doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.07.001

农业机器人关键技术研究现状与发展趋势

刘成良[1,2] 贡 亮[1,2] 苑 进[3] 李彦明[1,2]

(1.上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; 2.上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240;
3.山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018)

摘要: 农业机器人是机器人领域重要分支,农业机器人代替人工作业成为现代农业发展的重要趋势。本文给出了农业机器人定义和分类,分析了农业机器人国内外发展现状、应用需求和技术挑战,划分了农业机器人3个发展阶段。通过对各类应用场景农业机器人的研究分析,提出了农业机器人的物境信息智能感知、智慧决策与智能控制、灵巧臂手精准作业、自主导航稳定行走、端-边-云协同机器人系统5大技术要素,阐明了农业机器人关键技术发展趋势,给出了其技术标准体系架构方案。指出了农业机器人共性关键技术是助推智能农机升级、智慧农业产业快速发展的重要抓手,同时指出我国农业机器人正进入快速发展期,也是我国追赶国际技术前沿的战略机遇期,最后为我国农业机器人产业发展提供了方向性建议。

关键词: 农业机器人; 智能感知; 决策控制; 自主作业; 标准体系

中图分类号: TP249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)07-0001-22 **OSID:**

Current Status and Development Trends of Agricultural Robots

LIU Chengliang[1,2] GONG Liang[1,2] YUAN Jin[3] LI Yanming[1,2]

(1. *School of Mechanical Engineering*, *Shanghai Jiaotong University*, *Shanghai* 200240, *China*
2. *State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration*, *Shanghai Jiaotong University*, *Shanghai* 200240, *China*
3. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Shandong Agricultural University*, *Taian* 271018, *China*)

Abstract: Agricultural robot is an important branch of robot family, and it reshapes the modern agriculture industry via replacing human with machines. The definition and classification of agricultural robots were presented, followed by the analysis of its current status, application requirements and technical challenges. Therefore, the phases of agricultural robots were divided into three stages. Through investigating a broad spectrum of agricultural robots with in diverse productional scenes, totally five aspects of the key technologies of agricultural robots, i. e., the biological and environment perception, smart decision-making and control, dexterous robotic arm and hand operation, autonomous navigation, and end-terminal-cloud coordinated robotic system integration, were highlighted to foresee its developing trends. Relevant standard architecture was proposed to forge the foundation of agricultural robotics. The agricultural robot common key technologies were beneficial to the intelligent agricultural machinery and smart agriculture industry development, indicating that the agricultural robots were in rapid progress which can be seized to catch up and overtake international counterparts. Finally, the developing direction suggestions and roadmaps were given for guiding the domestic agricultural robot industry in the future.

Key words: agricultural robot; intelligent sensing; decision-making and control; autonomous operation; standardization

0 引言

1921年捷克科学家卡尔·恰佩克提出了机器人概念,20世纪50年代约瑟夫·恩格尔博格研制出世界上第一台用于压铸工艺的五轴液压驱动工业机器人Unimate。在机器人问世的初期,技术发展较为缓慢,主要停留在大学和研究所的实验室。20世纪70年代,随着自动控制理论和计算机技术的发展,以美

收稿日期: 2022-05-09 修回日期: 2022-05-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFE0125200、2019YFB1312301)

作者简介: 刘成良(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机器人研究,E-mail: chlliu@sjtu.edu.cn

国 Unimation 公司 PUMA 机器人和日本山梨大学牧野洋研制的 SCARA 机器人为代表的机器人产品进入工业生产并在随后的 30 年内趋于成熟，以 ABB、软银机器人、波士顿动力公司为代表的工业、服务、特种机器人进入智能时代。国际标准化组织将机器人定义为自动化控制、可编程的机械作动执行机构，能够自主实现运动、操纵或定位作业[1]。农业机器人隶属于特种机器人范畴，持续获得社会、学术界和产业界的关注。世界范围内的人口老龄化加剧、农业从业人员短缺催生了“机器代人”的旺盛需求，加之人工智能、机器人等技术的牵引，农业机器人进入快速发展期。

本文将给出农业机器人定义与分类，综述国内外农业机器人技术现状，分析农业机器人共性关键技术，借鉴机器人产业发展规律，提出未来我国农业机器人技术发展方向和建议。

1 农业机器人定义与分类

1.1 农业机器人定义

农业机器人是指用于农业生产，具有感知、决策、控制与执行能力的多自由度自主作业装备，主要包括信息感知系统、决策控制系统、作业执行机构、自主移动平台，即“眼、脑、手、脚”。工程实际应用中，农业机器人与人工智能、大数据、云计算、物联网相结合，构成了农业机器人应用系统[2-3]，它丰富了农业机器人概念的内涵与外延（图 1）。

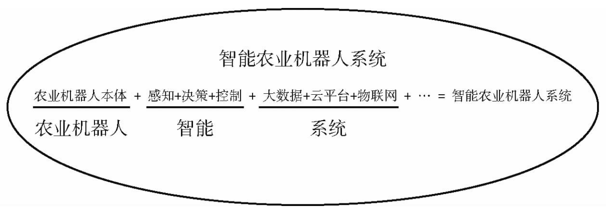

图 1 农业机器人与智能农业机器人应用系统概念

Fig. 1 Concept of agricultural robot and agribot systems

农业机器人是在复杂非/半结构化环境下，主要以生物活体为作业对象，服务于农业生产的单机、多机自主作业装备或系统，它是智能农业装备的高端形态，具有作业环境、操作对象、装备状态、人员行为等信息的全域感知能力，融合机器学习、知识推理、人机交互、作业规划等的自主决策能力，以及灵巧作业、动态伺服、运动协同、多机协作等精准执行能力，能在繁重、恶劣、有危害的作业场景下实现精准、高效的生产目标。

1.2 农业机器人分类

农业机器人按照作业对象不同可以分类为种植机器人和养殖机器人。种植机器人包括田间种植、果园种植、设施种植机器人，养殖机器人包括畜禽养殖、水产养殖机器人（图 2）。

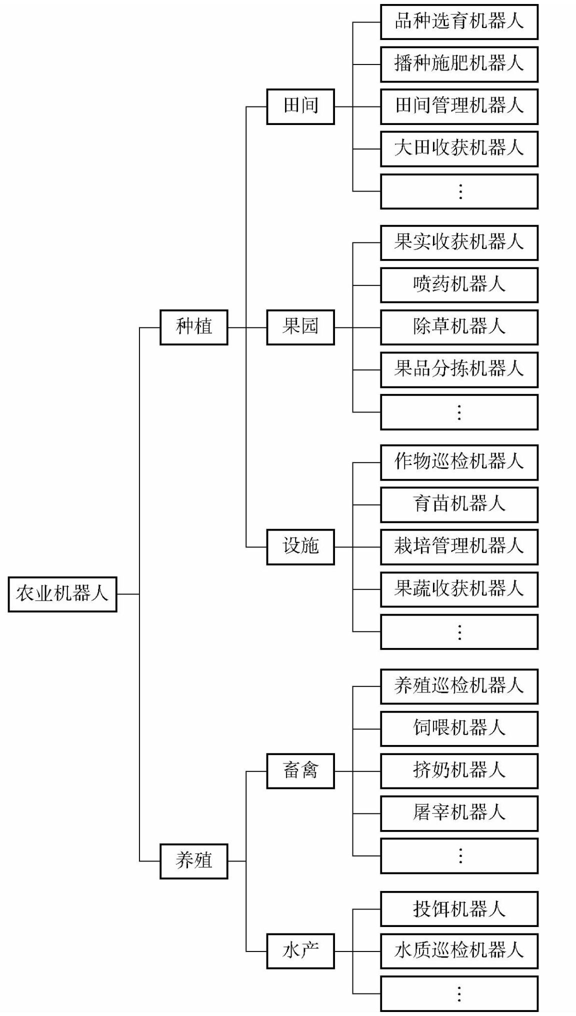

图 2 农业机器人分类

Fig. 2 Agricultural robot types and classifications

1.3 农业机器人产业需求

我国农业综合机械化率已超过 70%，农业机械化解放了劳动力、提高了劳动生产率，基本解决了田间联合收割等作业条件一致性较好、适宜大规模自动化的生产环节。然而，农业生产仍然广泛存在现有农机装备难以胜任的高、精、尖、难作业任务，却对具有感知决策、眼手协同控制等智能化自主作业能力的农业机器人提出了明确需求。

现代农业已经走向智能化、精细化时代，许多农业生产场景都需要类似人工灵巧作业的机器。农业机器人应运而生，能够承担农业从业人员“干不了”、“干不好”、“干不快”、“不愿干”、“危害大”等的工作。“干不了”指不间断劳作和苛刻的自然条件使得人力难以企及的生产场景，如畜禽舍 24 h 不间断巡检、水下养殖海产品捕捞等；“干不好”指批量高效率精细作业难题，例如高速嫁接等；“干不快”指对高效精细操作有要求的生产环节，农业机器人能够显著提升生产效率和产品质量，如精密定植、高效屠宰；“不愿干”指高劳动强度或长时间枯

燥机械作业岗位，如饲养、挤奶、采摘等；“危害大”指存在较大有损从业人员健康安全风险的生产环节，如植保喷药、高枝作业等。随着机器人行业设计、感知、决策、控制等共性技术发展，机器视觉、轨迹规划、定位导航等单元技术性能趋于成熟，为农业机器人场景落地提供了技术支撑。

1.4　农业机器人技术挑战

与结构化环境下作业的工业机器人不同，农业机器人处于非结构化、不确定性作业环境，面临自主柔性作业要求高、场景动态适应性强等重大技术问题，对复杂场景下的目标识别机器视觉、动态环境下避障规划与实时轨迹控制等机器人共性前沿技术提出了超高要求。

(1)生物环境感知难

农业机器人作业场景复杂、对象多变，需重点突破以下关键理论技术：①作业环境与对象多源异构信息的高精度原位传感新原理、新材料、新方法。②基于物景多源数据的高精度高可靠农业目标识别、实例分割和空间定位等机器学习模型算法。③嵌入数据清洗、特征提取、参数补偿、多传感数据融合等片上模型的智能边缘计算模组设计。这是农业机器人“眼睛”面临的技术挑战。

(2)认知决策控制难

农业环境场景对象的准确认知决策控制是计算、数据科学和人工智能领域核心问题，需重点突破以下关键理论技术：① 基于多源感知异构信息的物景认知，包括数据高效标注、语义分析、行为识别、知识推理等。②基于机器学习的智能决策，包括任务规划、路径规划、轨迹规划、运动规划等。③面向高动态、强干扰、高并发任务的自适应鲁棒控制，包括机器人多部件协同控制等。④基于多核处理器、NPU 等专用芯片的农业机器人控制器设计，农业机器人操作系统(Agri - ROS)及其应用生态构建，网络化农业机器人端边云协同。这是农业机器人“大脑”面临的技术挑战。

(3)高效精准作业难

农业机器人的操纵任务是实现高效精准作业。需重点突破以下关键理论技术：①生物友好的轻量化柔性机械臂设计。②力觉触觉敏感、视觉伺服的驱控一体智能末端执行器设计。③灵巧采摘、高速嫁接、上杯挤奶等机器人快速高效眼手协同作业。这是农业机器人“手臂”面临的技术挑战。

(4)自主导航行走难

农业机器人自主行走面临全地形、多遮挡、动态场景下运动、定位、避障、规划难题，需重点突破以下关键理论技术：①复杂农田环境下驱控一体化全驱 FWD 底盘结构优化设计。②多轴(轮)驱动力协同、功率匹配与能耗管理。③多传感融合的地图构建、定位导航、自主避障技术。这是农业机器人“腿脚”面临的技术挑战。

(5)眼脑手脚协同难

农业机器人作业场景复杂、作业任务多样，需重点突破以下关键理论技术：①农业机器人眼脑手脚集成设计技术。②机器人多运动部件协同、人机交互技术。③云环境下机器人集群规划调度方法。这是农业机器人“系统”面临的技术挑战。

综上，5 大技术挑战贯穿农业机器人设计、控制、制造、应用全过程。农业机器人技术门槛高、开发难度大、高可靠低成本矛盾突出，是农业机器人产业发展必须解决的问题。

2　农业机器人技术发展现状

自诞生以来，农业机器人随着工业机器人和其他类机器人的发展而不断进步，尤其是在移栽、巡检、植保、挤奶、饲喂等产业获得初步应用。

2.1　农业机器人发展阶段

农业机器人的发展大体上可分为 3 个阶段：第 1 阶段为萌芽期，从 20 世纪 80 年代至 20 世纪末，农业生产环节中引入了机械臂、图像处理等工业机器人元素，助推了农业自动化的发展[4-6]。第 2 阶段，自 2000 年至 2015 年为起步期，代表性成果为嫁接、移栽等机器人进入产业应用期[7-12]。第 3 阶段，2016 年至今为发展期，人工智能技术工程化趋于成熟并进入复杂农业场景，除草、表型机器人形成了示范应用[13-14]。农业机器人进入多学科交叉融合高技术整体驱动的新时代(图 3)。

2.2　农业机器人技术发展现状

农业机器人技术受机器人机构学、人工智能、物联网、移动通信、传感器等前沿技术牵引，逐渐全面渗透到种植、养殖产业各个生产应用场景，世界各国先后研发了各式各样的农业机器人。

2.2.1　大田农业机器人

大田农业机器人是指在大田环境下从事作物表型、农情巡检、墒情检测、杂草去除、土地平整、特种选择性作物收获等任务的自主作业装备，其关键技术包括精准导航、机器视觉、智慧决策、自主行走和智能作业控制等。

