doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.05.018

热带水果采摘机器人研究进展综述

陈天赐[1,2]　张世昂[3]　付根平[4]　陈家政[1]　朱立学[1]

(1. 仲恺农业工程学院机电工程学院, 广州 510225; 2. 华南农业大学工程学院, 广州 510642;
3. 仲恺农业工程学院创新创业教育学院, 广州 510225; 4. 仲恺农业工程学院自动化学院, 广州 510225)

摘要: 热带水果是许多热带、亚热带国家的重要出口产品,是区域经济发展的重要支撑。随着农业智能装备的不断发展,结合人工智能等新兴技术,自动化、智能化热带水果采摘机器人逐渐成为农业采摘领域研究热点。回顾了采摘机器人在热带水果产业发展中应用和研究进展,梳理了国内外热带水果采摘现状,基于常见热带水果生长环境的复杂性与作物生长的特殊性,分析了不同热带水果采摘机械技术特点,讨论了热带水果采摘机器人各子系统的关键技术,并对当前的关键技术难点进行了分析。最后,展望了人工智能等高新技术赋能农业装备机遇,提出了未来热带水果采摘机器人逐步向智能化、无人化采摘的发展趋势。

关键词: 热带水果; 作物特性; 采摘机器人; 综述

中图分类号: S225; S24　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)05-0184-18　　**OSID**:

Review of Research Progress on Tropical Fruit Harvesting Robots

CHEN Tianci[1,2]　ZHANG Shiang[3]　FU Genping[4]　CHEN Jiazheng[1]　ZHU Lixue[1]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou* 510225, *China*
2. *College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou* 510642, *China*
3. *College of Innovation and Entrepreneurship Education, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou* 510225, *China*
4. *College of Automation, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou* 510225, *China*)

Abstract: Tropical fruits are significant export products for many tropical and subtropical countries, playing a crucial role in regional economic development. With the continuous advancement of agricultural intelligent equipment and the integration of emerging technologies such as artificial intelligence, machine learning, and computer vision, automated and intelligent tropical fruit harvesting robots have gradually become a research hotspot in the field of agricultural harvesting. The application and research progress of harvesting robots in the tropical fruit industry was comprehensively reviewed, and the current status of tropical fruit harvesting both domestically and internationally was outlined. It highlighted the growing demand for efficient and sustainable harvesting solutions due to labor shortages and increasing production costs. The technical characteristics of harvesting machinery for different tropical fruits were analyzed, such as bananas, pineapples, and mangoes, based on the complexity of their growing environments and the uniqueness of crop growth patterns. The key technologies of various subsystems in tropical fruit harvesting robots were also discussed, including fruit identification and localization, robotic arm manipulation, and intelligent control systems. The current technical challenges were examined, such as improving recognition accuracy in complex environments and enhancing adaptability to different fruit varieties. Finally, it was looked forward to the opportunities presented by high-tech advancements such as artificial intelligence, big data analytics, and IoT in empowering agricultural equipment. It proposed that future tropical fruit harvesting robots would increasingly move towards intelligent and unmanned harvesting, with potential applications in precision agriculture and smart farming systems.

Key words: tropical fruits; crop characteristics; harvesting robot; review

收稿日期: 2025-02-09　修回日期: 2025-03-10

基金项目: "十四五"广东省农业科技创新十大主攻方向"揭榜挂帅"项目(2022SDZG03-5)和广东省重点领域科技研发计划项目(2019B020223003)

作者简介: 陈天赐(1996—),男,博士生,主要从事作物视觉感知与空间定位技术研究,E-mail: chentianci1206@163.com

通信作者: 朱立学(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农业机械装备研究,E-mail: zhulixue@zhku.edu.cn

0　引言

水果作为农业领域的一个重要分支，不仅具有高营养价值，还对提高农民收入、推动农业现代化具有重要作用[1]。然而，尽管水果产业的市场需求和产量持续增长，尤其是热带水果的种植规模不断扩大，水果生产的机械化水平提升仍然缓慢。截至 2021 年，全国果园的平均综合机械化率仅约为 30%。采摘环节仍然依赖大量人工操作，是典型的劳动密集型作业，所需劳动力占整个生产过程的 40% ~50%，采摘成本则占总生产成本的 50% ~70%[2]。因此，提升采摘作业效率、降低劳动强度已成为迫切需求，尤其是针对热带水果采摘的机械化研究与创新尤为关键。

热带水果种类多，产量大，菠萝、柑橘、香蕉、荔枝等是具有代表性的热带水果。据国家统计局数据，2022 年水果总产量为 $3.129\,624\times10^8$ t，其中香蕉、柑橘和菠萝产量占比达到了 23.59%。广东、广西、云南、海南和福建等地区是我国热带水果的重要产区，其中广东、广西热带水果面积占到全国 67%，5 个主产省热带水果生产总面积占全国 94% 以上[3]。随着热带水果产业的发展，热带水果采摘装备与技术在过去的 20 年中也得到了长足的发展[1]，主要包括采摘机器人本体和末端执行器的定制化设计[4]，目标水果的位姿、成熟度、缺陷等个体数据采集与分析[5]，以及对环境中枝条分布、叶片遮挡等信息的感知能力[6]。

热带水果在生长环境、空间分布、几何形状、大小、颜色和硬度等方面与北方水果具有显著差异。这些差异使得热带水果的机器人结构设计、视觉感知以及控制方法与北方水果的采摘装备技术存在较大差异。因此，热带水果采摘机器人在硬件和软件设计上，不仅继承了其他作物采摘机器人的共性特点，还需要针对热带水果的独特生物学特性，设计特有的采摘方式与技术。

本文总结热带水果采摘机器人的研究进展，分析热带水果的生长环境和特点，梳理现有采摘装备及相关技术的优势与不足，展望未来的技术发展趋势，为技术创新与产业发展提供新思路。

1　国内外热带水果采摘现状

热带水果因其高劳动力投入而成为许多热带和亚热带国家的高价值作物[7]。随着农业技术的不断进步，全球多个国家已开始致力于热带水果的机械化和自动化采摘，旨在提高效率、降低劳动成本，并应对日益严重的劳动力短缺问题[8-12]。然而，由于热带水果种类繁多及其生长环境的特殊性，不同国家和地区在热带水果机械化采摘领域的研究进展存在较大差异。

美国的热带水果采摘机械化主要集中在柑橘类水果上，尽管一些技术已被应用于热带水果，如芒果和香蕉，但目前这些设备仍处于试验阶段，未广泛普及[13]。巴西作为全球最大的柑橘类水果生产国之一，虽然尚未实现全自动化采摘，但多款辅助人工采摘的机械装置已在提升采摘效率方面发挥重要作用[14]。澳大利亚的 Ubot 公司致力于柑橘自动化采收，研发了结合升降平台和机械手的采摘机器人，目前仍处于积极研发阶段[15]。

菠萝的采摘面临独特挑战，主要由于果实外表坚硬且呈螺旋状生长。尽管菠萝的机械化采摘技术在不断推进，但进展较其他热带水果更为缓慢。研究表明菠萝的机械化生产具有巨大潜力[16]，但现阶段马来西亚的菠萝采摘仍主要依赖人工[17]。印度受丘陵地形的制约，对菠萝的采收仍处于人工或半机械化程度[18]。相对而言，越南的地形较为适宜，开发的机械化装备已在菠萝种植试验场完成初步试验[19]。

芒果采摘在印度几乎完全依赖人工操作，但一些辅助的设备例如升降底盘和手持电动装置被用于辅助采摘也使采摘效率得到提高[20]。澳大利亚中央昆士兰大学设计了一款四臂收获机，对芒果的自动识别率达到 75%。同时，澳大利亚农业系统研究所开发了芒果自动采收原型机，采用垂直起降的机械手来穿过植株进行采摘，但这些装备仍未推广使用[21]。

中国是全球热带水果的重要生产国，尤其在香蕉、荔枝和龙眼的种植方面具有重要地位。尽管香蕉采摘机器人在试验阶段已取得一定进展，但由于香蕉树的高度差异、果实的分布不均，以及采摘的效率等问题，机械化普及仍存在难点[22]。此外，龙眼和荔枝的机械化采摘研究仍在进行中，当前的相关设备大多采用抓取和振动方式，但在复杂的生长环境中，机械装备仍难以准确高效地完成采摘任务[23]。

总体而言，热带水果的机械化采摘在全球主要生产国的研究进展较为迅速，但由于热带水果种类繁多、成熟时间差异大、果树结构复杂等因素，完全机械化乃至自动化采摘仍面临诸多技术挑战。

2　热带水果生长环境与生长特点

热带水果采摘装备大多数应用于果园环境。与结构化环境相比，果园的非结构化环境缺乏明确的

规则和固定的布局,具有高度的随机性和复杂性[24-27],包含的场景元素数量多、种类杂[28]。此外,热带水果种类多样,生长独特[29-30],也为采摘机器人的应用增加了难度。

2.1 水果植株不规则分布和地形复杂性

现有果园中的水果植株并非全是规则排列的,树木之间的间隔也往往不均匀,枝条和叶片的交叉遮挡形成复杂随机的空间结构。不同热带水果的植株高度、形状和枝条的生长方向各不相同,果实分布在植株的位置随机,增加了采摘机器人识别和采摘水果的难度。

果园起伏的地面或坡地也给机器人移动造成了困难。此外,果园内可能还存在水渠、灌溉设备,地面杂草、林间落果等障碍物,进一步增加了环境的复杂性。图 1 为不同的果园场景图,可以看出植株生长与地形特点使热带果园环境更为复杂。

2.2 果实种类和形态多样化

目前,我国市场上流通的热带水果主要有香蕉、柑橘、芒果、菠萝、荔枝、番石榴等,其中香蕉的产量最高[3],这些水果在岭南地区产量大,分布广。果实形状和外观特征差别较大,部分果实在成熟时较为脆弱,容易受损。与温带水果(如苹果和梨)相比,热带水果的果实更为脆弱,需要更高的操作精度和柔性,以避免采摘过程中的损伤。为了设计出高效的热带水果采摘机器人,需要深入分析这些水果的生长特征,进而指导机器人的设计和采摘方式。表 1 列举了常见热带水果的种类、形态、参数和采摘方式,为采摘机器人的设计提供参考。

