DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2025.02.005

传感器技术在水果采摘机器人中的应用现状及趋势

吕秋辉[1], 朱立学[1, 2*], 张世昂[1], 陈逸鹏[1], 毛顺[1]

(1. 仲恺农业工程学院机电工程学院,广东广州,510225;
2. 农业农村部华南果蔬绿色防控重点实验室,广东广州,510225)

摘要:目前水果采摘存在劳动力短缺、采摘效率低和作业环境复杂等问题,亟须发展具备高精度感知与自主作业能力的智能化采摘装备,以全面提升果实采摘的效率和质量。传感器技术在水果采摘机器人中的应用包括路径规划、果实识别、定位及抓取控制等关键任务环节。针对非结构化果园环境,视觉、触觉与激光传感器的协同应用可实现目标识别、位置感知与避障控制,显著提升了采摘机器人对复杂环境的适应能力与作业精度,但是现有传感器仍然存在一些技术短板,如视觉传感器易受阳光干扰、枝叶遮挡和果实密集分布等因素影响,导致目标检测困难;触觉传感器易受温湿度影响,难以量化复杂的力学反馈,因而细微抓取力控制困难;由于非结构化环境下的路径优化困难,且激光传感器成本高昂,限制了其大规模应用。同时,单一传感器存在感知维度单一、环境适应性不足和果实特征感知不足等局限,难以适应非结构化果园环境。为此,针对多传感器融合技术面临的数据异构性、时序同步性和计算复杂性等挑战,对传感器技术在水果采摘机器人的未来应用进行了展望,指出融合红外、紫外等多波段成像技术和高动态范围(high dynamic range imaging,HDR)成像技术,柔性电子皮肤结合仿生结构设计的多传感器融合技术有望得到广泛应用。

关键词:传感器技术;视觉传感器;触觉传感器;激光传感器;多传感器融合技术;农业机器人
中图分类号:S24 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-7217(2025)02-0058-11

吕秋辉, 朱立学, 张世昂, 陈逸鹏, 毛顺. 传感器技术在水果采摘机器人中的应用现状及趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2025, 6(2): 58-68
LÜ Qiuhui, ZHU Lixue, ZHANG Shi'ang, CHEN Yipeng, MAO Shun. Application status and trends of sensor technology in fruit picking robots [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2025, 6(2): 58-68

0 引言

2025年中央一号文件提出,推进农业科技力量协同攻关,以科技创新引领先进生产要素集聚,因地制宜发展农业新质生产力。当前,我国水果产业正加速向智能化转型[1]。国家统计局数据显示,2023年我国水果总产量(包括西甜瓜与园林水果)为327 442.8 kt,较2022年增加了14 480.4 kt,增幅为4.63%[2],其中广东的水果产量位居全国前列。随着农业从业者逐步减少及人口老龄化趋势的加剧,仅靠人力采摘已不能满足水果成熟集中时须快速完成采摘的需求[3]。机械化采摘可以有效减少劳动强度和提高采摘效率,有效应对人口老龄化带来的劳动力短缺难题[4]。水果采摘机器人技术主要包括果实检测识别、定位和末端执行器设计等[5]。水果采摘机器人硬件系统包括视觉系统、机械臂、控制单元、移动平台、末端执行器和电源[6],其中传感器技术的使用十分普遍。

在此背景下,水果采摘机器人作为实现果园智能化作业的重要工具,正受到广泛关注。本研究分析了视觉、触觉、激光传感器在水果采摘机器人系统中的应用,进一步探讨多传感器融合的发展趋势与挑战,旨在为水果采摘机器人的感知系统研究提供理论参考与技术借鉴。

1 视觉传感器的应用

1.1 视觉传感器技术用于果实识别定位

视觉传感器作为机器人系统中的重要组成部分,能够提供丰富的环境信息,帮助机器人实现精准的水果识别和定位,从而提高采摘效率和准确性[7]。视觉系统通常由摄像头、图像处理模块、定位设备和中央处理单元组成。常用的相机为单目相机、双目相机及深度相机等[8]。视觉传感器技术通过图像采集和处理,

收稿日期:2025-03-13 修回日期:2025-04-18
基金项目:国家自然科学基金项目(32101632);广州市科技计划项目(2023B03J0862)
第一作者:吕秋辉,男,2001年生,广东高州人,硕士研究生;研究方向为农业智能技术。E-mail: 137637519@qq.com
*通信作者:朱立学,男,1970年生,浙江三门人,博士,教授;研究方向为智能农业技术及装备。E-mail: 14660662@qq.com

将目标水果的图像转化为可识别的信息。它利用图像滤波、增强、检测等技术，提取水果的图像、坐标和姿态等数据[9]。当前主流视觉系统采用单目、双目及深度相机（如RGB-D相机）构建三维视觉感知能力，结合图像滤波、增强与特征提取算法，可精准获取果实坐标、姿态及成熟度信息。SILWAL团队[10]开发的苹果采摘机器人利用视觉传感器实现果实识别与坐标定位，验证了该技术在复杂果园环境下的可行性。LIU等[11]利用视觉传感器拍下苹果的颜色和特征进行果实识别定位监测。WU等[12]使用视觉传感器用于捕捉葡萄藤及其茎秆的图像，能够实时获取葡萄园中的葡萄藤及其环境的视觉信息。林桂潮等[13]利用深度相机捕捉菠萝所在环境的图像信息，通过图像处理技术识别菠萝的位置，并根据颜色、形状、纹理等外观特征，确保机器人能够准确区分菠萝与其他物体，从而精确找到目标果实。随着深度学习技术的渗透，基于卷积神经网络（CNN）的视觉算法进一步推动了目标检测性能的提升。DU等[14]将YOLO-MCNN用于番茄的多任务检测，包括目标定位、姿态检测和茎检测，显著提高了识别和定位的准确性。朱立学等[15]通过多尺度空洞卷积与轻量化U-Net网络优化香蕉图像分割效果如图1所示，在保证精度的同时降低计算负载，为实时处理提供了技术支撑。罗陈迪等[16]采用YOLOv7结合YCrCb颜色空间转换，有效克服了火龙果在复杂光照下的分割难题，验证了多模态图像处理策略的潜力。周佳良等[17]利用GCAM-YOLOv5方法结合佳能77D相机，在不同光照条件下也能进行火龙果的快速检测。刘畅等[18]基3C-YOLOv8n和深度相机结合实现对葡萄识别与定位。