(1)信息获取类机器人

大田信息获取类机器人主要完成作物发育表型、作物长势、病虫草害、土壤理化性质等信息采集，可用于品种选育、田间管理、适时收获等作业决策。其主要技术难点在于种类繁多的高性价比机载传感

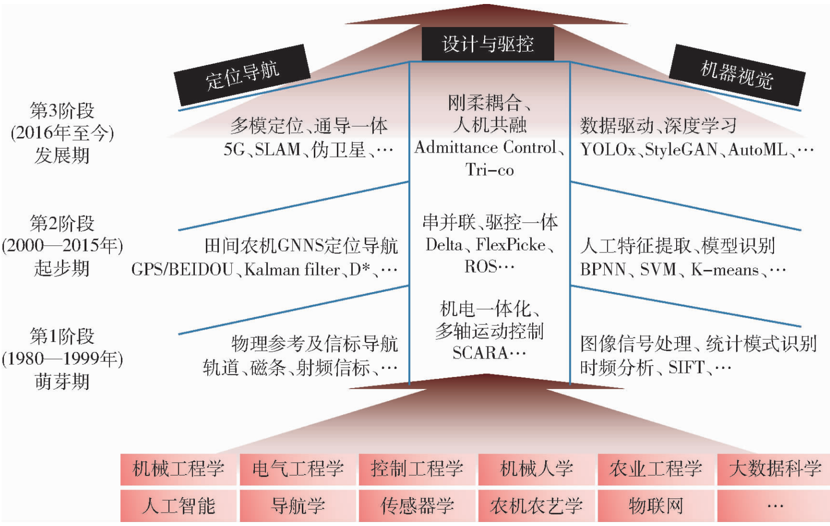

图 3　农业机器人发展阶段

Fig. 3　Agricultural robot development phases

器研发，以及田间高效巡检平台自适应快速稳定行走设计问题。

荷兰 Phenospex[15]、德国 LemnaTec[16] 和法国 RoboPec 公司[17] 开发了龙门式和悬臂式植物表型机器人，通过叠加 3D 和多光谱信息准确测量最大植物高度、3D 叶面积、叶片角度、光穿透深度等形态参数，具有高精准度、完全自动化、不受照明条件影响、可实现昼夜扫描等优点，实现了每天 10 000 m^2 的高通量分析（图 4a～4c）。SHAFIEKHANI 等[18]、MUELLER-SIM 等[19]、BAO 等[20] 研制了田间移动式作物表型分析机器人，实现了作物茎秆强度及几何形态的高通量测量（图 4d、4e）。上海交通大学张伟军等开发了全地形适应性田间作物巡检机器人，采用 8 轮错位构型与主被动复合柔性驱控算法，保障了行进过程中机载激光传感器和鱼眼相机图像获取的稳定性（图 4f）。

加拿大萨斯喀彻温大学 BAYATI 等[21] 开发了一种高通量油菜植物表型监测分析移动机器人平台（图 5）。该平台具有 GIS 标注功能，实现了高通量大范围精准图像获取和表型分析。美国卡耐基梅隆大学 NARVAEZ 等[22] 提出了采用激光环视扫描、实时目标定位和场景重构方法开发高速表型分析机器人，能够实现在高粱或玉米等行间作物冠层之下的测量植物茎强度、叶片直立性、叶片发病率、植被指数（GRVI）等表型数据。

美国伊利诺伊大学 KAYACAN 等[23] 开发了一种应用于玉米田冠下的轻小型机器人 TerraSentia（图 6）。该机器人利用机器视觉算法自动驾驶穿越田地来收集作物数据。利用深度学习算法，它还可以监测早期植物生长活力、识别疾病和估计农作物产量。

(a) Phenospex田间表型机器人
(b) LemnaTec田间表型机器人
(c) RoboPec 田间表型机器人
(d) 自主移动型　(e) 钵苗定位型　(f) 全地形通过型

图 4　高通量表型检测机器人

Fig. 4　High throughput field plant phenotyping robots

农情巡检方面，罗锡文、何勇团队[24-25] 利用无人机、结构光技术和地面无线传感器网络中继等方法采集农田信息和获取植物三维形态结构，满足了农田信息数据采集和监控的生命周期长、传输数据可靠、覆盖面积广的要求。

（2）田间耕种类机器人

田间耕种类机器人是指通过自主导航、智慧决

图 5　高通量油菜表型监测分析平台[21]

Fig. 5　Brassica phenotyping and analysis robot

1. GPS 天线　2. 机械臂　3. 油菜畦　4. 检测设备


图 6　TerraSentia 作物巡检机器人

Fig. 6　TerraSentia plant monitoring robot

策和精准化作业的伺服控制技术，实现大田生产土地耕整一致性、播种精量化、移栽智能化的机器人，它能够保障大田种床平整度，降低播种移栽成本，提高农作物产量和质量。相较于其他农业机器人，播种/施肥/移栽机器人相对成熟。其主要技术难点在于高精度高程图实时绘制、对特殊形态种子的精量播种、漏播监测和补种，以及移栽中的高速识苗取苗-剔苗补苗问题。

作业区平整地作业是全程自主作业的基础，联适导航公司[26]研制的自主平地机器人根据机载高精度北斗卫星实时测量平地机具在作业轨迹点的高程信息，并绘制高程图，继而与方案图中目标高程进行对比，系统作业时通过实时计算不同定位点的高程差自主调整平地铲高度，从而精准获得平地效果(图 7)。ZHOU 等[27]研究了农田三维地形图绘制、不平水田硬底层平整前馈补偿控制、平整路径规划等关键技术，实现了基于北斗的水田智能化精准平整作业。John Deere 公司开发了无人驾驶激光平地机，实现激光平地机群协同作业，提升了作业效能。

德国乌尔姆应用科学大学的 BLENDER 等[28]


图 7　基于高程地图的激光平地机器人作业方案

Fig. 7　Laser leveling field robot with digital-map

开发了管理集群播种机器人的 OptiVisor 云控系统，可以协调控制多机器人机群的播种模式、播种密度、路径规划、播种补种、多机避碰。魏新华等[29]设计了穴盘苗全自动移栽协调控制系统，实现了苗盘横向进给运动、取苗机械手纵向往复运动、垂直取放苗和喂苗动作的电动气动复合伺服控制，保障了地轮行进速度和移栽动作的时序协调，钵苗移栽成功率达到 96.9%。

(3)田间管理类机器人

田间管理类机器人是指通过自主导航、视觉识别与定位和精准作业控制技术完成除草、喷药、追肥等功能的机器人，主要针对病虫草害实现精准对靶施药，针对作物生理需求实现按需变量追肥，提高农药和肥料利用率，提高农产品品质，减少生产成本，改善生态环境。它的主要技术难点在于作物杂草高精度实时识别、精准对靶作业等。

澳大利亚昆士兰科技大学的 MCCOOL 等[30]研发了新一代作物和杂草管理机器人 AgBot II(图 8)，以机器人团队协作方式在田间自主导航、施肥、除草，杂草检测和分类识别成功率在 90% 以上。


图 8　AgBot II 机器人

Fig. 8　AgBot II field management robot

美国 John Deere、BlueRiver 公司研发的智能除草机器人采用新一代 See&Spray 化学杂草控制技术，利用高分辨率摄像机实时识别杂草，实现了单株杂草个性化喷施，大大降低杀虫剂使用量(图 9a)[31]。瑞士 EcoRobotix 公司研发了太阳能驱动的除草机器人，应用机器视觉、GPS 和其他传感器自主跟踪作物行并以 95% 的精度检测定位杂草，然后通过并联机械臂以高响应速度将小剂量的除草剂直接喷到杂草上，可减少农药用量 20 倍(图 9b)[32]。美国 Carbon Robotic(CR)公司研制了大田除草机器人，利用人工智能和激光模组来进行大田除草，二氧化碳激光模组阵列每 50 ms 发射一次，精度控制在 3 mm 内，可以同时对 8 处目标进行激光除草(图 9c)[33]。法国的 Naio Technologies 公司研发了不同尺度的系列纯电动力农业机器人，采用四轮驱动四轮转向的田间 U 形行间转向，可完成大田杂草控制、中耕等作业以及采集作物的数据，辅

助作物产量管理(图 9d)[34]。

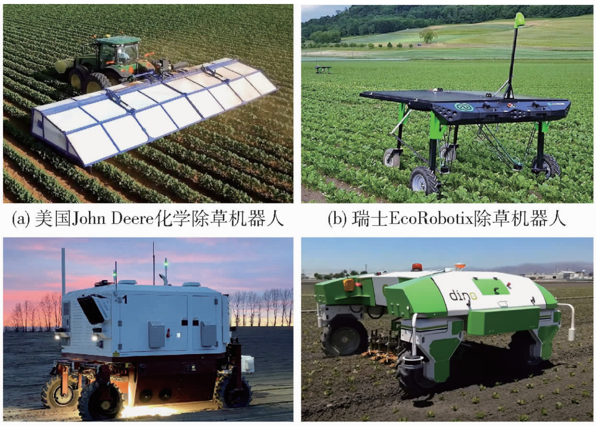
(a) 美国John Deere化学除草机器人 (b) 瑞士EcoRobotix除草机器人
(c) 美国CR激光除草机器人 (d) 法国Naio机械除草机器人

图 9 典型大田除草机器人

Fig. 9 Field weed removing robot

李南等[35]设计了电驱动田间锄草机器人,以中小功率拖拉机为配套动力,机器视觉系统实时对作物和杂草进行识别与定位,伺服电动机驱动月牙形锄草刀对行护苗锄草,伤苗率小于 10%,杂草锄净率约为 90%。

(4)田间收获类机器人

大田收获类机器人是指通过机器视觉等技术识别与定位、选择作业对象并依据对象特征实现差异化精准收获控制的机器人,它关注无法大规模自动化采收的对象,同时注重收获作业的高效性和适应性,弥补了农机装备在精细选择性收获作业方面装备的不足。其主要技术难点是高效、低损收获末端执行器设计与控制。

翟长远等[36]将无人驾驶技术、机器视觉与甘蓝收获技术结合,研制了大田甘蓝自主收获机器人(图 10a),通过北斗系统定位种植行后将采收臂与甘蓝对齐、机器视觉微调后完成对行采收作业,同时通过传输通道将甘蓝运至协同运输的自动行驶车辆。美国 CROO Robotics 研发了大田高垄草莓收获机器人[37](图 10b),利用草莓与茎叶的位置差异,设计了柔性茎叶和草莓果分离末端执行器和开合式硅爪采收轮,通过旋转光学相机识别定位目标草莓,实现了快速采收、输送和集箱。


(a) 大田甘蓝收获机器人 (b) 大田草莓收获机器人

图 10 大田甘蓝、草莓收获机器人

Fig. 10 Field cabbage and strawberry harvesting robots

荷兰 Cerescon、AvL Motion 公司[38]研发了产品化的白芦笋选择性收获机器人。前者采用了基于介电特性的垄面下芦笋检测,白芦笋收获末端执行器和双臂并行收笋机构等技术,实现了最大采收效率 0.3 hm^2/h。后者采用光学视觉手段检测出土笋芽,设计了基于回转链循环的多末端执行器,实现了垄上多个白芦笋的入土、切割、柔性夹持和出土集箱过程,每株平均收获时间为 1.3 s(图 11)。


(a) 荷兰Cerescon公司 Sparter (b) 荷兰AvL Motion公司

图 11 大田白芦笋收获机器人

Fig. 11 Field white asparagus harvesting robots

2.2.2 果园机器人

果园生产和大田农业生产一样,也要走从机械化、自动化向机器人化发展的路径。果园多位于丘陵山地等崎岖地面,其主要任务包括果园物境信息获取、剪枝套袋、对靶喷药、疏花疏果、果实采摘等,它对移动过程中精准作业具有较高要求。

(1)果园巡检类机器人

果园巡检类机器人主要依靠机器视觉、自主导航、智能决策功能完成果树长势、果品产量质量、病虫草害的检测与预警,主要用于病虫草害监控、产量预估与收获作业规划等目的。其主要技术难点在于移动视角下的果树果实目标检测、时空变换下巡检信息的融合和数据挖掘。

澳大利亚悉尼大学 BARGOTI 等[39]基于形态学和深度学习,开发了果实原位识别及产量预估的果园巡检机器人,自然条件下漏检率低于 5%,估产精度达到 85%(图 12)。HE 等[40]综述了果园估产机器人技术前沿进展,并指出估产特征优选、光谱成像时机选择、多尺度信息融合等技术具有决定性作用。

图 12 果园巡检与估产机器人

Fig. 12 Fruit detection and yield estimation robot

西班牙莱里达大学 MARTÍNEZ-CASASNOVAS

等[41]、GENÉ-MOLA 等[42]使用地面移动激光雷达设备获取果树的 3D 点云，通过提取点云中果树的冠层几何形态学信息，实现对果树生长状态的监测。同时通过风机气流吹动叶片出被遮挡果实，实现了高精高效估产。

文献[43－44]设计了地形高通过性的果园机器人底盘及其控制系统，开发了面向果园巡检、采收、物流功能的组合导航系统，基于 CSF（Cloth simulation filter）和 RANSAC（RANdom SAmple consensus）方法对图像和点云信息进行融合，机器人循迹导航偏航误差小于 5 cm。ZHOU 等[45]针对果园物流机器人稳定性控制问题，提出了基于数据驱动的状态控制算法，实现了不同路况下机器人高性能动力学特性控制。

（2）果园管理类机器人

果园管理类机器人是指通过自主导航、视觉识别与定位和精准作业控制技术完成除草喷药、剪枝套袋、对靶喷药、疏花疏果等功能的机器人，主要针对病虫草害实现精准对靶施药、灵巧疏花疏果套袋作业，提高果品品质，实现机器代人。它的主要技术难点在于灵巧作业手臂设计、作物杂草精确识别、精准对靶喷药控制等。