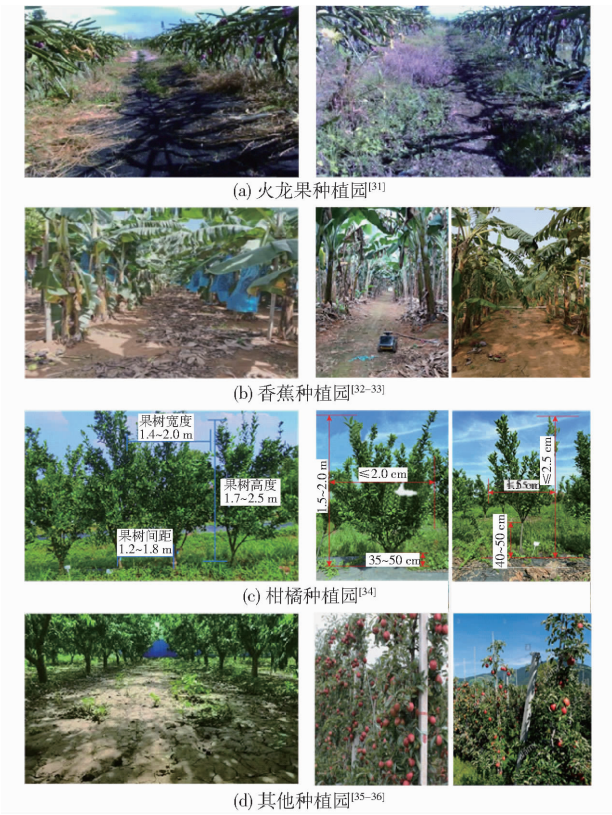


图 1 不同果园场景

Fig. 1 Scenes of different orchards

表 1 常见热带水果特点与采摘方式

Tab. 1 Characteristics and harvesting methods of common tropical fruits

水果种类	形态	参数	采摘方式
香蕉[37-39]	果实长而弯曲,成串生长,果皮薄而坚韧,成熟时颜色由绿色变为黄色	整串质量 25~60 kg,果轴直径 60~120 mm	果轴成串采摘
柑橘[40-42]	果实通常呈圆形或椭圆形,果皮较厚,颜色有绿色、黄色或橙色	单个质量 82~266 g,横径 54.1~95.2 mm	单个采摘或成串采摘
芒果[43-44]	果实通常呈椭圆形或肾形,果皮较厚,成熟时颜色从绿色变为黄色或红色	单个质量 180~610 g,纵径 120~200 mm,横径 40~80 mm	单个采摘
菠萝[45-46]	果实呈圆柱形或椭圆形,大小不一,果皮坚硬且粗糙,由多个六边形的果眼组成,每个果眼有一个小刺	单个质量 524~1 129 g,纵径 100~145 mm,横径 94~121 mm	单个采摘
荔枝[47]	果实小巧,通常呈圆形或椭圆形,果皮粗糙较薄	母枝直径 3~7 mm,长径 100~150 mm	母枝成串采摘
火龙果[48-49]	果实呈椭圆形或梨形,外皮颜色鲜艳,表面覆盖有绿色的鳞片结构	单个质量 200~500 g,纵径 66~102 mm,横径 55~88 mm	单个采摘
番石榴[50]	果实呈圆形、椭圆形或梨形,果皮薄且光滑,不同时期颜色有绿色和淡红色	单个质量 150~250 g,纵径 60~90 mm,横径 60~80.5 mm	单个采摘

2.3 果实分布随机化与生长环境动态化

果园果实的生长和成熟情况具有高度的随机性,不同植株上的果实成熟时间不同,分布位置也不固定。即使是同一棵树,由于树冠的高度和枝叶密度的差异,果实在不同位置的成熟进程也可能有所不同。有些果实可能隐藏在枝叶深处,需要采摘机器人具备优秀的视觉系统,穿透层层枝叶,识别隐藏的果实。而暴露在外的果实则需要避免在采摘过程中对其本身以及植株造成损伤。此外,还有果实颜色与背景高度相似,风吹扰动、光线变化、采摘点受遮挡等因素,也使得热带水果的采摘作业更加复杂。

图 2 所示为不同热带水果环境生长示例。YU

等[51]研究果园中不同颜色荔枝的识别方法，荔枝在不同成熟阶段表现出红色和绿色的不同颜色。ZHONG 等[52]研究了在荔枝母枝受遮挡的条件下，确定采摘点的位置。熊俊涛等[53]研究了在扰动状态下，如何精确定位荔枝的采摘点。YAO 等[54]针对番石榴的茂密枝干，研究了如何帮助机器人识别和采摘番石榴果实，虽然取得了显著进展，但要实现全自动化采摘仍需进一步研究。FU 等[55]针对香蕉果轴和果实与背景相似的问题，研究了香蕉在自然果园环境下的视觉识别算法。

作为热带水果之一的菠萝，果实生长位于地面，这使得它们通常被叶子遮挡[56]。高嘉正等[57]研究了火龙果在复杂生长环境中的三维重建技术，以克服枝条茂密、生长姿态多样等问题，赵文锋等[58]针对火龙果园的视觉感知问题，研究了多任务感知方法，从而为采摘机器人提供更多的目标感知信息。

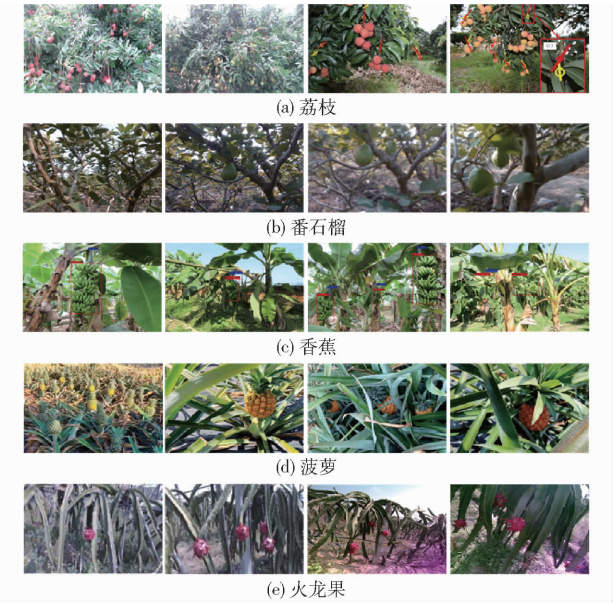


图 2　热带水果生长环境

Fig. 2　Growth environment of tropical fruits

这些研究成果展示了热带水果独特的生长环境与特点，也为采摘机器人技术的开发提供了重要思路。通过针对性地解决各类热带水果采摘中的挑战，未来能够开发出更加高效和适应性的采摘机器人，满足热带水果采摘的多样化需求。

3　热带水果采摘装备

热带水果采摘装备是专门为适应热带水果独特的生长环境和果实特性而设计的。与其他水果采摘机器人不同，热带水果采摘装备在设计和功能上既有共性，也有独特性。装备的设计主要包括 4 个关键部分：视觉传感器、行走机构、采摘装置和末端执行器。

3.1　视觉传感器

视觉传感器是采摘机器人的重要组成部分，使机器人能够感知果园环境，并实现对目标果实的空间定位。

常见的二维传感设备包括红绿蓝（RGB）相机和光谱传感器。RGB 相机通过采集水果图像进行特征分析，能有效识别采摘目标[59]。光谱传感器则通过分析光谱反射率，尤其适用于颜色特征不明显的水果[60]。

然而，这些传感器在空间定位上的能力有所不足。因此，采摘机器人常采用两种主要的视觉传感设备来满足空间定位需求：基于光学几何定位的双目相机和基于飞行时间定位的深度相机。双目相机通过图像融合和三角测距来计算深度，但该方法需要频繁校准，速度较慢[61]。

深度相机利用红外光脉冲测距，并结合 RGB 图像进行目标定位，常与激光雷达结合使用，以提高定位精度[62]。然而，激光雷达虽然精度高，但价格昂贵，数据融合过程较慢。相比之下，RGB－D 相机在定位精度、稳健性和计算效率方面表现优越，成为农业机器人视觉系统的主流组件[63－65]。但 RGB－D 相机在强光或近距离扫描时表现有所下降[66－67]，需要在设计中加以优化。

3.2　行走机构

我国南方的热带水果大多种植在丘陵山地等复杂地形中，这对采摘机器人的行走能力提出了更高要求[68]。对于平坦地区的果园，轮式行走机构较为常见，如图 3 所示。但在起伏的山地果园中，履带式行走机构更为适用。履带能够提供更大的牵引力和抓地力，适应不平地面，避免机器人陷入松软土壤或翻倒。



图 3　轮式机器人

Fig. 3　Wheeled robot

HUANG 等[69]设计了一款适用于丘陵山地的履带式多功能底盘，总体结构如图 4 所示。履带行走机构[70]由底盘机架、液压驱动系统、橡胶履带、支重轮、导向轮等组成，动力部分由液压系统提供，包括液压泵和液压马达。行走过程对不平路面的通过性较好，此外，液压马达控制履带的转速与方向，可实现行走机构的多方位运动。当下，对于热带水果采摘机器人行走机构的设计大体与该模式相类似[28]。

图 5 为最初设计的香蕉与菠萝采摘机器人试验样机[71-72]。

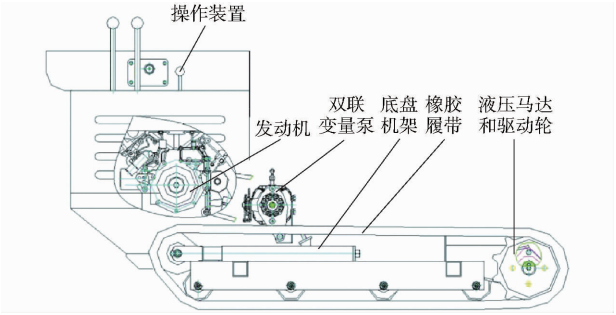


图 4 履带底盘总体结构图

Fig. 4 Overall structure diagram of track chassis



(a) 香蕉采摘机器人试验样机 (b) 菠萝采摘机器人试验样机

图 5 采摘机器人试验样机

Fig. 5 Prototype of picking robot

履带式行走机构具有较大的接地面积,能够减少松软土壤下陷的风险,确保在不平坦的地形上稳定行驶。然而,这种行走方式需要承载多个采摘装置,如机械臂和末端执行器,这对行走机构的承载能力提出了更高要求。此外,履带行走机构的高能耗也增加了机器人在复杂环境中持续作业的挑战。

除了在机构上的设计研究,近年来,丘陵山地果园的履带式底盘研究也包括了动力试验与运动控制[73]。李善军等[74]通过设计全液压遥控式履带动力底盘,展示了其在复杂地形下的适应性和操作便捷性。何永强等[75]基于履带式联合收获机转向特性的局部跟踪路径规划,优化了路径跟踪的准确性和效率。其他研究还聚焦于丘陵山地运动过程中的调平系统研究,以进一步提高作业的稳定性[76-77]。这些研究为丘陵山地果园的机械化作业提供了重要的技术支持。

3.3 采摘机械臂本体

机械臂本体是采摘机器人最为关键的组成部分,决定了机器人在果园中执行采摘任务的能力。特别是在热带果园环境中,机械臂需要具备高度的灵活性和精确的控制能力,以适应果树复杂的形态和果实分布。

目前,热带水果采摘机器人研究中大多数集中在工业机械臂或协作机械臂的应用上。这些机械臂通常具有多个自由度,包括旋转、俯仰、伸缩等功能,使其能够在三维空间中灵活运动,精确调整至最佳采摘位置和角度。这对于热带果园中果实分布不规则的情况尤为重要。图 6 展示了不同热带水果采摘机器人使用的机械臂本体,涵盖了荔枝[78-79]、火龙果[80]、柑橘[81]、番石榴[82]和香蕉[83]。



(a) 荔枝1 (b) 荔枝2 (c) 火龙果 (d) 柑橘 (e) 番石榴 (f) 香蕉

图 6 热带水果采摘机械臂

Fig. 6 Tropical fruit picking robot arm

尽管这些机械臂已经展现出较高的精确性和灵活性,但在实际应用中,采摘范围仍受限于较小的工作空间,难以覆盖整个果树的采摘区域。为了克服这些局限,国内外研究者设计了更加实用的大型机械装备,适用于实际采摘作业。