图1　U-Net网络分割效果图

Figure 1　U-Net network segmentation effect diagram

双目视觉在水果的三维定位和图像识别中应用十分普遍。朱明秀[19]利用双目相机实现了采摘机器人对橘子的检测、定位和三维重建。王粮局[20]使用双目相机采集的图像获得草莓域的形心，从而推导出草莓域的深度信息。郭艾侠等[21]通过双目相机提供关键图像数据，结合先进的图像处理和深度学习技术，使机器视觉系统能够在复杂环境中高效、准确地完成荔枝的识别、定位和采摘任务。伍锡如等[22]设计的苹果采摘机器人，采用双目视觉系统，识别果实的正确率达到了90%，采摘的成功率达到了91.31%。张帅帅等[23]基于低成本双目相机采集数据，通过快速图像处理，实现双目视觉下番茄的检测和定位。

可见，视觉传感器利用图像滤波、增强、检测等技术提取水果的图像坐标和姿态，结合特征提取算法，可精准获取果实坐标、姿态以及成熟度信息。深度学习技术发展进一步推动了目标检测性能的提升，在保证精度的同时降低计算机负载，为实时处理提供了技术支撑，显著提升了机器人的采摘效率、准确性和智能化水平，为实现水果采摘的自动化、智能化提供了强有力的技术支持。

1.2　视觉传感器技术用于采摘机器人自主导航

在复杂的果园环境中，视觉传感器能够感知周围的障碍物和地形信息，结合路径规划算法，机器人可以据此规划出最佳行走路径，避开障碍物，顺利到达目标果实附近。深度学习在图像分类研究方面的突破性进展推动了目标视觉检测的快速发展[24]，促使许多研究人员将这些技术应用于导航路径识别。KIM等[25]开发的作物高度与边界提取技术，通过双目视觉生成果树行距数据，为导航路径规划提供了可靠输入。ZHU等[26]进一步将深度相机与DeepLabV3+网络结合，实现了火龙果果园道路的精准识别，导航精度提升至92%以上，导航路线分割效果如图2所示。MAJEED等[27]通过视觉传感器在环境感知中的应用，特别是通过语义分割技术识别苹果树干和树枝，这有助于机器人的导航和避障。GU等[28]利用双目相机捕获果树行空间关系，结合SLAM算法完成机器人自主定位，有效降低了环境复杂性对导航的干扰。韩振浩等[29]通过ZED立体相机与U-Net网络实现路径分割，在枝叶密集区域仍保持85%的避障成功率。蔡舒平等[30]使用ZED高清相机获取环境图像，为YOLOv4模型提供输入数据，实现障碍物识别与定位。许贞辉等[31]提出的树干检测与导航线拟合算法，通过实时图像处理生成最优路径，显著提升了机器人在非结构化果园中的机动性。MASUZAWA等[32]通过视觉传感器实时获取温室大棚环境信息，帮助机器人避开障碍物，规划安全路线，以确保无碰撞地完成移动任务。TANG等[33]使用单目相机结合LiDAR传感器对机器人周围的果树进行定位，以获得果树定位坐标，实现机器人自主导航。PANDA等[34]利用视觉传感器采集的农田图像数据，再结合语义分割技术提前预测和规避障碍物，确保机器人的安全运行。CHEN等[35]将视觉传感器与超声波传感器融合，通过多源数据互补优化了橙子树干距离测量精度，验证了异构传感器融合在导航中的必要性。



图 2 DeepLabV3+网络分割效果

Figure 2 DeepLabV3+ network segmentation effect

可见,视觉传感器通过使用不同类型的双目相机、深度相机和ZED立体相机,使机器人能够感知果园中的障碍物、地形和作物信息,从而规划出最佳行走路径,再结合深度学习方法进行识别路径、障碍物以及作物的高度和位置,支持机器人实现精准导航、避障和自我定位。

2 触觉传感器的应用

触觉传感器是水果采摘机器人实现精准抓取的核心组件之一,其核心功能在于实时感知末端执行器与果实接触时的力学特性(如接触力、压力分布及摩擦力),从而动态调控抓取策略,避免因施力不当导致果实损伤或采摘失败。由于水果是一种易损伤作物,采摘作业中损伤果实直接影响水果的经济价值,触觉传感和机器末端结合可以帮助机器人感知物体的表面特性、形状、硬度、柔韧性等[36]。

现有触觉传感器多基于压电效应、应变电阻或电容式原理,将力学信号转化为电信号,结合闭环控制算法实现抓取力度的实时优化。国外研究多聚焦于高精度触觉感知与柔性执行器的协同控制,通过压力传感器与实时反馈机制提升果实抓取的稳定性与柔性。MU等[37]针对猕猴桃的果实特性,在末端执行器中集成压力薄膜传感器,对末端执行器与果实接触时的压力进行实时监测,如图3所示。结果表明,该机器人平均采摘时间为4~5 s,在对240个样本进行的果园实地试验中,采摘成功率达到了94.2%,不仅显著提高了采摘效率,还实现了柔性抓取控制,显著增强了对果实的保护性能。



图 3 猕猴桃采摘机器人采摘过程

Figure 3 Picking process of a kiwifruit harvesting robot

JI等[38]采用薄膜型压力传感器实时检测抓取过程中施加于苹果的力学信号,并将数据反馈至嵌入式控制器。该控制器根据实际受力与目标值之间的误差,自动调整气动系统的输入气压,直至实现有效采摘,如图4所示。

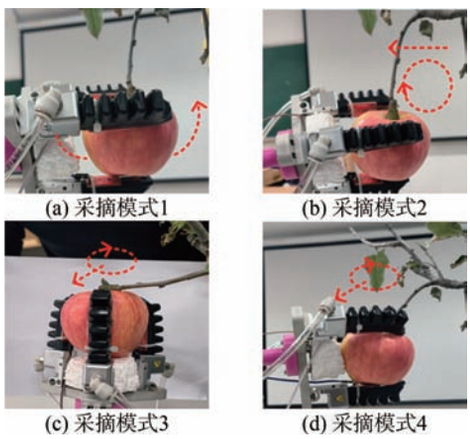


图 4 灵活的3指末端执行器的苹果采摘模式

Figure 4 Apple picking patterns of a flexible three-fingered end-effector

注:红色箭头表示施力方向。

相比之下,国内研究更注重于传感器技术与果实特性的适配性优化。王雯等[39]利用3D触觉传感器捕获猕猴桃抓取过程中的时序接触力模态,构建成熟度分级模型,使机器人可选择性采摘成熟果实,降低误采率。蒋林祥等[40]采用压力薄膜传感器监测抓取压力分布,通过动态反馈调节机械手施力如图5所示,该设计有效平衡了抓取稳定性与保护果实的需求。



