

# 农业机器人关键技术及其在现代农业生产中的应用研究进展

崔惟远

中国农业大学信息与电气工程学院, 北京

收稿日期: 2026年5月3日; 录用日期: 2026年6月3日; 发布日期: 2026年6月12日

## 摘要

农业机器人作为智慧农业的核心装备, 是应对全球劳动力短缺、资源约束及生产效率瓶颈的关键技术路径。文章系统梳理了农业机器人的关键技术体系与现代应用现状。首先, 从多模态环境感知、自主导航与定位、智能决策与任务规划、柔性执行与灵巧操作、多机协同与集群控制、系统集成及环境适应性与可靠性七个维度, 构建了完整的技术架构, 并分析了各领域的研究进展与技术难点。在此基础上, 综述了农业机器人在精准种植与田间管理、自动化采摘与收获、智能植保与巡检三大核心应用场景中的效果。最后, 对农业机器人的未来研究进行了展望。

## 关键词

农业机器人, 环境感知, 自主导航, 柔性执行, 现代农业

# Research Progress on Key Technologies of Agricultural Robots and Their Applications in Modern Agricultural Production

Weiyuan Cui

College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing

Received: May 3, 2026; accepted: June 3, 2026; published: June 12, 2026

## Abstract

As the core equipment of smart agriculture, agricultural robots serve as a critical technical approach to address global labor shortages, resource constraints, and production efficiency bottlenecks. This

paper systematically reviews the key technical systems and the modern application status of agricultural robots. Firstly, a comprehensive technical framework is constructed from seven dimensions, including multimodal environmental perception, autonomous navigation and positioning, intelligent decision-making and task planning, flexible execution and dexterous operation, multi-robot cooperation and swarm control, system integration, as well as environmental adaptability and reliability. The research progress and technical difficulties in each field were also analyzed. On this basis, the application effects of agricultural robots in three core scenarios are summarized, covering precision planting and field management, automatic picking and harvesting, and intelligent plant protection and inspection. Finally, the future research trends of agricultural robots are predicted.

## Keywords

Agricultural Robot, Environmental Perception, Autonomous Navigation, Flexible Execution, Modern Agriculture

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

传统农业生产长期面临劳动力短缺、生产效率不高、资源利用效率较低等问题。随着全球耕地资源日益缩减以及农业劳动力老龄化程度不断加深，传统农业模式已难以满足现代社会对生产效率与产品质量的双重需求。在此背景下，农业机器人作为融合感知、决策、控制与执行技术的智能化自主作业装备，已被认为是推动农业向精准化、自动化、可持续化转型的核心，也是解决现代农业劳动力短缺、生产模式粗放等不足的重要手段[1]。农业机器人通常由信息感知系统、决策控制系统、作业执行系统和自主移动系统四大部分构成，在实际工程应用中与人工智能、大数据、云计算、物联网等技术深度融合，形成完整的农业机器人应用系统[2]。自20世纪50年代工业机器人诞生以来，其技术理念逐步向农业领域渗透，经过数十年的技术积累，当前农业机器人技术已进入快速迭代与规模化落地的关键发展阶段[3]。

与工业机器人所处的标准化结构化作业环境不同，农业机器人长期在开放、动态、非结构化的自然田间环境中作业，作业作物、果蔬等作用对象具备生物生命特征，个体形态、成熟度差异显著，环境干扰因素多，增加了设备研发、算法适配与稳定作业的技术门槛与研发难度[4]。此外，田间复杂多变的光照、地形起伏、植被遮挡等干扰，也进一步制约了机器人识别、定位与作业精度[5]。近年来，得益于计算机科学、传感检测技术、人工智能及自动控制理论的快速发展，农业机器人在环境感知、自主导航、精准作业等核心模块取得了较多进展[6]，应用场景也从早期单一的田间环境监测，逐步拓展至播种、施肥、喷药、蔬果采摘、作物分选、田间管护等农业全生产链条，智能化、集成化水平持续提升[7]。本文将系统梳理农业机器人的关键技术体系及在现代农业生产中的应用现状，深入剖析当前面临的主要挑战并展望未来发展方向，旨在为农业机器人领域的后续研究与技术发展提供系统参考。

## 2. 农业机器人关键技术架构

农业机器人作为智慧农业的核心载体，其高效、精准、稳定的作业能力依赖于多技术协同融合的完整架构体系。该架构通常涵盖多模态环境感知、自主导航与定位、智能决策与任务规划、柔性执行与灵巧操作、多机协同与集群控制、系统集成、环境适应性与可靠性七大关键技术模块。各模块相互支撑、

层层递进, 构成农业机器人实现自主化、精细化田间作业的技术基础。

## 2.1. 多模态环境感知

环境感知是农业机器人实现自主避障、路径规划与精准作业的前提与核心基础。农田场景存在光照剧烈波动、枝叶密集遮挡、作物与杂草形态高度同质化、地形复杂多变等典型干扰问题, 仅依靠可见光相机等单一传感器, 难以持续获取稳定、全面、高可靠的环境特征信息[8]。多模态环境感知技术通过融合视觉(RGB、多光谱、高光谱)、激光雷达(LiDAR)、毫米波雷达、超声波、触觉感知等多类传感器数据, 构建高鲁棒性、高冗余度的田间环境表征模型, 为上层决策规划与末端执行控制提供全面数据支撑[7]。其中, 视觉感知技术以深度学习算法为核心, 广泛应用于田间杂草甄别、果蔬目标检测、果实成熟度分级、农作物病虫害智能识别等核心任务; 伴随 Transformer 架构与 YOLO 系列轻量化模型的持续迭代优化, 视觉算法在复杂田间背景下的识别精度与终端实时推理性能之间实现高效平衡[8]。三维感知技术依托 RGB-D 深度相机与激光雷达设备, 精准获取田间植株高度、作物冠层体积、行间距、障碍物空间分布等三维结构信息, 为机器人田间自主导航、行间行驶对齐与近距离精准作业提供关键几何依据[4]。在多源传感融合策略层面, 现有方案主要划分为数据级前融合、特征级中融合与决策级后融合三类。结合农业非结构化复杂作业场景的适配性来看, 以 RGB 图像特征与深度空间特征联合表征为代表的特征级融合应用最为广泛, 可有效弥补单一传感器受环境干扰导致的信息缺失、识别失效等问题, 显著提升农业机器人全天候、全场景作业的环境适应能力[7]。

