常,采摘机器人是由移动底盘、机械臂、末端执行器、导航以及果实识别单元组成的复杂系统。采摘机器人的性能主要取决于各个系统的融合能力,需要各个系统相互协调配合完成果实的抓取和采摘。导航寻迹、果实视觉识别和底盘与机械臂的移动等,这些动作的精确位姿补偿和动作协调并行交互,目前仍存在一些问题,还需要深入的研究。

2.4 果蔬采摘机器人的制造和维护成本较高

因作物生长环境和外界天气的影响,果蔬采摘机器人的工作环境一般复杂多样,因此所设计的机械结构、控制系统必须具备高可靠性且比较复杂^[20-21]。伴随着现代电子技术的不断发展,机器人相关的部件成本得到了极大的降低,但是在农业生产中,总的利润并不高,且农业机器人大都是针对单一的果蔬采摘,性价比不能满足农业生产的需要。

3 果蔬采摘机器人的发展趋势

从以上研究可以了解到,在果蔬采摘机器人的发展过程中,仍然存在水果识别率不够高、采摘成功率不甚理想、采摘环境复杂、各系统协调能力有待提高,以及制造和维护成本较高等问题。因此,本文结合果蔬采摘机器人未来发展的方向,提出了以下建议。

3.1 提高采摘机器人的识别率和定位精度

可以采用先进的物体识别技术、多模态感知、强化定位和导航系统、优化机械结构和执行器、引入强化学习和自主学习算法以及持续优化和改进。通过这些方法,机器人能够提高对不同果蔬的识别准确性、获取更精确的位置信息,改进运动控制和抓取能力,并通过学习和优化不断提升采摘成功率。

3.2 作业环境的工厂化

高度非结构化的工作环境和巨大的对象个体差别已成为限制采摘机器人作业性能提升和推广应用的主要瓶颈,这种复杂性使机器人面临巨大的挑战,无法轻易应对不同形状、大小、颜色等变化的果蔬,克服这些挑战是实现采摘机器人性能提升和广泛应用的关键。农机与农艺更广泛的深度融合,作业环境工厂化对于果蔬采摘机器人的识别率和定位精度

的提升至关重要。工厂化环境简化了果蔬种植和布局,减少了外界干扰,优化了机器人设计,并且方便了设备调整和维护,从而提高了机器人的操作性能和效率。此外,工厂化环境的标准化和规范化提高了生产效率,使机器人能更准确、高效地完成果蔬采摘任务,进而提高识别率和定位精度。

3.3 优化机械结构

通过优化机械结构,可以全面提升采摘机器人的作业性能,使其更适应复杂环境,增强稳定性和可靠性,降低能耗和噪音,并简化机器人的操作使用与维护保养,从而推动采摘机器人技术的进一步应用和发展。

4 结语

通过研究国内外的文献和网络资料,了解到目前我国的果蔬采摘机器人研究尚未达到商业化大规模推广的阶段,还存在许多问题需要解决,但也存在着巨大的进步空间。未来应继续在农业机器人研究中运用人机协同、开放式结构、多传感器融合等方式,特别是将人工智能、深度学习等新技术运用到果蔬采收机器人的研发中。今后,机器人技术的发展方向应该集中在减少开发和使用成本、提高工作效率、拓宽适用范围等方面。虽然现在还存在诸多堵点,但是在未来,不仅是采摘机器人,具备其他功能的农业机器人也会从实验室走向田间,走向大众,造福人类。

参考文献:

[1] 肖旭,李明,谢景鑫,等. 农业机器人技术发展综述[J]. 湖南农业科学,2020(11):113-118.

[2] Kondo N, Monta M, Fujiura T. Fruit harvesting robots in Japan[J]. Adv. Space Res, 1996, 18(1/2): 181-184.

[3] Hayashi S, Shigematsu K, Yamamoto S, et al. Evaluation of a strawberry-harvesting robot in a field test[J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(2): 160-171.

[4] Yamamoto S, Hayashi S, Yoshida H, et al. Development of a stationary robotic strawberry harvester with a picking mechanism that approaches the target fruit from below[J]. Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ, 2014, 48(3): 261-269.

[5] Sarabu H, Ahlin K, Hua P. Graph-based cooperative robot path planning in agricultural environments[C]// 2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Hong Kong,

2019: 519-525.

[6] 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.

[7] Arad B, Balendonc K J, Barth R, et al. Development of a sweet pepper harvesting robot[J]. Journal of Field Robotics, 2020, 37(6): 1027-1039.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 纪超. 温室果蔬采摘机器人视觉信息获取方法及样机系统研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.

[11] 刘继展, 李萍萍, 李智国, 等. 番茄采摘机器人末端执行器的硬件设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 109-112.

[12] 刘继展. 番茄采摘机器人真空吸持系统分析与优化控制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2010.

[13] 刘继展, 白欣欣, 李萍萍, 等. 番茄果实蠕变特性表征的 Burger's 修正模型[J]. 农业工程学报, 2013, 29(9): 249-255.

[14] 刘继展, 白欣欣, 李萍萍, 等. 果实快速夹持复合碰撞模型研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 49-54.

[15] Yu Y, Zhang K, Yang L, et al. Fruit detection for strawberry harvesting robot in non-structural environment based on Mask-RCNN[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019(163): 104846.

[16] 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.

[17] 于丰华, 周传琦, 杨鑫, 等. 日光温室番茄采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 53(1): 41-49.

[18] 程鹏胜. 草莓采摘机器人控制系统的设计与研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2023.

[19] 陈俊丞. 基于 ROS 的智能草莓采摘机器人设计[D]. 南充: 西华师范大学, 2023.

[20] 蒋先平, 徐灿, 刘丰溥, 等. 果蔬采摘机器人系统的应用与发展[J]. 现代农业装备, 2021(2): 2-8.

[21] 敖茂尧. 果蔬采摘机器人的研究现状与对策分析[J]. 装备制造技术, 2019(3): 128-131.

作者简介: 万乾程, 男, 1993 年生, 硕士, 工程师。研究方向为农业设施装备。谢敬波, 男, 1985 年生, 硕士, 高级工程师。研究方向为农业设施装备。