图 5 机械手抓取过程

Figure 5 Manipulator gripping process

张跃跃等[41]则针对火龙果表皮特性,通过压力薄膜实时感知接触力变化,结合PID控制实现施力自调整,设计了一款咬合式椭圆轨迹末端执行器如图6所示,避免了采摘火龙果时挤压损伤。马锃宏等[42]开发的弹力体触觉传感器弥补了视觉系统在番茄姿态解析中的局限性,通过力学反馈辅助规划抓取轨迹,进一步提升了复杂场景下的采摘精度。总体来看,国外研究侧重系统化集成与精度提升,国内研究更关注果实特性适应性与结构创新,二者在技术路径上各具优势。

可见,触觉传感器通过和机器末端相结合可以帮助机器人感知物体表面特性、形状、硬度、柔韧性等,使水果采摘机器人可以精准控制抓取力度,实时感知末端执行器与果实接触时的力学特性,帮助机器人动态调整抓取策略,以适应不同水果的种类、形

状和大小的差异，有效避免水果损伤或造成不完全采摘的现象发生。

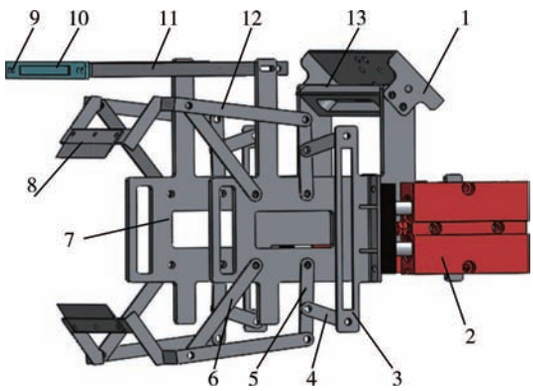


图 6　末端执行器结构示意图

Figure 6　Schematic diagram of end-effector

1. 手腕连接件　2. 双轴气缸　3. 动力传动推板　4. 连杆　5. 摇杆一　6. 摇杆二　7. 主框架板　8. 刀片　9. 压力薄膜传感器安装架　10. 压力薄膜传感器　11. 压力薄膜传感器支撑架　12. 刀片支撑架　13. 支撑铝板

3　激光传感器的应用

3.1　激光传感器在果园环境感知与导航中的应用

在复杂果园场景下，激光传感器能够穿透枝叶，生成高分辨率点云数据，辅助机器人在精准定位果实的同时实现障碍物的感知[43]。

在非结构化果园环境中，精准的环境感知与自主导航能力是采摘机器人高效作业的前提。激光传感器凭借其高分辨率距离测量与三维建图能力，为果园场景建模与路径规划提供了核心感知支撑。从研究趋势看，国外更注重SLAM算法、深度感知与高维环境建模等系统集成方法的开发，以提升机器人在GPS信号缺失或复杂地形中的自主导航性能。SHALAL等[44]提出了基于激光SLAM的定位方法，显著增强了果园环境下机器人在GPS不可用区域的作业稳定性，移动机器人架构如图7所示。VAN等[45]则利用激光散射成像技术构建高维果园环境感知模型，进一步拓展了激光技术在农业场景中的应用边界。YANG等[46]利用激光测距技术实现对草莓园环境的实时测量与动态障碍物感知，提升了机器人对复杂地形的适应能力。

而国内研究则更多聚焦于激光传感器与果园实际应用场景的深度融合，重点解决果树结构建模、动态障碍检测与路径修正等关键问题。吴德刚等[47]构建的高精度果园激光建模系统，实现了对障碍物的有效检测和机器人路径的精准规划。冯娟等[48]基于ToF原理并应用LMS211激光测距仪，为机械臂作业路径调整与目标跟踪提供了实时动态数据支持。张邦凤[49]将红外技术与激光扫描技术融合，构建果树快速识别模型，为果树精准定位与作业区分割提供了有效手段，机器人如图8所示。王立谦等[50]结合激光感知信息与PID控制策略，显著提高了系统对果树结构特征变化的响应速度与果实定位精度。张宾等[51]则在路径规划中引入环境感知算法，结合激光点云信息优化采摘路径，有效提升了作业效率与系统稳定性。

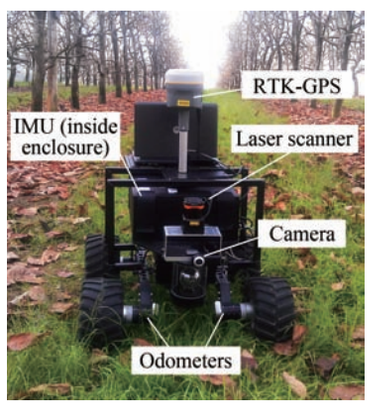


图 7　移动的机器人架构

Figure 7　Mobile robot architecture



图 8　红外线和激光扫描果树定位机器人

Figure 8　The fruit trees positioning robot of infrared and laser scanning

综上所述，国外技术路径更偏向算法驱动与系统融合，国内则以作业可靠性与感知实用性为导向，两者在不同维度上推动了激光感知技术在果园机器人导航系统中的深度发展，可见激光传感器在实现果园环境数字化建模和提高导航系统的鲁棒性方面具有不可替代的技术优势。

3.2　激光传感器在水果识别与空间定位中的应用

在水果采摘作业中，果实的精准识别与空间定位是确保抓取成功率与减少果损率的关键。激光传感器具备毫米级测距精度与良好的抗光照干扰能力，尤其适用于在低光照、强遮挡等视觉退化环境中对目标果实进行高精度感知。刘兆祥等[52]开发的基于主动三角测量原理的激光距离传感器，成功实现了苹果的三维定位，为末端执行器提供了准确的抓取姿态信息。冯青春等[53]结合反射时间差分析技术，获取番茄果串与

