

序

目前，我国农业劳动力老龄化问题日益突出，城镇化进程的加速导致农业劳动力数量进一步减少，农业机器人成为解决劳动力短缺问题的关键技术。随着农业科技向智能化、无人化方向发展，农业机器人已成为全球农业装备的战略制高点和竞争焦点。我国围绕本国农业发展特点，正在加强农业机器人政策与规划布局，带动农业机器人产业进入稳定增长期。技术创新是农业机器人发展的核心动力，自主、智能、具身、协作将成为未来农业机器人的发展方向。关键技术和知识产权的自主化、核心部件的国产化也成为提高我国农业机器人国际竞争力的关键。

农业机器人种类繁多，涵盖从巡检、作物表型分析到果蔬采摘、精准除草、施药等诸多领域，其中农产品采收是农业机器人领域中的一个难点问题。基于当前农业采收机器人发展的趋势和需求，中国农业大学李伟教授团队撰写了《农业采收机器人》一书。李伟教授躬耕农业机器人三十余载，带领团队研发了国内首款黄瓜采摘机器人、智能锄草机器人等，获得多项具有自主知识产权的关键技术成果，为我国农业机器人从 0 到 1 的跨越做出卓越的贡献。该书是团队多年来在农业采收机器人方向研究成果的总结和归纳，介绍了农业采收机器人的发展趋势与挑战，围绕农业采收机器人中作业目标信息获取、采收末端执行器设计、机器人视觉伺服控制、系统集成等关键技术展开详细的论述。全书以机器视觉、深度学习、机器人伺服控制等核心算法为技术基础，以农业采收机器人末端执行器和系统集成为本体构架，内容充实，系统性、创新性、理论性强，汇聚了大量的农业机器人工程应用案例，实践性突出，是农业机器人领域不可多得的参考书，对我国农业机器人的发展和提升具有重要意义。

李伟教授是国内优秀的农业机器人科研、教学带头人，具有深厚的农业机器人研究基础与产业化实践积累。借此，期待李伟教授带领农业机器人团队再接再厉，紧扣技术前沿，持续攻克新难题，推动农业机器人实际生产的应用，促进农业机器人迈上新的台阶。同时，也期待通过该书的出版和推广，吸引更多的青年学者投身农业机器人领域，为我国农业机器人的崛起做出更多的贡献。



中国工程院院士

2026 年 1 月

前 言

从传统的农耕方式到现代化的机械作业，再到如今的农业机器人，我们正在见证一场前所未有的农业创新模式的巨变。农业机器人通过自动化、智能化技术和农业技术的融合与创新，在作物种植、畜牧养殖、水产管理及农业产销全链条中发挥着越来越重要的作用，改变了传统的农业劳动方式，提高了农民的劳动生产力，促进了现代农业的发展。在 21 世纪农业科技快速发展的浪潮中，农业机器人如同璀璨的星辰，正引领着全球农业迈向智能化的新时代。

在这样的背景下作者团队开展了农业机器人的长期研究，在农业采收机器人、设施植保机器人、大田智能锄草机器人等方面取得了可喜的成果。特别是在农业采收机器人方面，率先研发了国内的黄瓜采摘机器人、番茄采摘机器人、天然橡胶智能割胶机器人，并把番茄采摘机器人逐步推向市场。三十多年来，作者团队在农业机器人领域以科学的精神挖掘机理、以顽强的毅力破解难题、以工匠精神深入田间地头、以先行者的姿态进行产业化实践，经过研究、归纳、总结、凝练，形成这本关于农业采收机器人的专著。

本书围绕机器视觉、深度学习、机器人伺服控制等核心算法，通过番茄采摘机器人、黄瓜采摘机器人、天然橡胶智能割胶机器人等应用案例，从技术背景、信息获取、伺服控制及机器人系统集成四方面进行论述。书中内容以作者科研成果为根基，理论与实践相结合，技术剖析透彻，案例丰富，是研究团队 30 多年科研成果的结晶，可以为从事农业机器人研究和应用的科技工作者提供学术参考，对农业采收机器人的技术发展与产业促进具有重要的推动作用。

全书共 6 章。第 1 章由李伟撰写，介绍农业采收机器人的发展背景、技术构成及发展趋势与挑战。第 2 章由袁挺、李伟撰写，从信息感知的角度出发介绍农业采收机器人作业目标识别技术，阐述基于彩色空间、光谱特征、深度学习的采收目标识别理论和方法。第 3 章由袁挺、张天雪撰写，分析立体视觉、三维点云和深度学习网络模型在采收目标的空间姿态识别和三维空间定位的方法和应用。第 4 章由张俊雄撰写，介绍农业采收机器人末端执行器的设计方法和案例，突出面向农产品采收对象的末端执行器的柔性、自适应性和力反馈等特点。第 5 章由张俊雄、张天雪、魏洪兴撰写，介绍农业采收机器人的视觉伺服控制技术，阐述农业采收机器人手眼系统的构建和标定方法、基于位置和图像的视觉伺服控制理论、采收机械臂的运动规划等。第 6 章由王蓬勃、李伟撰写，介绍农业采收机器人的系统集成，包括农业采收机器人的移动底盘、导航与定位等。