MAJEED 等[46]设计了葡萄园剪枝机器人，采用 RGB－D 机器视觉检出果树结构，优化决策作业点，实现了行进中自主剪枝作业。法国 Wall－Ye 葡萄枝修剪机器人每天可以修剪 600 棵葡萄树，具备高负荷、高效率的工作性能（图 13a）[47]。BOTTERILL 等[48]研发的葡萄剪枝机器人，每株葡萄平均剪枝 8 条，全自动作业效率2 min/株。YOU 等[49]设计了樱桃剪枝机器人枝条骨架分析算法，基于语义导引的方式对枝条重建正确率超过 70%，能够有效支撑机器人剪枝决策（图 13b）。美国 Vision Robotics 公司[50]研发的苹果剪枝机器人可以代替 90% 人工（图 13c）。

(a) Wall-Ye 葡萄枝修剪机器人　(b) 樱桃剪枝机器人[49]
(c) Vision Robotics苹果剪枝机器人

图 13　果园剪枝机器人

Fig. 13　Orchard pruning robots

德国霍恩海姆大学 REISER 等[51]研发了“凤凰”电动旋转式除草机器人（图 14），用来清除果园内的杂草。在机器人的动力与结构方面，将传统刀具的液压马达替换为电动马达，并进行了整机轻量化设计。除草机器人可以精确高效地完成果园除草任务。

图 14　“凤凰”除草机器人

Fig. 14　“Phenix” weed removing robot

吴应新等[52]针对果园地形开发了混合动力除草机器人能源管理系统及通用仿真平台，基于路面统计信息优化的动力切换策略可提升整机能效 8% 以上。晓耕智能科技有限公司[53]开发了基于通用移动底盘的果园管理系列机器人，实现了果园除草、喷药、物流机器人模块化生产和功能重构。

（3）果园采摘类机器人

果园采摘是季节性强、最费工费时费力的生产环节。果园采摘类机器人是指具备自主导航、果实识别定位、作业规划、采摘动作控制功能的机器人。高效低损采摘是机器人化作业的巨大技术挑战。

美国华盛顿州立大学 ZHANG[54]、SILWAL 等[55]开发了一种苹果自动采摘机器人（图 15）。机器人通过机器视觉定位成熟果实，利用 7 自由度的采摘机构完成采摘过程，平均单果采摘时间 6.0 s，采摘成功率为 84%。


(a) 苹果采摘机器人　(b) 机器人末端执行器

图 15　苹果采摘机器人

Fig. 15　Apple picking robot

澳大利亚莫纳什大学 GRANLAND 等[56]和 WANG 等[57]针对苹果园机器人化采收问题给出了较为系统的解决方案，提出果实形态分割识别方法，并设计了采摘机械手，采摘点空间定位平均误差 6.6 mm、角度平均误差 4.8°，采摘成功率接近 85%。

以色列 FFRobotics（图 16a）[58]和美国的

Abundant Robotics（图 16b）分别研发了具有市场化前景的苹果采摘机器人，采用深度相机方式识别和定位苹果，在并行多臂上安装真空吸入式的苹果采摘末端执行器和直角坐标的三指抓握式末端执行器，通过伸缩抓取和扭断果梗方式提升了采摘效率。新西兰 Robotics Plus 公司[59]研发了猕猴桃采摘机器人（图 16c），用于下垂生长的猕猴桃的自主采收作业，收获成功率达到 86.0%，猕猴桃平均收获时间为 2.78 s/个。中国农业机械化科学研究院与江苏大学[60]联合开发了一种由机械臂、末端执行器和基于图像视觉伺服控制系统组成的苹果采摘装置，对具有 5 自由度的 PRRRP 结构的机械臂进行了几何优化，基于支持向量机开发了果实识别算法，实现了对果树和果实的自动检测和采摘。苹果采收成功率为 77%，平均采收时间约为 15 s/个（图 16d）。针对采收机器人优化结构设计，以色列理工大学 BLOCH 等[61]提出了一种针对不同苹果树结构的苹果采收机器人机构优化方法，将苹果树按照结构分为 CL 型（Central Leader）、Y 型（Y-trellis）和 TS 型（Tall Spindle），建立 3D 树模型的完整数据库。针对不同树结构分别建立了铰接式（RRR）、笛卡尔（PPP）、伸缩式（RRP）3 种机器人机构。

(a) 以色列苹果采摘机器人　(b) 美国苹果采摘机器人

(c) 新西兰猕猴桃采摘机器人　(d) 国产苹果收获机器人

图 16　果园收获机器人

Fig. 16　Orchard harvesting robot

文献［62 – 63］通过固定于机械臂一侧的 KinectV2 获取场景 RGB 图和深度图，对荔枝的果梗进行图像分割和三维定位，基于 RRT 算法在线规划避障采摘路径，通过气缸驱动末端实施果枝剪切与夹持，实现高效和稳定的荔枝串收获（图 17）。

文献［64 – 65］研制了猕猴桃采摘机器人，提出的 Progressive probabilistic Hough transform（PPHT）图像处理方法对纤细的种植拉线检出率达 92.4%。开发的算法有效避免了采摘过程中的机械臂碰撞。ZHOU 等[66]设计了在天然橡胶种植园作业的割胶机器人，建立六轴串联机器人空间螺旋轨迹规划方法，双目立体视觉系统获取了采集切割轨迹所需参数，以精确控制切割轨迹和割胶作业。树间周期割胶作业平均消耗时间为（80 ± 5） s（图 18）。

(a) 工业臂荔枝采摘机器人　(b) 协作臂荔枝采摘机器人

图 17　荔枝采摘机器人

Fig. 17　Litchi picking robot

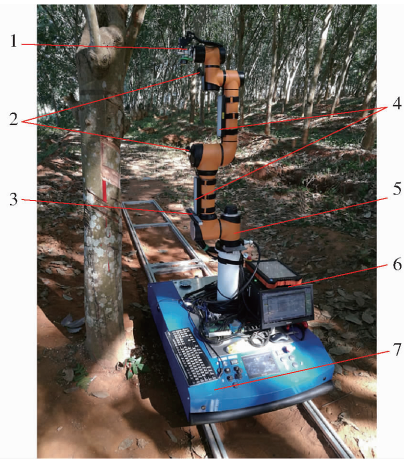

图 18　割胶机器人

Fig. 18　Rubber-tapping robot

1. 末端执行器　2. 相机　3. 结构光　4. 面光源　5. 机械臂　6. 控制柜　7. 移动平台

果园收获机器人的机器视觉[67]、末端执行器[68]、作业点规划和作业运动规划[69 - 70]、自主行走[71]等热点问题均被广泛深入讨论和研究。

2.2.3　设施农业机器人

设施半结构准工厂化环境适合机器人化生产，设施农业机器人用于设施环境下高速高效精准作业，主要包括表型选育、种苗移栽嫁接、长势-产量-病虫害巡检、打叶整枝、果蔬采收等机器人。

（1）育苗表型类机器人

设施表型机器人是在可控环境条件下进行作物形状、结构、大小、颜色等可观测性状进行高通量信息获取的机器人，它为优良品种选育提供表型组学信息。其难点技术在于多源时空高光谱信息融合识别、复杂生长环境下生物性状特征去噪辨识等。

LIU 等[72]、XIAO 等[73]、GU 等[74]提出了环境-表型同步关联分析方法，设计了叶菜、大株作物品种选育高通量表型分选机器人，实现了叶面积参数自动测量和自动化拣选一站式功能。

DU 等[75]针对同一栽培环境下不同生菜品种长

势对比分析问题，设计了高通量生菜表型视觉测量方法，建立了品种选育量化评价方法（图 19a），Phenospex 公司的表型分析仪器能够提供种苗多类光谱信息，提供了几何形态到生理指标的大量表型参数（图 19b、19c）。ATEFI 等[76]提出了采用类人作业机器人模拟专家现场分析作物表型的行为，对种苗进行多视角观测，获取更为全面的信息。

(a) 生菜育种表型分析机器人　(b) 番茄育苗表型机器人　(c) 设施育种高光谱成像

图 19　高通量表型育种机器人

Fig. 19　Phenotyping robots forlettuce breeding

（2）嫁接移栽类机器人

嫁接机器人是指利用传感器和计算机图像处理技术，实现了嫁接苗子叶方向的自动识别、判断。嫁接机器人能完成砧木、穗木的取苗、切苗、接合、固定、排苗等嫁接过程。嫁接机器人能够有效提高作业效率和嫁接苗成活率，被公认为是能够最先投入实际生产应用的设施园艺机器人[77]。移栽机器人是指实现钵苗从高密度到低密度穴盘的稀植移栽的机器人。其关键技术在于高速低损取苗夹爪设计、基于机器视觉的优劣苗实时分选等。

2011 年，日本井关公司推出了型号为 GRF800－U 的瓜类全自动嫁接机器人（图 20）。该机适用于瓜类作物，开发出基于穴盘苗的自动上苗装置代替人工上苗作业，具有穴盘内缺苗视觉自动检测功能，仅需一人供给穴盘上苗，生产效率可达 800 株/h，嫁接成功率为 95%[78]。

日本京都大学 ASHRAF 等[79]开发了一种番茄苗嫁接辅助机器人，将番茄苗和砧木正确匹配，提高了嫁接效率。使用具有 PL 滤光片的背光系统与 UXGA 单色相机组成的机器视觉系统实现对番茄苗的弯曲度，叶片节点和茎的直径进行自动分类，对于番茄苗和砧木的匹配准确率高达 97%。

JIANG 等[14]针对现有蔬菜嫁接机器人单手爪夹持搬运机构作业时需要在上苗、切削和对接工位

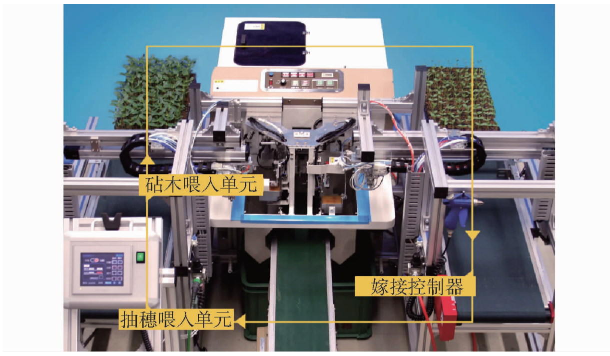

图 20　嫁接机器人[78]

Fig. 20　Grafting robot

往复旋转作业，限制了机器嫁接生产效率，存在夹持伤苗、操作人员上苗等待时间过长、易疲劳等问题，设计了一种四手爪柔性夹持搬运机构，能够实现上苗、切削和对接工位同步作业，以及秧苗柔性夹持与快速搬运，有助于提高机器嫁接效率。性能试验表明，柔性夹持手爪平均伤苗率降低 3.5%，嫁接平均速度为 1 052 株/h，嫁接成功率为 96.67%。

以荷兰 Visser 公司[80]为代表的国外钵苗移栽机器人采用 Pic－O－Mat 机器视觉技术融合种苗视图和立体图像获取作物幼苗生长信息，通过目标区域像素统计的方法对真叶数、苗龄、株高和长势一致等幼苗生长状况进行评价，通过取苗爪完成对穴盘里壮钵苗移栽和弱钵苗剔除与补栽，将健康苗移至栽培区域，每小时最高扦插苗数量达到 1×10^4 株，且移栽一致性好（图 21）。

图 21　Visser 扦插苗移栽机器人

Fig. 21　Visser transplanting robot

（3）设施植保类机器人

设施植保类机器人是指通过室内导航、视觉识别与定位、对靶精准作业控制技术完成喷药、授粉等功能的机器人。它的主要技术难点在于目标精准识别评价、室内移动高精度定位。

在病虫害控制方面，OBERTI 等[81]开发了一种检测发病区域对靶喷洒的机器人，基于机器视觉的疾病在线评估模型保证了点喷面积的最小化（图 22）。荷兰 BERG 公司[82]开发了 Meto 温室自动喷雾机器人，加快了作物植保自动化进程。

张俊雄等[83]研发了一套温室内移动对靶喷雾辅助系统，实现了对黄瓜等篱架型植物以长方形栅格区域为靶标的精准喷雾。采用高架导轨安装模式，4 自由度的直角坐标系机械臂吊装在平台下，根

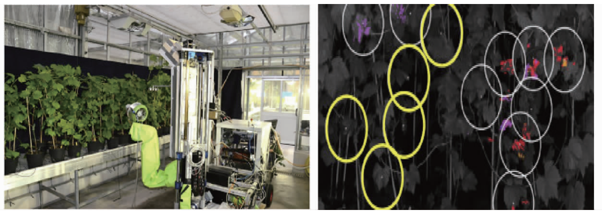

图 22 对靶喷施机器人

Fig. 22 Spot spraying robot with disease area detection

据病害等级程度配合电磁阀控制的喷嘴实现对不同局部的变量喷雾。解决了对作物植株单体甚至是单个叶片内病害区域进行对靶喷雾的难题，有效降低了农药用量。LI 等[84]开发了设施喷药机器人，针对设施内植株密植施药空间狭窄的问题，设计了一种日光温室用精准喷雾机器人，以实现区域内的自动喷雾作业，推导了液滴沉积面积与喷射机构姿态之间的关系，以喷雾雾滴在作物群体上均匀覆盖为目标，提出了基于遗传算法的离线最优喷施算法，试验验证了喷雾姿态的优化策略效果。