日本久保田公司研制的柑橘采摘装备采用大臂与小臂结合的 3 自由度机械臂,通过带有吊臂的移动平台实现大范围采摘作业(图 7a)[84]。美国 Energid 公司则研发了一种由电机和气动驱动组成的柑橘采摘装备,配备柴油卡车作为底盘,能够在较大范围内进行采摘(图 7b)[13]。澳大利亚 Ubot 公司也开发了一款使用升降平台携带机械手和摄像头的柑橘采摘装备,适应不同的果园环境(图 7c)[15]。巴西的柑橘采摘装备主要用于辅助人工采摘(图 7d)[14]。图 7e 为华南理工大学等单位研发的半自主式菠萝采摘机器人[85],该装备采用轮毂电机驱动和剪叉式液压升降结构,其采摘效率是人工采收的 3 倍。图 7f 展示了越南研发的龙门架式菠萝采摘装备,设计了专用的末端执行器,包括气动执行器、夹持器和切割装置,提升了菠萝采摘的效率和精确度[19]。澳大利亚中央昆士兰大学研发的芒果采摘装备(图 7g)采用了嵌入式控制器和摄像头进行

芒果检测，结合可编程控制器控制执行器，从而实现高效采摘[21]。此外，仲恺农业工程学院研发的香蕉高位水果采摘装备（图 7h）采摘高度可达 3 m，最大承载量可达 60 kg[86]。



图 7　典型热带采摘装备

Fig. 7　Typical tropical fruit picking equipment

在创新方面，LI 等[87]提出了一种新颖的采摘方式，通过无人机作为载体，搭载采摘工具，成为龙眼采摘机器人，能够完成对丘陵地区龙眼果串的定位与采摘。

这些研究成果表明，热带水果采摘机器人在应对复杂环境和果实多样性方面逐步取得进展。尽管目前的采摘机器人仍面临一些技术挑战，但随着技术的不断发展和创新，它们在实际应用中具备了越来越强的能力。

3.4　采摘执行器

末端执行器是热带水果采摘机器人中最具特色的部分，直接影响采摘效率和精确度。与普通水果（如苹果、梨）相比，热带水果在形态和生长环境上的多样性使得末端执行器的设计要求更为复杂。热带水果的果实通常较为脆弱，而树枝和果实之间的坚硬程度差异较大，这种特性在普通水果的采摘中较少，但在热带水果的采摘中至关重要，如芒果[88-89]和龙眼[90]。此外，热带果树通常生长在枝叶茂密、果实分布不均的环境中，给采摘作业带来了更大的挑战。

（1）适应果实特性的采摘方式

热带水果的生长特点要求采摘方式具备更高的灵活性和精确性。以荔枝为例，荔枝多以成串果实采摘，因此现有研究主要集中在剪切式收获、摇晃式收获和柱梳式收获 3 种方式。华南农业大学研究了荔枝果串的剪切特性，研制了一种夹剪一体的末端执行器（图 8），该执行器包括剪切模块、夹持模块、动力输出模块和机械臂连接组件[91]。实验表明，当母枝直径小于 5 mm 时，采摘成功率达到 100%，且剪切时间为 2 s。该剪切式末端执行器能够较好地保护果实的完整性，但采收效率较低，难以实现大规模的机械化采收。

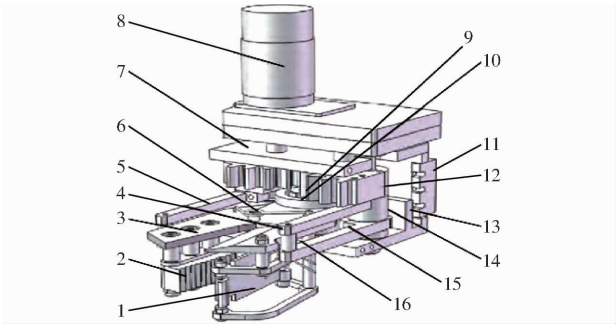


图 8　荔枝采摘末端执行器结构图

Fig. 8　Structure diagram of litchi picking end-effector

1. 柔性指　2. 刚性指　3. 右刀片　4. 左刀片　5. 摆杆　6. 复位扭簧　7. 支承板　8. 动力源　9. 圆螺母　10. 压刀块　11. 连接组件　12. 扇形齿轮　13. 机架　14. 摆杆转轴　15. 刀片销轴　16. 滚子

摇晃式收获和柱梳式收获是通过振动激励对果实进行分离的方式。尽管摇晃式收获在采摘效率上表现出一定优势，但由于荔枝簇形果实的特性，以及果实与枝条的结合力较大，单纯的摇晃会导致果实损伤。相比之下，柱梳式收获方式通过振动直接作用在与果实连接的枝条上，能够更好地保护果实。WANG 等[92]研究了不同频率（18、25、32 Hz）下的振动对荔枝采收效率的影响，结果表明，高频振动可以有效提高采摘效率，并减少果实损伤。为进一步提高采摘效率，设计了一种手持式荔枝单果采收末端执行器，如图 9 所示。通过实验验证，采用 32 Hz 频率结合脱落剂可以实现 97% 的采收率，且果实去除率达到 100%，是人工采收效率的 3.5 倍[93]。

为了进一步提升采摘效率和保护果实的完整性，LI 等[94]设计了一种具有同步收集装置的柱梳荔枝采收末端执行器，如图 10 所示。该执行器主要由柱梳机构、收集机构和升降机构组成，能够调节采收范围和角度，实现大范围的高效采收。同步收集装置的折叠设计使其能够通过升降机构自动收集果实，结合 EDEM 技术优化参数，实验表明该执行器

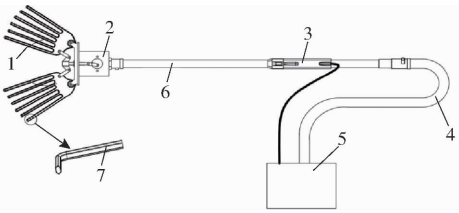
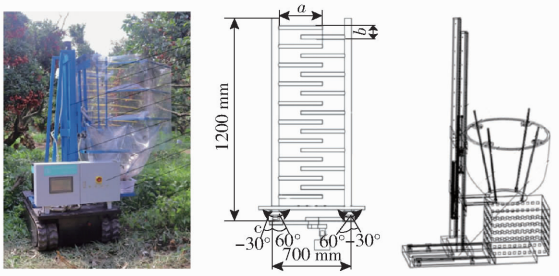


图 9 手持式荔枝枝条振动器结构图

Fig. 9 Hand-held litchi branch shaker structure diagram

1. 振动手指 2. 齿轮箱 3. 控制面板 4. 活动轴 5. 汽油引擎 6. 手持杆 7. L 型手指



(a) 柱梳式荔枝采收机 (b) 装置结构示意图 (c) 折叠式同步收集装置

图 10 荔枝采收装置

Fig. 10 Litchi harvesting device

的工作效率是人工采收的 2.2 倍,采收速度可达 33 kg/h,且果实的破损率仅为 6.1%。

(2)具备高承载的夹持切割方式

香蕉的生长高度较大,且果实聚集成串,因此采摘执行器需要具备高空作业能力和高承载力,这在普通水果采摘中较少涉及。JOHN[95]最初发明了手握式香蕉采摘杆,通过勾状切刀切断香蕉果轴。麻省理工学院研制的辅助砍蕉机具,利用人工辅助方式夹持切割香蕉果轴[96]。随着技术发展,半机械化的采摘机具逐渐应用,采用液压和电动驱动进行操作。

现有的采摘方式主要分为两种:对香蕉整串果实进行夹持;仅对果轴部分进行夹持。图 11 所示为不同的夹持机构,研究表明,夹持装置与果实或果轴的接触面积及夹持钳的张合调节对香蕉的损伤程度有直接影响[97-99]。

为了进一步提升采摘的效率,也逐步发展了香蕉果轴夹持和切割复合执行机构,将复合夹持机构安装于机器人末端,可一次性完成香蕉的采摘任务。复合执行器如图 12 所示,研究分析了夹持力度、驱动力及控制方式等因素的优化[100-101]。

(3)适应果实生长环境的采摘方式

菠萝不同于其他热带水果,它不生长在果树上,而是直接从地面或低矮的植株上生长,这要求采摘技术具备独特性。中国热带农业科学院研究者基于仿生学设计了一种差速梳齿式菠萝采收装置,通过模仿人工采收方式,完成“扶持-折取-装运”的采收

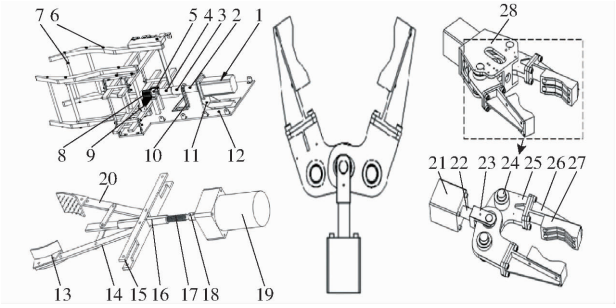


图 11 香蕉果实、果轴夹持机构

Fig. 11 Banana fruit and shaft holding mechanism

1. 电动机 2. 电机联轴器 3. 传感器 4. 传感器联轴器 5. 轴承座 6. 爪子 7. 支撑柱 8. 齿轮 9. 齿条 10. 传感器支架 11. 电机支架 12. 底板 13. 抱掌 14. 夹持杆 15. 支撑杆 16. 内丝杆 17. 外丝杆 18. 联轴器 19. 夹持电机 20. 连接杆 21. 液压缸 22. 推杆 23. “Y”型接头组件 24. 销轴 25. 钳臂组件 26. 钳 27. 钳口 28. 支架

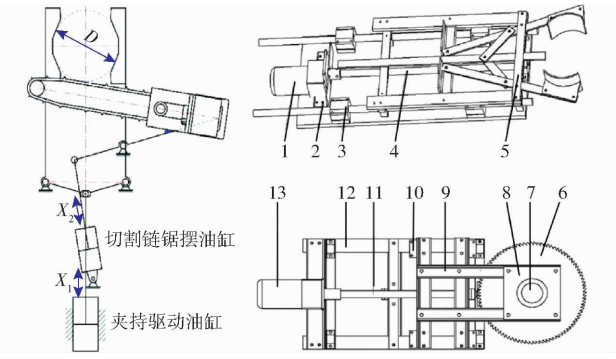
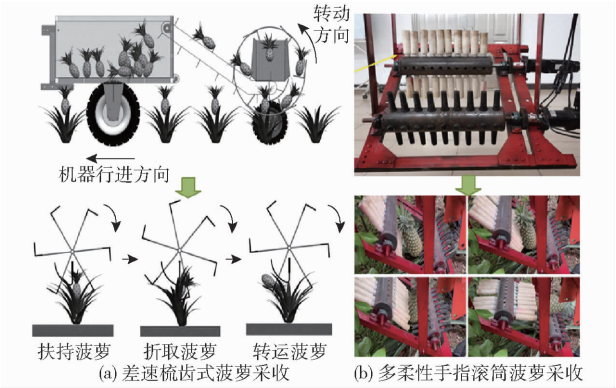


图 12 夹持切割一体式执行器

Fig. 12 Clamping and cutting integrated actuator

1. 传动电机 2. 固定板 3. 滚动轴承 4. 传动轴 5. 夹具支撑杆 6. 锯片 7. 锯片电机 8. 固定架 9. 固定支架 10. 轴承 11. 传动轴 12. 轴 13. 传动电机

过程,田间试验表明,梳齿数量为 6 个、转速为 15 r/min 时,采摘率最高可达 85.4%[102]。此外,华南农业大学研发的多柔性手指滚筒菠萝采收装置,通过柔性手指的配合,成功率达到 78%,果实损伤率为 8%[72]。图 13 为不同的菠萝采收方式。