与本书内容相关的研究工作得到了国家自然科学基金委员会、科技部、农业农村部等的支持，同时得到了苏州博田自动化技术有限公司、遨博(北京)智能科技股份有限公司在装备制造、产业化应用推广上给予的大力支持，在此一并表示由衷的感谢与诚挚的敬意。

本书内容汇聚了中国农业大学农业机器人创新研究中心团队全体师生多年的积累和心血，感谢团队的张春龙、张文强、谭豫之、张宾、陈英、刘景云、农克俭等老师，纪超、马锒宏、耿长兴、文永双、葛鲁振、李楠、陈子文、孙哲、杨振宇、王大帅、张顺路、张帆、高金、周航、任永新、荣佳诚、许晨光、冯青春、沈括、盛希宇、李德程、张帅辉、扶君、张凯飞、翟毅豪、郭辉、尹金亮、杨晨、饶伟杰、吕琳、解津一、杨岩等研究生，以及苏州大学的周辉、熊传成、颜嘉雯等。

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2026 年 1 月

目 录

序

前言

第 1 章 概论	1
1.1 农业采收机器人发展背景	1
1.2 农业采收机器人技术构成	3
1.2.1 移动底盘	3
1.2.2 采收机械臂	4
1.2.3 信息感知系统	5
1.2.4 末端执行器	5
1.3 农业采收机器人发展趋势与挑战	6
1.4 本书研究对象	8
参考文献	9
第 2 章 农业采收机器人作业目标识别技术	11
2.1 基于彩色空间的采收目标识别	11
2.1.1 基于颜色特征和轮廓补偿的草莓采收目标识别	11
2.1.2 基于颜色和纹理特征的黄瓜采收目标识别	18
2.2 基于光谱特征的采收目标识别	34
2.2.1 基于近红外光谱成像技术的小型西瓜采收目标识别	35
2.2.2 基于近红外光谱成像技术的黄瓜采收目标识别	44
2.3 基于深度学习的采收目标识别	55
2.3.1 基于 SSD 网络模型的小型西瓜采收目标识别	55
2.3.2 基于 CTD-YOLO 网络模型的串番茄采收目标识别	66
2.3.3 基于 YOLOv5s 网络模型的大番茄采收目标识别	84
参考文献	93
第 3 章 农业采收机器人位姿信息获取技术	94
3.1 采收目标空间姿态识别	94
3.1.1 基于二维关键点检测的番茄串姿态识别	94
3.1.2 基于三维关键点检测的番茄串姿态识别	118
3.2 采收目标采摘点定位	141
3.2.1 草莓果实采摘点定位	141

3.2.2 串番茄采摘点定位	145
参考文献	156
第4章 农业采收机器人末端执行器	158
4.1 大果番茄粒采末端执行器	158
4.1.1 大果番茄物理力学特性测试	158
4.1.2 大果番茄指式末端执行器	163
4.2 小果番茄串采末端执行器	172
4.2.1 小果番茄果梗剪切强度测试	172
4.2.2 套剪式串采末端执行器	175
4.2.3 大容差柔顺控制串采末端执行器	181
4.3 小果番茄粒采末端执行器	186
4.3.1 小果番茄物理力学特性测试	186
4.3.2 小果番茄气吸夹持复合式末端执行器	188
4.3.3 小果番茄柔性二指式末端执行器	199
4.4 天然橡胶割胶末端执行器	207
4.4.1 橡胶树割胶力学参数测试	208
4.4.2 天然橡胶铰削式末端执行器	220
4.4.3 天然橡胶平切式末端执行器	223
参考文献	229
第5章 农业采收机器人视觉伺服控制技术	232
5.1 农业采收机器人手眼系统	232
5.1.1 手眼系统分类	232
5.1.2 手眼系统标定	233
5.2 视觉伺服控制原理	240
5.2.1 基于位置的视觉伺服控制	242
5.2.2 基于图像的视觉伺服控制	243
5.2.3 混合视觉伺服控制	246
5.3 采收机器人臂运动学分析	247
5.3.1 机械臂运动学方程	247
5.3.2 机器人臂运动学方程求解	253
5.4 割胶机器人视觉伺服控制	261
5.4.1 割胶机器人作业流程	261
5.4.2 割胶机器人位置伺服信息系统	263
5.4.3 基于视觉伺服控制的起割点找准	265
5.4.4 起割点找准试验	273
5.4.5 机器人割胶精度试验	278

