

陈光明, 孔浩然, 章永年, 等. 苹果机器人采摘存在的关键问题及对策[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(6): 1709-1714.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.06.030

## 苹果机器人采摘存在的关键问题及对策

陈光明<sup>1,2</sup>, 孔浩然<sup>1</sup>, 章永年<sup>1</sup>, 李佩娟<sup>3</sup>

(1. 南京农业大学工学院, 江苏 南京 210031; 2. 江苏省智能化农业装备重点实验室, 江苏 南京 210031; 3. 南京工程学院工业中心/创新创业学院, 江苏 南京 211167)

**摘要:** 中国果园面临收获装备亟缺、劳动力成本上升等问题。目前, 苹果采摘机器人机械化、智能化水平的提高已经成为农业机械研究的主要方向之一。本文分类综述了国内外苹果采摘机器人的最新研究成果, 对其信息收集处理系统、机械系统等特点进行对比分析。此外, 本文针对苹果采摘机器人关键系统面临的难点进行探讨, 总结出如下要点: 工作环境复杂多变、目标果实识别定位困难、机械系统选型及设计困难等。最后, 本文提出构建现代果园无人化收获成套技术体系与建立示范基地的展望。由此可见, 研发一款适合本土商业化应用的苹果采摘机器人对当前苹果产业的发展有着至关重要的作用。

**关键词:** 苹果; 采摘机器人; 柔性夹爪; 移动底盘

**中图分类号:** S232.5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4440(2022)06-1709-06

## Key problems and countermeasures of apple machine picking

CHEN Guang-ming<sup>1,2</sup>, KONG Hao-ran<sup>1</sup>, ZHANG Yong-nian<sup>1</sup>, LI Pei-juan<sup>3</sup>

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Nanjing 210031, China; 3. Industrial Center, School of Innovation and Entrepreneurship, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

**Abstract:** China is faced with problems such as shortage of equipment for orchard harvesting and rising labor costs. The improvement of mechanization and intelligence level of apple picking robot has become one of the main research directions of agricultural machinery. The latest research achievements of apple picking robot at home and abroad were reviewed, and the characteristics of its information collection and processing system and mechanical system were compared and analyzed. This paper discussed the difficulties faced by the key system of apple picking robot: complicated and changeable working environment, difficult recognition and positioning of target fruit, difficult selection and design of mechanical system, etc. Countermeasures and prospects were put forward: the construction of modern unmanned orchard harvest technology system and demonstration base. The development of an apple-picking robot suitable for local commercial applications plays a vital role in the development of the current apple industry.

**Key words:** apple; picking robot; flexible gripper; mobile chassis

在世界各国推广农业机械化的历史进程中, 大多数国家都认识到果蔬采收技术的机械化水平是阻

碍农业机械化水平提高的主要障碍之一<sup>[1]</sup>。果蔬采收存在周期短、采收时期集中、工作强度高的问题, 并且采收工作量占总工作量的比例大、劳动力短缺、人工成本高等问题较多<sup>[2-3]</sup>。因此, 降低采收工作强度、提高果蔬采收效率和采收机械智能化水平, 是提高中国农业现代化水平的内在必然要求<sup>[4]</sup>。

基于电动的苹果采摘机器人关键系统组成如图

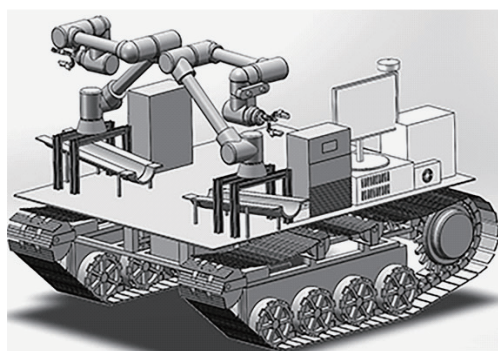
收稿日期: 2022-03-25

基金项目: 江苏省重点研发计划项目(BE2021016-5)