## 2.2. 自主导航与定位

自主导航与定位是农业机器人实现田间自主移动的核心技术。与结构化工业环境相比, 农田环境具有非结构化、动态变化特点, 且全球导航卫星系统(GNSS)信号易受树木、地形遮挡, 对机器人定位精度与路径规划提出严峻挑战[9]。GNSS/RTK 技术是目前应用最广泛的绝对定位手段, 可提供厘米级定位精度, 但在果园、温室等信号遮挡区域, 其可用性大幅降低[10]。因此, 多传感器融合定位方法已成为领域研究热点。区别于传统松耦合融合架构, 当前研究以紧耦合融合方案为主, 即在原始观测数据层与状态估计底层实现多源信息深度融合与联合解算。例如, 魏逸飞等[9](2023)针对果园 GNSS 信号易遮挡问题, 提出基于 GNSS 与激光雷达的导航系统, 通过卡尔曼滤波融合数据并辅以里程计去畸变, 在 0.2~0.8 m/s 速度下实现横向平均偏差小于 11 cm 的自主导航, 验证了多源感知融合在果园场景中的可靠性与实用性[9]。同步定位与建图(SLAM)技术在农业机器人导航中也有较多应用, 通过激光雷达或视觉传感器, 机器人可在未知环境中同步构建地图与确定自身位置, 适用于温室、果园等封闭或半封闭场景[11]。有研究表明, 基于图优化的 Cartographer 算法在建图效果上优于传统 Gmapping 算法, 能有效消除累积误差, 提高定位精度[12]。

路径规划分为全局路径规划与局部路径规划。全局路径规划基于先验地图规划起点到终点的最优路径, 常用算法有 A\*算法、Dijkstra 算法等[13]; 局部路径规划侧重实时避开障碍物, 常用算法包括动态窗口法(DWA)、人工势场法等[14]。针对农田全覆盖作业需求, 有研究者提出基于生物激励神经网络与神经元激励网络的方法, 以减少路径重复率、提高作业效率[13]。此外, 针对非结构化地形中的负障碍与动态障碍物, 基于地形约束的导航方法通过八叉树地图实现高效路径搜索与轨迹优化, 可实现复杂越野环境下的自主导航[15]。

## 2.3. 智能决策与任务规划

智能决策与任务规划是农业机器人的“大脑”, 负责将感知信息转化为具体的作业指令。随着农业

生产对精细化要求的提高, 机器人需要具备根据作物生长状态、环境变化动态调整作业策略的能力。传统的农业机器人多采用预编程的控制方式, 难以应对复杂多变的田间环境。现代智能决策系统则引入了人工智能技术, 特别是机器学习与深度强化学习。例如, 在多臂采摘机器人的任务规划中, 利用深度强化学习优化的任务规划器, 可以显著减少机械臂的运动执行时间, 提高采摘效率[2]。通过构建状态感知、动作选择与奖励反馈机制, 机器人能够在不断的试错中学习最优的作业策略, 从而适应不同的作业场景与任务需求[16]。

此外, 基于大数据的智能决策也是重要发展方向。通过物联网技术采集农田环境、土壤、作物生长等多源数据, 并上传至云端平台进行挖掘分析, 机器人可以获得关于作物品种、生长规律及生产环境的专家知识[17]。这些知识能够指导机器人进行精准的农事操作, 如根据作物长势调节施肥量、根据病虫害程度调整施药策略等[18]。在精准种植管理系统中, 通过对农业大数据的实时统计分析, 系统能够自动生成灌溉、施肥等调控指令, 实现智能化的种植管理[17]。这种数据驱动的决策模式, 不仅提高了作业的精准度, 还有助于实现农业生产的标准化与智能化。同时, 针对多任务并行的复杂场景, 分层任务网络(HTN)等规划方法被用于实现任务的自动分解与调度, 提升了机器人系统的自主认知与规划能力[19]。

#### 2.4. 柔性执行与灵巧操作

农业机器人的作业对象多为娇嫩的果实、幼苗或易损的作物组织, 这就需要机器人的末端执行器与操作臂具备高度的柔顺性与灵巧性, 以避免在作业过程中造成机械损伤。受制于结构刚度与接触特性, 传统刚性夹爪难以实现脆弱作物的温和抓取, 柔性机器人技术逐渐成为重要发展方向。柔性机械手通常采用硅胶、橡胶等材料或气动肌肉制成, 具有结构简单、重量轻、安全性高等特点[20]。例如, 一种气动弯曲型柔性驱动器用于果蔬采摘机械手, 通过调节气压控制手指弯曲程度和抓持力, 能柔顺抓取球形、圆柱形果蔬, 避免损伤果肉[21]。再比如, 设计仿生柔性夹爪, 引入形状记忆合金(SMA)或电活性聚合物(EAP)等智能驱动材料, 可进一步优化抓取性能, 实现对不同形状、硬度果实的自适应包络抓取[22]。

在控制策略上, 阻抗控制与力位混合控制是实现柔顺操作的关键。通过集成力传感器、视觉传感器等多模态感知信息, 机器人可实时检测接触力的幅值与方向变化, 动态修正运动路径与接触作用力, 从而兼顾作业刚性与操作柔顺性。针对果蔬等易碎采摘对象, 自适应迭代学习等智能抓取控制方案得到广泛应用, 在保证定位精度的基础上, 可抑制抓取抖动, 缓冲瞬时接触冲击, 满足柔性、脆性农产品的无损作业要求[23]。面对田间枝叶遮挡、空间狭窄等非结构化复杂场景, 多自由度灵巧机械臂逐步成为研发热点, 通过仿人手运动机理设计, 机械臂可灵活绕行障碍物, 完成复杂工况下的精细化作业任务[24]。

#### 2.5. 多机协同与集群控制

单一机器人在面对大规模、高强度的农业生产任务时, 其作业效率往往受限。多机器人协同作业系统通过分布式交互与协同控制, 可显著提高作业效率与系统的容错能力。多机协同控制架构主要分为集中式、分布式与混合式。集中式控制虽然便于全局优化, 但对通信带宽与计算中心的要求极高, 且鲁棒性较差。分布式控制架构中每个机器人仅依赖局部信息与邻居节点通信即可做出决策, 具有更强的可扩展性与鲁棒性, 适合通信受限的农田环境[25]。例如, 针对多机器人编队护航任务, Gao 等[26] (2018)提出基于向量场的分布式控制方法, 使非完整机器人系统在全局定位条件下, 实现对运动目标的稳定环绕与均匀间距保持[26]。