参考文献	282
第 6 章 农业采收机器人系统集成	284
6.1 农业采收机器人系统组成	284
6.1.1 感知与检测系统	284
6.1.2 移动底盘	287
6.1.3 动作执行系统	289
6.2 农业采收机器人移动底盘	292
6.3 农业采收机器人导航与定位	294
6.4 农业采收机器人软件系统	299
6.4.1 农业采收机器人软件架构设计核心原则	299
6.4.2 农业采收机器人软件架构	300
6.5 农业采收机器人系统案例	302
6.5.1 单果番茄采摘机器人	302
6.5.2 串番茄采摘机器人	306
6.5.3 草莓采摘机器人	311
6.5.4 天然橡胶割胶机器人	313
参考文献	316

第1章 概 论

农业采收机器人是一类典型的农业机器人,是现代农业科技发展的新生事物,也是机器人技术在农业领域应用和发展的产物。本章介绍农业采收机器人的发展背景和概况,阐述农业采收机器人的主要技术构成,分析农业采收机器人当前的发展趋势和面临的挑战,并介绍本书的具体研究对象。

1.1 农业采收机器人发展背景

我国是一个发展中的农业大国,农业问题是关系到我国经济社会发展的根本问题。在 21 世纪新的发展目标和新的挑战面前,高效的智慧农业机械将为农业发展带来新的突破口,为提高耕地利用率和农业生产效率以及降低农业生产风险提供新的发展思路。2024 年 10 月,农业农村部发布的《农业农村部关于大力发展智慧农业的指导意见》^[1]指出,智慧农业是发展现代农业的重要着力点,是建设农业强国的战略制高点。应加快技术装备研发攻关,根据轻重缓急建立重大问题清单,加快农业传感器与专用芯片、农业核心算法、农业机器人等关键核心技术研发攻关,深入推进人工智能大模型、大数据分析等技术在农业农村领域融合应用。而实施农业机器人科技创新,发展劳动强度高、适应性强、性价比高、可智能决策的新一代农业机器人,是发展智慧农业的重要内容。

农业机器人是面向农业场景,具有精准感知、自主决策、智能控制与自动执行能力的自主作业装备,属于特种机器人范畴。农业机器人是智慧农业中的重要组成部分。在信息技术、生物工程技术革新的推动下,农业正逐步进入智能化、现代化、可持续的发展阶段。特别是在人口老龄化、农业从业人员短缺,而人工智能机器人技术快速发展的双重推动下,农业机器人的发展引起了全世界的共同关注^[2]。

农业采收机器人是农业机器人最先发展的方向和形态,也是最能代表农业机器人发展水平和动态的方向之一。农业采收机器人具有巨大的应用价值和发展前景,正逐步成为现代农业技术领域的发展热点。

采收是农业生产过程中的重要一环,需要在特定时间段内完成农产品的无损采收和品质管控。农产品采收也是农业生产中最为耗费劳动力的环节之一。农产品的采收具有劳动强度大、采收工艺要求高等特点,且对采收工人的经验有较高要求。在部分农产品生产中,采收环节的用工甚至占到整个生产用工的 1/3 以上。

同时,采收环节对作业时效性要求非常高,不及时采收可能会导致农产品的败坏和减产,造成巨大的经济损失。也正因如此,采收环节成为农业机器人应用研究的先行领域。应对季节性强、费时费工、作业精度要求高的采收机器人研究成为农业机器人领域的热门课题。

农业采收机器人萌芽的初衷之一就是要解决农业劳动力不足的难题。以我国为例,农村劳动人口是从事农业生产的主要力量,但随着城市化的推进,从事农业生产的劳动人口持续减少。2010 年我国乡村常住人口中 16~59 岁劳动年龄人口规模为 4.27 亿,而到 2020 年下降至 2.85 亿,减少了近三分之一,预计未来还会进一步下降^[3]。此外,年轻人口不断流出,农村老龄化程度日益加重。农村劳动人口的进一步减少和老龄化的日益加重给农业可持续发展带来了较大挑战,如土地弃耕和劳动生产率低等问题突出。因此,推广现代农业技术和发展农业机器人是应对当前这一挑战的有效对策之一。

为使农业得到持续稳定的发展,我国早已确立科教兴农战略,技术替代资源的发展道路是 21 世纪农业发展的必然选择。大力实施精准农业,广泛应用农业机器人,提高资源利用率和农业产出率,是现代农业发展的必然趋势。

农业机器人是实现农业生产劳动中“机器人代劳”的重要手段,已成为现代农业生产的重要组成部分。农业机器人在解决劳动力不足、减轻劳动强度和提高劳动生产率等方面发挥着重要作用。