(a) 差速梳齿式菠萝采收 (b) 多柔性手指滚筒菠萝采收

图 13 菠萝不同采摘方式

Fig. 13 Different pineapple picking methods

针对菠萝的生长特殊性,其他研究者提出了径

向夹持与轴向夹持两种方式。图 14 综合展示了现有的自动化与半自动的菠萝采摘过程。吴沛晟等[103]设计的径向夹持装置使用伺服电机进行夹紧和扭转，尽管采摘成功率为 87%，但采摘单次时间较长(36.3 s)，效率仍有提升空间。姜涛等[104]设计的径向包裹式末端执行器能够有效减小果实损伤，但由于整体结构较大，可能会对菠萝植株造成损伤。傅旻等[105]设计的轴向夹持装置提高了采摘效率，然而该装置的实验仅在室内进行，实际果园中的效果和损伤程度仍需验证。刘天湖等[106]通过力学分析设计了一种链喂入摘辊与柔性杆联合拨断式菠萝采摘装置，对菠萝采摘成功率为 82%，损伤率为 34.14%。马兴灶等[107]基于菠萝的物性特征和生长特点，设计一种二指轴向夹持的菠萝采收机械爪，人操作仅需 31.7 N 握力可实现果实夹持和分离。DU 等[108]设计一种带压力传感器二指轴向夹持的菠萝采收装置，试验表明平均采收时间为 14.76 s，果实损伤率为 5%，植株损伤率为 0%，落果率为 1.7%。但该装置开口大小是固定的，工作效率会因为果实的大小而改变。

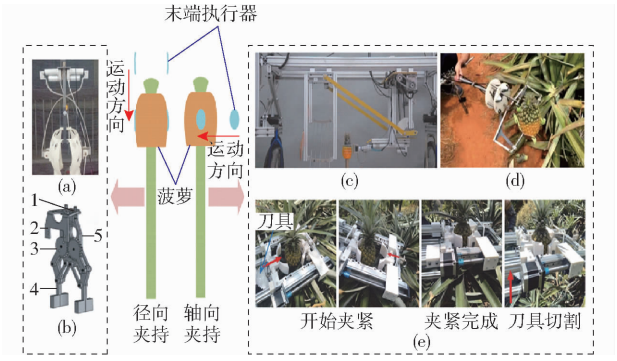


图 14　菠萝采摘的不同过程

Fig. 14　Different processes of pineapple picking

1. 伺服电机连接段　2. 伺服电机底座　3. 齿轮连杆　4. 夹具　5. 安装底座

(4)具有柔性夹持吸附采摘方式

柑橘外表硬度适中，相对荔枝能够承载吸附力，但相对菠萝则需要更为柔性的抓取力，对于咬合式末端执行器较为常见[109-110]。王毅等[111]基于仿生学原理，设计了一种模仿蛇嘴结构的咬合式柑橘采摘末端执行器，这种装置适用于果径 40～88 mm 的果实，成功率为 87.5%。然而，由于其尺寸较大，常与树枝或其他障碍物碰撞，且有可能将树枝与果实一同夹取。针对柑橘自动化采摘末端执行器剪切果柄难度大这一问题，马锃宏等[112]设计了一种采用球形闭合进行咬合剪切果柄的柑橘采摘末端执行器，对直径小于等于 4 mm 的柑橘果柄采摘断柄成功率达 95%。

为了提高果实的采摘准确性，肖旭[113]基于柑橘的生长特性设计了三指夹持式柑橘采摘末端执行器，采用柔性材料的三指对不同尺寸的果实进行稳定夹持，然后通过切割机构完成果实的切割，最佳参数下采摘成功率较高。秦雪静[114]针对柑橘的无损采摘设计了一种负压吸盘式柑橘采摘末端执行器，该末端执行器主要依靠吸盘对柑橘进行吸附，并利用气缸带动切割机构进行果柄切割，有效避免了夹持式末端执行器在夹紧过程对柑橘造成的机械损伤，但在果园的自然环境下采摘时，可能会因气压系统的不稳定性，出现由于吸附力不足导致果实掉落的问题。魏博等[115]针对不同椭圆度和尺寸柑橘的采摘需求，设计了一种三指型欠驱动式柑橘采摘末端执行器，该末端执行器采用了双连杆并联式手指设计，并结合基于电流反馈的主动柔顺控制策略实现了无损、稳定的采摘，在实验室对直径 30～100 mm 的柑橘进行模拟采摘，试验成功率为 98.3%，平均单个果实采摘时间为 5.3 s。执行器的外形如图 15 所示。

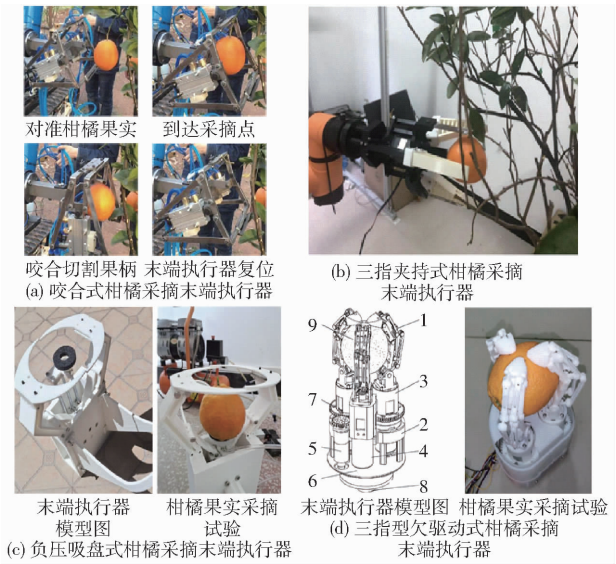


图 15　柑橘末端执行器

Fig. 15　Citrus end-effector

1. 手指组件　2. 执行器支架　3. 指根旋转机构　4. 抓握驱动电机　5. 指根旋转驱动电机　6. 执行器底板　7. 指根旋转齿轮　8. 手腕旋转机构　9. 柑橘

4　热带水果采摘技术

4.1　果园导航与路径规划

对于热带水果采摘机器人的作业，自主导航已经成为关键核心技术。自主导航包括导航关键设备的使用，如 GPS、激光雷达、视觉传感器、超声波等，对于不同设备的使用，也有不同的导航方式。窦汉杰等[28]对果园的智能化作业装备自主导航做了充分详细描述，本文不再赘述。

4.2 热带水果目标识别技术

目标识别技术是热带水果采摘中不可或缺的一环。多光谱成像技术通过在不同光谱下成像,可以捕捉到肉眼和普通相机无法识别的细节,从而提取更多的目标特征。LU 等[116]利用多光谱成像技术,在不同光照条件下有效识别柑橘果实,确保机器人在复杂环境中的作业规划。然而,由于光线的变化对多光谱成像影响较大,它在热带水果的应用中常作为辅助手段,而非主要手段。

相比之下,基于 RGB 相机的图像分割方法在热带水果识别中更为普遍。彭红星等[117]提出的双 OTSU 算法应用于荔枝分割,准确率高达 95%。ZHUANG 等[41]针对光线变化设计了自适应算法,对果园柑橘识别准确率为 88%。付根平等[118]基于阈值分割对香蕉的识别率超过 80%。尽管这些传统的图像处理方法在特定场景中具有一定可行性,但由于果园环境的复杂性和多变性,手工特征方法依旧存在显著局限,难以应对动态变化的环境。

得益于数据、算法、算力的提高,利用深度学习技术结合 RGB 图像在热带水果中的应用逐渐增多。该技术的使用可以很好地推广到真实的果园场景中,并对水果遮挡和可变光照条件具有很强的鲁棒性[119]。表 2 分析了深度学习方法目前的研究成果。尽管当前对于热带水果的识别已经取得了较好的效果,但大多数都是基于某种特定问题进行研究,仍不能涵盖农业环境的多种复杂因素,此外部分水果半遮挡或完全遮挡的采摘点位置也具有挑战性。

表 2 热带水果识别研究典型成果

Tab. 2 Research on tropical fruit recognition

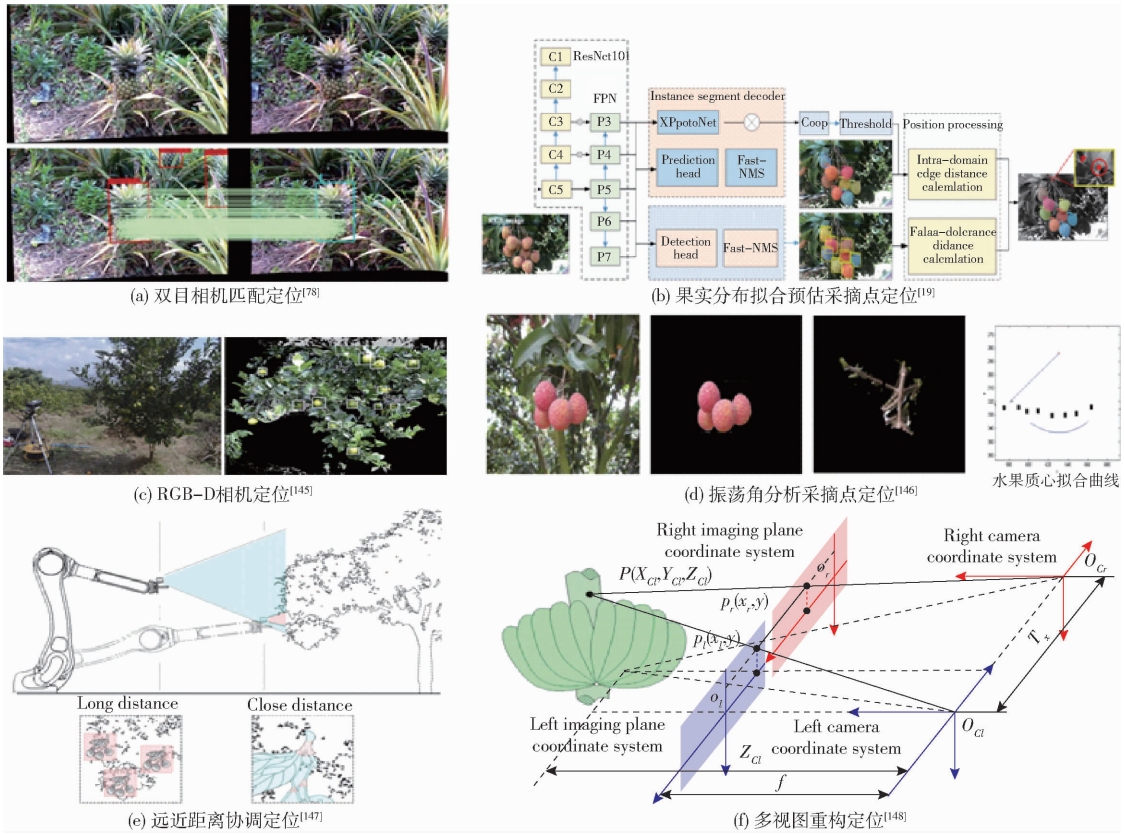
识别目标	基准模型	优化策略	性能指标	文献序号
柑橘	Faster R - CNN	多特征融合	召回率为 91%,平均精度均值为 91.55%	[42]
柑橘	FPENet	优化损失函数	平均精度为 88.92%	[120]
柑橘	YOLO v4	优化主干网络,引入注意力机制	精度为 93.45%	[121]
柑橘	YOLO v7	引入注意力机制	平均精度为 97.29%	[122]
柑橘	YOLO v5s	多特征融合;优化损失函数	召回率为 87.89%,综合评价值为 0.91,平均精度为 95.92%	[123]
柑橘	YOLO v8	数据集增强	平均精度为 80.40%,召回率为 78.2%	[124]
荔枝	YOLO v3	减少网络层深度,增加预测范围	召回率为 85.98%,综合评价值为 0.89,平均精度为 93.76%	[125]
荔枝	YOLO v3	优化兴趣区域	平均精度为 96.52%	[126]
荔枝	DeepLabv3 +	优化数据集与卷积,采用迁移学习方法	平均交并比为 0.765	[127]
荔枝	DeepLabv3 +	优化主干网络与损失函数	平均交并比为 0.902 8,平均像素精度为 94.95%	[128]
荔枝	YOLO v4	优化标签锚框	召回率为 82.5%,综合评价值为 0.85	[129]
荔枝	YOLO v7	引入注意力机制	召回率为 95.90%,平均精度均值为 98.60%	[130]
香蕉	YOLO v4	优化网络结构	平均精度均值为 92.19%	[55]
香蕉	DeepLabv3 +	结合图像处理方法	平均交并比为 0.878	[131]
香蕉	YOLO v4	优化模型参数	平均精度为 93.69%	[132]
菠萝	YOLO v5	优化模型参数	平均精度为 98%	[133]
香蕉	认知经验模型	构建专业知识库	准确率为 93.30%	[134]
菠萝	Swin - Transformer	优化数据集与网络模块	准确度为 92.54%	[135]
菠萝	YOLO v7	多特征融合	平均精度为 96.65%	[56]
菠萝	YOLO v8	优化损失函数	精度为 97.3%,召回率为 94.8%	[136]
芒果	设计端到端网络	关键点与实例分割模型	召回率为 92.9%,平均交并比为 0.947	[67]
芒果	YOLO v4	优化主干网络	平均精度均值为 96.20%,综合评价值为 0.9361	[137]
芒果	Faster R - CNN	优化交并比计算	召回率为 94.9%,综合评价值为 0.938	[138]
芒果	YOLO v3	多尺度聚合	综合评价值为 0.977	[139]
芒果	YOLO v8	结合 Transformer 稀疏注意力模块	精度为 97.6%,召回率为 94.4%	[140]
火龙果	YOLO v5	优化感兴趣区域	准确度为 94.8%	[141]
火龙果	ResNet50	优化数据集	综合评价值为 0.98	[142]
番石榴	全卷积网络	采用欧氏聚类方法	精度为 98.3%,召回率为 94.8%	[143]
番石榴	Mask R - CNN	优化主干网络	综合评价值为 0.851	[144]