在多机器人协同作业中, 任务分配、路径规划与环境感知是关键环节。在任务分配方面, 多智能体系统与博弈论被广泛应用: 通过构建分布式任务分配模型, 机器人集群可根据各自的负载、位置与能力动态分配作业任务, 避免冲突与资源浪费[27]。例如, 在采摘作业中, 多机器人系统通过协同规划实现作

业区域的自动划分与路径协调,从而最大化整体采摘效率[28]。在路径规划与避障方面,粒子群算法、蚁群算法等集群智能算法用于解决多机器人的路径规划及避障问题,实现大规模机器人在复杂环境下的自组织协同作业[29]。在环境感知方面,多机器人协同 SLAM 技术是难点之一:通过多机间的信息共享与地图融合,可大幅提高环境地图的构建精度与效率,为协同作业提供精确的空间基准[30]。

## 2.6. 系统集成

在系统集成方面,农业机器人通常由移动平台、机械臂、末端执行器、感知系统及控制系统等多个模块组成。如何实现软硬件的高效集成,确保各模块间的协同工作,是系统设计的核心。基于机器人操作系统(ROS)的模块化设计是目前的主流方案,它提供了标准化的通信接口与开发工具,便于不同功能模块的快速集成与二次开发[12]。ROS 通过硬件抽象层屏蔽底层硬件差异,支持多源传感器(激光雷达、IMU、轮式里程计)的即插即用与数据融合,实现厘米级定位与自主导航[12]。同时,基于 PLC(可编程逻辑控制器)的控制系统因其高可靠性与抗干扰能力,在农业机器人的底盘控制与电气系统中仍被广泛采用。例如,基于 PLC 的农机控制系统在自动导航与电液悬挂系统控制中表现出了优异的稳定性[31]。

为兼顾 ROS 的灵活性与 PLC 的稳定性,主流方案多采用 ROS + PLC 双架构融合:上层 ROS 负责感知融合、路径规划与任务决策,下层 PLC 负责底盘驱动、液压控制与安全联锁,通过 ROS PLC Bridge 实现实时数据交互与指令下发[32]。硬件集成方面,一体化硬件架构(如 Orange Pi + STM32 + AVR)与标准化总线协议,可有效降低农业移动机器人多模块耦合干扰问题,提升田间作业设备的适配性与拓展性[33]。此外,依托标准化集成框架搭建的全局调度系统,能够实现单机精准控制与多农业机器人集群协同作业,为规模化农田智能化作业提供系统支撑[34]。

## 2.7. 环境适应性与可靠性

在田间复杂非结构化环境中存在光照突变、地形起伏、作物遮挡、泥水侵蚀及通信不稳定等问题,对农业机器人系统的容错能力与运行可靠性提出了严苛要求[1][3]。面对传感器漂移、执行机构卡顿、通信中断等典型故障,仅依靠硬件加固难以满足长期稳定作业需求,必须通过软硬件协同设计构建完整的可靠性保障体系[3]。硬件方面,通过防水防尘抗震封装、多源传感器冗余配置、关键部件双备份等方式提升环境耐受度[7];软件方面,智能故障诊断与容错控制成为核心技术手段。研究表明,采用模糊神经网络模型对农业机器人控制系统进行可靠性评估,能够有效挖掘非线性、强干扰下的潜在故障特征,提前识别系统失效风险[31]。同时,面向野外工况设计的自主故障检测、定位与重构算法,可在传感器异常或信号丢失时快速切换控制策略,通过模型补偿与控制律重构维持基本作业能力,显著提升系统鲁棒性[35]。

农业机器人的可靠性提升并非单一技术的突破,而是要靠系统集成优化与环境适应性综合设计[36]。在复杂田间场景中,完全自主决策仍存在局限性,构建“自主作业 + 远程兜底”的人机协同模式成为重要保障途径[2]。基于移动通信网络的远程监控与遥操作技术,可实现机器人状态实时回传与异常工况人工干预,在机器人遭遇缠绕、陷车等自主无法解决的故障时,确保设备安全并完成应急处置[37]。此外,结合故障树分析、数字孪生仿真与全生命周期健康管理,能够从设计、测试到运维阶段持续优化系统抗干扰能力与容错性能。总体上,只有将硬件冗余加固、智能诊断容错、人机协同干预与系统整体优化相结合,才能有效应对田间动态不确定性,保障农业机器人在复杂野外环境下稳定、高效、安全地完成作业任务。

# 3. 农业机器人在现代农业生产中的应用

## 3.1. 精准种植与田间管理

精准种植与田间管理是农业机器人应用的重要领域,其核心目标是实现资源的高效利用与作物生长

环境的精细调控。精准种植作为基础环节，核心是通过智能化技术突破传统播种的局限性，实现种植全流程的精准可控，为后续管理奠定基础。在精准种植方面，机器人技术主要应用于播种与移栽环节。传统机械化播种难以适应不同土壤条件与种子特性的差异化需求，而智能播种机器人通过集成视觉传感器与深度学习算法，能够实时识别土壤质地与杂草分布，据此调整播种深度、株距与施肥量，实现“种肥同播”与“按需播种”[38]。基于农业大数据的精准种植管理系统，通过构建物联网监测网络，实时采集气候环境、土壤条件等数据，指导机器人进行智能化的品种选择与生产环境调节，从而实现高产优质[17]。在播种质量实时监控方面，机器视觉技术发挥了重要作用。基于机器视觉的农作物播种精度检测方法，能够实时监测排种情况，及时发现漏播或重播，并通过控制系统进行补种或调整，从而保证播种质量[39]。此外，为降低技术成本并推广精准农业，研究者开发了基于开源硬件平台的自动精密播种机器人，该机器人能够以高于传统系统的行内精度播种，并利用高端 GNSS 存储每颗种子的地理位置，其精度足以支持在作物生长期重新访问植株，为后续精细化管理奠定基础[40]。智能技术的集成应用，让播种环节实现了从“机械化”到“精准化”的跨越，为精准种植夯实了基础。