激光传感器之间的相对距离与姿态参数,为果串识别和稳定抓取提供关键支撑。ABEYRATHNA 等[54]提出将高精度激光深度数据与视觉传感器融合,有效弥补了后者在低光与遮挡环境中的感知盲区,实现苹果的精准定位、果园地图构建与路径引导,其中单点激光测距器原理如图 9 所示。

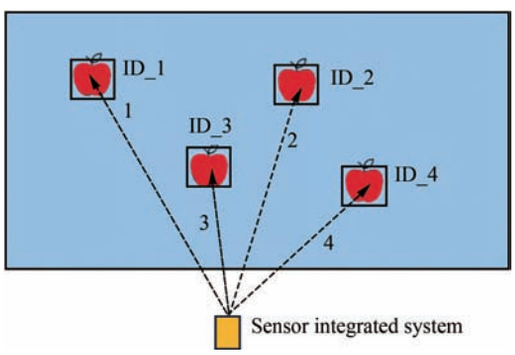


图 9 基于苹果检测的单点激光测距器工作原理

Figure 9 Principles of single-pointed laser ranger operations for the detection of apples based on apple

可见,激光传感器通过发射激光束并接收反射信号,实现对目标物体的高精度测距与三维形态重建,帮助机器人精准定位果实并实现障碍物位置感知,使水果采摘机器人能精确检测水果的位置、距离,助力机器人准确锁定采摘目标,还可以通过扫描构建环境地图,规划合理的采摘路径,避开障碍物,提升采摘效率与质量。

4 多传感器融合技术

4.1 多传感器融合技术用于水果采摘

水果采摘机器人在复杂的非结构化环境中运行,单一传感器由于数据维度有限,难以应对光照突变、遮挡等问题。因此,为了克服这些问题,多传感器融合技术通过异构数据互补与协同处理,成为突破数据维度有限、光照突变等问题的关键。多传感器融合是指使用更高级的数据处理方法将从多个传感器中获得的信息进行融合[55]。

多传感器融合技术已广泛应用于水果采摘机器人的各个功能模块中,尤其是在果实定位、末端控制及故障容错等方面表现出显著优势。张炜等[56]融合视觉、红外与激光雷达数据,利用加权融合算法优化番茄定位精度,同时通过冗余设计实现传感器故障容错。焦锐等[57]针对菠萝果茎遮挡问题,集成视觉、触觉与力觉信息,将切割点检测成功率提升至 85% 采摘机器人如图 10 所示。

刘继展等[58]设计的智能型番茄采摘机器人,采用多传感器信息融合和开放式控制,末端执行器与智能控制系统高度集成,能够根据实时数据(如力传感器、视觉传感器)自适应调节执行器的动作和抓取方式。周俊等[59]针对末端执行器容易损果的问题,设计了一款多传感器与柔性末端结合通过测得电机输出电压以及抓水果所需的角度,来计算抓水果需要的力。

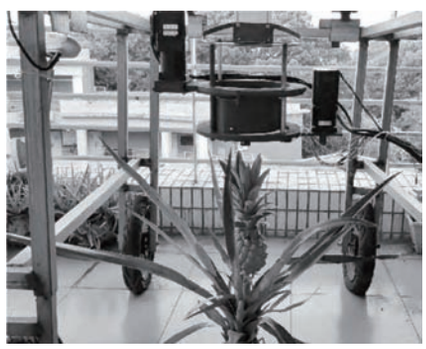


图 10 菠萝采摘机器人

Figure 10 Pineapple harvesting robot

国外研究亦在该领域取得显著进展,XIE 等[60]通过整合视觉、触觉传感器和惯性测量单元,实现果实定位、抓取力反馈与机械臂运动监测抓取过程,如图 11 所示。KANG 等[61]提出了一种基于高分辨率 LiDAR 与摄像头融合的果实定位方法,显著提升了果实定位的准确性和鲁棒性。ZHOU 等[62]则开发了一种结合深度学习算法与低成本触觉传感器的多自由度软体机械手如图 12 所示,能够在复杂环境中有效识别和抓取果实。GAO 等[63]设计了一种采摘樱桃番茄的末端执行器,其中结合了一种基于多传感器融合的动态测量系统,用于测量拣选过程中施加的力和角度。

4.2 多传感器技术在采摘机器人中的集成应用

技术层面,多传感器融合需解决数据异构性、时序同步性与计算负载三大难题。沈跃等[64]提出 LiDAR 与 IMU 紧耦合算法,通过卡尔曼滤波消除惯性测量噪声,显著提升果园机器人定位鲁棒性。魏语佳[65]结合激光雷达、视觉与 IMU 数据,构建了一种基于深度学习的跨模态特征提取框架,使 SLAM 系统在动态果园环境中的地图构建误差降低 23%。CHEN 等[66]将高负载点云配准任务卸载至云端,边缘端专注实时决策,在番茄采摘任务中实现毫秒级响应。

可见,为克服单一传感器在实际应用中感知维度单一,环境适应性不足和果实特征感知不足的局限,无法适应非结构化果园以及面临数据异构性、时序同步性及计算复杂性等问题。多传感器融合通过不断引入先进的传感技术(如深度学习、视觉传感器、激光雷达与采摘机器人的结合)可以实现环境感知对水果精准