农业机器人是工业机器人技术和农业工程技术相结合、交叉孕育的产物。1968 年, Schertz 和 Brown^[4]最早提出运用机器人技术进行果蔬收获的理念被学术界认为是农业采收机器人研究的开端。但最初农业采收机器人采用的收获方式主要是机械振摇式和气动振摇式,其自动化和智能化程度不高,只能算是半自动化的收获机械;而且这种收获方式对果实损伤较大且无选择性,推广应用受到较大的限制。从 20 世纪 80 年代中期开始,美国、日本、法国、荷兰、意大利、英国、比利时、西班牙、中国等国在农业采收机器人领域开展了大量的探索和研究,采收对象涉及黄瓜^[5]、番茄^[6]、甜椒^[7]、草莓^[8]、柑橘^[9,10]、苹果^[11]、猕猴桃^[12]等多种果蔬。一些农业采收机器人也开始从实验室走进田间生产,如美国的 Root AI 公司、AppHarvest 公司以及以色列的 MetoMotion 公司的番茄采摘机器人,可以在较好的温室条件下实现番茄的采摘。

我国对农业采收机器人的研究起步晚于国外,20 世纪 90 年代中期才开始出现一些探索和尝试,但缺乏系统性的研究。经过多年的发展,已取得了一些可喜的成果,逐步研发出一些能进入田间开展作业的采收机器人。比较具有代表性的有 2009 年中国农业大学李伟教授团队研制出的国内首台黄瓜采摘机器人^[13]、2023 年北京市农林科学院智能装备技术研究中心等研制的苹果采摘机器人^[14]等。虽然我国的农业采收机器人技术起步较晚,但随着人口红利的消失,劳动力紧缺问题

已快速成为制约农业发展特别是劳动密集型果蔬产业发展的瓶颈，农业采收机器人技术已从前瞻性研究开始成为现实需求，从而进一步刺激了农业采收机器人的快速发展。在过去的十年中，我国的农业采收机器人研究进入一个蓬勃发展的时期，各种农业采收机器人如雨后春笋般涌现，和国外研究水平的差距逐渐缩小，甚至在部分关键技术上可以和发达国家并跑甚至实现领跑。

从 20 世纪 60 年代提出农业采收机器人概念至今，农业采收机器人领域的研究从纯机械式采收、半自动采收、全自动采收，逐步发展到智能采收。农业采收机器人的研究与开发虽然取得了较大的进展，但由于技术、市场和价格等因素的影响，整体仍处于实验室阶段，采收速度和采收成功率较低，对采收环境的要求过高，应用性较差，距离规模化农业生产应用还有一定的距离，商业化的进程仍较为艰难。

1.2 农业采收机器人技术构成

农业采收机器人是从工业机器人技术基础上发展起来的一种具有感知能力、能通过计算机编程实现采收作业的自动化收获系统。农业采收机器人在技术层面与其他机器人具有共通之处，都依赖传感器技术、计算机技术、人工智能技术、自动控制技术、自动导航技术，对智能识别、智能决策、智能控制有较高要求。和一般的工业机器人相似，农业采收机器人的系统构成常具有采收机械臂和末端执行器。同时，为了适应农业场景的应用，一般还具有较为复杂的信息获取系统和移动底盘。和工业机器人不同，农业采收机器人发展较晚，应用场景非结构化，采收对象复杂多样，因此其部件难以标准化，往往是根据具体的采收任务重新进行设计。

与工业机器人相比，农业采收机器人的作业具有如下两个显著特点。

(1) 作业环境具有非结构性。农业采收机器人工作在田间，对象是随着时间和空间不断变化的生物体，属于典型的非结构化环境，农业采收机器人需要在感知、推理和判断等方面具有更高的智能。

(2) 作业对象具有娇嫩性和复杂性。采收的农产品及作物本身生长差异很大，形状复杂多样，且通常软弱易伤，这大大增加了农业采收机器人的作业难度。

因此，农业采收机器人对移动底盘、采收机械臂、信息感知系统和末端执行器等方面都提出了更高的要求。

1.2.1 移动底盘

根据农业采收的特点，农业采收机器人一般具有移动机器人的形态。但是在农业种植场景中，农业采收机器人的具体形式多变，因此对移动底盘的作业稳定

性和环境适应性提出了更高的要求。农业采收机器人移动底盘的行进方式是影响其稳定性和适应能力的关键因素。常见的行进方式主要包括轮式、履带式、腿式和混合式等。其中,轮式移动底盘结构简单,行走灵活,技术成熟,控制和驱动简单,是最常见的一种形式,但是其缺点也比较明显,对复杂田间环境的适应能力较弱。履带式移动底盘主要用于相对复杂的地形,特别是不平整和地面较软的场景,对地形的适应能力更强,但其结构较轮式复杂,灵活性也稍差。腿式移动底盘是近年来逐渐兴起的一种形式,可以更好地适应大部分地形,但是其关节自由度过高,控制复杂,负载能力有限,难以实现广泛使用。混合式移动底盘具有多种移动底盘的优点,但在面对复杂地形时各行进方式的合理配合需要有稳定的结构和精确的控制算法作为支撑。除了路面行驶的移动底盘外,近年来也有一些研究者尝试把多旋翼无人机等飞行器作为农业采收机器人的移动底盘,应用于一些空中障碍较少的作业场景中。