在精准种植的基础上，变量作业执行机构进一步保障了资源投入的精确调控。作为实现精准农业的核心支撑，变量作业执行机构通过精准控制资源投入量，有效解决传统农业资源浪费与投入不均的问题，是农业机器人智能化水平及精准农业的关键技术体现。根据处方图或实时传感器数据，机器人需动态调整播种量或施肥量。已有研究基于 RBF-PID 控制调节算法设计了一种以 PLC 为核心的变量施肥闭环控制系统，该系统利用步进电机驱动排肥器，结合北斗定位信息与不同地块的施肥处方，研究对氮、磷、钾三种肥料精准变量施肥。结果表明，该控制系统的排肥量最大相对误差仅为 3.85%，最大均匀性变异系数为 2.81%，完全满足棉花精准施肥作业要求[41]。类似地，基于电液比例系统的变量施肥控制装置，通过单片机接收上位机指令与地理环境数据实时调节排肥量，控制精度误差小于 4% [42]。智能施肥器也能实现自动变量施肥，有效解决传统施肥不均匀问题，提高肥料利用率并减少面源污染[43]。这种智能化的监测与执行闭环系统，是农业机器人区别于传统农机的重要特征。

在田间管理方面，除草、施肥与灌溉是主要应用场景。依托机器视觉、GNSS 等先进技术，智能机器人实现了田间管理各场景的精准化、绿色化作业，大幅提升了田间管理的效率与质量，实现了资源高效利用。智能除草机器人的关键技术在于作物与杂草的识别及除草执行机构。机器视觉是识别杂草的主要手段，通过分析作物行间的颜色、纹理与形状特征，智能田间除草机器人可精准识别并清除杂草，减少化学药剂使用，是绿色、环保的杂草防控技术[44]。例如，利用 YOLOv4 网络模型检测玉米苗和杂草，检测率分别达到 96.04% 和 92.57%，并设计了基于除草铲空间立体运动轨迹的除草装置，实现土壤上的避苗除草模式，有效降低伤根率[45]。在稻田除草中，集成 GNSS、电子罗盘与机器视觉开发的水田除草机器人，通过视觉引导，精确沿作物行驶，在杂草密度较低时导航偏差小于 45.9 毫米，实现了无损作业[46]。此外，在农作物种植管理中，利用农业信息化技术与智能机器人，可优化施肥和灌溉策略，及时采取防治措施，确保作物品质并减少资源浪费。如智能灌溉机器人与施肥机器人能够根据作物生长模型与实时监测数据，进行变量灌溉与施肥，显著提高水肥利用率，降低生产成本[47]。基于机器视觉的园艺作物生长监测系统，通过摄像头实时采集作物图像，提取株高、叶面积等表型参数，评估作物生长状态[48]。

农业机器人在精准种植与田间管理领域的应用已形成较为完整的技术体系。从播种移栽的精准执行、变量作业的精确调控，到田间除草、水肥管理的智能化实施，其围绕资源高效利用与作物优质高产的核心目标，融合了机器视觉、物联网、大数据与智能控制等多种技术，不仅突破了传统农机的局限性，实现了农业生产的精细化、绿色化与高效化，也为精准农业的规模化推广提供了有力的技术支撑。

### 3.2. 自动化采摘与收获应用

采摘与收获是农业生产中劳动强度最大、季节性最强的核心环节，也是农业机器人应用研究的重点集中领域。相较于精准种植与田间管理，采摘收获环节对机器人的灵活性、精准度和柔性操作要求更高，需结合不同果蔬的生长特性、栽培模式，实现“识别-定位-抓取-采摘”的全流程智能化，以此解决人工采摘效率低、成本高、损伤率高的问题。在果蔬采摘领域，机器人系统通常由移动平台、机械臂、视觉感知系统及末端执行器四大核心模块构成[49]-[51]。其中，视觉感知系统承担果实识别与定位的关键功能，目前基于深度学习的识别算法(如 YOLO 系列算法)，已在田间复杂背景(如枝叶遮挡、光照变化)下，实现对番茄、梨、苹果、草莓等多种果蔬的高精度实时检测[52][53]。不同果蔬的栽培模式、果实形态及生长环境存在差异，因此研究者针对具体果蔬品种开展了定制化研发，形成了各具特色的采摘机器人，且整体呈现出识别精度和采摘效率高以及损伤率低的发展趋势。在番茄采摘机器人研究中，针对宽沟窄畦温室种植模式，王亚薇等[54]设计了番茄自主采摘机器人，其执行机构由四自由度伸缩机械臂、多位姿腕关节及三指扭转式采摘末端手组成，通过绳排式可伸缩移动关节优化机构尺寸，实地试验结果表明，该机器人采摘成功率达 88.7%，单果采摘周期为 13.4 秒/个[54]；徐灿等[55]针对串收番茄设计了专用采摘机器人，采用 YOLOv3 算法精准识别果梗采摘点，配套夹剪一体型末端执行器，现场试验采摘成功率可达 93% [55]；Liu Lei 等[56]为解决夜间采摘识别精度偏低的问题，开发了夜间温室番茄采摘机器人，采用 YOLOv5 与 HSV 颜色空间融合算法实现昼夜连续作业，夜间采摘成功率达 87.55%，平均单果采摘时间为 17.26 秒[56]。梨果采摘中，通过集成双目视觉系统与惯性测量单元(IMU)实现果实姿态精准估计，有效解决枝叶遮挡下的定位难题[52]；刘小磊等[57]基于仿生学原理，设计了集成 RGB-D 视觉系统与振动切割装置的末端执行器，采用改进型 YOLOv5 网络完成作物识别，结合自适应频率调节算法优化切割参数，试验显示该方案采摘成功率达 89.8%，较传统方案提升 23.4%，果实损伤率仅 3.1%，平均单果采摘时间为 4.2 秒[57]。草莓作为高经济价值浆果，因果实柔软易损、多采用低矮垄作栽培，识别与抓取难度较大；Yu Yang 等针对垄作模式设计双臂协作式草莓采摘机器人，配备轻量化 Mask R-CNN 视觉感知系统，自然环境下对疏花疏果后的草莓采摘平均成功率为 49.30%，双臂协作采摘速度达 4 秒/个[58]；凌轩等[59]设计的智能草莓采摘机器人采用“夹持-扭转果柄”方式，果实误判率 7%，采摘成功率达 90% [59]；Yu 等基于改进型 YOLO V11 算法与自适应路径规划技术，有效解决了遮挡条件下草莓的识别难题[60]。深度学习算法与视觉感知技术的融合应用，有效突破了复杂田间环境下的果蔬识别与定位难点，而机械臂与末端执行器的定制化设计，则进一步提升了采摘的精准度与效率，为不同果蔬的智能化采摘提供了可行方案。