4.3　热带水果空间定位策略

空间定位是实现精确采摘的关键技术，尤其是在干扰源较少的条件下，结合视觉识别和深度信息能够有效定位目标水果。LIU 等[145]利用双目立体相机在自然环境中进行菠萝的空间定位，定位误差为 24.414 mm。LIN 等[146]通过 RGB－D 相机实现了较为精确的定位，最大误差不超过 13 mm，足以满足采摘需求。

然而，果实的生长环境通常较为复杂，存在遮挡或果实与枝条交织的情况。为应对这些问题，LI 等[147]通过研究荔枝母枝的采摘点定位，发现果实轮廓边缘与枝条倾斜角之间存在显著的数学关系，成功实现了对采摘点的预测，定位准确度达到 82%。熊俊涛等[53,78]采用钟摆原理分析了荔枝母枝的振荡角度，并在有扰动的条件下完成了采摘点的定位，最大误差为 5.8 cm。

针对采摘点遮挡的情况，研究者提出了多种定位策略。WANG 等[79]通过机械臂调节 RGB－D 相机的成像角度，提升了对采摘点信息的获取，定位成功率达到 88.46%。CHEN 等[148]提出了多相机的点云拼接算法，用于提升香蕉果轴的空间三维定位精度。尽管这些技术在理论和实验室环境中取得了不错的成绩，但果园环境的不确定性、识别与定位方法的兼容性、随机误差等问题仍然存在，需要进一步研究。图 16 为定位方法示意图，这些方法为热带水果的空间提供了可借鉴的思路[19,78,145－148]。但对于热带水果采摘的空间定位策略，仍存在多种挑战，果园环境的不确定性、识别与定位方法的兼容性与容错性、随机误差等问题仍有待研究。



(a) 双目相机匹配定位[78]　(b) 果实分布拟合预估采摘点定位[19]

(c) RGB-D相机定位[145]　(d) 振荡角分析采摘点定位[146]

(e) 远近距离协调定位[147]　(f) 多视图重构定位[148]

图 16　采摘点定位策略

Fig. 16　Picking point positioning strategy

4.4　热带水果采摘避障与规划方法

在果园中，树木密集、枝叶繁茂、果实分布不均，采摘机器人的避障和路径规划面临极大挑战。LIN 等[149]针对番石榴的枝条避障研究，提出了一种基于通道和空间注意力的全卷积网络，用于分割树枝，并开发了轻量化模型[54]，有效提升了路径规划的精度。在视觉稳定识别枝条的前提下，采用基于主成分分析的方法重建果实和树枝[144]，并利用深度强化学习规划无碰撞的采摘路径，使得采摘成功率提高了 10.97%[82]。

针对柑橘果实的分割，YANG 等[150]基于 Mask R－CNN 模型开发了集成检测系统，有效检测单果、多果、树枝和树干，帮助机器人规划合适的采摘路径。图 17 为枝条分割示意图[82,144,149－150]。

LIU 等[151]进一步提出了一种时间最短的随机数探索算法，利用势场控制随机树目标偏移的概率，在仿真中成功将路径长度降低了 17.88%。TANG 等[152]提出的改进滤波器模型，优化了采摘路径规

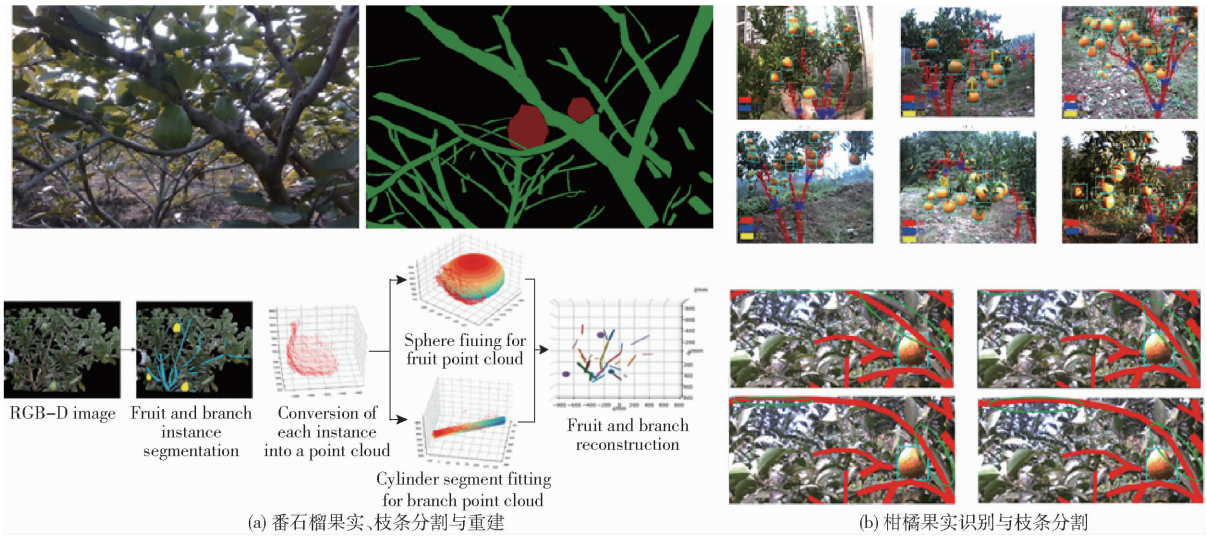


图 17 路径枝条分割

Fig. 17 Path branch segmentation

划的时间和误差。熊春源等[153]提出一种强化学习与人工势场相结合的柑橘采摘规划方法,采摘路径长度缩短了 16.20%,路径规划成功率提升了 9.67%。

此外,在荔枝采摘规划上,熊俊涛等[154]提出一种结合人工势场法的四向搜索算法。规划时间减少 93.17%,路径成本降低 36.62%,验证了所提出方法的可行性。

尽管这些路径规划方法在理论和仿真中已取得较好的成果,但在实际果园中,枝条与果实的重叠度较高,且枝叶密集时的避障定位仍是一个重要的研究难题。采摘路径规划方面,虽然已有较多仿真验证,仍需要在真实环境中进行更深入的测试和优化。

5 展望

(1)热带水果采摘机械装备研制

国内外学者在热带水果采摘末端执行器的研究上取得了显著进展,但目前仍缺乏一款适用于热带果园的整机采摘装备。现有装备在实际作业中往往只能实现局部或边缘作业,难以应对热带果园复杂的环境条件和多变的作业需求。未来的研究方向应致力于开发具有全方位作业能力的低能耗、高效率的采摘机械装备,以便满足热带水果采摘的实际需求,实现“有机可用”的目标。

(2)热带水果采摘机器人技术集成

为了提升热带水果采摘装备的自动化水平,进而提高作业效率和质量,研究人员已在果园导航、目标识别、采摘定位、路径避障和采摘规划等多个子系统进行了深入研究。未来,热带水果采摘装备应将这些智能技术整合、系统化,进而形成更加高效、智能的采摘机器人。这将有助于实现更高水平的自动化,推动热带水果采摘机器人向“有机好用”的目标发展。

(3)热带水果采摘机器人的智能化集群开发

尽管热带水果采摘机器人技术不断取得进展,但现阶段该技术尚未具备大规模推广和商业化的潜力。采摘成功率、效率和损伤率等指标仍然是衡量机器人性能的关键因素。随着技术的成熟,未来的采摘机器人将逐步发展为一机多用、多臂协同和多机协同等智能化集群作业模式。这将显著提高作业效率,并增强机器人的适应性和灵活性。

(4)热带水果采摘机器人的无人化管理

热带果园的复杂性和动态性对机器人的作业提出了较高的要求。为了实现无人化的高效管理,可以通过采集果园环境大数据,运用人工智能大模型,分析果园的数字化场景信息、作业生长信息以及机器人作业信息。在此基础上,结合 5G 网络通信和云端信息管理系统,实现对果园的精确、高效调控。未来,热带水果采摘机器人将具备更高的自主性,能够在无人化管理模式下进行高效作业。

参 考 文 献

[1] TANG Y, CHEN M, WANG C, et al. Recognition and localization methods for vision-based fruit picking robots: a review[J]. Frontiers in Plant Science, 2020,11: 510.

[2] 赵春江,范贝贝,李瑾,等. 农业机器人技术进展、挑战与趋势[J]. 智慧农业(中英文),2023,5(4): 1 – 15.
ZHAO Chunjiang, FAN Beibei, LI Jin, et al. Agricultural robots: technology progress, challenges and trends[J]. Smart Agriculture, 2023,5(4):1 – 15. (in Chinese)

[3] 王宇婷,周新,王喆,等.热带水果生产与保鲜以及加工现状[J].热带农业科学, 2023, 43(10):80 – 88.
WANG Yuting, ZHOU Xin, WANG Zhe, et al. The current situation of tropical fruit planting, preservation, and processing [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2023, 43(10):80 – 88. (in Chinese)

[4] 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.