识别定位，以及视觉导航和果实抓取，以使水果采摘机器人能够在更为复杂的非结构化环境中工作[67-69]。

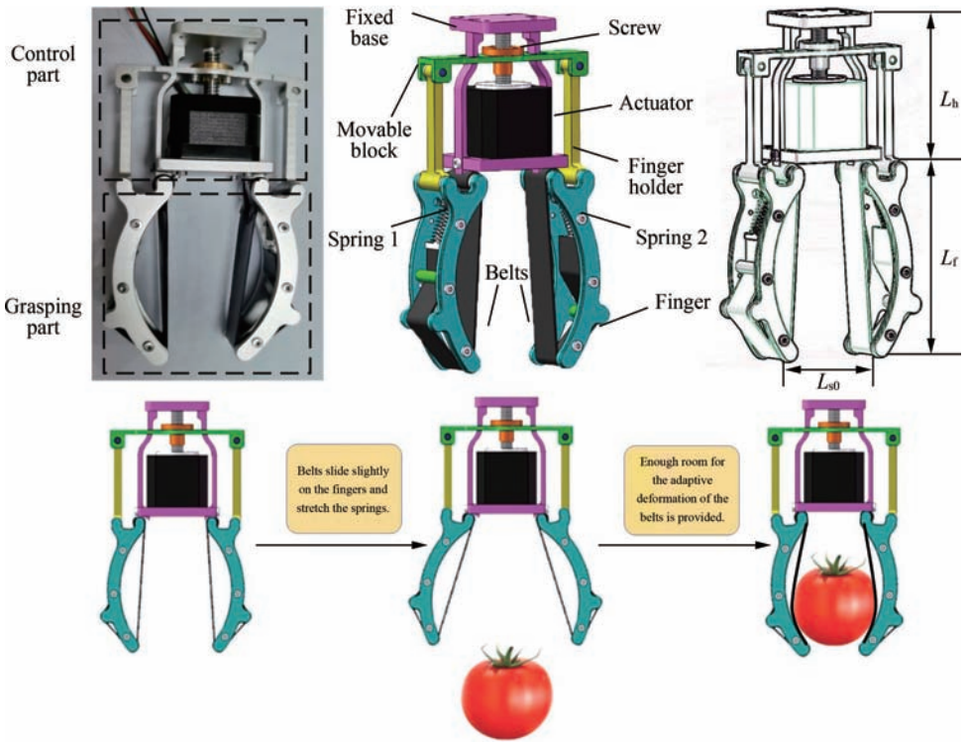


图 11　末端执行器抓取过程示意图

Figure 11　Schematic diagram of the end-effector grasping process

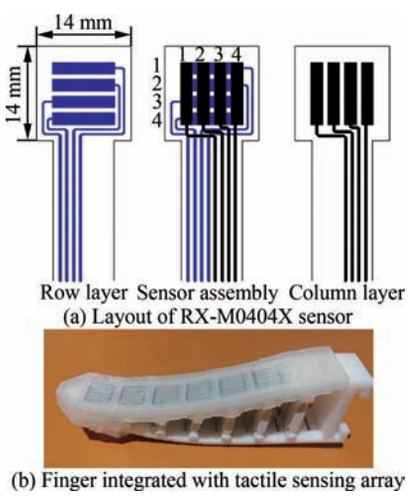


图 12　触觉传感器与柔性爪指结合

Figure 12　Integration of tactile sensors with flexible gripper fingers

5　传感器技术在水果采摘机器人应用中面临的挑战

目前，传感器技术在水果采摘等农业作业过程中的应用越来越普遍，其技术发展的精准化、智能化也在不断提升，但还存在不少问题和挑战，在水果采摘机器人中的应用可能会在 4 个方面取得突破。

1）视觉传感器作为水果采摘机器人的视觉部分，其核心挑战在于复杂果园环境的动态性与不确定性。光照条件（如强光、阴影、逆光）易导致图像过曝或欠曝，直接影响果实识别精度，枝叶遮挡、果实密集分布则加剧目标检测难度。通过结合红外、紫外等多波段成像技术和高动态范围成像技术，可以显著增强果实表面特征（如糖度分布、病害斑点）的敏感度，HDR 成像技术能够有效缓解光照不均问题，同时轻量化深度学习模型的发展也为实时处理提供了新的解决方案。

2）触觉传感器需在抓取过程中实时感知水果表面硬度、形变及摩擦力。现有压电薄膜或电容式传感器易受温湿度干扰，且难以量化复杂力学反馈。柔性电子皮肤的应用，实现三维接触力与扭矩的同步检测结合仿生结构设计，能够显著提升抓取的自适应性。力学视觉联合标定技术通过视觉预判水果的姿态与成熟度，结合触觉实时反馈接触应力，能够构建闭环控制模型，从而动态优化抓取轨迹。

3）激光传感器凭借高精度测距能力，在避障与三维建模中不可或缺，但其性能易受雨雾、尘土等环境干扰，且高昂成本制约大规模应用。低成本固态 LiDAR 的开发通过基于 MEMS 微镜或光学相控阵技术的小型化、低功耗激光模块，结合硅光子学工艺，能够有效降低制造成本。同时，多源环境补偿算法的应用，通过融合激光与毫米波雷达数据，并利用卡尔曼滤波技术消除雨雾干扰，引入迁移学习模型，能够适配不同果园

的地形特征。动态扫描策略优化依据果实分布密度自适应调整扫描频率,减少无效数据的采集,显著提升系统的能效比。

4)多传感器融合面临数据异构性、时序同步性及计算复杂性三重挑战。自适应加权融合模型基于深度强化学习,能够动态分配传感器权重。边缘—云协同架构利用5G网络将高负载计算任务(如点云配准)卸载至云端,边缘端则专注于处理关键决策任务,从而平衡系统的实时性与精度。跨模态自监督学习通过对比学习对齐不同传感器的特征空间,减少了对人工标注的依赖,同时提升了模型的泛化能力。这些创新技术的融合将为未来的智能感知系统提供更高效、灵活的解决方案。

参 考 文 献

[1] 中共中央 国务院. 中共中央 国务院关于进一步深化农村改革 扎实推进乡村全面振兴的意见[EB/OL]. (2025-01-01). https://www.gov.cn/zhengce/202502/content_7005158.htm.

[2] 张放. 2023年我国主要水果产量再创新高[J]. 中国果业信息, 2024, 41(6): 55.

[3] 曹楠楠, 张洁瑕. 我国农业机械化对农民增收贡献率实证分析[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(9): 327-332.
CAO Nannan, ZHANG Jiexia. Empirical analysis on the contribution rate of agricultural mechanization to farmers' income increase in China [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(9): 327-332.

[4] 李双双, 刘卫柏, 蒋健. 农业机械化可以解决农业劳动力短缺吗?[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(7): 316-322, 336.
LI Shuangshuang, LIU Weibai, JIANG Jian. Can agricultural mechanization solve the shortage of agricultural labor? [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(7): 316-322, 336.

[5] 张莎, 冯聪利, 赵培. 水果采摘装置的现状及发展趋势[J]. 科技创新与应用, 2019(7): 84-85.