末端执行器的设计直接关系到采摘的成功率与果实的完好率。作为采摘机器人与果实直接接触的核心部件，末端执行器的设计需充分适配不同果实的物理特性(如硬度、表皮脆弱程度)，兼顾抓取稳定性与无损性，是决定采摘质量的关键因素，也是当前采摘机器人研发的核心优化方向之一。针对不同果实特性，研究者开发了多种类型的末端执行器。例如，针对草莓等浆果，设计了基于负压吸附与柔性夹持的末端执行器，实现了无损抓取[61]。针对苹果、柑橘等硬质果实，开发了仿生抓取式或剪切式末端执行器，通过力觉反馈控制抓取力度，避免损伤果皮[62]。这种“按需定制”的末端执行器设计思路，既解决了不同果蔬采摘的个性化难题，又有效降低了果实损伤率，也进一步完善了农业机器人的智能化技术体系。

### 3.3. 智能植保与巡检应用

作为农业生产全程智能化的重要组成部分，智能植保与巡检通过技术融合打破传统粗放式植保模式，实现病虫害早发现、早防控，在保障作物产量品质、契合农业可持续发展理念的同时，衔接精准种植、

田间管理与采摘收获,是保障农作物健康生长、提高产量的关键环节。随着无人机技术与地面机器人的协同应用,构建了“空中监测+地面作业”的立体化植保体系,有效弥补单一作业模式的局限性,推动植保作业向精准化、自动化、高效、环保转型,为农业可持续发展提供重要技术支撑,成为智能植保的核心发展路径。其中,无人机植保是目前应用最为成熟的领域,植保无人机利用高分辨率摄像设备与多光谱传感器,能够对农田进行大范围的病虫害监测与生长评估[63];通过图像处理技术,无人机可以快速识别病虫害发生区域,并生成精准的施药处方图[64];结合RTK定位技术与智能喷洒系统,无人机能够实现厘米级的飞行控制与变量喷洒,显著提高了农药利用率,减少了环境污染[65]。研究表明,植保无人机的应用可使农药使用量减少25%~40%,作物产量提升10%~15%,同时有效降低了操作人员接触农药的风险[65]。

传统的施药施肥方式往往采用全覆盖式均匀喷洒,不仅造成农药化肥的浪费,还导致环境污染与农产品残留超标。精准施药与施肥机器人通过感知作物需求与病虫害分布,实现按需、变量作业,其核心技术集中于靶标探测与变量控制。

靶标探测技术与变量控制技术是精准施药施肥机器人的两大核心支撑。其中,靶标探测技术利用机器视觉、超声波或激光雷达等传感器识别作物冠层或病虫害区域,确保“识得准”;变量控制技术则通过脉宽调制(PWM)等方式调节喷头流量,实现药剂与肥料的“施得匀”。二者深度融合,使机器人能够“按需供给”,区别于传统植保装备。典型研究包括:基于超声波靶标探测的果园变量喷药控制系统[66],以及基于模糊PID的温室履带式智能施药机器人(实现自主导航与路径纠偏)[67];在变量施药方面,除PWM技术[68]外,还有基于叶面积指数(LAI)的变量施药决策模型[69][70],以及针对橡胶树白粉病防治、采用模糊PID算法同时调节风速与药量的精准施药控制系统[70]。各类精准施药技术的探索与应用,不断提升作业精度与场景适配性,为不同种植场景、不同作物的精准植保提供了定制化解决方案。

病虫害防控与地面巡检机器人进一步完善了智能植保体系,其中病虫害防控机器人结合了监测与施药功能,例如有研究开发了一款基于YOLOv8的病虫害识别及精准施药机器人,通过激光雷达定位与导航,利用深度学习模型实时检测番茄叶片病虫害,并根据检测结果联动控制喷药装置[71]。此外,针对设施蔬菜,研究者指出利用机器视觉与激光雷达技术获取靶标位置,结合变量喷施技术,是未来设施农业植保机器人发展的关键[72]。地面植保机器人则在局部精准施药与巡检方面发挥着重要作用,对靶施药机器人通过视觉传感器识别作物靶标,仅对靶标区域进行喷雾,极大提高了农药利用率[73];智能巡检机器人集成多种传感器,可在田间自主行走,实时监测作物生长状态、土壤墒情及病虫害情况,并将数据传输至云端进行分析[74][75]。此外,在畜禽养殖领域,巡检机器人也被用于监测动物健康状况与环境参数,辅助养殖户进行精细化管理[76],这些智能装备的应用,为农业生产的可持续发展提供了有力支撑[77]。地面巡检与病虫害防控机器人的应用,不仅进一步完善了智能植保的技术体系,更将智能化理念延伸至畜禽养殖领域,实现了农业生产全场景的精细化、智能化管控,进一步推动了农业可持续发展。

## 4. 展望

### 4.1. 深化多学科交叉融合

未来农业机器人应继续向多学科深度交叉融合的方向发展,重点融合机械工程、传感检测、人工智能、自动控制、农学、大数据与物联网等领域的先进技术。通过学科优势互补与技术间的协同,在非结构化农田环境感知、智能决策与自适应作业等核心问题上取得突破。多学科融合也将进一步推动装备结构优化、算法智能升级及作业模式革新,促进农业机器人从单一功能设备向系统化、智能化、一体化的作业平台演进,从而为智慧农业落地、产业转型升级及绿色可持续发展提供技术支撑。

## 4.2. 突破作业效率及生产成本制约瓶颈

作业效率与成本之间的矛盾仍是制约农业机器人规模应用的核心瓶颈。以智能采摘机器人为例，其识别率虽高，但作业节拍难以满足农忙抢收需求，高昂的研发与硬件成本也限制了市场推广。未来需多路径协同突破：算法与硬件协同提速，采用轻量化模型、边缘计算及高速并联机械臂，提升单机效率；发展低成本感知与模块化设计，以视觉惯性融合替代昂贵传感器，实现一机多用，降低制造成本；创新共享模式，将购置成本转化为可变使用成本；优先在设施农业、标准化大田等可控场景实现效率与成本的闭环，再向复杂露天环境逐步延伸等。