[5] ZHOU H, WANG X, AU W, et al. Intelligent robots for fruit harvesting: recent developments and future challenges[J]. Precision Agriculture, 2022,23(5):1856 – 1907.

[6] ROSE D C, LYON J, DE B A, et al. Responsible development of autonomous robotics in agriculture[J]. Nature Food, 2021, 2(5): 306 – 309.

[7] BAC C W, VAN H 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.

[8] RUIZ M, ORTIZ J, VALERO C. Fruit and vegetables harvesting systems[J]. Production Practices and Quality Assessment of Food Crops Volume 1: Preharvest Practice, 2004,1:261 – 285.

[9] XIAO X, WANG Y, JIANG Y. Review of research advances in fruit and vegetable harvesting robots[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2024,19(1):773 – 789.

[10] HUA X, LI H, ZENG J, et al. A review of target recognition technology for fruit picking robots: from digital image processing to deep learning[J]. Applied Sciences, 2023,13(7):4160.

[11] WANG C, PAN W, ZOU T, et al. A review of perception technologies for berry fruit-picking robots: advantages, disadvantages, challenges, and prospects[J]. Agriculture, 2024,14(8):1346.

[12] LI Z, YUAN X, WANG C. 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.

[13] PHOLSIRI C, KAPOOR C, TESAR D. Manipulator task-based performance optimization [C] // International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2004,46954:1193 – 1201.

[14] FERREIRA M D, SANCHEZ A C, BRAUNBECK O A, et al. Harvesting fruits using a mobile platform: a case study applied to citrus[J]. Engenharia Agricola, 2018,38(2):293 – 299.

[15] GOULAR N D S R. Efficiency evaluation of an automated mango harvesting unit[D]. Rocky: Central Queensland University, 2023.

[16] RUKUNDIN I H, MOHAMMUD C H, RAHIM H A, et al. Field evaluation of mechanization system for large scale pineapple production on mineral soils in Malaysia[J]. CABI Databases, 2011,9:299 – 305.

[17] BAKAR B A, BAHAROM S N A, RANI R A, et al. A review of mechanization and automation in malaysia's pineapple production[J]. Advances in Agricultural and Food Research Journal, 2023,4(2):206.

[18] BACHCHE S. Deliberation on design strategies of automatic harvesting systems: a survey[J]. Robotics, 2015,4(2):194 – 222.

[19] ANH N P T, HOANG S, VAN T D, et al. Developing robotic system for harvesting pineapples[C] // 2020 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS). IEEE, 2020:39 – 44.

[20] JHALA K B, BANDHIYA R D, THORIYA H. Design and development of battery operated mango harvester[J]. Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci., 2018,7(8):1998 – 2002.

[21] MASUM H, PATI M, MAHATO S. Development of an advanced mango picker with automatic sorting facility[J]. Journal of Postharvest Technology, 2023,11(2):9 – 19.

[22] CHEN T, ZHANG S, CHEN J, et al. Development, integration, and field experiment optimization of an autonomous banana-picking robot[J]. Agriculture, 2024,14(8):1389.

[23] 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.

[24] OU F, LI Y, MIAO Z. Place recognition of large-scale unstructured orchards with attention score maps[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023,8(2):958 – 965.

[25] LIN N, ZHAO W, LIANG S, et al. Real-time segmentation of unstructured environments by combining domain generalization and attention mechanisms[J]. Sensors, 2023,23(13):6008.

[26] KANG H, WAN X. Semantic segmentation of fruits on multi-sensor fused data in natural orchards[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204:107569.

[27] 霍韩淋,邹湘军,陈燕,等.基于视觉机器人障碍点云映射避障规划及仿真[J].系统仿真学报,2024,36(9):2149 – 2158.
HUO Hanlin, ZOU Xiangjun, CHEN Yan, et al. Visual robot obstacle avoidance planning and simulation using mapped point clouds[J]. Journal of System Simulation,2024,36(9):2149 – 2158. (in Chinese)

[28] 窦汉杰,陈震宇,翟长远,等.果园智能化作业装备自主导航技术研究进展[J].农业机械学报,2024,55(4):1 – 22.
DOU Hanjie, CHEN Zhenyu, ZHAI Changyuan, et al. Research progress on autonomous navigation technology for orchard intelligent equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(4):1 – 22. (in Chinese)

[29] 吴刚,陈海平,谭乐和.中国特色热带果树产业现状及发展对策[J].热带农业科学,2014, 34(12):105 – 110.

WU Gang, CHEN Haiping, TAN Lehe. Status of tropical fruit industry in China and development countermeasures[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture,2014,34(12):105 - 110. (in Chinese)

[30] 赵国祥,李维锐. 云南热带水果产业发展趋势及对策建议[J]. 中国热带农业,2020(5):33 - 36,9.
ZHAO Guoxiang, LI Weirui. Development trend, countermeasures and suggestions on tropical fruit in Yunnan[J]. China Tropical Agriculture,2020(5):33 - 36,9. (in Chinese)

[31] 周学成,肖明玮,梁英凯,等. 基于改进 DeepLabv3 + 的火龙果园视觉导航路径识别方法[J]. 农业机械学报,2023,54(9):35 - 43.
ZHOU Xuecheng, XIAO Mingwei, LIANG Yingkai, et al. Navigation path recognition between dragon orchard using improved DeepLabv3 + network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9):35 - 43. (in Chinese)

[32] 杨尘宇. 基于深度学习的农业机器人视觉自主导航与控制研究[D]. 广州:仲恺农业工程学院,2022.
YANG Chenyu. Visual autonomous navigation of agricultural robot based on deep learning and control studies[D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2022. (in Chinese)

[33] 张振乾,李世超,李晨阳,等. 基于双目视觉的香蕉园巡检机器人导航路径提取方法[J]. 农业工程学报,2021,37(21):9 - 15.
ZHANG Zhenqian, LI Shichao, LI Chenyang, et al. Navigation path detection method for a banana orchard inspection robot based on binocular vision[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(21):9 - 15. (in Chinese)

[34] 鲍秀兰,马志涛,马萧杰,等. 丘陵果园自然环境下柑橘采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(4):124 - 135.
BAO Xiulan, MA Zhitao, MA Xiaojie, et al. Design and experiment of citrus picking robot in hilly orchard natural environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(4):124 - 135. (in Chinese)

[35] 肖珂,夏伟光,梁聪哲. 复杂背景下果园视觉导航路径提取算法[J]. 农业机械学报,2023,54(6):197 - 204,252.
XIAO Ke, XIA Weiguang, LIANG Congzhe. Visual navigation path extraction algorithm in orchard under complex background[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6):197 - 204,252. (in Chinese)

[36] LI Y, LI M, QI J, et al. Detection of typical obstacles in orchards based on deep convolutional neural network[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 181: 105932.

[37] 王红军,黄国钢,陈佳鑫,等. 香蕉采摘机械手结构设计及样机试验[J]. 机械设计,2013,30(6):13 - 17.
WANG Hongjun, HUANG Guogang, CHEN Jiaxin, et al. Structural design and prototype test for a bananas picking manipulator[J]. Journal of Machine Design,2013,30(6):13 - 17. (in Chinese)

[38] CHEN T, ZHANG R, ZHU L, et al. A method of fast segmentation for banana stalk exploited lightweight multi-feature fusion deep neural network[J]. Machines, 2021, 9(3): 66.

[39] FU L, DUAN J, ZOU X, et al. Banana detection based on color and texture features in the natural environment[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 167: 105057.

[40] 罗艾,龚桂芝,彭祝春,等. 柑橘果实大小与质量的遗传分析和数量性状位点定位[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2021,47(6):719 - 728.
LUO Ai, GONG Guizhi, PENG Zhuchun, et al. Genetic analysis and quantitative trait locus mapping of citrus fruit size and mass[J]. Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences),2021,47(6):719 - 728. (in Chinese)

[41] ZHUANG J, LUO S, HOU C, et al. Detection of orchard citrus fruits using a monocular machine vision-based method for automatic fruit picking applications[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 152: 64 - 73.

[42] ZHENG Z, XIONG J, LIN H, et al. A method of green citrus detection in natural environments using a deep convolutional neural network[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 705737.

[43] IBRAHIM M F, AHMAD S F S, ZAKARIA A, et al. In-line sorting of harumanis mango based on external quality using visible imaging[J]. Sensors, 2016, 16(11): 1753.

[44] AHMAD S F S A, IBRAHIM M F, SHAKAFF A Y M, et al. Shape and weight grading of mangoes using visible imaging[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 115: 51 - 56.

[45] 李超. 基于机器视觉的菠萝品质无损检测方法研究[D]. 广州:仲恺农业工程学院,2022.
LI Chao. Research on nondestructive testing method of pineapple quality based on machine vision[D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2022. (in Chinese)

[46] 吴东晓. 基于深度相机的果园菠萝识别和大小估计方法研究[D]. 广州:仲恺农业工程学院,2023.
WU Dongxiao. Research on orchard pineapple recognition and size estimation method based on depth calllera[D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2023. (in Chinese)

[47] 蒋志林. 荔枝机器人采摘末端执行器设计及回收放置减损策略研究[D]. 广州:华南农业大学,2017.
JIANG Zhilin. Design of end-effector of litchi picking robot and study on derogative strategy of picking-and-placing[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[48] 张跃跃,田嘉全,王文祥,等. 火龙果采摘机器人末端执行器设计与试验[J]. 林业工程学报,2023,8(4):144 - 150.
ZHANG Yueyue, TIAN Jiaquan, WANG Wenxiang, et al. Design and experiments of end-effector for dragon fruit picking robot[J]. Journal of Forestry Engineering, 2023,8(4):144 - 150. (in Chinese)

[49] 杨蕙菡,邢业苗,陈灿斌,等.不同批次火龙果果实品质分析与评价[J].中国南方果树,2023,52(5):36 – 46.
YANG Huihan, XING Yemiao, CHEN Canbin, et al. Analysis and evaluation of quality of different batches of pitaya fruits (*Hylocereus undatus*)[J]. South China Fruits,2023,52(5):36 – 46. (in Chinese)

[50] 邱珊莲,林宝妹,张少平,等.不同成熟期番石榴果实品质特征与评价[J].食品安全质量检测学报,2020,11(24):9230 – 9238.
QIU Shanlian, LIN Baomei, ZHANG Shaoping, et al. Quality characteristics and evaluation of guava fruit at different maturity stages[J]. Journal of Food Safety & Quality,2020,11(24):9230 – 9238. (in Chinese)

[51] YU L, XIONG J, FANG X, et al. A litchi fruit recognition method in a natural environment using RGB – D images[J]. Biosystems Engineering, 2021, 204: 50 – 63.

[52] ZHONG Z, XIONG J, ZHENG Z, et al. A method for litchi picking points calculation in natural environment based on main fruit bearing branch detection[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 189: 106398.

[53] 熊俊涛,邹湘军,邹海鑫,等.基于动态目标的采摘机器人视觉定位技术研究[J].系统仿真学报,2015,27(4):836 – 842.
XIONG Juntao, ZOU Xiangjun, ZOU Haixin, et al. Visual positioning technology research of picking robot based on dynamic target[J]. Journal of System Simulation, 2015,27(4):836 – 842. (in Chinese)

[54] YAO J, YU Q, DENG G, et al. A fast and accurate obstacle segmentation network for guava-harvesting robot via exploiting multi-level features[J]. Sustainability, 2022, 14(19): 12899.