[6] 段洁利, 王昭锐, 叶磊, 等. 水果采摘机械臂运动规划研究进展与发展趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2021, 2(2): 7-17.
DUAN Jieli, WANG Zhaorui, YE Lei, et al. Research progress and development trend of motion planning of fruit picking robot arm [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2021, 2(2): 7-17.

[7] 白克. 基于PLC和机器视觉的采摘机器人智能控制系统设计[J]. 农机化研究, 2021, 43(2): 212-216.
BAI Ke. Design of intelligent control system for picking robot based on PLC and machine vision [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43 (2): 212-216.

[8] ALATISE M B, HANCKE G P. A review on challenges of autonomous mobile robot and sensor fusion methods [J]. IEEE Access, 2020, 8: 39830-39846.

[9] 梁雨凤. 基于机器视觉的智能水果采摘机器人系统设计研究[J]. 中国设备工程, 2024(11): 34-35.

[10] SILWAL A, DAVIDSON J R, KARKEE M, et al. Design, integration, and field evaluation of a robotic apple harvester [J]. Journal of Field Robotics, 2017, 34(6): 1140-1159.

[11] LIU X Y, ZHAO D A, JIA W K, et al. A detection method for apple fruits based on color and shape features [J]. IEEE Access, 2019, 7: 67923-67933.

[12] WU Z W, XIA F, ZHOU S Y, et al. A method for identifying grape stems using keypoints [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 209: 107825.

[13] 林桂潮, 吴志铭, 严茂森, 等. 基于机器视觉的多机械臂菠萝采摘机器人设计与试验[J]. 机电工程技术, 2023, 52(10): 141-144, 154.
LIN Guichao, WU Zhiming, YAN Maosen, et al. Design and testing of a multi-arm pineapple picking robot based on machine vision [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2023, 52(10): 141-144, 154.

[14] DU X Q, MENG Z C, MA Z H, et al. Comprehensive visual information acquisition for tomato picking robot based on multitask convolutional neural network [J]. Biosystems Engineering, 2024, 238: 51-61.

[15] 朱立学, 伍荣达, 付根平, 等. 基于多尺度串联空洞卷积的轻量化UNet香蕉图像分割[J]. 农业工程学报, 2022, 38(13): 194-201.
ZHU Lixue, WU Rongda, FU Genping, et al. Segmenting banana images using the lightweight UNet of multi-scale serial dilated convolution [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(13): 194-201.

[16] 罗陈迪, 李文涛, 商枫楠, 等. 基于YOLOv7和YCrCb的火龙果识别与分割方法[J]. 农机化研究, 2025, 47(7): 59-64.
LUO Chengdi, LI Wentao, SHANG Fengnan, et al. Identification and segmentation method of dragon fruit based on YOLOv7 and YCrCb [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(7): 59-64.

[17] 周佳良, 王金鹏, 张跃跃, 等. 基于GCAM-YOLOv5的火龙果快速检测方法[J]. 林业工程学报, 2023, 8(3): 141-149.
ZHOU Jialiang, WANG Jinpeng, ZHANG Yueyue, et al. Fast detection method of dragon fruits based on GCAM-YOLOv5 [J]. Journal of Forestry Engineering, 2023, 8(3): 141-149.

[18] 刘畅, 孙雨, 杨晶, 等. 基于3C-YOLOv8n和深度相机的

葡萄识别与定位方法[J]. 智慧农业(中英文), 2024, 6(6): 121－131.
LIU Chang, SUN Yu, YANG Jing, et al. Grape recognition and localization method based on 3C-YOLOv8n and depth camera [J]. Smart Agriculture, 2024, 6(6): 121－131.

[19] 朱明秀. 采摘机器人水果检测及定位研究——基于图像处理和卷积神经网络[J]. 农机化研究, 2022, 44(4): 49－53.
ZHU Mingxiu. Research on fruit detection and location of picking robot—based on image processing and convolution neural network [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(4): 49－53.

[20] 王粮局. 基于动态识别定位的多机械手草莓收获机器人的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.

[21] 郭艾侠, 彭明明, 邢仲璟. 机器视觉技术在荔枝识别与定位研究中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(17): 218－223, 259.
GUO Aixia, PENG Mingming, XING Zhongjing. Study on recognition and positioning of Litchi based on technology of machine vision [J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(17): 218－223, 259.

[22] 伍锡如, 黄国明, 刘金霞, 等. 新型苹果采摘机器人的设计与试验[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(9): 71－79.
WU Xiru, HUANG Guoming, LIU Jinxia, et al. Design and experiment of a new type apple picking robot [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(9): 71－79.

[23] 张帅帅, 伍恩慧, 蔡奇洋, 等. 复杂背景下番茄采摘机器人双目视觉检测技术研究[A]//第十八届全国信号和智能信息处理与应用学术会议论文集[C]. 中国安徽合肥: 2024: 6.

[24] NASIRAHMADI A, STURM B, EDWARDS S, et al. Deep learning and machine vision approaches for posture detection of individual pigs [J]. Sensors, 2019, 19(17): 3738.

[25] KIM W S, LEE D H, KIM Y J, et al. Stereo-vision-based crop height estimation for agricultural robots [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 181: 105937.

[26] ZHU L X, DENG W Q, LAI Y J, et al. Research on improved road visual navigation recognition method based on DeepLabV3+ in Pitaya Orchard [J]. Agronomy, 2024, 14(6): 1119.

[27] MAJEED Y, ZHANG J, ZHANG X, et al. Apple tree trunk and branch segmentation for automatic trellis training using convolutional neural network based semantic segmentation [J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(17): 75－80.

[28] GU B X, LIU Q, GAO Y, et al. Research on relative position detection method for orchard robot based on binocular vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S1): 25－32.

[29] 韩振浩, 李佳, 苑严伟, 等. 基于U-Net网络的果园视觉导航路径识别方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 30－39.
HAN Zhenhao, LI Jia, YUAN Yanwei, et al. Path recognition of orchard visual navigation based on U-Net [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 30－39.

[30] 蔡舒平, 孙仲鸣, 刘慧, 等. 基于改进型YOLOv4的果园障碍物实时检测方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(2): 36－43.
CAI Shuping, SUN Zhongming, LIU Hui, et al. Real-time detection methodology for obstacles in orchards using improved YOLOv4 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(2): 36－43.