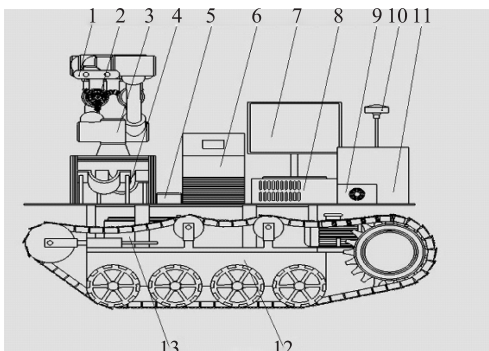
作者简介: 陈光明(1967-), 男, 江苏泰兴人, 硕士, 副教授, 研究方向为农业采摘机器人、智能化农业装备。(E-mail) 2543863714@qq.com

1 所示。一款适用于商业化要求的采摘机器人系统一般由信息采集系统、控制系统、机械系统、能源装置等组成。信息采集系统由各种传感器组成,包括相机、全球定位系统(GPS)及各种类型的传感器,主要负责收集各种信息,并将其传递给控制系统;控制系统会对各种信息进行处理分析,进而控制机械系

统进行整机和机械臂移动以及控制末端执行器进行采摘等动作;机械系统作为执行机构,完成控制系统指定的命令。本研究通过研究分析近年来国内外苹果采摘机器人的最新研究成果,对采摘机器人关键系统面临的难点进行分析,并提出相应对策。



a. 整机外观示意



b. 结构组成示意

1: 双目摄像头; 2: 柔性夹爪; 3: 协作机械臂; 4: 下果台; 5: 柔性夹爪控制箱; 6: 协作机械臂控制箱; 7: 显示器; 8: 工控机; 9: 电机驱动器; 10: 全球定位系统(GPS)天线; 11: 电气箱; 12: 履带式移动底盘; 13: 锂电池系统。

图 1 双臂式苹果采摘机器人示意图

Fig.1 Schematic diagram of double-arm apple picking robot

## 1 国内外有关苹果采摘机器人的研究进展

美国在 20 世纪 40–50 年代便实现了大田作物生产全过程的机械化,并开始进行水果生产机械化的研究。在 20 世纪 50 年代末,美国研究人员在世界范围内开始了苹果机械收获的研究,并取得了许多成果,日本、荷兰等国同样处于领先地位。然而目前国内大多数智能采摘机器人的研究仅处于设计和试验验证阶段,与大多数发达国家相比,中国农业采摘机器人的智能化程度还有很大的发展空间<sup>[5-6]</sup>。

### 1.1 国外苹果采摘机器人的研究现状

图 2 是美国一家创业公司于 2016 年开发的一款负压式苹果采摘机器人,它通过其搭载的三维扫描雷达实现自动驾驶,通过人工智能技术实现基于视觉的苹果及其质量的实时探测,使用负压式末端执行器从果树上吸取苹果,从而降低果损率,并开发了机器人自动操作软件,单果采摘耗时 2 s。然而,由于负压管道运动距离较短,因此很难从树冠内部摘取苹果。

为了解决上述机器人负压管道运动距离较短的问题,2021 年美国密歇根州立大学的 Zhang 等<sup>[7]</sup>对

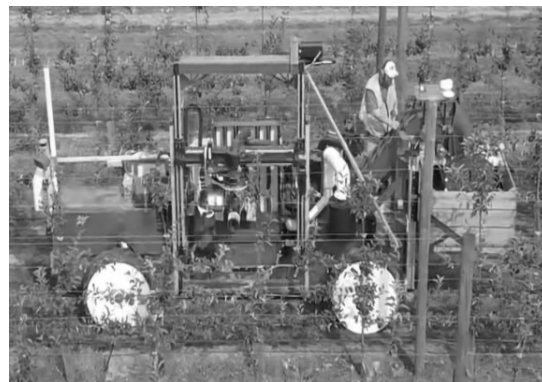


图 2 负压式苹果采摘机器人

Fig.2 Picking robot of apples based on negative pressure

机械系统进行了优化,其开发的气动式长冲程苹果采摘机器人如图 3 所示。采摘机构在云台模块的基础上增加了 1 个棱柱关节,以扩大机械手工作空间的深度,棱柱关节是 1 个行程长度为 0.61 m 的气动无杆气缸和 1 个滑块组成,气动系统由 1 台 113.56 L 的空气压缩机驱动,使采摘系统可以在 1 s 内完成整个行程;末端执行器采用直径为 0.064 m 的软硅胶真空杯,采摘时其贴合苹果以降低果实损伤率。机器人收获单个苹果的总时长为 8.8 s,在无人控制的情况下,采摘成功率为 64%<sup>[7]</sup>。目前,该机器人