移动底盘的作用是承载作业部件和所采收到的农产品。因此,如何实现移动底盘的稳定、精准、快速导航仍然是当前需要解决的问题。在农业环境中,作物空间分布相对不规则,农业采收机器人移动底盘自主行走所需的导航信息表达不稳定。为使农业采收机器人能够根据环境的变化自行确定行走的方向,其在障碍探测、导航信息提取等技术方面需要具备更强的能力。

根据作业环境的不同,导航的方式也有多种不同的形式。对于大田、果园等露天场所,常采用卫星导航和视觉导航的方式。对于设施农业,由于卫星信号受遮蔽严重,供底盘移动的空间也较小,其导航方式与大田、果园存在较大的差别,通常采用信标导航、惯性导航、即时定位与建图导航,以及融合定位方法。其中,依据使用的传感器不同,即时定位与建图导航可进一步划分为视觉、激光和融合三种类型。

1.2.2 采收机械臂

农业采收机器人采收机械臂工作于农业环境下,周围空间作物密布且随机分布,在满足末端执行器作业空间的前提下,为防止作业过程中与作物发生干涉,需对采收机械臂的控制以及构型优化提出更高要求。

关节型串联工业机械臂具有动作灵活、作业空间大的优点,是最为广泛应用于农业采收机器人的一类机械臂。但是考虑到采收作业空间有限,移动底盘的负载能力和稳定性也有限,往往仅能选用一些小型的工业机械臂。小型的工业机械臂其臂展较小,工作范围难以达到要求,这便形成了矛盾。近年来,协作型机械臂的兴起,很好地解决了这一矛盾,其在合适的负载下可以获得较大的工作范围,因而迅速成为农业采收机器人采收机械臂的一种主流形式。一般情况下,采用 6 自由度的关节型机械臂就可以对空间不同位姿的目标物体进行抓取。但是在农业

采收中,往往对抓取的姿态有较苛刻的要求,而且对机械臂的避障要求也很高,因此很多场合下6自由度显得捉襟见肘,更高自由度的机械臂逐渐被引入农业采收机器人的应用中来。

除了串联机械臂之外,并联机械臂和柔性机械臂在农业采收中的应用也得到了研究。由于柔性机械臂目前尚处于探索阶段,缺少商业化的产品,所以研究较少。并联机械臂相比于串联机械臂具有刚度好、响应速度快、精度高且无累积误差的优点,在苹果、蘑菇、茶叶等的采收中得到了一些应用研究。

1.2.3 信息感知系统

采收对象三维空间位姿信息是控制农业采收机器人采收运动的依据。农业环境是典型的非结构化环境,作物生长状态无法完全被人约束。采收对象周围植株交错,茎叶交叠,再加上受光照不均、风力变化等诸多不确定因素导致作业环境复杂,农业采收机器人必须能够应对这种非结构化复杂环境,实现对采收对象和环境的感知,为后续的智能决策和智能控制奠定基础。这也成为农业采收机器人面临的重大技术难题。

采收对象的信息感知技术途径是多样的,机器视觉由于具有信息采集丰富、测量准确性高等优势,是一直以来最常用的方案。在早期的研究中主要是通过机器视觉获取采收对象的空间位置信息。根据三维测距的原理不同,机器视觉又可分为双目立体视觉、结构光立体视觉和飞行时间立体视觉等。随着研究的深入,仅靠三维位置信息是难以获得良好的采收效果的,还需要更多地获取采收对象的位姿信息及采收对象周围的遮挡、障碍信息。这对信息感知系统(无论是传感器硬件还是检测软件算法)提出了新的要求。在理论上,农业采收机器人作业的空间结构复杂,由此造成的信息多义性及弱鲁棒性等都是传统的理论算法与信息感知系统难以解决的。得益于高速发展的机器学习、人工智能算法,这一难题正逐渐被攻克。实现非结构化环境下信息的准确获取,是农业采收机器人走出实验室,走向田间地头,真正代替人类从事采收作业的关键。

1.2.4 末端执行器

末端执行器是农业采收机器人直接与采收对象接触的部分。农业采收机器人作业的对象往往是外表脆弱的生物体,采收过程中不能对采收对象及农作物产生损伤,这就要求农业采收机器人的末端执行器具有较好的柔顺性和灵巧性。传统工业机器人所采用的刚性末端执行器在农业采收中难以施展。

不同采收对象的尺寸、形状、质量、表面特性等不同,对损害的敏感性也不同,特别是一些薄皮的果蔬,如葡萄、草莓、梨、番茄等,极易受到外力损伤,因此获得恰当的抓取力是具有挑战性的难题。而当抓取簇状果蔬时,如葡萄、樱桃番茄