（4）打叶整枝类机器人

设施作物打叶、整枝机器人是通过对蔓、茎、果、叶、绳感知与理解，基于果蔬专家经验知识、农机农艺融合完成打叶、整枝的机器人。其难点技术包括高效末端执行器设计及专家决策方法、目标枝叶定位机器视觉算法、避障运动规划控制方法等。

荷兰 Kompano[85]、SAIA[86]公司番茄整枝打叶机器人，可以完成大规模温室的自动巡行和番茄打叶管理（图 23a、23b）。瓦克宁根大学[87-88]研发的温室番茄黄瓜剪枝、打叶机器人，全自动打叶效率 70 s/叶（图 23c、23d）。

(a) Kompano打叶机器人 (b) SAIA打叶机器人

(c) 番茄整枝机器人 (d) 黄瓜打叶机器人

图 23 打叶整枝机器人

Fig. 23 Deleafing and pruning robots

（5）果蔬采收类机器人

设施果实采收类机器人是指依据着色、尺寸等指标自动识别作业对象、自动规划路径并进行选择地收获的机器人，是设施生产无人化作业的关键装备。其主要技术挑战在于任务路径自主规划、受遮挡目标重建、灵巧低损末端执行器设计等。

西班牙 AGROBOT Robotics 公司[89]开发了针对高垄栽培和架式栽培草莓选择性收获机器人（图 24），通过 24 个独立机械臂以无线通信方式协同工作，每个机械臂带有一个短视距集成彩色和红外深度传感器和图像处理单元确定待收获草莓的成熟度，其末端执行器采用断茎夹持方式收获草莓，不直接接触果实，避免损伤。

图 24 草莓采摘机器人

Fig. 24 Strawberry harvesting robot

针对稠密环境下的果蔬采收，以色列本古里安大学 RINGDAHL 等[89]开发了一种具有视觉伺服的甜椒收获机器人。开发了采摘路径混合规划算法，解决了采收机器人受到植物遮挡造成难以成功采收的难题，使甜椒采摘效率和成功率大幅提升。在8 种场景、对 150 个甜椒的采摘实验中，成功率达到 86%。韩国成均馆大学 LEE 等[90]开发了具有闭环控制视觉伺服系统的自动甜椒采收机器人，果实识别率 82.16%，收获成功率达到 70%。日本京都大学 KONDO 等[91]开发了全自动番茄果实团簇收获机器人。采用机器视觉系统确定水果簇的重心与花序梗和主茎的交点，以确定采收机器人最佳的抓握位置，末端执行器对果实抓握的成功率达到了 73%。日本国家农业和食品研究组织的 YAMAMOTO 等[92]研制了一种与移动工作台相结合的草莓采摘机器人。针对草莓采摘构建两个机器视觉系统，分别检测果实的位置和颜色，检测的平均误差为 5.4%。同时开发了一种新型的草莓采摘末端执行器，可以防止在采摘的过程中误触与目标水果相邻的果实，性能测试表明，草莓采摘机器人收获成功率稳定在 67.1%，果实收获率达到 88.0%。

荷兰瓦赫宁根大学 VAN HENTEN 等[6]、BACA 等[93]设计了针对温室稠密作物环境的甜椒采收机器人，讨论了在复杂环境（光照变化、遮挡和密集障碍物）中硬件和软件组件的性能，提出了创新的“约束方位角”机械臂运动规划方法和基于茎定位的最佳的抓握姿势算法，并设计了尺寸更小的 Fin Ray 末端采摘机构。使采摘机构在对密集障碍包围的水果采收成功率从 63% 提高到 84%，采收时的作物损

伤率从 19% 降低到 13%。这种采收机器人方案采用了 9 自由度机械臂，并开发了适用于高自由度机械臂运动规划的平衡双向 RRT 算法（图 25a、25b）和高性能末端执行器（图 25c、25d）。

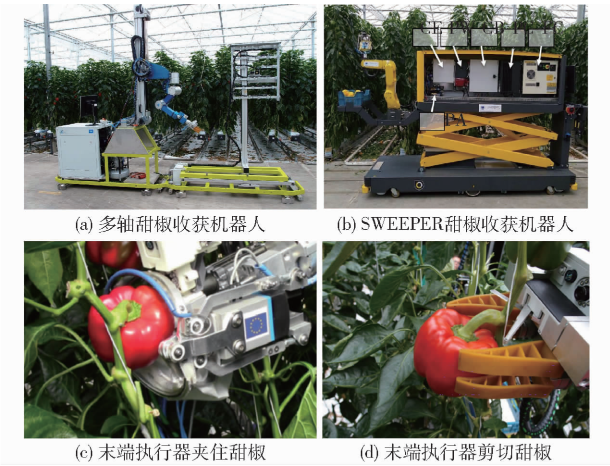
(a) 多轴甜椒收获机器人　(b) SWEEPER甜椒收获机器人
(c) 末端执行器夹住甜椒　(d) 末端执行器剪切甜椒

图 25　设施蔬果采收机器人

Fig. 25　Fruit and vegetable harvesting robots

美国 Root AI 和日本松下公司研发了温室小番茄采摘机器人，两者通过应用深度学习依据 3D 相机所获取的深度图像信息，检测果实成熟度和推断植株与果实的位置，形成对实际采摘路径和姿态规划；前者采用控制柔性三爪末端执行器抓取扭断方式，后者控制套取果实和支撑切割果梗方式，实现小番茄无损快速采摘（图 26a）。以色列 Metomotion 公司研发了温室大果番茄的成串选择性采摘机器人（图 26b），设计了与现在设施种植轨道配套的自主移动和两个独立作业的六自由度机械臂，集成 3D 视觉系统和机器视觉算法可识别和定位成熟果实，设计了两自由度闭合链串番茄果梗套剪夹持末端执行器，用于分离其他碰触的果实，通过剪断和夹持果梗，以实现目标串番茄低损收获和集箱。

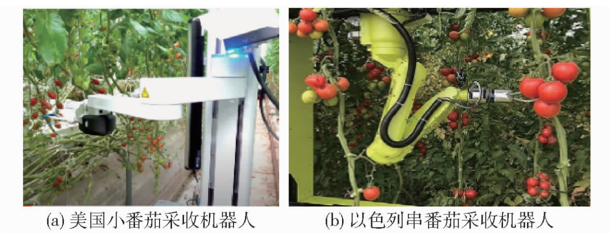
(a) 美国小番茄采收机器人　(b) 以色列串番茄采收机器人

图 26　设施收获机器人

Fig. 26　Greenhouse harvesting robot

纪超等[94]研发了黄瓜采摘机器人系统，提出三层式系统控制方案，机器人采摘成功率达 85%，单根黄瓜采摘耗时 28.6 s。赵春江团队[95]开发了一种基于激光测距和视觉伺服的果串自动对靶测量系统，对果串内果粒的平均识别率为 83.5%。实现了樱桃番茄果串自动采收中采收目标的精确识别定位。

刘成良团队[96-99]提出了采用机器学习提升番茄采摘机器人目标识别成功率，基于机器人双臂协作提升番茄采摘效率和成功率的方法。光照变化、果实粘连场景下 93.3% 的成熟番茄能够被正确识别，果体遮挡率超过 60% 时识别定位成功率超过 85%；SCARA 双臂机器人作业效率 8 s/个，作业成功率 87.5%，协作型双臂机器人果实作业效率 7 s/个，作业成功率接近 90%（图 27）。

(a) SCARA型双臂番茄采摘机器人
(b) 协作型双臂番茄采摘机器人

图 27　双臂番茄采摘机器人

Fig. 27　Dual-arm tomato harvesting robots

工厂化栽培是未来食用菌的主要生产方式。宾夕法尼亚州立大学 HUANG 等[100]比较了传统方法和 3 种简化方法（弯曲、扭曲和提升）的采摘力和运动，开发了 3 个力传感器和 1 个惯性测量单元的传感系统来测量拾取力和运动。采摘末端执行器评估表明弯曲采摘运动取得了最佳性能（图 28）。

图 28　食用菌车间管理收获机器人

Fig. 28　Mushroom harvesting robot

（6）设施物流类机器人

设施物流机器人主要指基于自主导航行走、路径规划、多机协同的搬运机器人。主要用于生产过程农产品、生产物资自主运输，对于减轻劳动强度、

提升生产效率有着重要意义。主要研究室内高精度定位导航与避障问题。

在设施物流机器人高速稳定性控制方面，以色列理工大学 GAT 等[101]提出了一种借助高架导向装置操纵的温室自动驾驶物流车用于运输采后蔬菜，车辆通过检测与导向装置的角度和距离来进行转向和校正，在涉及地面坡度和地形急剧变化的农业环境中能够保持稳定并以较小的振动收敛正确的路径。在温室物流机器人自主导航与主动避障方面，挪威生物经济研究所 HARIK 等[102]设计了一种轮式移动物流机器人，基于视觉图像和 LIDAR 传感器和 Hector SLAM 方法估算机器人位置，能够在 GPS 信号受限制的温室环境中实现自主导航、主动避障。美国 Iron OX[103]、荷兰 Berg - hortimotive 公司在温室生产中引入了物流机器人，提高了生产效率(图 29)。

(a) Iron OX公司 AGV　　(b) Berg-hortimotive 公司AGV

图 29　设施物流机器人

Fig. 29　Logistics robot in greenhouse

2.2.4　畜禽养殖类机器人

畜禽养殖类机器人是指在规模养殖环境下完成自主导航行走、识别动物行为、定向跟踪作业等任务的机器人。畜禽养殖机器人主要用于畜禽饲喂、环境消杀、挤奶打针、健康巡检等任务。关键技术包括活体生物目标行为特征识别、饲料精准精量投喂控制等。

法国 Octopus Robot 公司[104]研制的 Octopus Poultry Safe (OPS)机器人基于自主导航技术可以在禽舍内完成消杀功能(图 30a)。荷兰瓦赫宁根大学 VROEGINDEWEIJ 等[105-106]研制的 PoultryBot 可以自主捡拾养殖场内禽蛋(图 30b)。法国 TIBOT Technologies 公司[107]研制的 Spoutnic 机器人用于训练母鸡归巢下蛋、促进禽类进行健康活动。

监测动物行为是养殖类机器人研究热点。英国西英格兰大学 HANSEN 等[108]提出了基于卷积神经网络的猪脸识别算法，提高了机器人对饲养个体进行追踪分析和个性化饲喂的效率(图 31)。

在奶牛养殖中，饲喂机器人实施自动化饲喂是提高奶牛产量、降低生产成本的重要途径。美国 Lely 公司[109]研制了奶牛饲喂推料机器人、挤奶机器人(图 32)。Hetwin、GEA 等畜牧业跨国企业也均

(a) Octopus禽舍消杀机器人　　(b) PoultryBot捡蛋机器人

图 30　畜禽养殖机器人

Fig. 30　Poultry robot

(a) 猪脸识别　　(b) 精量投饵饲喂机器人

图 31　猪饲喂机器人

Fig. 31　Pig feeding robot

(a) 奶牛饲喂推料机器人　　(b) 挤奶机器人

图 32　奶牛推料饲喂挤奶机器人

Fig. 32　Forage pushing and milking robots

开发了多类型饲喂、挤奶机器人，基本实现了全程少人化生产。奥地利 Banns、Westfleisch 公司研制的屠宰机器人极大提高了生产效率。

万畅等[110]研制了磁条导航的饲草推送机器人(图 33a)和自助充电装置(图 33b)，通过磁条导航完成畜舍的自动巡检和机器人自动充电功能，在半开放式牛场工作环境实现了自主勤密饲喂。FENG 等[111]研制了畜禽养殖消毒机器人系统，由自动车、消毒剂喷洒单元、监控单元和控制器单元组成，机器人沿地面用磁铁和 RFID 标签标记的直线移动，支持自动和远程高效消毒作业，保障了畜禽养殖场所的安全。

2.2.5　水产养殖类机器人

水产养殖类机器人是指面向规模化池塘海面、陆基养殖、网箱养殖等场景，完成空中水面水下自主移动、识别水产对象行为、执行定向跟踪作业等的机器人。水产养殖机器人主要用于巡检、投喂、捡拾、捕捞等。主要技术挑战为水下生物行为机器视觉检测、饲料精准精量投喂控制等。

墨西哥生物技术研究中心 LUNA 等[112]、VON BORSTEL 等[113]采用人机交互和遥操作技术，研制了水体质量监控与饵料精量投喂一体化机器人，管

(a) 推料机器人

(b) 机器人在充电电桩回充

图 33　自主饲草推送机器人

Fig. 33　Forage pushing robot

理人员可通过网络远程可视化监测水质理化参数和遥控投饵量(图 34)。

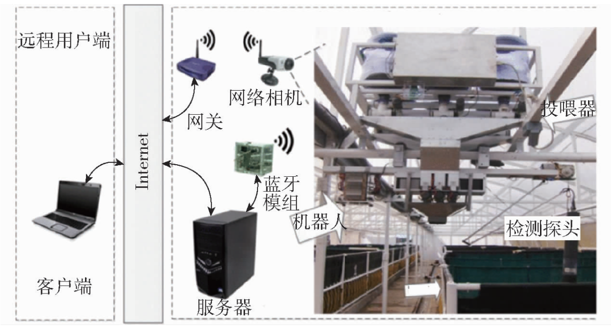

图 34　水质监控和水产品饲喂一体机器人

Fig. 34　Water quality monitoring and feeding robot

智利 Vard Aqua 公司[114]研制了一种全自动精确饲喂机器人 EXACT,可为整个设施养殖场提供饲喂作业。机器人根据其控制系统中登记的生物质信息计算饲料量,然后在轨道系统上运行,该系统可以定制以与设施的储罐设置配合使用(图 35)。