仍处于试验阶段,没有配套果实收集转运系统。



图3 气动式长冲程苹果采摘机器人

Fig.3 Picking robot of apples based on pneumatic type

图4为以色列一家科技公司于2017年公布的水果收获机FFRobot,其能够将成熟、健康的苹果与其他苹果加以区分并进行精确定位。各机械手均采用3个单关节手指的结构,手指内部呈弧形并配有柔质护垫,模仿人手抓取苹果时的形态,抓取苹果后,通过扭转或旋转方式从树上摘下苹果,采摘成功率为85%。虽然机械手的运动冲程较大,能够克服普通机械手难以对树冠内部苹果进行采摘的难点,但采摘过程中容易损坏毗邻苹果<sup>[8]</sup>。



图4 FFRobot 三爪机械手苹果采摘机器人

Fig.4 Picking robot of apples based on three-claw manipulator  
FFRobot

日本农业和食品技术综合研究机构、日本立命馆大学和汽车零部件制造商日本电装公司联合于2021年公布1款全自动采摘机器人(图5),该机器人通过错位安装2个机械臂进行协同工作,单臂、单次采摘流程用时12 s,每个机械臂配备2个相机,采集数据经控制系统处理后,能够实现果实的识别定

位、采摘姿态选取、双臂防碰撞等功能,可对高度为0.8~2.0 m的苹果树等9种果树进行果实识别与采摘工作,相对于单臂采摘机器人而言可以提高工作效率。



图5 日本双机械臂果实采摘机器人

Fig.5 Japanese double-arm fruit picking robot

## 1.2 国内苹果采摘机器人的研究现状

南京农业大学顾宝兴<sup>[9]</sup>于2012年设计了1款智能水果采摘机器人(图6)。该机器人选用工业机械臂与自设计末端执行器方案,以工控机为上位机,结合机械臂、末端执行器、移动平台控制器以形成完善的控制系统,此外,通过系统搭建采摘机器人远程视频监控,开发了视觉与DGPS结合的导航系统,使得导航偏差率相对于单视觉导航与DGPS导航方式降低了30%。



图6 智能水果采摘机器人

Fig.6 Smart fruit picking robot

南京农业大学的李国利等<sup>[10]</sup>于2016年设计了1种多末端苹果采摘机器人机械手(图7),该机器人机械手通过双目相机采集传输图像,经上位机计算,在遵循“最短路径”与“主臂多动,从臂少动”原



则的基础上,对采摘点坐标进行确定和任务分配。经试验验证,相较于夹持式末端执行器,该机械手采摘单果的平均耗时减少了 22.4%,其在实验室环境下的采摘成功率为 82.14%,与单末端执行器采摘单果的平均耗时(16.1 s)相比,多末端苹果采摘机器人机械手采摘单果的平均耗时为 4.5 s,降幅达 72%<sup>[10-12]</sup>。