等, 由于其密集成簇产生流变, 抓取变得更加复杂, 对末端执行器的要求更高。

研究者从不同的技术路线开展了大量的研究, 针对不同的采收对象, 分析其在农业上的采收模式, 选择适合于机器人作业的模式并加以改进。例如, 对于番茄的采收, 可以有剪切式、拉扯式、旋拧式等不同的采收模式, 其中剪切式直接对番茄的果梗进行操作, 对柔性的要求较低, 而后两种是直接接触番茄果实表面的操作, 对柔性的要求较高。同时, 无论拉扯式还是旋拧式, 根据接触果实表面的抓持形式不同又可以分为手指抓持式、真空气吸式等。

为了达到较好的柔性抓持, 研究人员尝试在刚性的抓持手指表面覆盖柔性材料, 以材料自身的变形来增大与采收对象的接触面积, 减小压强, 从而降低对采收对象的损伤, 但该方式的效果往往不尽如人意。近年来也有研究采用连续变形的柔性手指和欠驱动的多关节手指, 来增加手指对采收对象的包覆能力, 从而降低损伤, 但这也大大增加了系统整体的复杂性和生产成本。

总体来说, 农业采收任务对环境识别、目标识别、智能决策、机械臂灵活作业、底盘自主导航移动都有极高的要求。农业采收机器人是多项技术的综合体。目前, 农业采收机器人研究面临生物环境感知难、认知决策控制难、高效精准作业难和自主导航避障难等技术挑战, 需要融合传感器、机器视觉、人工智能、智能控制等新技术。由于这些新技术都尚在发展阶段, 农业采收机器人的各模块均存在亟待解决的技术问题, 农业采收机器人的整体技术仍有较大的进步空间。

1.3 农业采收机器人发展趋势与挑战

当前, 我国农业综合机械化率已超过了 70%, 但现有的农机设备主要适用于大型农场的规模化作业, 无法胜任农业生产中高精细度、高灵活度、高复杂度的作业任务。从农业现代化的角度出发, 在大型收获机械成熟运用的基础上, 农业采收机器人正好可借助其灵活、智能的优势弥补这一不足, 实现精细无损采收。随着计算机技术、机器人技术和人工智能技术的快速发展以及农业高新技术的应用和普及, 农业采收机器人技术逐步进入农业生产领域, 促使现代农业走上装备机械化、生产智能化与智慧化道路^[15,16]。

农业采收机器人的应用前景已经逐渐得到社会的认同, 其主要优势体现如下。

(1) 作业效率高。农业采收机器人能够快速、准确地采收农产品, 而且可以连续 24h 作业, 受天气、光照等自然条件限制少, 有效提高作业效率。

(2) 作业质量高。农业采收机器人能够保证作业的稳定性和一致性, 提高农产品的品质和安全, 提高自然风险抗击能力。

(3) 劳动成本低。农业采收机器人可以替代部分人力劳动, 降低对农业劳动力的依赖, 缓解季节性农业劳动力用工荒的压力, 同时减轻农民的劳动强度, 降低

劳动成本。

(4) 促进生产标准化。农业采收机器人将信息技术进行综合集成,集感知、传输、控制、作业于一体,促进生产的标准化和规范化,并且将农作物通过物联网连接起来进行信息交换和通信,提高农业生产的智能化管理水平。

(5) 生产效益高。通过降低成本和提高效率,农业采收机器人有助于提升农业生产的整体效益。

(6) 保障农业可持续发展。农业采收机器人有助于实现农业可持续发展,减少环境污染和资源浪费。

(7) 创造就业机会。农业采收机器人的应用将创造更多与机器人相关的工作,包括研发、生产、维护和运营等方面的工作。

同时,我们也要看到虽然农业采收机器人研究已进行了五十多年,但仍鲜有合适的机器人推出,缺乏成熟的市场化产品。与工业机器人或者其他领域的机器人相比,农业采收机器人工作环境多变,以非结构化环境为主,工作任务复杂,其开发及推广应用面临技术研发难度大、成本高等诸多困难。目前,农业采收机器人的研发和推广应用存在如下亟待解决的主要问题。

(1) 系统性研究不足。目前已有的研究成果虽多但比较零碎,缺乏整体性和系统性,没有更多地从农机农艺的整体来着手,多数研究成果仅作为一种单一的技术而存在,没能形成一个比较完整的系统。而且农作物的种植及生产模式较多,标准化程度较低,不适合机器人作业,这给实际应用带来了一定的困难。

(2) 目标识别率和采净率较低。农业采收机器人工作环境比较复杂,目前的采收目标识别检测技术手段还无法和人工作业相比,导致很多采收目标无法被识别和采收到。需要进一步从传感器硬件、智能目标检测算法与农艺管理等方面进行综合匹配和优化。