## 4.3. 发展多机协同与人机协作

当前研究多聚焦于单一功能农业机器人，而在多机协同作业与人机协作等复杂场景方面仍较为薄弱，难以满足未来智慧农业对系统性解决方案的需求。以多机协同与人机协作为核心方向，未来应重点突破异构机器人之间的任务分配与路径协调、实时通信与协同感知，以及人在回路的自适应交互控制等关键技术，构建“人-机-环境”深度融合的作业体系。在此基础上，发展云边端协同的集群调度平台与标准化协同协议，使不同类型机器人能够按需组合、实时协同，并与人工操作形成安全高效的互补配合。从单一设备走向群体智能与人机共融，农业机器人将真正具备应对复杂农事场景的灵活性与鲁棒性，为智慧农业提供可落地、可扩展的系统解决方案。

## 4.4. 强化大规模田间验证与推广应用

目前，多数研究成果仍停留在实验室或小规模试验阶段，缺乏大规模、长周期的田间应用验证。部分农业机器人产品尚不能完全胜任实际生产任务，其稳定性与适应性在复杂自然环境中面临严峻考验。此外，现有农艺模式与机器人作业要求不匹配，传统种植模式导致作物行距不一、枝叶遮挡严重，增加了机器人作业难度。因此，未来的研究不应仅局限于机器人技术本身，更应推动农机与农艺的深度融合，通过标准化种植为机器人作业创造有利条件。同时，需在典型产区建立长期田间测试基地，开展多季节、多品种、多区域的规模化验证，加速技术从“可用”向“可靠、经济、易用”转变，为农业机器人的大面积推广奠定基础。

## 参考文献

- [1] Maqbool, A.T. (2025) The Evolution of Agricultural Robotics: A Comprehensive Review and Future Challenges. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, **13**, 241-267. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2025.66780>
- [2] Zhu, Y., Zhang, S.D., Tang, S.N. and Gao, Q. (2025) Research Progress and Applications of Artificial Intelligence in Agricultural Equipment. *Agriculture*, **15**, Article 1703. <https://doi.org/10.3390/agriculture15151703>
- [3] Jin, Y.C., Liu, J.Z., Xu, Z.J., Yuan, S.Q., Li, P.P. and Wang, J.Z. (2021) Development Status and Trend of Agricultural Robot Technology. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, **14**, 1-19. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211404.6821>
- [4] Ahlin, K., Bazemore, B., Boots, B., Burnham, J., Frank, D., Dong, J., *et al.* (2017) Robotics for Spatially and Temporally Unstructured Agricultural Environments. In: Zhang, D. and Wei, B., Eds., *Robotics and Mechatronics for Agriculture*, CRC Press, 50-74. <https://doi.org/10.1201/9781315203638-3>
- [5] Patil, N. and Tiwari, S. (2018) Implementation of Modern Technology in Agriculture. *International Journal of Creative Research Thoughts*, **6**, 1446-1451.
- [6] Singh, A., Gupta, A., Bhosale, A. and Poddar, S. (2015) Agribot: An Agriculture Robot. *IJARCCCE*, **4**, 317-319. <https://doi.org/10.17148/ijarccce.2015.4173>
- [7] Xie, D.B., Chen, L., Liu, L.C., Chen, L.Q. and Wang, H. (2022) Actuators and Sensors for Application in Agricultural Robots: A Review. *Machines*, **10**, Article 913. <https://doi.org/10.3390/machines10100913>

- [8] Fountas, S., Malounas, I., Athanasakos, L., Avgoustakis, I. and Espejo-Garcia, B. (2022) AI-Assisted Vision for Agricultural Robots. *AgriEngineering*, **4**, 674-694. <https://doi.org/10.3390/agriengineering4030043>
- [9] 魏逸飞, 李青龙, 孙宜田, 孙永佳, 侯加林. 基于 GNSS 和激光雷达的果园机器人导航系统研究[J]. 农机化研究, 2023, 45(10): 55-61, 69.
- [10] Yao, Z.X., Zhao, C.J. and Zhang, T.H. (2024) Agricultural Machinery Automatic Navigation Technology. *iScience*, **27**, Article 108714. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.108714>
- [11] Aguiar, A.S., dos Santos, F.N., Cunha, J.B., Sobreira, H. and Sousa, A.J. (2020) Localization and Mapping for Robots in Agriculture and Forestry: A Survey. *Robotics*, **9**, Article 97. <https://doi.org/10.3390/robotics9040097>
- [12] 蔡明珠, 刘肖燕, 唐志伟. 基于多传感器融合 SLAM 的 ROS 服务机器人研究[J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(2): 48-52.
- [13] 姜龙腾, 迟瑞娟, 马悦琦, 董乃希, 黄修炼, 班超, 朱晓龙. 基于栅格法的农业机器人路径规划方法研究[J]. 农机化研究, 2024, 46(6): 19-24.
- [14] 谭晨佼, 李铁林, 王东飞, 毛文菊, 杨福增. 农业机械自动导航技术研究进展[J]. 农机化研究, 2020, 42(5): 7-14, 32.
- [15] Zhou, B., Yi, J., Zhang, X., Chen, L., Yang, D., Han, F., *et al.* (2022) An Autonomous Navigation Approach for Unmanned Vehicle in Outdoor Unstructured Terrain with Dynamic and Negative Obstacles. *Robotica*, **40**, 2831-2854. <https://doi.org/10.1017/s0263574721001983>
- [16] Tsymbal, O., Bronnikov, A. and Yerokhin, A. (2019) Adaptive Decision-Making for Robotic Tasks. 2019 *IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL)*, Sozopol, 6-8 September 2019, 594-597. <https://doi.org/10.1109/caol46282.2019.9019488>
- [17] Li, Y. (2020) Research on Precision Planting Management System Based on Agricultural Big Data. *Journal of Physics: Conference Series*, **1544**, Article 012174. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1544/1/012174>
- [18] 兰玉彬, 闫瑜, 王宝聚, 宋灿灿, 王国宾. 智能施药机器人关键技术研究现状及发展趋势[J]. 农业工程学报, 2022, 38(20): 30-40.
- [19] 路飞, 田国会, 李擎. 智能空间环境下基于本体的机器人服务自主认知及规划[J]. 机器人, 2017, 39(4): 423-430.
- [20] Shintake, J., Cacucciolo, V., Floreano, D. and Shea, H. (2018) Soft Robotic Grippers. *Advanced Materials*, **30**, Article 1707035. <https://doi.org/10.1002/adma.201707035>
- [21] 赵云伟, 耿德旭, 刘晓敏, 孙国栋. 气动柔性果蔬采摘机械手运动学分析与实验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 31-42.
- [22] An, C. (2024) Advancing Robotic Fruit Picking: Adaptive End-Effector Approach. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, **97**, 249-257. <https://doi.org/10.54097/mysdej46>
- [23] Zheng, K. (2026) Research on Intelligent Grasping Strategy of Pneumatic Flexible Gripper Based on Adaptive Iterative Learning Strategy. *Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research and Application*, **53**, 587-599. <https://doi.org/10.1108/ir-09-2025-0325>
- [24] Belov, M.I., Sorokin, S.V. and Pylayev, B.V. (2014) Robot Manipulators in Agriculture. *Tractors and Agricultural Machinery*, **81**, 3-9.
- [25] Guo, Y. (2017) Distributed Cooperative Control: Emerging Applications. Wiley, 123-124. <https://doi.org/10.1002/9781119216131>
- [26] Gao, S., Song, R. and Li, Y.B. (2018) Cooperative Control of Multiple Nonholonomic Robots for Escorting and Patrolling Mission Based on Vector Field. *IEEE Access*, **6**, 41883-41891. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2850348>
- [27] Blankenburg, J., Banisetty, S.B., Alinodehi, S.P.H., Fraser, L., Feil-Seifer, D., Nicolescu, M., *et al.* (2017) A Distributed Control Architecture for Collaborative Multi-Robot Task Allocation. 2017 *IEEE-RAS 17th International Conference on Humanoid Robotics (Humanoids)*, Birmingham, 15-17 November 2017, 585-592. <https://doi.org/10.1109/humanoids.2017.8246931>
- [28] Liu, J.Y., Yan, F.S., Dong, H., Fu, W., Chen, Y. and Zhang, S. (2025) Optimal Collaborative Path Planning for Four-Wheel Steering Picking Robots Focusing on Improving Efficiency at Bends. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. Early Access.
- [29] Debie, E., Kasmarik, K. and Garratt, M. (2023) Swarm Robotics: A Survey from a Multi-Tasking Perspective. *ACM Computing Surveys*, **56**, 1-38. <https://doi.org/10.1145/3611652>
- [30] 马楠, 曹姗姗, 白涛, 孔繁涛, 孙伟. 农业复杂场景下多机器人协同 SLAM 研究进展与展望[J]. 智慧农业(中英文), 2025, 6(6): 23-43.
- [31] 戴花林. 基于 PLC 的农机控制系统可靠性研究[J]. 农机化研究, 2021, 43(2): 221-224.