[55] FU L, YANG Z, WU F, et al. YOLO-Banana: a lightweight neural network for rapid detection of banana bunches and stalks in the natural environment[J]. Agronomy, 2022, 12(2): 391.

[56] ZHANG R, HUANG Z, ZHANG Y, et al. MSGV – YOLO v7: a lightweight pineapple detection method[J]. Agriculture, 2023, 14(1): 29.

[57] 高嘉正,李文涛,罗陈迪,等.基于语义分割和几何分析的火龙果果实与枝条的三维重建[J].农业工程学报,2024,40(12):157 – 164.
GAO Jiazheng, LI Wentao, LUO Chendi, et al. Three-dimensional reconstruction for dragon fruits and branches using semantic segmentation and geometric analys[J]. Transactions of CSAE,2024,40(12):157 – 164. (in Chinese)

[58] 赵文锋,黄袁爵,钟敏悦,等.基于 OrchardYOLOP 的火龙果园多任务视觉感知方法[J].农业机械学报,2024,55(11):160 – 170.
ZHAO Wenfeng, HUANG Yuanjue, ZHONG Minyue, et al. Multi-task visual perception method in dragon orchards based on OrchardYOLOP[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(11):160 – 170. (in Chinese)

[59] LI L, ZHANG Q, HUANG D. A review of imaging techniques for plant phenotyping[J]. Sensors, 2014, 14(11): 20078 – 20111.

[60] 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.

[61] GENNERY D B. Stereo-camera calibration[C]// Proceedings ARPA IUS Workshop, 1979: 101 – 107.

[62] WOLCOTT R W, EUSTICE R M. Robust LiDAR localization using multiresolution Gaussian mixture maps for autonomous driving[J]. The International Journal of Robotics Research, 2017, 36(3): 292 – 319.

[63] CHEN T, LI H, CHEN J, et al. Detection network for multi-size and multi-target tea bud leaves in the field of view via improved YOLOv7[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 218: 108700.

[64] FU L, GAO F, WU J, et al. Application of consumer RGB – D cameras for fruit detection and localization in field: a critical review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 177: 105687.

[65] TU S, PANG J, LIU H, et al. Passion fruit detection and counting based on multiple scale faster R – CNN using RGB – D images[J]. Precision Agriculture, 2020, 21: 1072 – 1091.

[66] WANG X, KANG H, ZHOU H, et al. Geometry-aware fruit grasping estimation for robotic harvesting in apple orchards[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 193: 106716.

[67] ZHENG C, CHEN P, PANG J, et al. A mango picking vision algorithm on instance segmentation and key point detection from RGB images in an open orchard[J]. Biosystems Engineering, 2021, 206: 32 – 54.

[68] 王峻,王辉,傅杰,等.丘陵山地两段式履带行走机构的设计与试验[J].农机化研究,2023,45(9):217 – 225.
WANG Jun, WANG Hui, FU Jie, et al. Design and test of two-stage crawler walking mechanism in hilly and mountainous areas[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2023,45(9):217 – 225. (in Chinese)

[69] HUANG Z, OU C, GUO Z, et al. Human-following strategy for orchard mobile robot based on the KCF – YOLO algorithm[J]. Horticulturae, 2024, 10(4): 348.

[70] 王锋,杨玲,谢守勇,等.一种三角履带式果园动力底盘的设计与研究[J].农机化研究,2019,41(5):91 – 96.
WANG Feng, YANG Ling, XIE Shouyong, et al. Design and research of a triangular track orchard power chassis[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2019,41(5):91 – 96. (in Chinese)

[71] HUANG P, ZHU L, ZHANG Z, et al. Row end detection and headland turning control for an autonomous banana-picking robot [J]. Machines, 2021, 9(5): 103.

[72] LIU T, LIU W, ZENG T, et al. A multi-flexible-fingered roller pineapple harvesting mechanism[J]. Agriculture, 2022,

12(8): 1175.
[73] 孙景彬,曾令坤,应婧,等.农业履带底盘关键技术研究现状与展望[J].农业机械学报,2024,55(11):202 - 220.
SUN Jingbin, ZENG Lingkun, YING Jing, et al. Research status and prospect of key technologies of agricultural track chassis [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(11):202 - 220. (in Chinese)
[74] 李善军,陈辉龙,彭际博,等.丘陵山地果园全液压遥控式履带动力底盘设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(2):119 - 127,201.
LI Shanjun, CHEN Huilong, PENG Jibo, et al. Design and test of hydraulic remote control crawler power chassis for hilly and mountainous orchards[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(2):119 - 127,201. (in Chinese)
[75] 何永强,周俊,袁立存,等.基于履带式联合收获机转向特性的局部跟踪路径规划[J].农业机械学报,2022,53(11):13 - 21.
HE Yongqiang, ZHOU Jun, YUAN Licun, et al. Local tracking path planning based on steering characteristics of crawler-type combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(11):13 - 21. (in Chinese)
[76] 汪若尘,苏兆睿,丁仁凯,等.基于滑模同步控制的履带式作业机全向调平系统研究[J].农业机械学报,2024,55(4):394 - 401.
WANG Ruochen, SU Zhaorui, DING Renkai, et al. Omnidirectional leveling system of crawler machine based on sliding mode synchronous position control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(4):394 - 401. (in Chinese)
[77] 孙泽宇,夏长高,蒋俞,等.基于 QBP - PID 的履带式作业机全向调平控制研究[J].农业机械学报,2023,54(12):397 - 406.
SUN Zeyu, XIA Changgao, JIANG Yu, et al. Omnidirectional leveling control of crawler machine based on QBP - PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(12):397 - 406. (in Chinese)
[78] XIONG J, HE Z, LIN R, et al. Visual positioning technology of picking robots for dynamic litchi clusters with disturbance [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 151: 226 - 237.
[79] WANG H, LIN Y, XU X, et al. A study on long-close distance coordination control strategy for litchi picking[J]. Agronomy, 2022, 12(7): 1520.
[80] 朱立学,赖颖杰,张世昂,等.基于改进 U - Net 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 robot based on enhanced U - Net[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(11):180 - 188. (in Chinese)
[81] 李丽,梁继元,张云峰,等.基于改进 YOLOv5 的复杂环境下柑橘目标的精准检测与定位方法[J].农业机械学报, 2024,55(8):280 - 290.
LI Li, LIANG Jiyuan, ZHANG Yunfeng, et al. Accurate detection and localization method of citrus targets in complex environments based on improved YOLO v5[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(8):280 - 290. (in Chinese)
[82] 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.
[83] 陈天赐.基于深度学习的香蕉采摘机器人视觉感知与控制系统研究[D].广州:仲恺农业工程学院,2022.
CHEN Tianci. Research on visual perception and control system of banana picking robot based on deep learning [D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2022. (in Chinese)
[84] 张哲.柑橘采摘机器人采摘姿态及序列研究[D].重庆:重庆理工大学,2018.
ZHANG Zhe. Research on picking posture and sequence of citrus picking robot[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2018. (in Chinese)
[85] HE F, ZHANG Q, DENG G, et al. Research status and development trend of key technologies for pineapple harvesting equipment: a review[J]. Agriculture, 2024, 14(7): 975.
[86] LIN G, HUANG P, WANG M, et al. An inverse kinematics solution for a series-parallel hybrid banana-harvesting robot based on deep reinforcement learning[J]. Agronomy, 2022, 12(9): 2157.
[87] LI D, SUN X, LV S, et al. A novel approach for the 3D localization of branch picking points based on deep learning applied to longan harvesting UAVs[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 199: 107191.
[88] 王菲,朱叶红,刘世豪.自走式芒果采收车结构设计与分析[J].海南大学学报(自然科学版),2023,41(4):397 - 403.
WANG Fei, ZHU Yehong, LIU Shihao. Structural design and analysis of a self-propelled mango harvester[J]. Journal of Hainan University (Natural Science),2023,41(4):397 - 403. (in Chinese)
[89] 刘世豪,王菲,林茂,等.芒果采收车机械臂运动特性分析及试验[J].农业工程学报,2024,40(1):58 - 67.
LIU Shihao, WANG Fei, LIN Mao, et al. Analysis and test of the kinematics characteristics of the robotic arm for a mango harvesting vehicle[J]. Transactions of the CSAE,2024,40(1):58 - 67. (in Chinese)
[90] 林和德.弯轴荔枝龙眼采摘机械手的设计[J].现代制造技术与装备,2016(5):34 - 36.

LIN Hede. Design on the curved-axis picking manipulator for litchi and longan[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment,2016(5):34 - 36. (in Chinese)

[91] 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)

[92] WANG W, LU H, ZHANG S, et al. Damage caused by multiple impacts of litchi fruits during vibration harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 732 - 738.

[93] WANG W, LU H, MO C, et al. Experiments on the mechanical harvesting of litchi and its effects on litchi storage[J]. Transactions of the ASABE, 2017, 60(5): 1529 - 1535.

[94] LI C, LI Z, WANG T, et al. Parameter optimization of column-comb harvesting of litchi based on the EDEM[J]. Scientia Horticulturae, 2023, 321: 112216.

[95] JOHN S. Tool for cutting bananas from bunches thereof: U.S. Patent 1,514,680[P]. 1924 - 11 - 11.

[96] GUO J, DUAN J, LI J, et al. Mechanized technology research and equipment application of banana post-harvesting: a review[J]. Agronomy, 2020, 10(3): 374.

[97] 田旭峰.香蕉柔性夹持关键技术与装置研究[D].广州:仲恺农业工程学院,2019.
TIAN Xufeng. Research on key technology and device of banana flexible clamped[D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2019. (in Chinese)

[98] 段洁利,易文峰,王红军,等.香蕉串果夹持机构设计与试验[J].华南农业大学学报,2021,42(2):116 - 123.
DUAN Jieli, YI Wenfeng, WANG Hongjun, et al. Design and test of banana skewer fruit holding mechanism[J]. Journal of South China Agricultural University,2021,42(2):116 - 123. (in Chinese)

[99] 王石榴.香蕉采摘末端执行器夹持装置设计与试验[D].武汉:华中农业大学,2022.
WANG Shiliu. Design and experiment of clamping device for banana picking end-effector[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[100] 梁汉文,何万涛,郭延艳,等.香蕉采摘机器人结构设计[J].南方农机,2023,54(19):7 - 10.
LIANG Hanwen, HE Wantao, GUO Yanyan, et al. Structure design of banana picking robot[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2023,54(19):7 - 10. (in Chinese)

[101] 欧炬基,张日红,胡宏男,等.香蕉果柄夹持与切割复合执行机构设计与实验[J].机床与液压,2022,50(24):45 - 48.
OU Juji, ZHANG Rihong, HU Hongnan, et al. Design and experiment of compound actuator for banana stalk clamping and cutting[J]. Machine Tool & Hydraulics,2022,50(24):45 - 48. (in Chinese)

[102] 王宏轩,陈志轩,张秀梅,等.差速梳齿式菠萝采收机的设计及试验研究[J].农机化研究,2024,46(9):115 - 120,127.
WANG Hongxuan, CHEN Zhixuan, ZHANG Xiumei, et al. Design and experimental study of differential speed comb type pineapple harvesting machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(9): 115 - 120, 127. (in Chinese)

[103] 吴沛晟,华京.菠萝采摘机器人的实用化设计[J].兰州工业学院学报,2016,23(3):58 - 61.
WU Peisheng, HUA Jing. The practical design of pineapple-picking robots[J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2016,23(3):58 - 61. (in Chinese)

[104] 姜涛,郭安福,程学斌,等.菠萝自动采摘收集机结构设计与分析[J].工程设计学报,2019,26(5):577 - 586.
JIANG Tao, GUO Anfu, CHENG Xuebin, et al. Structural design and analysis of pineapple automatic picking-collecting machine[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2019,26(5):577 - 586. (in Chinese)

[105] 傅旻,李晨曦,郑兆启.半自动拧取式菠萝采摘收集机的设计与分析[J].工程设计学报,2020,27(4):487 - 497.
FU Wen, LI Chenxi, ZHENG Zhaoqi. Design and analysis of semi-automatic screw type pineapple picking collecting machine[J]. Chinese Journal of Engineering Design,2020,27(4):487 - 497. (in Chinese)

[106] 刘天湖,麦宝锋,张锦翀,等.链喂入摘辊与柔性杆联合拨断式菠萝采摘装置研究[J].农业机械学报,2024,55(10):116 - 125.
LIU Tianhu, MAI Baofeng, ZHANG Jinchong, et al. Design and experiment of chain feeding combined with roller and flexible rod breaking pineapple picking mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10):116 - 125. (in Chinese)

[107] 马兴灶,连海山,弓满锋,等.菠萝采摘机械手结构设计与试验[J].山东农业大学学报(自然科学版),2020,51(4):727 - 732.
MA Xingzao, LIAN Haishan, GONG Manfeng, et al. Structural design and experiment of pineapple picking manipulator[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition),2020,51(4):727 - 732. (in Chinese)

[108] DU X, YANG X, JI J, et al. Design and test of a pineapple picking end-effector[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2019, 35(6): 1045 - 1055.