(3) 采收速度慢、成功率低、果实损伤率高。目前,农业采收机器人大多数采用机器视觉技术进行目标检测和信息获取,一方面,受限于目前的图像采集、传输、处理速度,农业采收机器人工作效率较低;另一方面,机械臂运动规划、避障以及末端执行器的柔顺性等都会影响采收速度、采收成功率和损伤率。

(4) 成本比较高,推广应用较困难。高精度的伺服电机、新型微型传感器等虽然可以提高定位精度、运动速度和采收成功率,但是其价格昂贵,且使用维护需要相当高的费用,普通农户可接受度低。因此,成本也成为制约农业采收机器人市场化推广的重要因素。

(5) 操作人员技术水平要求高。农业采收机器人的操作应用和维护对大多数农业从业人员而言具有较大的难度。因此,一方面要加强农业从业人员的科技培训,另一方面要求农业采收机器人操作简单、可靠性高。

由于经济的不均衡发展以及农业劳动力的逐渐减少,我国农业正面临着新的

严峻考验。因此,研发以农业采收机器人为代表的新型农业机械,对我国农业的长远发展有着重要意义。随着人口老龄化和劳动力短缺问题的加剧,农业采收机器人市场需求将不断增加,同时,随着人们对食品安全和环保意识的提高,农业采收机器人将在有机农业、绿色农业等领域得到广泛应用。

社会发展对农业采收机器人提出了迫切需求,机器人技术、信息感知技术和人工智能技术的日益成熟也为农业采收机器人的开发提供了新的解决方案,当下正处于农业采收机器人研究的黄金时期。不断的技术创新与突破使农业采收机器人可借助更先进的人工智能技术,实现自主决策、精准作业和高效生产。借助高精度传感器和导航技术的提升,农业采收机器人将能够更准确地获取环境和作物信息,实现精准作业。农业采收机器人的发展也将改变传统农业生产方式,实现高度自动化和智能化的农业生产,为人类带来更多的便利和福祉,未来农业采收机器人将朝着更加智能化、自主化、多功能化的方向发展,同时将更加注重环境保护和可持续发展,为农业生产带来更加广阔的发展前景。

农业采收机器人技术经历了从传统农业机械向自动化、智能化的发展过程,随着传感器、人工智能等技术的不断进步,农业采收机器人的应用范围和功能也在不断拓展。从传统的农耕方式到现代化的机械作业,再到如今的农业采收机器人,我们正在见证一场前所未有的农业创新模式的巨变。在 21 世纪农业科技快速发展的浪潮中,农业采收机器人如同璀璨的星辰,正引领着全球农业迈向智能化的新时代。

1.4 本书研究对象

农业采收机器人本身具有机器人的属性。如前所述,目前,农业采收机器人仍处于系统性研究不足、专机专用、开发和应用成本高、推广应用困难的阶段。农业采收机器人一直以来面向的应用对象往往集中在:①大宗且采收周期长的作物;②需要选择性采收,无法采用传统收获机械进行采收,采收环节耗费劳动力大的作物;③具备一定的规范化种植模式的作物。基于此,本书研究的农业采收机器人主要用于大型温室栽培的番茄、黄瓜、草莓的采摘以及热带天然橡胶的割胶收获。

番茄是重要的农作物之一,我国是全球番茄产量最高的国家,占全球的 1/3 以上。相关数据显示,2025 年我国番茄种植面积约为 $1.131 \times 10^6 \text{hm}^2$,产量约为 $6.450 \times 10^7 \text{t}$ 。虽然我国的番茄总产量大幅领先,但与荷兰等农业发达国家相比,单位面积产量仍明显落后。以连栋玻璃温室栽培的番茄为例,我国的平均产量约为 30kg/m^2 ,而荷兰的平均产量超过 60kg/m^2 。我国在番茄的品种培育、种植模式、管理水平上仍有较大的提升空间^[17]。

在智能温室番茄栽培的日常管理中,仅需要少量的工人操作水肥系统等自动化设备就可以维持温室的正常运转,但是在采收期则严重依靠人工对成熟番茄进行收获。番茄采摘是阶段性工作,在采收期往往面临劳动力短缺的问题。特别是在中国,受人口红利消失的影响,从事农业生产的年轻劳动力持续减少,雇佣工人进行番茄采收变得更加艰难。因此,为了应对不断增长的番茄产量与不断减少的农业劳动力不匹配的风险,推动番茄收获工作由人工采摘向机器人自主采摘转变十分必要。