图 35　饵料精量投喂机器人

Fig. 35　Exact fish feeding robot

综上所述,近年来农业机器人从理论技术到工程应用均取得长足进展。

(1)理论技术方面,室外高精度定位导航、轨迹规划、机器视觉、智能控制等技术逐渐成熟,为农业机器人大田作业场景落地提供了技术支撑,未来要重点解决不确定性和差异性更大的农业应用场景中智能感知、自主学习与知识推理技术方面的难题,发展面向更加复杂应用场景的农业机器人技术,例如选择性收获、动物行为识别等。

(2)农业机器人产业方面,在工厂化育苗、水产和畜牧养殖领域,国内外已经有许多成熟的配套机器人化产品。在规模化农业的多种场景中,国内外传统农机企业和农业机器人初创公司相继开发了农业机器人产品,推动了以无人驾驶拖拉机和无人植保机为代表的大田农业机器人快速发展。但在更细分作业场景中,例如巡检、除草、植保等机器人仅形成了产业雏形,农业机器人发展仍面临全程全面的机器人化生产需求。

(3)工程应用方面,目前我国在高端设施育苗花卉、畜牧养殖等领域中较早开展了移栽、水肥一体化、环境控制、个性化饲喂、挤奶机器人等的应用。田间作业的无人驾驶、无人机植保等方面获得工程化初步应用与示范,果蔬采摘、设施巡检等方面开展了技术展示,但农业机器人发展仍然需要重点突破适用成本、作业效率、使用可靠性、品类多样化等问题,进一步提高技术示范的广度和规模。

3　农业机器人共性关键技术

农业机器人主要涉及 5 大关键技术:物境信息智能感知技术(“眼”)、智慧决策与智能控制技术(“脑”)、灵巧臂手精准作业技术(“手”)、自主导航稳定行走技术(“脚”)及端-边-云协同机器人系统构建技术(图 36)。

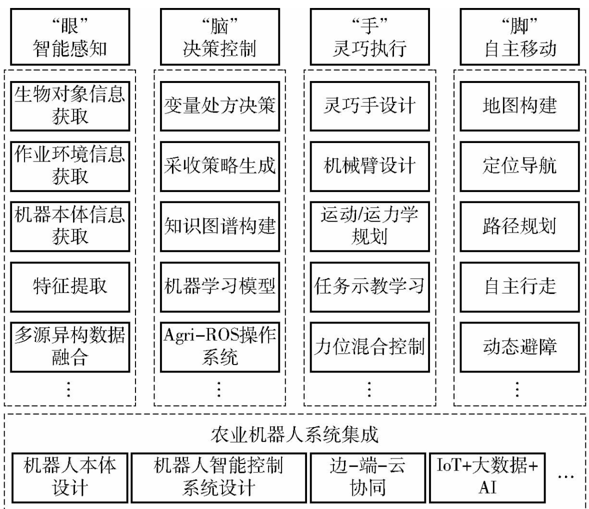

图 36　农业机器人关键技术构成

Fig. 36　Key technologies for agricultural robots

3.1　物境信息智能感知技术

农业机器人作业首先需要感知作业环境、作业对象和机器人本体状态,获取作业过程相关的全景数据,为农业机器人完成作业任务提供基础,物境信

息智能感知主要包括:传感器件、特征提取、信息融合等共性关键技术的研究(图37)。

图37 农业机器人感知技术

Fig. 37 Perception technologies for agricultural robots

农业物境感知重点研究:①农业机器人作业场景中的动植物对象、作业环境、机器人本体、作业过程特性的传感新原理、新材料、新方法,研制农业机器人专用传感器。②研究数据降维、去噪等数据预处理方法,开发多源多类数据高效特征提取算法,支撑农业机器人感知认知目标。③研究农业场景多源异构数据融合方法,建立多模态、多传感器的轻量级深度学习模型,形成基于片上模型(Model-on-the-chip,MoC)的感算融合系统,实现农业机器人高效感知。

例如,针对蔬果采摘机器人在密植场景下的高效采摘问题,GONG 等[99]提出了受遮挡目标空间高精度重建技术,传感信息包括 RGB 颜色、近红外和深度数据,特征提取阶段通过 FAST - RCNN 等深度学习模型提取了不同成像通道的模态信息,在信息融合环节基于颜色-点云空间联合学习方法实现了多源数据融合,遮挡程度超过60%的蔬果目标重建后空间定位精度达到5 mm,有效提升了采摘机器人应对复杂自然场景的能力。

3.2 智慧决策与智能控制技术

智慧决策与智能控制系统旨在对感知信息进行深度融合、认知推理、预测规划,并协调控制农业机器人眼、手、脚多个子系统作业,它是农业机器人的核心要素,其共性关键技术主要包括农业机器人软硬件控制平台技术、作业算法工具、作业决策应用(图38)。

面向多类型、跨场景、多任务农业机器人的快速开发与应用需求,智慧决策与智能控制技术需重点研究:①针对通用机器人操作系统 ROS(Robot operating system)[115-116]对农业机器人硬件兼容性不佳、仿真环境不适用农业场景等弊端,研制开源农

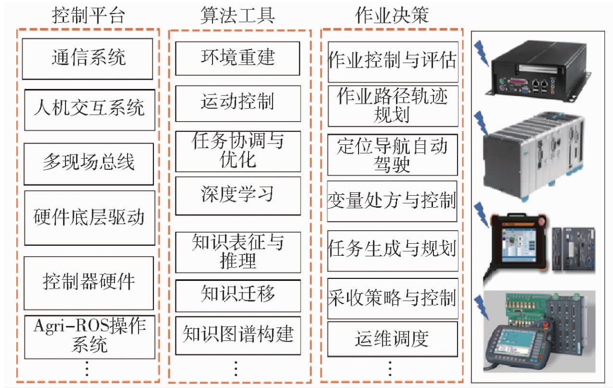

图38 农业机器人决策与控制技术

Fig. 38 Decision-making and smart control for agricultural robots

业机器人操作系统 Agri - ROS,突破农业机器人的软硬件资源管理、多任务并发实时任务处理,感知/运动/规划/控制算法仿真,算法库模型库共享,支撑农业机器人开发者生态。②研制适用于农业机器人多模态感知信息处理、易于组网通讯的嵌入式主板,开发低成本、可拓展、高防护等级农业机器人通用控制器。③研究基于机器学习的感知、决策、控制算法,开发目标识别定位、环境重建、自主移动、高效收获、运维调度等作业决策通用组件,构建高性能农业机器人快速开发平台。

TSOLAKIS 等[117]设计了农业机器人操作系统 AgROS,支持设备层实时控制和应用层可视化决策。GAO 等[118]提出了一种适应于复杂环境的机器人开源硬件控制器,支持多模态感知与通信、强实时多任务调度、集中-分布式多态算力分配,实现了仿真环境、示教器和嵌入式控制器一体化,可以支撑农业机器人控制系统快速开发。

3.3 灵巧臂手精准作业技术

农业机器人机械臂与末端执行器是完成重复、高强度或危险工作的作业部件,机器人末端执行器与农业作业对象关系密切,其灵巧特性应被格外关注。灵巧作业机械手、臂研究主要包括新型轻材料应用、结构设计、驱控系统设计、作业模式与作业方法规划,以及高精高效作业控制(图39)。

灵巧臂手精准作业重点研究:①农业机器人模块化构型设计、与作业环境相适应的机械臂轻量化设计、刚柔耦合设计及机电液气混合驱动方法,研制可配置可重构多功能农业机器人手臂系统。②针对农业机器人作业环境复杂、目标物多变、对象易损问题,研究灵巧末端构效规律、作业损伤机理、新型材料适用属性、高通用性设计方法,开发高效作业嵌入式自适应控制系统,实现高效低损作业。③研究手臂作业系统规划与控制方法,突破动态视觉伺服、实时避障、导纳控制等高

图 39　农业机器人灵巧臂手精准作业技术

Fig. 39　Precise operations of robotic arm and end-effector of agricultural robots

动态高鲁棒算法，优化机器人系统“手-眼-臂”协调模式，实现农业机器人灵巧作业。

LING 等[97]设计了关节型双臂采摘机器人，采摘末端执行器采用真空吸附和剪切耦合结构，解决了多臂实时运动规划与避障避碰问题。吴剑桥等[119]、ZHANG 等[120]综述了农业多功能机器人末端设计、制造控制方法，指明了采摘机器手系统将向着采摘目标场景通用化、结构形式多样化、灵巧作业智能化方向发展的趋势。CAO 等[70]针对荔枝等蔬果采摘问题提出了基于粒子群优化的机械臂采摘规划与轨迹跟踪控制方法，提高了自然场景下避障采摘效率。

3.4　自主导航稳定行走技术

农业机器人自主导航稳定行走主要解决机器人在复杂自然场景中的移动性和通过性问题。关键技术包括：移动底盘设计与驱控、实时精准定位、自主导航与避障技术，以及地图探索与构建和路径规划轨迹跟踪控制等（图 40）。

重点研究：①设计模块化、轻量化、高通过性农业机器人移动底盘，构建运动学与动力学模型，建立机器人与地面相互作用系统高维模态分析方法，开发负载敏感自适应、多驱动轮动力匹配的移动平台控制系统。②针对植保、巡检、收获等机器人共性需求，设计具备通用机电接口、数据通讯模式的“一专多能”功能性移动平台。③研究农田可通过性场景感知与理解方法，开发地图实时构建、多模态地况感知、路径动态规划、机群协同编队、地头转弯优化决策模型，实现通用高效能移动平台自主避障、自动驾驶功能。

图 40　农业机器人定位导航自主移动技术

Fig. 40　Auto-driving technologies for agricultural robots

INOTSUME 等[121]提出了越野机器人路面通过性多源迁移学习方法，实现了对机器人在未知路面上移动时滑移、行进能耗特性的准确预测和控制。BARRON 等[122]针对无边界场景的高效表征和语义模糊问题，提出基于神经辐射场的主动建图方法，实现了高精度逼真渲染的场景重建。MUR-ARTAL 等[123]提出利用 ORB（OrieBnted FAST and BRIEF）作为整个视觉 SLAM 中的核心特征 ORB－SLAM2 算法，实现地图重用、回环检测和重新定位的功能。胡鸿彬等[124]设计了一套基于 Android 的导航管理系统，包含农机作业参数管理、农田地理信息管理、作业路径规划、导航实时监控和历史作业数据管理等功能模块，实现自动导航中的管理和监控功能。

3.5　端-边-云协同机器人系统

端-边-云协同的农业机器人系统设计包括机器人本体数字化设计、控制系统架构设计、眼脑手脚协调控制、系统仿真与数字孪生、端-边-云协同的云脑控技术，以及多机器人协同作业技术。

农业机器人系统设计重点研究：① 机器人眼脑手脚集成设计与多学科优化方法。② 构建农业机器人全程作业云端大数据库、云端知识图谱知识库，开发农业机器人云管控系统（图 41）。③面向无人植物工厂、无人农场、智慧牧场等系统级建设需求，研究农业机器人多机协作、机群调度、智能运维等云脑控技术，实现多平台兼容机器人系统集成。

针对农业生产阶段性、季节性作业特点，EDAN[125]、PHANOMCHOENG 等[126]指出农业机器人一机多用、一专多能、软硬件联合设计是较为理想的农业机器人集成设计范式。在本体设计方面，WANG 等[127]、XU 等[128]提出了设施农业多功能农业机器人模块化设计技术。北海道大学 ZHANG 等[129]研制了一种应用于农业田间作业的多拖拉机协同作业系统，为机器人设定矩形或圆形安全区，从而避免机器人群的互相冲撞，提高了机器人机群的作业效率。LIU 等[130]提出了农业机器人眼手协同复杂连续行为的开发框架，SIRUVORU 等[131]梳理

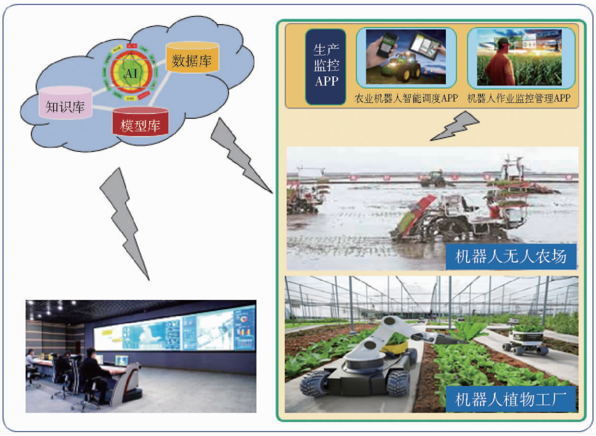

图 41　云管控农业机器人系统架构

Fig. 41　Cloud architecture for agricultural robot systems

归纳了构建农业云机器人系统的共性技术。GIANTS Software 公司开发的《模拟农场》游戏[132]提供了 Challenger、Fendt 等公司 250 余款农机真机数字模型和逼真的农耕自然场景，为农业元宇宙提供了数字入口。文献[133]综述了农机装备智能化进展，给出了端边云协同控制架构，指明了智能农业装备的发展趋势和路径。