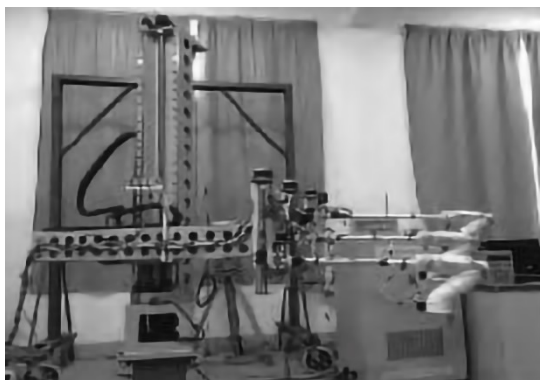


图 7 多末端苹果采摘机器人机械手

Fig.7 Manipulator of apple picking robot with multiple ends

## 2 苹果机器人采摘存在的关键问题及对策

### 2.1 机器人采摘存在的关键问题

2.1.1 工作环境复杂多变 中国苹果生产以小农户为主,种植区域集中在渤海湾、西北高原和黄河故道,这些地区的地形以山地、丘陵和高原为主,地面不平整,地势起伏较大,土壤情况复杂,气候多变,对移动底盘的爬坡能力、抗倾覆能力要求较高;种植区域行距、株距较小,且各地环境不同,导致苹果果园农艺标准差异过大<sup>[13]</sup>,使得在设计采摘机器人的过程中,不得不考虑车身尺寸、机械臂种类与工作空间广度、机械系统与能源系统成本之间的协调性问题,个性化的设计不利于商业化推广,且在多种因素限制下,采摘机器人无人化驾驶技术仍处于试验阶段。

2.1.2 复杂环境下的目标果实识别较难 果实、树枝和树叶之间相互遮挡会影响判断,加上真实工作环境下光照条件对采集图像质量造成的不确定性影响以及果实振荡等因素,均会影响苹果果实的识别、定位精度<sup>[14]</sup>。根据设计思路不同,有时还需对果

梗、果梗方向和果实质心进行识别与特征提取。以上问题对信息采集及处理系统的要求较高,虽然能够通过相应算法在一定程度上解决果实被遮挡及果梗振荡等问题,但是准确性较低,并且如果有实时性分析的要求时,则对控制系统处理器的算力要求较高。

2.1.3 机械系统末端执行器设计难度大 在多方面条件的限制下,即使换用不同机械采摘系统,采摘过程中的刚性碰撞也不可避免,导致果实、果树受损。相机参数标定、目标识别定位、机械臂运动等过程中产生的误差都会导致实际工作时末端执行器不能准确移动至目标果实处。这个问题虽然可以通过末端执行器的设计来消除误差,但增大了设计难度。

### 2.2 解决苹果机器人采摘关键问题的思路对策

2.2.1 农业采摘机器人与标准化果园农艺相结合 结合国内情况,学习国外先进果园种植方法,通过农艺手段,使苹果尽可能生长在同一垂直面上,既可以省去复杂视觉定位算法的处理过程,又能消除树冠内部果实难采摘的问题,提高采摘率,做到农业采摘机器人与标准化果园相结合。

2.2.2 模块化可重构底盘的设计 将履带式移动平台和轮式移动平台集中在一起,通过改进底盘机构,可在复杂果园与平坦道路环境中自由切换履带式与轮式底盘,以增强采摘机器人的环境适应能力,减少能量损耗,降低使用成本,提高移动底盘的使用效率。该设计具有一定的经济价值,模块化的设计便于功能模块的选择与产品使用和维护,能够提高移动底盘的使用率。

2.2.3 视觉识别和快速定位 苹果的准确识别和快速定位是提高采摘效率的基本前提和保证,不同类型视觉方案的特点如表 1 所示<sup>[15]</sup>。通过相机获取图像后,由上位机进行图像处理。传统处理图像的方法是针对识别目标物色彩与外形特征进行特征信息的分析提取工作,流程包括但不限于基于方向梯度直方图(HOG)的特征提取、基于穷举策略的区域选择和基于自适应提升(Adaboost)的分类器分类等<sup>[16]</sup>。随着基于深度学习的深度卷积神经网络(DCNN)的发展,视觉识别有了新的思路,其工作流程一般分为两类,一类是基于区域生成方法,首先由相应算法生成目标候选框,然后针对候选框内的目标进行识别分类;另一类是基于回归方法,目标定位与预测分类工作同时进行。第 1 种方法的识别成功

率高,错误率低,但工作周期长,难以满足实时工作的需求;第2种方法的识别速度快,准确性也接近第1种方法。与DCNN法相比,传统图像处理方法的复杂性更高,泛化能力差,并且后者需要足量的数据集,且对控制系统算力的要求较高。