我国设施栽培黄瓜面积占总播种面积的 50%~60%。黄瓜开花 10 天左右即可采摘,皮色从暗绿变为鲜绿有光泽、花瓣不脱落为最佳采收期。黄瓜果实生长速度快于其他果蔬,盛产期产量大,晚收不仅会降低黄瓜品质,而且会影响其他果实生长,易导致坠秧。据调查,设施温室栽培的黄瓜,以 1hm^2 计算,其全部劳动时间为数千小时,其中收获及后处理时间约占全部时间的 50%,且收获作业枯燥、繁重,工人需经受比室外温度高 30%、湿度高 90% 的恶劣作业环境的考验。因此,为了减轻工作人员的劳动强度、提高采摘作业的质量,研究开发黄瓜采摘机器人势在必行。

天然橡胶是重要的工业原材料,是国计民生和国防战略不可或缺的资源紧缺型战略物资。随着经济的快速发展,我国对天然橡胶的需求量也在迅速增加,天然橡胶年消费量超过 $6\times 10^6\text{t}$,成为全球第一大天然橡胶消费国和进口国,自给率也从过去的 1/2 左右下降到现在的不足 1/6。20 世纪 50 年代以来,国内的橡胶产业蓬勃发展,橡胶林的种植面积也越来越大。截至 2025 年,我国的橡胶林面积超过 $1.129\times 10^6\text{hm}^2$,栽种规模位居世界前列。天然橡胶的年总产量超 $9.732\times 10^5\text{t}$,位居世界第 4^[18]。

目前,从橡胶树中获取天然橡胶的主要方式依然是割胶,割胶属于劳动密集型工作,是天然橡胶生产的中心环节,人力成本占总成本的 70% 以上。长久以来,天然橡胶的人工采收难度大,工作条件恶劣,劳动力需求大,劳动强度大,给天然橡胶生产带来了严重影响,特别是胶工短缺和劳动人口老龄化已成为我国天然橡胶产业发展的瓶颈。因此,转型机械化、智能化采收,是发展我国天然橡胶产业的必然趋势。为此,以实现橡胶林非结构化环境中天然橡胶的自动化、智能化收获为研究目标,探索天然橡胶的智能化采收方法,开发天然橡胶割胶机器人,对提高天然橡胶产量并降低对胶工的技术依赖,促进天然橡胶产业的发展具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国农业农村部. 农业农村部关于大力发展智慧农业的指导意见[EB/OL]. [2025-05-30]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/SCYJJXXS/202410/t20241025_6465040.htm.

- [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.
- [3] 黄匡时, 萧霞. 我国乡村人口变动趋势及其对乡村建设的影响[J]. 中国发展观察, 2022, (6): 50-54.
- [4] Schertz C E, Brown G K. Basic considerations in mechanizing citrus harvest[J]. Transactions of the ASAE, 1968, 11(3): 343-346.
- [5] van Henten E J, Hemming J, van Tuijl B A J, et al. An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses[J]. Autonomous Robots, 2002, 13(3): 241-258.
- [6] Kondo N, Yata K, Iida M, et al. Development of an end-effector for a tomato cluster harvesting robot[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2010, 3(1): 20-24.
- [7] Arad B, Balendonck J, Barth R, et al. Development of a sweet pepper harvesting robot[J]. Journal of Field Robotics, 2020, 37(6): 1027-1039.
- [8] Arima S, Kondo N, Monta M. Strawberry harvesting robot on table-top culture[C]. ASAE Annual International Meeting, Ottawa, 2004.
- [9] Harrell R C, Slaughter D C, Adsit P D. A fruit-tracking system for robotic harvesting[J]. Machine Vision and Applications, 1989, 2(2): 69-80.
- [10] 虞浪, 俞高红, 吴浩宇, 等. 欠驱动关节型柑橘采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(17): 29-38.
- [11] Baeten J, Donné K, Boedrij S, et al. Autonomous fruit picking machine: A robotic apple harvester[C]. 6th International Conference on Field and Service Robotics, Chamonix, 2007.
- [12] 崔永杰, 王寅初, 何智, 等. 基于改进 RRT 算法的猕猴桃采摘机器人全局路径规划[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 151-158.
- [13] 袁挺, 李伟, 谭豫之, 等. 温室环境下黄瓜采摘机器人信息获取[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 151-155.
- [14] 冯青春, 赵春江, 李涛, 等. 苹果四臂采摘机器人系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(13): 25-33.
- [15] 赵春江. 智慧农业的发展现状与未来展望[J]. 中国农业文摘: 农业工程, 2021, 33(6): 4-8.
- [16] 刘继展. 温室采摘机器人技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 1-18.
- [17] 许艺, 李新旭, 杨哲, 等. 我国连栋玻璃温室番茄长季节栽培产量与荷兰存在差距的原因分析[J]. 中国蔬菜, 2020, (10): 1-8.
- [18] 卫晋瑶, 毛新翠, 王翌翀, 等. 2025 年我国天然橡胶产业形势分析及未来展望[J]. 中国热带农业, 2026, (2): 35-41, 82.