无人农场和无人植物工厂是农业机器人系统作业的高级形式。在设施农业植物工厂全自主生产方面，随着农业用地供应的约束，垂直农业通过特定的设计实现室内可控光照和气候调控使作物产量最大化和投入成本降低，从而成为新型的农业生产模式。佛罗里达大学的 MARCHANT 等[134]提出了针对现有垂直农场的作物种植和收获的机器人系统，通过层间搬运机器人、层内物流机器人与收获机器人机群的系统控制，实现垂直栽培模块的动态调度。在大田智慧农场方面，无人农场是采用物联网、大数据、人工智能、5G、智能装备与机器人等新一代信息技术，通过对设施、装备、机械等进行远程控制、全程自动控制或机器人自主控制，完成所有农场生产作业的一种全天候、全过程、全空间的无人化生产作业模式。英国哈珀亚当斯大学团队[135]研发了世界上首个无人农场，利用地面机器人和空中无人机协作，实现了大麦种植的从土地耕整、播种施肥、田间管理和收获储运的全过程无人化周年作业。

4　农业机器人技术标准体系

农业机器人的产品化、产业化和规模化发展需要有国家标准的顶层设计与规划。国际标准化组织(ISO)在智能农机方面制定了相关标准，如智能农机网络通信标准 ISO－11783、控制系统安全性标准 ISO－25119、控制系统测试标准 ISO－18564 及农机控制系统功能性标准 ISO－11471 等。欧洲标准委员会(CEN)制定了农机装备控制系统安全性标准 EN12733、EN16246，试验方法规范 EN15695、EN13739。通过采标和对标，我国已制定智能农机装备类国家标准 18 项，行业标准 28 项。然而，国际上对农业机器人标准的研究处于起步阶段，我国也要根据自身发展需求制定相应的国家标准，形成农业机器人技术标准体系。

参考机器人、人工智能等领域相关标准体系[136－139]，农业机器人技术标准体系可分为基础层、共性通用层、应用领域层 3 层架构，具体为：通用基础、支撑技术与平台、基础软硬件、机器人系统与装备、生产保障 5 个分项(图 42)。根据农业机器人的技术研发与产品应用的发展趋势，适度逐步分层推进，为我国农业机器人的发展提供标准支撑。

5　总结与展望

目前，农业机器人的研发与应用仍处于初级阶段。随着工厂化和农业信息化的深度融合，农业机器人迎来了快速发展期，代表着最先进的农业生产力，作为无人农场、植物工厂、无人果园、无人渔场等的核心装备要素，可以极大提高劳动生产率、资源利用率和产出率，将实现农业劳动力的彻底解放，是智慧农业的发展方向。

5.1　农业机器人的发展机遇与挑战

人工智能、5G 通信、物联网、云计算等前沿科技为农业机器人技术发展提供了牵引力，农业从业人员“干不了”、“干不好”、“干不快”、“不愿干”、“危害大”等场景的产业需求为农业机器人技术发展提供了驱动力，多学科交叉融合的机器人关键技术的发展为农业机器人发展提供了支持力，小康社会乡村振兴战略为农业机器人发展提供了保障力，未来 5～10 年是农业机器人的快速发展窗口期。

然而，农业生产环境的复杂性和任务的多样性为农业机器人研发带来了巨大挑战，复杂农业场景下感知认知、智能控制、装备集成、系统决策与管控的理论技术亟待深入研究。

(1)智能感知：面向农业环境感知的多样化需求，以视觉技术为引领探索生物对象、环境、机器人本体感知新原理新方法，以及听/嗅/味觉、力/触觉等多模态感知与多源异构信息 SoC/MoC (System-on-the-chip/Model-on-the-chip)边缘计算感算融合技术，开发嵌入轻量级深度学习模型的农用人工智能芯片、专用传感器，实现高速高精度信息处理、农业机器人的多尺度视觉感知、高效目标检测与识别、复杂场景理解等任务，为农业机器人的智能化功能提供精准、快速、实时数据和信息 。

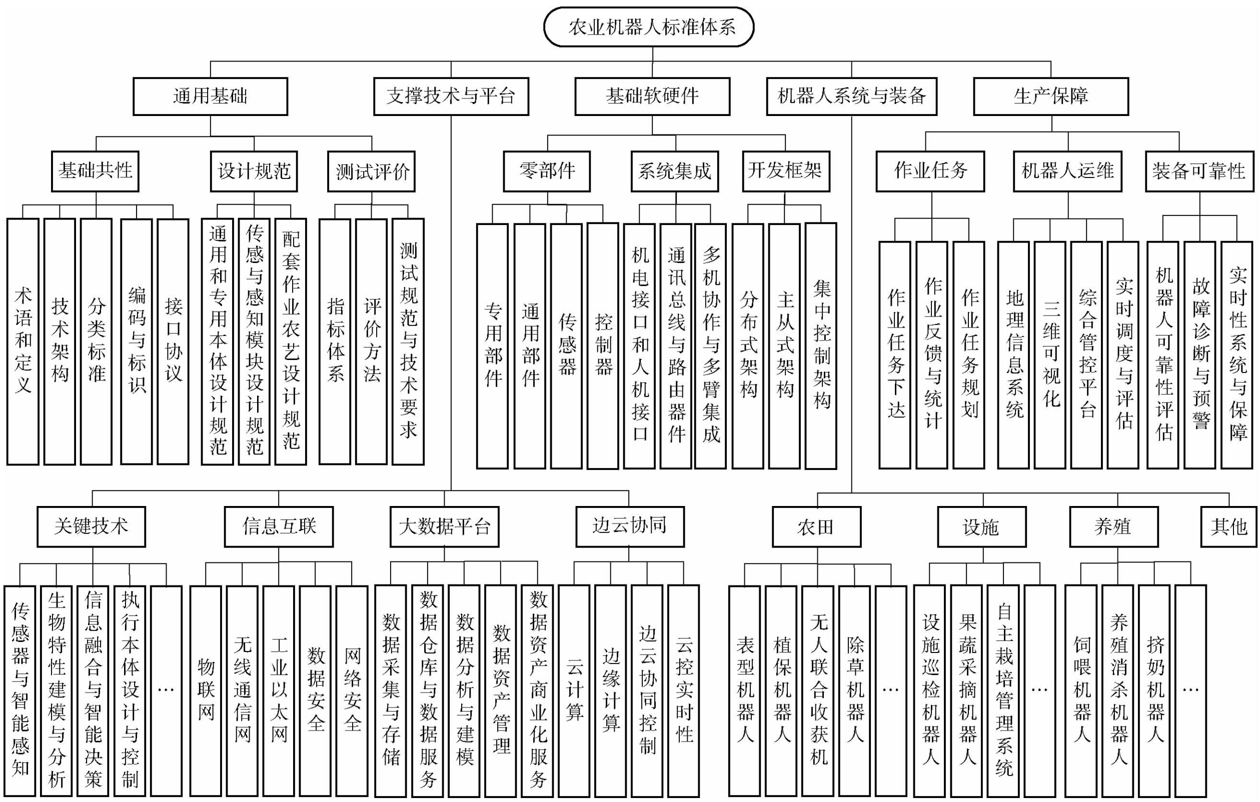

图 42　农业机器人标准体系架构

Fig. 42　Standard architecture for agricultural robots

(2)决策控制：面向农业机器人自主作业需求，研究作业处方生成方法；研究数据驱动、推理学习、经验探索于一体的可解释、更稳健决策方法，形成领域知识图谱并开发基于机器学习的感知、决策、控制算法工具库；研制兼容 x86/ARM/GPU 等架构处理器、带高性能人机交互接口(HMI)的农业机器人通用智能控制器；开发高通用性农业机器人操作系统(Agri - ROS)；设计农业云机器人及云端服务架构，从通用软硬件和基础设施层面支撑农业机器人智慧决策和智能控制。

(3)灵巧执行：研究农业机器人本体材料-结构-功能-性能一体化设计新理论新方法、复杂场景下高品质运动规划与视觉伺服控制方法；开发结构/驱动/感知/控制一体化关节，柔性化、轻量化被动安全及人-机器人-环境共融型机械臂和仿生仿形末端执行器，为农业机器人在强不确定场景下灵巧作业提供支撑。

(4)自主移动：面向复杂地形自主移动需求，研究田间、室内、水下农业生产环境高精定位新技术；研究地面自适应的全地形移动平台设计方法；研究防泥脚下陷滑移、高地隙动态调平的移动平台驱动控制技术；研发针对农业开放动态场景的 SLAM 技术；实现缓坡、垄沟、地头等复杂田间场景下自主稳定行走控制。

(5)端-边-云协同机器人系统构建：面向农业机器人系统高效作业需求，研究机器人数字化设计与优化新方法；研究眼脑手脚协调、多臂协作、多机协同作业决策方法；研究基于人机自然交互的示教协作新方法、人-机器人-环境共融新方法；研究农业机器人机群区域协调社会化服务模式和编队控制等群体智能技术；构建无人农场、植物工厂等多任务分布式协同云管控平台，促进高性能自主作业农用机器人大规模进入农业产业。

5.2　农业机器人的发展方向与路径

机器人是典型的高、精、尖、难技术产品，已广泛应用于各行各业。具有自主决策能力的农业机器人作为机器人家族的分支，填补了智能农机装备完成不了的作业模式。在“机器换人”迫切需求下，技术成本效益趋于平衡，推动农业机器人产业进入快速发展期。

农业机器人产业健康快速发展的建议：① 聚焦农业机器人主战场主产品：对接国家农业中长期发展规划，以乡村振兴战略为抓手，突破一批农业机器人共性关键技术，重点研发粮经饲、果蔬、畜禽、水产品生产关键环节的农业机器人，如品种选育、除草、饲喂、挤奶、收获类机器人等。② 推进农业机器人技术的标准化：加快农业机器人标准化研究，建立以农业机器人操作系统、通用控制器、多总线兼容协议、手/臂机电接口、移动底盘为代表的软硬件标准技术体系，为机器人系列化研发提供支撑。③ 构建多学科交叉人才生态环境：农业机器人涉及智能感

知、智能控制、智能决策、精准驱动等前沿科技,是多学科交叉融合的高技术产品,需要人工智能、机器人、大数据、移动通信等产业的技术和人才支撑。农业机器人产业的发展要吸引科研院所跨专业人才的加盟,用好高精专人才,培养交叉学科人才,加强国际合作交流,构建多学科交叉的人才生态环境,实现我国与国际农业机器人技术的同步发展。④ 为农机工业提供先进技术支撑:农业机器人先进的智能传感器技术、智慧决策智能控制技术、精密驱动技术、精确定位导航技术等是牵引智能农机装备升级发展的核心关键技术,必将助推我国农机工业、智慧农业产业快速发展。

综上,农业机器人进入了快速发展期,也是我国追赶国际技术前沿的关键窗口期。立足国内现状紧盯前沿抓住机遇,结合我国农业产业特点,加大农业机器人基础研究投入,鼓励“从 0 到 1”原创性研究,加快创新技术研发、缩短与国外技术水平差距,抢先实现农业机器人技术落地并进入产业化应用,实现与国际先进水平的跟跑和并跑,提高我国农机工业的技术水平和国际竞争力。

参 考 文 献

[1] ISO 8373:2021 Robotics-Vocabulary[S]. Berlin:2012:11 - 11.

[2] 近藤直,门田充司,野口伸共 著;乔军,陈兵旗 译. 农业机器人(Ⅰ/Ⅱ)[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2009: 35 - 36.

[3] 赵春江. 智慧农业的发展现状与未来展望[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 1 - 7.
ZHAO Chunjiang. Current situations and prospects of smart agriculture[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 1 - 7. (in Chinese)

[4] 曹其新,吕恬生,永田雅辉,等. 草莓拣选机器人的开发[J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(7):118 - 122.
CAO Qixin, LÜ Tiansheng, MASATERU Nagata, et al. Development of the strawberry sorting robot[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1999, 33(7):118 - 122. (in Chinese)

[5] 刘成良,王红永,曹其新,等. 秧苗嫁接机器人视觉与识别的研究[J]. 农业机械学报, 2001, 32(4):38 - 41.
LIU Chengliang, WANG Hongyong, CAO Qixin, et al. Study on robot vision and judgement system for seedling grafting robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(4):38 - 41. (in Chinese)

[6] VAN HENTEN E J, HEMMING J, VAN TUIJL B, et al. An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses[J]. Autonomous Robots, 2002, 13(3): 241 - 258.

[7] VAN HENTEN E, VAN TUIJL B V, HEMMING J, et al. Field test of an autonomous cucumber picking robot[J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(3): 305 - 313.

[8] 宋健,张铁中,徐丽明,等. 果蔬采摘机器人研究进展与展望[J]. 农业机械学报,2006,37(5):158 - 162.
SONG Jian, ZHANG Tiezhong, XU Liming, et al. Research actuality and prospect of picking robot for fruits and vegetables [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(5):158 - 162. (in Chinese)

[9] 刘继展,李萍萍,李智国,等. 面向机器人采摘的番茄力学特性试验[J]. 农业工程学报,2008,24(12):66 - 70.
LIU Jizhan, LI Pingping, LI Zhiguo, et al. Experimental study on mechanical properties of tomatoes for robotic harvesting[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(12):66 - 70. (in Chinese)

[10] 张俊雄,曹峥勇,耿长兴,等. 温室精准对靶喷雾机器人研制[J]. 农业工程学报,2009,25(增刊 2):70 - 73.
ZHANG Junxiong, CAO Zhengyong, GENG Changxing, et al. Research on precision target spray robot in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(Supp. 2):70 - 73. (in Chinese)

[11] 周俊,姬长英. 基于视觉导航的轮式移动机器人横向最优控制[J]. 机器人,2002,24(3):209 - 212.
ZHOU Jun, JI Changying. Lateral optimal control for wheeled mobile robot navigated by machine vision[J]. Robot, 2002, 24(3):209 - 212. (in Chinese)

[12] 邹湘军,罗锡文,卢俊,等. 虚拟环境下农业移动机器人行为及其仿真建模[J]. 系统仿真学报, 2006,18(增刊 2):551 - 553,562.
ZOU Xiangjun, LUO Xiwen, LU Jun, et al. Modeling for behavior and simulation of agriculture mobile robot in virtual environment[J]. Journal of System Simulation, 2006,18(Supp. 2):551 - 553,562. (in Chinese)

[13] YANG W, GUO Z, HUANG C, et al. Combining high-throughput phenotyping and genome-wide association studies to reveal natural genetic variation in rice[J]. Nature Communications, 2014, 5(1): 1 - 9.