[31] 许贞辉, 李晓娟. 果园树干检测与导航线拟合算法研究[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(8): 217－222.
XU Zhenhui, LI Xiaojuan. Research on tree trunk detection and navigation line fitting algorithm in orchard [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(8): 217－222.

[32] MASUZAWA H, MIURA J, OISHI S. Development of a mobile robot for harvest support in greenhouse horticulture-Person following and mapping [C]// 2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII). IEEE, 2017: 541－546.

[33] TANG B, GUO Z, HUANG C, et al. A fruit-tree mapping system for semi-structured orchards based on multi-sensor-fusion SLAM [J]. IEEE Access, 2024.

[34] PANDA S K, LEE Y, JAWED M K. Agronav: Autonomous navigation framework for agricultural robots and vehicles using semantic segmentation and semantic line detection [C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2023: 6272－6281.

[35] CHEN X, ZHANG B, LUO L. Multi-feature fusion tree trunk detection and orchard mobile robot localization using camera/ultrasonic sensors [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 147: 91－108.

[36] AHANAT K, JUAN A C R, VERONIQUE P. Tactile sensing in dexterous robot hands－Review [J]. Rob. Auton. Syst, 2015, 74: 195－220.

[37] MU L, CUI G, LIU Y, et al. Design and simulation of an integrated end-effector for picking kiwifruit by robot [J].

Information Processing in Agriculture, 2020, 7(1): 58－71.

[38] 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.

[39] 王雯, 张叶清, 张静, 等. 基于采摘机器人触觉的猕猴桃成熟度感知方法[J]. 科技与创新, 2021(18): 59－60, 64－65.
WANG Wen, ZHANG Yeqing, ZHANG Jing, et al. Kiwifruit maturity perception method based on picking robot tactile sensing [J]. Science & Innovation, 2021(18): 59－60, 64－65.

[40] 蒋林祥, 贺磊盈, 马锃宏. 多传感欠驱动水果采摘机械手的设计[J]. 农机化研究, 2025, 47(1): 93－98.
JIANG Linxiang, HE Leiying, MA Zenghong. Design of an underactuated robotic hand with multi-sensor for fruit harvesting [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(1): 93－98.

[41] 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.

[42] 马锃宏, 谭励, 曾伟, 等. 基于视触觉感知的番茄尺寸和姿态解析方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 223－232.
MA Zenghong, TAN Li, ZENG Wei, et al. Analytical method and evaluation of tomato size and posture based on visual and tactile perception [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 223－232.

[43] JIMÉNEZ A R, CERES R, PONS J L. A vision system based on a laser range-finder applied to robotic fruit harvesting [J]. Machine Vision and Applications, 2000, 11: 321－329.

[44] SHALAL N J D. Orchard mapping and mobile robot localisation using on-board camera and laser scanner data fusion[D]. University of Southern Queensland, 2016.

[45] VAN BEERS R, AERNOUTS B, DE BAERDEMAEKER J, et al. Apple ripeness detection using hyperspectral laser scatter imaging [C]// Sensing Technologies for Biomaterial, Food, and Agriculture 2013. SPIE, 2013, 8881: 111－115.

[46] YANG Y, XIE H H, ZHANG K L, et al. Design, development, integration, and field evaluation of a ridge-planting strawberry harvesting robot [J]. Agriculture, 2024, 14(12): 2126.

[47] 吴德刚, 赵利平, 陈乾辉. 基于激光传感器的农业机械控制器设计[J]. 激光杂志, 2024, 45(2): 234－238.
WU Degang, ZHAO Liping, CHEN Qianhui. Design of agricultural machinery controller based on laser sensor [J]. Laser Journal, 2024, 45(2): 234－238.

[48] 冯娟, 刘刚, 司永胜, 等. 苹果采摘机器人激光视觉系统的构建[J]. 农业工程学报, 2013, 29(S1): 32－37.
FENG Juan, LIU Gang, SI Yongsheng, et al. Construction of laser vision system for apple harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(S1): 32－37.

[49] 张邦凤. 果树快速定位采摘机器人设计——基于红外和激光扫描技术[J]. 农机化研究, 2017, 39(6): 233－237.
ZHANG Bangfeng. Design for picking robot of fruit trees fast positioning—based on infrared and laser scanning technology [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(6): 233－237.

[50] 王立谦, 汪小志, 林卫国. 农业激光自动采摘定位机器人控制系统设计——基于PID控制[J]. 农机化研究, 2015, 37(9): 211－216.
WANG Liqian, WANG Xiaozhi, LIN Weiguo. Design of agricultural laser automatic picking positioning robot control system based on PID Control [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(9): 211－216.

[51] 张宾, 宿敬肖, 张微微, 等. 基于激光视觉的智能识别苹果采摘机器人设计[J]. 农机化研究, 2016, 38(7): 60－64.
ZHANG Bin, SU Jingxiao, ZHANG Weiwei, et al. Design for apple-picking robot of intelligent recognition based on laser vision [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(7): 60－64.

[52] 刘兆祥, 刘刚, 乔军. 应用于苹果采摘机器人的激光距离传感器[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2010, 31(4): 373－377.
LIU Zhaoxiang, LIU Gang, QIAO Jun. Laser ranging sensor for apple harvesting robot [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2010, 31(4): 373－377.

[53] 冯青春, 赵春江, 王晓楠, 等. 基于视觉伺服的樱桃番茄果串对靶测量方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 206－212.
FENG Qingchun, ZHAO Chunjiang, WANG Xiaonan, et al. Fruit bunch meat food for cherry tomato based on visual service [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(16): 206－212.

[54] ABEYRATHNA R M R D, NAKAGUCHI V M, LIU Z, et al. 3D camera and single-point laser sensor

integration for apple localization in spindle-type orchard systems [J]. Sensors, 2024, 24(12): 3753.

[55] ZHANG Y Y, ZHANG B, SHEN C, et al. Review of the field environmental sensing methods based on multi-sensor information fusion technology [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2024, 17(2): 1−13.

[56] 张炜, 史桐源, 沈博源, 等. 基于机器视觉与多传感器融合的智能番茄采摘机器人设计[J]. 农业技术与装备, 2024(9): 13−16, 19.
ZHANG Wei, SHI Tongyuan, SHEN Boyuan, et al. Design of intelligent tomato picking robot based on machine vision and multi sensor fusion [J]. Agricultural Technology & Equipment, 2024(9): 13−16, 19.