表1 不同类型视觉方案的特点

Table 1 Features of different types of visual plans

名称	特点
单目相机	结构简单,成本低,易于标定和识别;测量尺度具有不确定性
双目相机	可以在室内、室外使用;需传感器校准;深度测量时距离和精度误差不可避免;视差计算会消耗大量计算资源
深度相机	精确测距;使用软件计算深度复杂度低;不适合室外使用;高功耗;低分辨率;受硬件质量影响较大
热成像	适应不同光照条件下的工作环境,尤其是夜间;需要进行传感器校准和大气校正;图像处理计算量大
光谱成像	可以检测到绿色或重叠苹果;成本高;处理耗时长

随着芯片技术的突破,DCNN的使用将更广泛。在现阶段,基于实时性探测需求与硬件成本考量,传统图像处理与深度学习混合探测方案已成为主流趋势之一,既能提高识别精度,又占用相对少的系统资源。

**2.2.4 采摘机械臂的选择** 目前,中国大多数采摘机器人都选择工业机械臂作为机械手系统,这样做的优点很多:能够缩短采摘机器人的研发时间;使用寿命长,定位精度高;有完整的支持程序,可以在现有程序的基础上重新处理;具有良好的转动惯量协调性,可有效提高采摘速度。但是该系统也存在成本高、功耗大、无法适应复杂多变的采摘环境等问题。相比之下,自设计机械臂虽然在一定程度上解决了工业机械臂功率过大、成本较高、工作环境适应性差的问题,但会延长开发周期,并且工作效率低于工业机械臂。

结合国内外成熟的采摘机器人,选用协作机械臂较为合适,各个机械臂分别负责不同的区域,并可有效提高采摘效率。直角坐标系机械臂适配经特定农艺处理的果园,加装可伸缩末端执行器,可进行树冠内部果实的采摘工作。现阶段,关于定点运动、直线及圆弧插补运动的控制早已趋于成熟,但在机械臂的柔顺控制、运动过程避障、相邻机械臂的防碰撞系统等方面仍有较大研发空间。

**2.2.5 末端执行器设计** 采摘效率和采摘过程中

因机械刚性碰撞引起的果实损伤率是评估采摘机器人性能的2个重要指标。末端执行器作为和苹果果实直接接触的执行机构,其结构设计和采摘动作的设计是降低果实损伤率、延长果实贮藏期最直接有效的方法。不同类型的苹果采摘端执行器的特性如表2所示。

表2 不同类型苹果采摘末端执行器的特点

Table 2 Features of end-effect of different apple picking machines

名称	特点
果梗裁剪型	果实损伤率较低;视觉识别精度要求高;果梗定位成功率低
负压吸附性	果实损伤率低;避障性较差,易受树枝阻挡
仿生气动柔性夹爪	果实损伤率最低;成本相对较高;工作效率较低;抓取速率一致性差
仿生机械刚性夹爪	扭转或旋转及拉扯采摘方式效率高;果实损伤率较高

末端执行器的设计应集成到采摘机器人的整个工作流程中。首先针对不同品种果树果梗及不同时期果实力学特性(如果实受压情况等),建立专门的机械损伤评估分类模型,并以此为依据,进行末端执行器机械结构的辅助设计<sup>[17-18]</sup>,复合式末端执行器的设计是结构设计的主流趋势,通过创新性结构拓展末端执行器的通用性,一种结构能够适应多种形状相似的果蔬品种采摘工作,从而提高末端执行器的使用频率。同时,使用柔性传感器代替刚性传感器安放于末端执行器与果实接触部位,实时进行力学数据的采集,通过多传感器融合采集相关信息以实现柔顺控制,降低果实损伤率<sup>[19-20]</sup>。

### 3 展望

苹果采摘机器人的关键系统如下:以基于GPS等导航系统进行定位移动的底盘行走机构作为“脚”,以机械臂与末端执行器作为“手”,以末端视觉识别与快速定位系统作为“眼”,以基于人工智能的总控制系统作为“脑”,以机械车体作为“身”。随着充电桩的普及,电池和驱动电机组成的新能源系统将代替内燃机作为“动力源”。与之配合工作的还有苹果收集装置与适合采摘机器人大展拳脚的智慧果园。