[14] JIANG K, ZHANG Q, CHEN L, et al. Design and optimization on rootstock cutting mechanism of grafting robot for cucurbit [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(5): 117 - 124.

[15] Phenospex[EB/OL]. [2022 - 05 - 01]. https:// phenospex. com/.

[16] LemnaTec[EB/OL]. [2022 - 05 - 01]. http:// www. lemnatec. com/.

[17] RoboPec[EB/OL]. [2022 - 05 - 01]. https:// www. robopec. com/en/products/phenotyping/.

[18] SHAFIEKHANI A, KADAM S, FRITSCHI F B, et al. Vinobot and vinoculer: two robotic platforms for high-throughput field phenotyping[J]. Sensors, 2017, 17(1): 214.

[19] MUELLER-SIM T, JENKINS M, ABEL J, et al. The Robotanist: a ground-based agricultural robot for high-throughput crop

phenotyping[C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA),2017: 3634 – 3639.
[20] BAO Y,GAI J,XIANG L, et al. Field robotic systems for high-throughput plant phenotyping: a review and a case study[M]// ZHOU J, NGUYEN H T. High-throughput crop phenotyping. concepts and strategies in plant sciences. Springer, Cham, 2021:13 – 38.
[21] BAYATI M,FOTOUHI R. A mobile robotic platform for crop monitoring[J]. Advances in Robotics & Automation, 2018, 7(1): 1000186.
[22] NARVAEZ F Y,REINA G,TORRES-TORRITI M, et al. A survey of ranging and imaging techniques for precision agriculture phenotyping[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(6): 2428 – 2439.
[23] KAYACAN E,YOUNG S N,PESCHEL J M, et al. High-precision control of tracked field robots in the presence of unknown traction coefficients[J]. Journal of Field Robotics, 2018, 35(7): 1050 – 1062.
[24] 张波,罗锡文,兰玉彬,等.基于无线传感器网络的无人机农田信息监测系统[J].农业工程学报,2015,31(17):176 – 182.
ZHANG Bo, LUO Xiwen, LAN Yubin, et al. Agricultural environment monitor system based on UAV and wireless sensor networks[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(17): 176 – 182. (in Chinese)
[25] 方慧,胡令潮,何任涛,等. 植物三维信息采集方法研究[J].农业工程学报,2012,28(3):142 – 147.
FANG Hui, HU Lingchao, HE Rentao, et al. Research on plant three-dimensional information acquisition method[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(3): 142 – 147. (in Chinese)
[26] Lianshi Navigation[EB/OL].[2022 – 05 – 01].http://www.allynav.cn.
[27] ZHOU H,HU L,LUO X, et al. Design and test of laser-controlled paddy field levelling-beater[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(1): 57 – 65.
[28] BLENDER T,BUCHNER T,FERNANDEZ B, et al. Managing a mobile agricultural robot swarm for a seeding task[C]// IECON 2016 – 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society,2016: 6879 – 6886.
[29] 魏新华,包盛,刘晓凯,等.穴盘苗全自动移栽机运动协调控制系统设计与移栽试验[J].农业机械学报,2016,47(12): 1 – 7,52.
WEI Xinhua, BAO Sheng, LIU Xiaokai, et al. Design and experiment on potted-seedling automatic transplanter control system for motion coordinating[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(12):1 – 7,52. (in Chinese)
[30] MCCOOL C,BEATTIE J,FIRN J, et al. Efficacy of mechanical weeding tools: a study into alternative weed management strategies enabled by robotics[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(2): 1184 – 1190.
[31] Blueriver technology[EB/OL]. Available:https://bluerivertechnology.com/our-products/, 2022 – 05 – 01.
[32] EcoRobotix[EB/OL]. [2022 – 05 – 01].https://ecorobotix.com/en/.
[33] Carbon Robotics[EB/OL]. [2022 – 05 – 01].https://carbonrobotics.com.
[34] Naio Technologies[EB/OL]. [2022 – 05 – 01].https://www.naio-technologies.com/en.
[35] 李南,陈子文,朱成兵, 等.电驱锄草机器人系统设计与试验[J].农业机械学报,2016,47(5):15 – 20,69.
LI Nan, CHEN Ziwen, ZHU Chengbing, et al. System design and experiment of electric driven weeding robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(5):15 – 20,69. (in Chinese)
[36] 翟长远,付豪,郑康,等.基于深度学习的大田甘蓝在线识别模型建立与试验[J].农业机械学报,2022,53(4):293 – 303.
ZHAI Changyuan,FU Hao,ZHENG Kang, et al. Establishment and experimental verification of deep learning model for on-line recognition of field cabbage[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(4):293 – 303. (in Chinese)
[37] Harvest CROO Robotics[EB/OL]. [2022 – 05 – 01].http://www.harvestcroorobotics.com.
[38] 苑进. 选择性收获机器人技术研究进展与分析[J].农业机械学报,2020,51(9):1 – 17.
YUAN Jin. Research progress analysis of robotics selective harvesting technologies[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(9):1 – 17. (in Chinese)
[39] BARGOTI S,UNDERWOOD J P. Image segmentation for fruit detection and yield estimation in apple orchards[J]. Journal of Field Robotics, 2017, 34(6): 1039 – 1060.
[40] HE L,FANG W,ZHAO G, et al. Fruit yield prediction and estimation in orchards: a state-of-the-art comprehensive review for both direct and indirect methods[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 195:106812.
[41] MARTÍNEZ-CASASNOVAS J A, RUFAT J, ARNÓ J, et al. Mobile terrestrial laser scanner applications in precision fruticulture/horticulture and tools to extract information from canopy point clouds[J]. Precision Agriculture, 2017, 18(1): 111 – 132.
[42] GENÉ-MOLA J,GREGORIO E,CHEEIN F A, et al. Fruit detection, yield prediction and canopy geometric characterization using lidar with forced air flow[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 168:105121.
[43] WANG Y,YANG F,ZHOU Y, et al. A riding fuzzy control system for a mountain agricultural robot[J]. International Journal on Smart Sensing & Intelligent Systems, 2013, 6(4):1725 – 1744.
[44] MAO W,LIU H,HAO W, et al. Development of a combined orchard harvesting robot navigation system[J]. Remote Sensing, 2022, 14(3): 675.
[45] ZHOU X,ZHOU J. Data-driven driving state control for unmanned agricultural logistics vehicle[J]. IEEE Access, 2020, 8:

65530 – 65543.
[46] MAJEED Y, KARKEE M, ZHANG Q, et al. Development and performance evaluation of a machine vision system and an integrated prototype for automated green shoot thinning in vineyards[J]. Journal of Field Robotics, 2021, 38(6): 898 – 916.
[47] WRENN E. Meet. Wall-Ye: The French grape-picking robot which can work day and night - and may well put vineyard workers out of a job[EB/OL]. [2022 – 05 – 01]. https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2209975/Meet-Wall-Ye-The-French-grape-picking-robot-work-day-night-vineyardworkers-job.html.
[48] BOTTERILL T, PAULIN S, GREEN R, et al. A robot system for pruning grape vines[J]. Journal of Field Robotics, 2017, 34(6): 1100 – 1122.
[49] YOU A, GRIMM C, SILWAL A, et al. Semantics-guided skeletonization of upright fruiting offshoot trees for robotic pruning[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 192:106622.
[50] RICHARD L. Automated pruning with robotics[EB/OL]. [2022 – 05 – 01]. https://www.goodfruit.com/automated-pruning-with-robotics/.
[51] REISER D, SEHSAH E-S, BUMANN O, et al. Development of an autonomous electric robot implement for intra-row weeding in vineyards[J]. Agriculture, 2019, 9(1): 18.
[52] 吴应新, 吴剑桥, 杨雨航, 等. 油电混合果园自动导航车控制器硬件在环仿真平台设计与应用[J]. 智慧农业(中英文), 2020, 2(4): 149 – 164.
WU Yingxin, WU Jianqiao, YANG Yuhang, et al. Design and application of hardware-in-the-loop simulation platform for AGV controller in hybrid orchard[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(4): 149 – 164. (in Chinese)
[53] Xiaogeng Agribots[EB/OL]. [2022 – 05 – 01]. www.ixiaogeng.com.
[54] ZHANG X, KARKEE M, ZHANG Q, et al. Computer vision-based tree trunk and branch identification and shaking points detection in dense-foliage canopy for automated harvesting of apples[J]. Journal of Field Robotics, 2021, 38(3): 476 – 493.
[55] 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.
[56] GRANLAND K, NEWBURY R, CHEN Z, et al. Detecting occluded y-shaped fruit tree segments using automated iterative training with minimal labeling effort[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 194:106747.
[57] 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.
[58] Ffrobotics.com[EB/OL]. [2022 – 05 – 01]. https://www.ffrobotics.com/.html.
[59] Robotics Plus[EB/OL]. [2022 – 05 – 01]. https://www.roboticsplus.co.nz.
[60] ZHAO D, LV J, JI W, et al. Design and control of an apple harvesting robot[J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(2): 112 – 122.
[61] BLOCH V, DEGANI A, BECHAR A. A methodology of orchard architecture design for an optimal harvesting robot[J]. Biosystems Engineering, 2018, 166:126 – 137.
[62] WANG C, ZOU X, TANG Y, et al. Localisation of litchi in an unstructured environment using binocular stereo vision[J]. Biosystems Engineering, 2016, 145:39 – 51.
[63] CAO X, ZOU X, JIA C, et al. Rrt-based path planning for an intelligent litchi-picking manipulator[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 156:105 – 118.
[64] SONG Z, ZHOU Z, WANG W, et al. Canopy segmentation and wire reconstruction for kiwifruit robotic harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 181:105933.
[65] SUO R, GAO F, ZHOU Z, et al. Improved multi-classes kiwifruit detection in orchard to avoid collisions during robotic picking[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 182:106052.
[66] ZHOU H, ZHANG S, ZHANG J, et al. Design, development, and field evaluation of a rubber tapping robot[J]. Journal of Field Robotics, 2022, 39(1): 28 – 54.
[67] 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. (in Chinese)
[68] 崔鹏, 陈志, 张小超. 苹果采摘机器人仿生机械手静力学分析与仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 149 – 153.
CUI Peng, CHEN Zhi, ZHANG Xiaochao. Statics analysis od apple-packing robot humanoid manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 149 – 153. (in Chinese)
[69] WU F, DUAN J, CHEN S, et al. Multi-target recognition of bananas and automatic positioning for the inflorescence axis cutting point[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12:705021.
[70] CAO X, YAN H, HUANG Z, et al. A multi-objective particle swarm optimization for trajectory planning of fruit picking manipulator[J]. Agronomy, 2021, 11(11): 2286.
[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 Bo, LIU Chengliang, GONG Liang, et al. The tip point feature of pakchoi recognition and virtual plant modelling based on image processing[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(16): 439 – 444.
[73] XIAO D, GONG L, LIU C, et al. Phenotype-based robotic screening platform for leafy plant breeding[J]. IFAC-