- [32] 卫培刚, 曹姗姗, 刘继芳. 具身智能农业机器人: 关键技术、应用分析、挑战与展望[J]. 智慧农业(中英文), 2025, 7(4): 141-158.
- [33] Valeriya, M. (2024) Development of Hardware for an Agricultural Mobile Robot. 2024 *Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon)*, Saint Petersburg, 29-31 January 2024, 434-436. <https://doi.org/10.1109/elcon61730.2024.10468520>
- [34] Asiminari, G., Moysiadis, V., Kateris, D., Busato, P., Wu, C., Achillas, C., et al. (2024) Integrated Route-Planning System for Agricultural Robots. *AgriEngineering*, **6**, 657-677. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6010039>
- [35] Li, Y.L., Xu, G.Q. and Wang, Y.H. (2025) Reliability Analysis and Numerical Simulation of Industrial Robot Drive System with Vacation. *Axioms*, **14**, Article 275. <https://doi.org/10.3390/axioms14040275>
- [36] Apazhev, A.K., Shekikhachev, Y.A., Khazhmetov, L.M., Egozhev, A.M., Fiapshev, A.G. and Baragunov, A.B. (2023) Improving the Operational Reliability of Agricultural Machines. *Machinery and Equipment for Rural Area*, **310**, 12-16.
- [37] 杨洪涛. 基于移动通信网络的农业移动机器人遥操作研究[J]. 农机化研究, 2022, 44(3): 111-115.
- [38] Ingole, A.G. (2025) A Review on IoT-Based Agricultural Robots: Seed Sowing, Fertilizer Spraying, and Grass Cutting Automation for Precision Farming. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, **13**, 3196-3202. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2025.76674>
- [39] 杨奥棋, 李冰. 基于机器视觉的农作物播种精度检测方法[J]. 智慧农业导刊, 2022, 2(12): 1-3.
- [40] Rogers, H. and Fox, C. (2020) An Open Source Seeding Agri-Robot. *UK-RAS Conference for PhD and Early Career Researchers Proceedings*, Lincoln, 17 April 2020.
- [41] 卜浩然, 张立新, 董万城. 基于 RBF-PID 的棉花变量施肥控制系统设计与试验[J]. 农机化研究, 2025, 47(6): 106-111.
- [42] 周文军, 伍贤洪. 一种电学控制特性下的变量施肥装置研究[J]. 农机化研究, 2024, 46(1): 112-115.
- [43] 贾荣丛. 智能施肥器的设计[J]. 电子制作, 2016(4): 11-13.
- [44] Xu, H., Li, T.H., Hou, X.W., Wu, H.R., Shi, G.Y., Li, Y., et al. (2024) Key Technologies and Research Progress of Intelligent Weeding Robots. *Weed Science*, **73**, 1-20. <https://doi.org/10.1017/wsc.2024.95>
- [45] 权龙哲, 张景禹, 姜伟. 基于玉米根系保护的株间除草机器人系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 115-123.
- [46] Kanagasingham, S., Ekpanyapong, M. and Chaihan, R. (2019) Integrating Machine Vision-Based Row Guidance with GPS and Compass-Based Routing to Achieve Autonomous Navigation for a Rice Field Weeding Robot. *Precision Agriculture*, **21**, 831-855. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09697-z>
- [47] 叶小龙. 智能化农业机械在农田管理与作物种植中的应用[J]. 数字农业与智能农机, 2024(4): 31-33.
- [48] McCarthy, A.C., Hedley, C.B. and El-Naggar, A. (2017) Machine Vision for Camera-Based Horticulture Crop Growth Monitoring. *Proceedings of the 7th Asian-Australasian Conference on Precision Agriculture*, Hamilton, 16-19 October 2017, 1-6.
- [49] 蒋焕煜, 彭永石, 申川, 应义斌. 基于双目立体视觉技术的成熟番茄识别与定位[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 279-283.
- [50] 李晓娟, 韩睿春, 梁治. 基于视觉引导的番茄连续采摘序列优化方法[J]. 农业机械学报, 2026, 57(1): 329-338.
- [51] Ling, X., Zhao, Y.S., Gong, L., Liu, C.L. and Wang, T. (2019) Dual-Arm Cooperation and Implementing for Robotic Harvesting Tomato Using Binocular Vision. *Robotics and Autonomous Systems*, **114**, 134-143. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.01.019>
- [52] He, X.K., Zhang, H.T., Wang, B.B., Su, L.Y., Yu, Z.Y., Liu, X.C., Meng, X.S., et al. (2025) Current Research Status and Development Trends of Key Technologies for Pear Harvesting Robots. *Agronomy*, **15**, Article 2163. <https://doi.org/10.3390/agronomy15092163>
- [53] 周浩, 唐昀超, 邹湘军. 农业采摘机器人视觉感知关键技术研究[J]. 农机化研究, 2023, 45(6): 68-75.
- [54] 王亚薇, 何津立, 林熙淼. 温室番茄采摘机器人伸缩式机械臂设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(S1): 18-28.
- [55] 徐灿, 熊征, 蒋先平. 串收番茄采摘机器人的设计与研究[J]. 现代农业装备, 2021, 42(6): 15-23.
- [56] Liu, L., Yang, Q.Z., He, W.B., Yang, X.Y., Zhou, Q. and Addy, M.M. (2024) Design and Experiment of Nighttime Greenhouse Tomato Harvesting Robot. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, **56**, 340-352. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2024.56.3.3>
- [57] 刘小磊, 张学哲, 冯祎璇. 温室作物采摘农业机器人末端执行器设计与智能控制[J]. 自动化应用, 2026, 67(4): 78-80.
- [58] Yu, Y., Xie, H.H., Zhang, K.L., Wang, Y., Li, Y.T., Zhou, J.M., et al. (2024) Design, Development, Integration, and Field