根据实际研发需求,重点进行现代果园无人化收获农艺-农机融合模式研究与鲜食果品高效低损采收、现场预分选分级、果箱收集转运等无人化关键

技术与装备的研发,进而构建现代果园无人化收获成套技术体系并建立示范基地,以期有效解决国内果园收获装备亟缺、劳动力成本上升等问题。

苹果采摘机器人的研发需要多领域、多学科交叉融合,涉及农艺、机械设计、电气系统、传感器、机器人视觉、深度学习、控制算法、系统集成等多方面的关键技术,研发难度大、成本高。针对国内苹果采摘机器人发展较为滞后、农艺和农机结合不紧密的现状,本研究为国内未来苹果采摘机器人各系统的设计给出优化设计方案。研制出一款适应复杂环境的高效率、低果实损伤、低成本、维护简单、功能较全且操作难度低的商用苹果采摘机器人,具有十分重要的现实意义。

### 参考文献:

- [1] 姬江涛,郑治华,杜蒙蒙,等. 农业机器人的发展现状及趋势[J]. 农机化研究, 2014, 36(2): 1-4, 9.
- [2] 李会宾,史云. 果园采摘机器人研究综述[J]. 中国农业信息, 2019, 31(6): 1-9.
- [3] 项荣,应义斌,蒋焕煜. 田间环境下果蔬采摘快速识别与定位方法研究进展[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 208-223.
- [4] 马强. 苹果采摘机器人关键技术研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2012.
- [5] 张洁,李艳文. 果蔬采摘机器人的研究现状、问题及对策[J]. 机械设计, 2010, 27(6): 1-5.
- [6] 冯启高,毛罕平. 我国农业机械化发展现状及对策[J]. 农机化研究, 2010, 32(2): 245-248.
- [7] ZHANG K X, LAMMERS K, CHU P Y, et al. System design and control of an apple harvesting robot[J]. Mechatronics, 2021, 79: 102644.
- [8] ZHANG Z, IGATHINATHANE C, LI J, et al. Technology progress in mechanical harvest of fresh market apples[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 175: 105606.
- [9] 顾宝兴. 智能移动式水果采摘机器人系统的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [10] 李国利,姬长英,顾宝兴,等. 多末端苹果采摘机器人机械手运动学分析与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 14-21, 29.
- [11] 李国利,姬长英,顾宝兴. 基于单目视觉与超声检测的振荡果实采摘识别与定位[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 1-8.
- [12] 李国利,姬长英,翟力欣. 果蔬采摘机器人末端执行器研究进展与分析[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(5): 231-236, 240.
- [13] 祝前峰,陆荣鑑,李奉顺. 苹果采摘机械的研究现状与发展趋势[J]. 林业机械与木工设备, 2021, 49(5): 4-9, 15.
- [14] 伍荣达,陈天赐,张世昂,等. 果蔬采摘机器人关键技术研究进展[J]. 机电工程技术, 2021, 50(9): 128-132.
- [15] ZHAO Y S, GONG L, HUANG Y X, et al. A review of key techniques of vision-based control for harvesting robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 311-323.
- [16] 武星,齐泽宇,王龙军,等. 基于轻量化YOLOv3卷积神经网络的苹果检测方法[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 17-25.
- [17] 徐鑫哲. 机械手抓取条件下苹果果肉应力情况研究[J]. 南方农机, 2022, 53(6): 1-5, 13.
- [18] 章永年,张任飞,孙晔,等. 局部按压对不同成熟度番茄机械损伤的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(11): 292-298.
- [19] 苗玉彬,郑家丰. 苹果采摘机器人末端执行器恒力柔顺机构研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(10): 19-25.
- [20] 徐丽明,刘旭东,张凯良,等. 脐橙采摘机器人末端执行器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 53-61.

(责任编辑:徐艳)