PapersOnLine, 2016, 49(16): 237 – 241.
[74] GU D, ZHU K, SHAO Y, et al. 3D scanning and multiple point cloud registration with active view complementation for panoramically imaging large-scale plants[C]//International Conference on Intelligent Robotics and Applications, 2019: 329 – 341.
[75] DU J, LU X, FAN J, et al. Image-based high-throughput detection and phenotype evaluation method for multiple lettuce varieties[J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 563386.
[76] ATEFI A, GE Y, PITLA S, et al. In vivo human-like robotic phenotyping of leaf traits in maize and sorghum in greenhouse[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 163: 104854.
[77] 张凯良，褚佳，张铁中，等. 蔬菜自动嫁接技术研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报，2017，48(3): 1 – 13.
ZHANG Kailiang, CHU Jia, ZHANG Tiezhong, et al. Development status and analysis of automatic grafting technology for vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 1 – 13. (in Chinese)
[78] KUBOTA C, MCCLURE M A, KOKALIS-BURELLE N, et al. Vegetable grafting: history, use, and current technology status in north America[J]. HortScience, 2008, 43(6): 1664 – 1669.
[79] ASHRAF M A, KONDO N, SHIIGI T. Use of machine vision to sort tomato seedlings for grafting robot[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2011, 4(4): 119 – 125.
[80] Visser[EB/OL]. [2022 – 05 – 01]. https://www.visser.eu/.html.
[81] OBERTI R, MARCHI M, TIRELLI P, et al. Selective spraying of grapevines for disease control using a modular agricultural robot[J]. Biosystems Engineering, 2016, 146: 203 – 215.
[82] Berghortimotive[EB/OL]. [2022 – 05 – 01]. https://berghortimotive.com/nl/.html.
[83] 张俊雄，曹峥勇，耿长兴，等. 温室精准对靶喷雾机器人研制[J]. 农业工程学报，2009，25(增刊2): 70 – 73.
ZHANG Junxiong, CAO Zhengyong, GENG Changxing, et al. Research on precision target spray robot in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(Supp.2): 70 – 73. (in Chinese)
[84] LI Y, YUAN J, LIU X, et al. Spraying strategy optimization with genetic algorithm for autonomous air-assisted sprayer in Chinese heliogreenhouses[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 156: 84 – 95.
[85] Priva. Priva Kompano Deleaf-Line[EB/OL]. http://www.priva-asia.com/en/discover-priva/stories/2016/priva-kompano-deleaf-line/, 2016.
[86] Saia pruning robot[EB/OL]. [2022 – 05 – 01]. https://www.saia-agrobotics.com/.
[87] LUCY C. Scientists create gardening robot to help out with pruning and Trimming[EB/OL]. https://www.independent.ie/world-news/and-finally/scientists-create-gardeningrobot-to-help-out-with-pruning-and-trimming-38629630.html, 2019.
[88] VAN HENTEN E, VAN TUIJL B, HOOGAKKER G J, et al. An autonomous robot for de-leafing cucumber plants grown in a high-wire cultivation system[J]. Biosystems Engineering, 2006, 94(3): 317 – 323.
[89] RINGDAHL O, KURTSER P, EDAN Y. Evaluation of approach strategies for harvesting robots: case study of sweet pepper harvesting[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2019, 95(1): 149 – 164.
[90] LEE B, KAM D, MIN B, et al. A vision servo system for automated harvest of sweet pepper in Korean greenhouse environment[J]. Applied Sciences, 2019, 9(12): 2395.
[91] KONDO N, YAMAMOTO K, SHIMIZU H, et al. A machine vision system for tomato cluster harvesting robot[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2009, 2(2): 60 – 65.
[92] YAMAMOTO S, HAYASHI S, YOSHIDA H, et al. Development of a stationary robotic strawberry harvester with picking mechanism that approaches target fruit from below (Part 2)—Construction of the machine's optical system[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2010, 72(2): 133 – 142.
[93] BACA C, ROORDAB T, RESHEFC R, et al. Analysis of a motion planning problem for fruit harvesting in a dense obstacle environment[J]. Improving Obstacle Awareness for Robotic Harvesting of Sweet-pepper, 2016, 146: 85 – 97.
[94] 纪超，冯青春，袁挺，等. 温室黄瓜采摘机器人系统研制及性能分析[J]. 机器人，2011，33(6): 726 – 730.
JI Chao, FENG Qingchun, YUAN Ting, et al. Development and performance analysis on cucumber harvesting robot system in greenhouse[J]. Robot, 2011, 33(6): 726 – 730. (in Chinese)
[95] 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 measurement method for cherry tomato based on visual servo[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16): 206 – 212. (in Chinese)
[96] ZHAO Y, GONG L, LIU C, et al. Dual-arm robot design and testing for harvesting tomato in greenhouse[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(16): 161 – 165.
[97] LING X, ZHAO Y, GONG L, et al. Dual-arm cooperation and implementing for robotic harvesting tomato using binocular vision[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2019, 114: 134 – 143.
[98] ZHAO Y, GONG L, ZHOU B, et al. Detecting tomatoes in greenhouse scenes by combining AdaBoost classifier and colour analysis[J]. Biosystems Engineering, 2016, 148: 127 – 137.
[99] GONG L, WANG W, WANG T, et al. Robotic harvesting of the occluded fruits with a precise shape and position reconstruction approach[J]. Journal of Field Robotics, 2022, 39(1): 69 – 84.
[100] HUANG M, HE L, CHOI D, et al. Picking dynamic analysis for robotic harvesting of *Agaricus bisporus* mushrooms[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 185: 106145.

[101] GAT G, GAN-MOR S, DEGANI A. Stable and robust vehicle steering control using an overhead guide in greenhouse tasks [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 121:234 - 244.
[102] HARIK E H C, KORSAETH A. Combining hector slam and artificial potential field for autonomous navigation inside a greenhouse[J]. Robotics, 2018, 7(2): 22.
[103] Iron Ox[EB/OL]. [2022 - 05 - 01]. https://ironox.com/technology/.
[104] OCTOPUS ROBOTS S A. Octopus Poultry Safe robot[EB/OL]. [2022 - 05 - 01]. http://octopusrobots.com/en/home/.
[105] VROEGINDEWEIJ B A. PoultryBot, a robot for poultry house applications: localisation, path planning, object recognition and performance evaluation[D]. Wageningen: Wageningen University and Research, 2018.
[106] VROEGINDEWEIJ B A, VAN HELL S, IJSSELMUIDEN J M, et al. Object discrimination in poultry housing using spectral reflectivity[J]. Biosystems Engineering, 2018, 167:99 - 113.
[107] TIBOT Technologies, Spoutnic[EB/OL]. [2022 - 05 - 01]. https://www.tibot.fr/.
[108] HANSEN M F, SMITH M L, SMITH L N, et al. Towards on-farm pig face recognition using convolutional neural networks [J]. Computers in Industry, 2018, 98:145 - 152.
[109] LELY[EB/OL]. [2022 - 05 - 01]. https://www.lely.com/cn/solutions/milking/astronaut-a5/.
[110] 万畅,谭彧,郑永军,等.饲草推送机器人磁条导航自动充电研究[J].农业机械学报, 2018,49(增刊):1 - 7,41.
WAN Chang, TAN Yu, ZHENG Yongjun, et al. Automatic charging of forage pushing robot by magnetic stripe navigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(Supp.):1 - 7,41. (in Chinese)
[111] FENG Q C, WANG X. Design of disinfection robot for livestock breeding[J]. Procedia Computer Science, 2020, 166:310 - 314.
[112] LUNA F D V B, DE LA ROSA AGUILAR E, NARANJO J S, et al. Robotic system for automation of water quality monitoring and feeding in aquaculture shadehouse[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2016, 47(7): 1575 - 1589.
[113] VON BORSTEL F D, SUÁREZ J, DE LA ROSA E, et al. Feeding and water monitoring robot in aquaculture greenhouse[J]. Industrial Robot: an International Journal, 2013,40(1):10 - 19.
[114] Vard Aqua Chile SA[EB/OL]. [2022 - 05 - 01]. https://www.vard.com/products-and-services/aquaculture.
[115] Robot Operating System[EB/OL]. [2022 - 05 - 01]. https://www.ros.org.
[116] DILUOFFO V, MICHALSON W R, SUNAR B. Robot Operating System 2: the need for a holistic security approach to robotic architectures[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2018, 15(3): 1729881418770011.
[117] TSOLAKIS N, BECHTSIS D, BOCHTIS D. Agros: a robot operating system based emulation tool for agricultural robotics[J]. Agronomy, 2019, 9(7): 403.
[118] GAO Y, GONG L, HUANG Y, et al. Rhino: an open-source embedded motherboard design enabling complex behavior of intelligent robots[C]//2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2019: 1568 - 1573.
[119] 吴剑桥, 范圣哲, 贡亮, 等. 果蔬采摘机器手系统设计与控制技术研究现状和发展趋势[J]. 智慧农业(中英文), 2020, 2(4): 17 - 40.
WU Jianqiao, FAN Shengzhe, GONG Liang, et al. Research status and devel-opment direction of design and control technology of fruit and vegetable picking robot system[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(4): 17 - 40. (in Chinese)
[120] 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.
[121] INOTSUME H, KUBOTA T. Terrain traversability prediction for off-road vehicles based on multi-source transfer learning[J]. ROBOMECH Journal, 2022, 9(1): 1 - 25.
[122] BARRON J T, MILDENHALL B, TANCIK M, et al. Mip-nerf: a multiscale representation for anti-aliasing neural radiance fields[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, 2021:5855 - 5864.
[123] MUR-ARTAL R, MONTIEL J M M, TARDOS J D. ORB - SLAM: a versatile and accurate monocular SLAM system[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(5): 1147 - 1163.
[124] 胡鸿彬,李彦明,唐小涛,等.基于 Android 的农机导航管理系统研究与设计[J].农机化研究, 2019,41(5):179 - 183.
HU Hongbin, LI Yanming, TANG Xiaotao, et al. The research and design of agricultural machinery navigation management system based on Android platform[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(5):179 - 183. (in Chinese)
[125] EDAN Y. Design of an autonomous agricultural robot[J]. Applied Intelligence, 1995, 5(1): 41 - 50.
[126] PHANOMCHOENG G, SAADI M, SASITHONG P, et al. Hardware software co-design of a farming robot[J]. Engineering Journal, 2020, 24(1): 199 - 208.
[127] WANG Y, KONG L, YANG H, et al. Building unmanned plant factory with modular robotic manipulation and logistics systems[C]//International Conference on Intelligent Computing, Communication&Devices, 2017:11 - 19.
[128] XU R, LI C. A modular agricultural robotic system (MARS) for precision farming: concept and implementation[J]. Journal of Field Robotics, 2022,39:387 - 409.

(下转第 55 页)

during ploughing in fields of different sizes[J]. Biosystems Engineering, 2019, 179(2):80－93.
[20] LACOUR S, BURGUN C, PERILHON C, et al. A model to assess tractor operational efficiency from bench test data[J]. Journal of Terramechanics, 2014, 54:1－18.
[21] 余友泰.农业机械化工程[M].北京:中国展望出版社,1987.
[22] 张凯,白美健,李益农,等.联合收割机生产率计算模型与适宜作业路线分析[J].农业工程学报,2018,34(18):37－43.
ZHANG Kai, BAI Meijian, LI Yinong, et al. Combine harvester productivity calculation model and analysis of suitable operation route[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(18):37－43. (in Chinese)
[23] 杨伟.江苏省小地块水稻收割机作业效率研究[D].南京:南京农业大学,2016.
YANG Wei. Study on rice harvester working efficiency of the small-type field in Jiangsu Province[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University,2016. (in Chinese)
[24] 卢林瑞,王庆喜,刘斌,等.田间移动机组的生产率[J].吉林农业大学学报,1992,14(2):69－73.
[25] 杜兵.农机作业班时间构成项目分类的分析及改进[J].北京农业工程大学学报,1995,15(1):64－68.
DU Bing. Analysis and improvement of current classification of time in shift[J]. Journal of Beijing Agricultural Engineering University,1995,15(1):64－68. (in Chinese)
[26] 孔德刚,张帅,杨明东,等.大功率拖拉机播种作业效率与经济性的测试分析[J].东北农业大学学报,2008,39(4):7－13.
KONG Degang, ZHANG Shuai, YANG Mingdong, et al. Study on work efficiency and economy of import large power tractor in sowing work[J]. Journal of Northeast Agricultural University,2008,39(4):7－13. (in Chinese)
[27] 孔德刚,赵永超,刘立意,等.大功率农机作业效率与机组合理运用模式的研究[J].农业工程学报,2008,24(8):143－146.
KONG Degang, ZHAO Yongchao, LIU Liyi, et al. Investigation of work efficiency of high-power agricultural machinery and reasonable application pattern of tractor-implement units[J]. Transactions of the CSAE,2008,24(8):143－146. (in Chinese)
[28] MEHTA C R, SINGH K, SELVAN M M. A decision support system for selection of tractor-implement system used on Indian farms[J]. Journal of Terramechanics, 2011, 48(1):65－73.
[29] 李洪文.农业机械化生产学[M].2 版.北京:中国农业出版社, 2018.
[30] 祝清震,武广伟,朱志豪,等.冬小麦精准分层施肥宽苗带播种联合作业机研究[J].农业机械学报, 2022, 53(2):25－35.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, ZHU Zhihao, et al. Design and test on winter wheat precision separated layer fertilization and wide-boundary sowing combined machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 25－35. (in Chinese)
[31] 李荣.基于 STUR 的播种机组适宜作业单元地块长度和面积耦合关系研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2021.
LI Rong. Research on STUR based coupling relationship of suitable unit plot length and area for sowing unit[D]. Harbin: Northeast Agricultural University,2021. (in Chinese)

(上接第 22 页)
[129] ZHANG C, NOGUCHI N. Development of a multi-robot tractor system for agriculture field work[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 142:79－90.
[130] LIU C, GONG L, ZHANG W. Manipulating complex robot behavior for autonomous and continuous operations[M]. New York: IntechOpen, 2020.
[131] SIRUVORU V, VIJAY KUMAR N. Cloud robotics in agriculture automation[C]//International Conference On Computational Vision and Bio Inspired Computing, 2018: 1073－1086.
[132] Farming Simlulator[EB/OL]. [2022－05－01]. https://farming-simulator.com.
[133] 刘成良,林洪振,李彦明,等.农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J].农业机械学报,2020,51(1):1－18.
LIU Chengliang, LIN Hongzhen, LI Yanming, et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(1):1－18. (in Chinese)
[134] MARCHANT W, TOSUNOGLU S. Robotic implementation to automate a vertical farm system[C]//30st Florida Conference on Recent Advances in Robotics,2017.
[135] DUCKETT T, PEARSON S, BLACKMORE S, et al. Agricultural robotics: the future of robotic agriculture[J]. arXiv preprint arXiv:1806.06762, 2018.
[136] 胡小鹿, 梁学修, 张俊宁, 等. 中国智能农机装备标准体系框架构建与研制建议[J]. 智慧农业(中英文), 2020, 2(4): 116－123.
HU Xiaolu, LIANG Xuexiu, ZHANG Junning, et al. Construction of standard system frame-work for intelligent agricultural machinery in China[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(4): 116－123. (in Chinese)
[137] 邓小明,胡小鹿,柏雨岑.国家农业机械产业创新发展报告(2018)[M]. 北京:机械工业出版社, 2019.
[138] 国家标准化管理委员会,中央网信办,国家发展改革委,科技部,工业和信息化部. 国家新一代人工智能标准体系建设指南[S]. 2020－07－27.
[139] 国家标准化管理委员会, 国家发展和改革委员会, 科学技术部, 工业和信息化部. 国家机器人标准体系建设指南[S]. 2017－05－22.