[109] 李亚丽,曹中华,潘良,等.柑桔采摘机器人末端执行器设计与试验[J].中国南方果树,2024,53(1):216 - 223.
LI Yali, CAO Zhonghua, PAN Liang, et al. Design and experiment of end-effector of citrus picking robot[J]. South China Fruits,2024,53(1):216 - 223. (in Chinese)

[110] WANG Y, YANG Y, YANG C, et al. End-effector with a bite mode for harvesting citrus fruit in random stalk orientation

environment[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 157: 454 - 470.

[111] 王毅. 柑橘采摘机器人咬合式末端执行器关键技术研究[D]. 重庆:重庆大学, 2019.
WANG Yi. Research on key technology of bite-mode end-effector of citrus harvesting robot[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese)

[112] 马锃宏,余煌,谭励,等. 咬合式柑橘采摘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 Zenghong, YU Huang, TAN Li, et al. Optimization design and test of occlusal end-effector for picking citrus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(10):106 - 115,125. (in Chinese)

[113] 肖旭. 柑橘采摘机器人的采摘关键技术研究与试验[D]. 长沙:湖南农业大学,2022.
XIAO Xu. Research and experiment on picking key technology of citrus picking robot[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[114] 秦雪静. 柑橘无损采摘机构末端执行器设计[D]. 重庆:重庆三峡学院,2021.
QIN Xuejing. Design of end effector of citrus non-destructive picking mechanism[D]. Chongqing: Chongqing Three Gorges University, 2021. (in Chinese)

[115] 魏博,何金银,石阳,等. 欠驱动式柑橘采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(10):120 - 128.
WEI Bo, HE Jinyin, SHI Yang, et al. Design and experiment of underactuated end-effector for citrus picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(10):120 - 128. (in Chinese)

[116] LU Q, TANG M, CAI J. Obstacle recognition using multi-spectral imaging for citrus picking robot[C]//2011 Third Pacific-Asia Conference on Circuits, Communications and System (PACCS). IEEE, 2011: 1 - 5.

[117] 彭红星,邹湘军,陈丽娟,等. 基于双次 Otsu 算法的野外荔枝多类色彩目标快速识别[J]. 农业机械学报,2014,45(4):61 - 68,75.
PENG Hongxing, ZOU Xiangjun, CHEN Lijuan, et al. Fast recognition of multiple color targets of litchi image in field environment based on double Otsu algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 61 - 68,75. (in Chinese)

[118] 付根平,陈天赐,张世昂,等. 基于背景饱和度压缩与差异阈值分割融合的香蕉串识别[J]. 中国农机化学报,2021,42(6):151 - 158.
FU Genping, CHEN Tianci, ZHANG Shiang, et al. Bunch of bananas recognition based on background saturation compression and seqmentation & fusion with different threshold range[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021,42(6):151 - 158. (in Chinese)

[119] KOIRAL A, WALSH K, WANG Z, et al. Deep learning-method overview and review of use for fruit detection and yield estimation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 219 - 234.

[120] SUN Q, ZHONG M, CHAI X, et al. Citrus pose estimation from an RGB image for automated harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 211: 108022.

[121] XU L, WANG Y, SHI X, et al. Real-time and accurate detection of citrus in complex scenes based on HPL - YOLOv4[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 205: 107590.

[122] CHEN J, LIU H, ZHANG Y, et al. A multiscale lightweight and efficient model based on YOLOv7: applied to citrus orchard[J]. Plants, 2022, 11(23): 3260.

[123] ZHAO Y, YANG Y, XU X, et al. Precision detection of crop diseases based on improved YOLOv5 model[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 13: 1066835.

[124] JROND Z, MOUSSAID A, HADI M. Exploring end-to-end object detection with transformers versus YOLOv8 for enhanced citrus fruit detection within trees[J]. Systems and Soft Computing, 2024, 6: 200103.

[125] WANG H, DONG L, ZHOU H, et al. YOLOv3-litchi detection method of densely distributed litchi in large vision scenes[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021(1): 8883015.

[126] LIANG C, XIONG J, ZHENG Z, et al. A visual detection method for nighttime litchi fruits and fruiting stems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 169: 105192.

[127] PENG H, XUE C, SHAO Y, et al. Semantic segmentation of litchi branches using DeepLabV3 + model[J]. IEEE Access, 2020, 8: 164546 - 164555.

[128] XIE J, JIING T, CHEN B, et al. Method for segmentation of litchi branches based on the improved DeepLabv3 +[J]. Agronomy, 2022, 12(11): 2812.

[129] WU J, ZGANG S, ZOU T, et al. A dense litchi target recognition algorithm for large scenes[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 2022(1): 4648105.

[130] LI C, LIN J, LI Z, et al. An efficient detection method for litchi fruits in a natural environment based on improved YOLOv7-Litchi[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 217: 108605.

[131] WU F, YANG Z, MO X, et al. Detection and counting of banana bunches by integrating deep learning and classic image-processing algorithms[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 209: 107827.

[132] FU L, WU F, ZOU X, et al. Fast detection of banana bunches and stalks in the natural environment based on deep learning[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 194: 106800.

[133] LIU A, XIANG Y, LI Y, et al. 3D positioning method for pineapple eyes based on multiangle image stereo-matching[J]. Agriculture, 2022, 12(12): 2039.

[134] 熊俊涛,廖世盛,梁俊浩,等.基于本体与认知经验的农业机器人视觉分类决策方法[J].农业机械学报, 2023,54(2): 208 - 215.
XIONG Juntao, LIAO Shisheng, LIANG Junhao, et al. Visual classification decision-making method for agricultural robots based on ontology and cognitive experience[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2):208 - 215. (in Chinese)

[135] MENG F, LI J, ZHANG Y, et al. Transforming unmanned pineapple picking with spatio-temporal convolutional neural networks[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 214: 108298.

[136] 周涛,王骥,麦仁贵.基于改进 YOLOv8 的实时菠萝成熟度目标检测方法[J].华中农业大学学报,2024,43(5):10 - 20.
ZHOU Tao, WANG Ji, MAI Rengui. Real-time object detection method of pineapple ripeness based on improved YOLOv8 [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2024,43(5):10 - 20. (in Chinese)

[137] ARUNABHA M, JAYABBRATA B. Real-time growth stage detection model for high degree of occultation using DenseNet-fused YOLOv4[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 193: 106694.

[138] BEHERA S, RATH A, SETHY P. Fruits yield estimation using Faster R - CNN with MIoU[J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80(12): 19043 - 19056.

[139] XU Z, JIA R, SUN, et al. Light - YOLOv3: fast method for detecting green mangoes in complex scenes using picking robots [J]. Applied Intelligence, 2020, 50: 4670 - 4687.

[140] GU Z, HE D, HUANG J, et al. Simultaneous detection of fruits and fruiting stems in mango using improved YOLOv8 model deployed by edge device[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 227: 109512.

[141] LI X, WANG X, ONG P, et al. Fast recognition and counting method of dragon fruit flowers and fruits based on video stream [J]. Sensors, 2023, 23(20): 8444.

[142] KHATN T, NIROB, BISHSHASH P, et al. A comprehensive dragon fruit image dataset for detecting the maturity and quality grading of dragon fruit[J]. Data in Brief, 2024, 52: 109936.

[143] LIN G, TANG Y, ZOU X, et al. Guava detection and pose estimation using a low-cost RGB - D sensor in the field[J]. Sensors, 2019, 19(2): 428.

[144] LIN G, TANG Y, ZOU X, et al. Three-dimensional reconstruction of guava fruits and branches using instance segmentation and geometry analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 184: 106107.

[145] LIU T, NIE X, WU J, et al. Pineapple (*Ananas comosus*) fruit detection and localization in natural environment based on binocular stereo vision and improved YOLOv3 model[J]. Precision Agriculture, 2023, 24(1): 139 - 160.

[146] LIN G, TANG Y, ZOU X, et al. In-field citrus detection and localisation based on RGB - D image analysis[J]. Biosystems Engineering, 2019, 186: 34 - 44.

[147] LI Y, LIAO J, WANG J, et al. Prototype network for predicting occluded picking position based on lychee phenotypic features[J]. Agronomy, 2023, 13(9): 2435.

[148] CHEN M, TANG Y, ZOU X, et al. Three-dimensional perception of orchard banana central stock enhanced by adaptive multi-vision technology[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 174: 105508.

[149] LIN G, WANG C, XU Y, et al. Real-time guava tree-part segmentation using fully convolutional network with channel and spatial attention[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 991487.

[150] YANG C, XIONG L, WANG Z, et al. Integrated detection of citrus fruits and branches using a convolutional neural network [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 174: 105469.

[151] LIU C, FENG Q, TANG Z, et al. Motion planning of the citrus-picking manipulator based on the TO - RRT algorithm[J]. Agriculture, 2022, 12(5): 581.

[152] TANG Z, XU L, WANG Y, et al. Collision-free motion planning of a six-link manipulator used in a citrus picking robot[J]. Applied Sciences, 2021, 11(23): 11336.

[153] 熊春源,熊俊涛,杨振刚,等.基于深度强化学习的柑橘采摘机械臂路径规划方法[J].华南农业大学学报,2023, 44(3):473 - 483.
XIONG Chunyuan, XIONG Juntao, YANG Zhen'gang, et al. Path planning method for citrus picking manipulator based on deep reinforcement learning[J]. Journal of South China Agricultural University,2023,44(3):473 - 483. (in Chinese)

[154] 熊俊涛,陈浩然,姚兆燊,等.基于 PIB - RRTstar 的荔枝采摘机械臂运动规划方法[J].农业机械学报,2024,55(10):82 - 92.
XIONG Juntao, CHEN Haoran, YAO Zhaoshen, et al. Motion planning for lychee picking manipulator based on PIB - RRTstar algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(10):82 - 92. (in Chinese)