- Evaluation of a Ridge-Planting Strawberry Harvesting Robot. *Agriculture*, **14**, Article 2126. <https://doi.org/10.3390/agriculture14122126>
- [59] 凌轩, 刘江涛, 梁超越. 智能草莓采摘机器人设计及试验[J]. 现代农业装备, 2021, 42(1): 46-50.
- [60] Yu, D. (2025) Research on the Strawberry Picking Robot with Improved YOLO V11 and Adaptive Path Planning. *Journal of Intelligence and Knowledge Engineering*, **3**, 7-15. <https://doi.org/10.62517/jike.202504202>
- [61] 刘佳, 李娜, 郝子岩. 柔性机械手设计与夹取力动态特性仿真分析[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2018, 38(2): 119-125.
- [62] Monta, M. and Wakimoto, S. (2015) Harvesting Actuation Mechanisms for Agricultural Robots. *Journal of the Robotics Society of Japan*, **33**, 680-683. <https://doi.org/10.7210/jrsj.33.680>
- [63] Liu, H., Liu, W. and Cao, Y. (2024) Application Research of Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing Technology in Agricultural Pest and Disease Monitoring. *Journal of Engineering System*, **2**, 13-17. <https://doi.org/10.62517/jes.202402203>
- [64] 宋彦涛. 植保无人机在玉米病虫害防治中的应用研究[J]. 黑龙江粮食, 2023(12): 81-83.
- [65] 常丽娜, 王素芝. 基于无人机的农业植保智能化创新探索[J]. 数字农业与智能农机, 2025(6): 39-41.
- [66] 邹伟, 王秀, 冯青春. 基于超声靶标探测的果园变量喷药控制系统设计[J]. 农机化研究, 2021, 43(2): 58-63.
- [67] 张燕军, 杨天, 徐勇. 温室履带式智能施药机器人设计与试验[J]. 农机化研究, 2022, 44(8): 97-104.
- [68] Zhang, Z.H., Yuan, S., Lai, Q.H., Zeng, R.H., Zhang, J.K. and Shen, S.Y. (2023) Precision Variable-Rate Control System for Mini-UAV-Based Pesticide Application. *Journal of Physics: Conference Series*, **2557**, Article 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2557/1/012006>
- [69] 吴双丽, 邓巍, 吴桂芳. 精准施药中叶面积指数探测研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(7): 262-268.
- [70] Wang, Y., Zhang, H.M., Fu, M., Fu, W., Wang, J., Zhang, B., et al. (2024) Design and Experimental Evaluation of a Variable Pesticide Application Control System for the Air-Assisted Rubber Tree Powder Sprayer. *Pest Management Science*, **80**, 5186-5199. <https://doi.org/10.1002/ps.8246>
- [71] 于书研, 胡光阳, 籍风磊. 病虫害识别及精准施药机器人的设计与实现[J]. 实验室研究与探索, 2025, 44(12): 113-117.
- [72] 杨征鹤, 杨会民, 喻晨. 设施蔬菜自动对靶喷药技术研究现状与分析[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(8): 1547-1557.
- [73] 石航, 胡军, 李宇飞. 对靶施药机器人及其关键技术的研究现状与分析[J]. 农业大数据学报, 2023, 5(2): 54-61.
- [74] 孙新安. 农业智能巡检机器人轨迹跟踪控制[J]. 农机化研究, 2019, 41(9): 99-103.
- [75] Ariffanan, M.B.M. and Azizi, M.A. (2022) Autonomous Agriculture Robot for Monitoring Plant Using Internet of Things. *Elektrika—Journal of Electrical Engineering*, **21**, 14-19. <https://doi.org/10.11113/elektrika.v21n1.336>
- [76] 肖德琴, 黄一桂, 熊悦淞. 畜禽机器人技术研究进展与未来展望[J]. 华南农业大学学报, 2024, 45(5): 624-634.
- [77] Balaska, V., Adamidou, Z., Vryzas, Z. and Gasteratos, A. (2023) Sustainable Crop Protection via Robotics and Artificial Intelligence Solutions. *Machines*, **11**, Article 774. <https://doi.org/10.3390/machines11080774>