[57] 焦锐, 马瑞峻, 陈瑜, 等. 基于多传感器信息融合的菠萝果茎切割点位置检测方法[J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(5): 21−30.
JIAO Rui, MA Ruijun, CHEN Yu, et al. A method for detecting cutting points in fruit stem of pineapple based on fusion of multi-sensor information [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43(5): 21−30.

[58] 刘继展, 李萍萍, 李智国. 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(3): 109−112.
LIU Jizhan, LI Pingping, LI Zhiguo. Hardware design of the end effector for tomato harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008(3): 109−112.

[59] 周俊, 刘锐, 张高阳. 基于立体视觉的水果采摘机器人系统设计[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 158−162.
ZHOU Jun, LIU Rui, ZHANG Gaoyang. Fruit harvesting robot based on stereo vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 158−162.

[60] XIE Y X, ZHANG B H, ZHOU J, et al. An integrated multi-sensor network for adaptive grasping of fragile fruits: Design and feasibility tests [J]. Sensors, 2020, 20(17): 4973.

[61] KANG H W, WANG X, CHEN C. Accurate fruit localisation for robotic harvesting using high resolution lidar-camera fusion [J]. arXiv preprint arXiv: 2205.00404, 2022.

[62] ZHOU H Y, WANG X, KANG H, et al. A tactile-enabled grasping method for robotic fruit harvesting [J]. arXiv preprint arXiv: 2110.09051, 2021.

[63] GAO J, ZHANG F, ZHANG J X, et al. Picking patterns evaluation for cherry tomato robotic harvesting end-effector design [J]. Biosystems Engineering, 2024, 239: 1−12.

[64] 沈跃, 肖鑫桦, 刘慧, 等. 基于LiDAR/IMU紧耦合的林果园机器人实时定位与建图方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(11): 20−28, 48.
SHEN Yue, XIAO Xinhua, LIU Hui, et al. Real-time localization and mapping method for agricultural robot in orchards based on LiDAR/IMU tight-coupling [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 20−28, 48.

[65] 魏语佳. 面向果园环境的多传感器融合SLAM与导航研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.

[66] CHEN K, YANG J, JIANG S, et al. Multi-sensor fusion tomato picking robot localization and mapping research [J]. Journal of physics. Conference series, 2023, 2477(1): 12057.

[67] 韦慧玲, 梁成斌, 王金海, 等. 绳驱柔性机械手研究进展及其在农业机器人中的应用[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2024, 5(4): 95−106.
WEI Huiling, LIANG Chengbin, WANG Jinhai, et al. Research progress of cable-driven flexible manipulator and its application in agricultural robots [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(4): 95−106.

[68] 陈明猷, 罗陆锋, 刘威, 等. 采摘机器人全果园视觉感知及自主作业综述[J]. 智慧农业(中英文), 2024, 6(5): 20−39.
CHEN Mingyou, LUO Lufeng, LIU Wei, et al. Orchard-wide visual perception and autonomous operation of fruit picking robots: A review [J]. Smart Agriculture, 2024, 6(5): 20−39.

[69] 王延鑫, 汪小旦, 李培艺, 等. 包络式金丝皇菊采摘机械手设计与试验优化[J/OL]. 南京农业大学学报, 1−18 [2025−03−10]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1148.S.20240605.1409.006.html.
WANG Yanxin, WANG Xiaochan, LI Peiyi, et al. Design and experimental optimization of an enveloping golden chrysanthemum harvesting manipulator [J/OL]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1−18[2025−03−10]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1148.S.20240605.1409.006.html.

Application status and trends of sensor technology in fruit picking robots

LÜ Qiuhui[1], ZHU Lixue[1, 2*], ZHANG Shi'ang[1], CHEN Yipeng[1], MAO Shun[1]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhongkai Universiy of Agriculture and Engineering, Guangzhou* 510225, *China*; 2. *Key Laboratory of Green Prevention and Control on Fruits and Vegetables in South China, Guangzhou* 510225, *China*)

Abstract: Contemporary fruit harvesting operations are confronted with several challenges, including labor shortages, low picking efficiency, and complex operational environments. These factors underscore the imperative for developing intelligent harvesting equipment endowed with high-precision perception and autonomous operation capabilities to comprehensively enhance the efficiency and quality of fruit picking. Sensor technology plays a critical role in key tasks of fruit-picking robots, such as path planning, fruit recognition, localization, and grasping control. In unstructured orchard environments, the collaborative utilization of vision, tactile, and laser sensors facilitates target identification, positional awareness, and obstacle avoidance, significantly improving the robot's adaptability and operational accuracy in complex settings. However, existing sensors still have technical limitations. For example, visual sensors are susceptible to deleterious effects from ambient sunlight interference, occlusion from branches and leaves, and the dense clustering of fruits, all of which impede robust target detection. Tactile sensors often display sensitive to fluctuations in temperature and humidity, which poses challenges for the accurate quantification of complex mechanical feedback, thereby hindering precise control of gripping force. In addition, path optimization in unstructured environments remains challenge, and the high procurement cost of laser sensors limits their large-scale application. Single-sensor systems suffer from limitations such as single-dimensional perception, poor adaptability to environmental variations, and insufficient recognition of fruit characteristics, making them suboptimal for deployment in unstructured orchard conditions. Therefore, this paper explores the future applications of sensor technologies in fruit-picking robots, focusing on the challenges of multi-sensor fusion, including data heterogeneity, temporal synchronization, and computational complexity. It highlights that the integration of multi-spectral imaging technologies such as infrared and ultraviolet, high dynamic range (HDR) imaging, and flexible electronic skin combined with biomimetic structural designs in multi-sensor fusion systems holds great promise for widespread application.

Keywords: sensor technology; visual sensors; tactile sensors; laser sensors; multi-sensor fusion technology; agricultural robotics

Foundation items: National Natural Science Foundation of China(32101632); Guangzhou Science and Technology Program Project(2023B03J0862)

First Author: LÜ Qiuhui, E-mail: 137637519@qq.com

* **Correspondence Author:** ZHU Lixue, E-mail: 14660662@qq.com