

微小型仿生农业机器人在温室作物巡检中的适应性研究

刘晓明 苏伟 徐阁 贺强 刘奥
襄阳金美科林农业开发有限公司 湖北 南漳 441500

摘要：本论文聚焦微小型仿生农业机器人在温室作物巡检中的适应性问题，通过分析温室环境特点与作物巡检需求，研究微小型仿生农业机器人的结构设计、感知系统、运动控制等方面对温室环境的适应能力。结合实际案例与实验数据，探讨其在温室作物巡检中的优势与不足，并提出相应的优化策略，为微小型仿生农业机器人在温室农业领域的推广应用提供理论与实践依据。

关键词：微小型仿生农业机器人；温室作物巡检；适应性；结构设计；感知系统

1 引言

1.1 研究背景与意义

近年来，我国温室农业发展迅速，截至2023年底，全国温室种植面积已达350万公顷，且呈逐年增长趋势。温室农业通过人工调控环境，为作物生长创造适宜条件，有效提高了农作物的产量和品质。然而，随着温室规模的不断扩大，传统的人工巡检方式暴露出效率低、成本高、准确性差等问题^[1]。人工巡检一名工人每天仅能完成约0.5-1公顷温室作物的巡检工作，且难以做到对作物生长状态的实时监测。微小型仿生农业机器人凭借其体积小、灵活性高、可自主作业等特点，能够实现对温室作物的高效、精准巡检，及时发现作物生长异常、病虫害等问题，为温室农业的智能化发展提供有力支持。研究微小型仿生农业机器人在温室作物巡检中的适应性，有助于推动其在实际生产中的广泛应用，提升温室农业的生产效率和管理水平^[2]。

1.2 国内外研究现状

国外在微小型仿生农业机器人研究方面起步较早，日本研发的仿昆虫小型巡检机器人，采用多足结构，能够在复杂的温室种植架间灵活移动，其搭载的视觉传感器可实现对作物叶片病害的初步识别。美国推出的微型无人机巡检系统，利用多光谱成像技术，能够快速获取大面积温室作物的生长状态信息^[3]。在国内，相关研究也取得了一定进展，华南农业大学研制的微型轮式巡检机器人，通过集成温湿度、光照等传感器，可实时监测温室环境参数和作物生长指标，但在复杂地形适应能力和自主决策能力方面仍有待提高。目前，国内外对于微小型仿生农业机器人在温室作物巡检中适应性的系统性研究相对较少，尤其是针对温室特殊环境和多样化巡检任务的适应性优化研究仍需深入开展。

1.3 研究内容与方法

本研究主要包括分析温室环境特点和作物巡检需求，研究微小型仿生农业机器人的结构设计、感知系统、运动控制等方面在温室环境中的适应性表现，通过实际案例和实验数据验证其适应性效果，并针对存在的问题提出优化策略。研究方法采用文献研究法梳理国内外相关研究成果，实地调研法了解温室农业生产现状和巡检需求，实验研究法对微小型仿生农业机器人进行性能测试和适应性分析。

2 温室环境特点与作物巡检需求分析

2.1 温室环境特点

温室环境具有空间狭小、地形复杂、温湿度高、光照条件多变等特点。一般温室内部种植架排列密集，通道宽度仅为0.8-1.2米，为机器人的移动带来限制。温室内种植的立体多层作物架，高度可达2-3米，增加了机器人在垂直方向上巡检的难度。温室内的温度通常保持在15-35℃之间，湿度在60%-90%左右，高湿环境容易导致电子元件受潮损坏，影响机器人的正常运行。同时，温室覆盖材料对光照的反射、折射和吸收作用，使得温室内光照强度和光谱分布与室外存在较大差异，给机器人的视觉感知系统带来挑战^[4]。

2.2 温室作物巡检需求

温室作物巡检需要全面监测作物的生长状态、环境参数以及病虫害情况。在作物生长状态监测方面，需实时获取作物的株高、茎粗、叶面积、果实数量和大小等信息；环境参数监测涵盖温湿度、光照强度、二氧化碳浓度、土壤墒情等；病虫害监测则要求能够及时发现作物叶片的病斑、虫害痕迹等^[5]。此外，巡检过程中还需对异常情况进行精准定位和记录，以便工作人员及时采取措施。这就要求巡检机器人具备高精度的感知能力、灵活的运动能力和可靠的信息处理能力。

3 微小型仿生农业机器人在温室作物巡检中的适应

性分析

3.1 结构设计适应性

微小型仿生农业机器人的结构设计对其在温室环境中的适应性起着关键作用。仿生多足结构机器人,如仿蜘蛛机器人,通过模仿蜘蛛的腿部运动方式,具有较强的越障能力,能够在高低不平的种植床和狭窄的通道中稳定行走。实验数据表明,在模拟温室复杂地形环境中,仿蜘蛛机器人的越障成功率达到85%以上^[6]。而仿生轮式结构机器人,具有运动速度快、能量消耗低的优点,在平坦的温室地面和规则的通道中能够高效作业,其平均巡检速度可达0.5-1米/秒。但轮式结构在遇到较高障碍物或松软地面时,通过能力较差。此外,可变形结构设计也是提高机器人适应性的有效方式,部分机器人能够根据环境需求改变自身形状和尺寸,如在通过狭窄通道时收缩机身,在进行高处巡检时伸展机械臂,增强了对不同温室环境的适应能力。

3.2 感知系统适应性

感知系统是微小型仿生农业机器人实现有效巡检的核心。视觉传感器是最常用的感知设备,目前,基于深度学习的机器视觉技术被广泛应用于作物病虫害识别和生长状态监测。在温室黄瓜白粉病识别实验中,采用卷积神经网络(CNN)的视觉系统,对病斑的识别准确率达到92%。但温室光照条件的多变性会影响视觉传感器的成像质量,导致识别准确率下降。例如,在光照强度低于500lux时,识别准确率降低至80%左右^[7]。多光谱传感器能够获取作物在不同波段的光谱信息,对作物的生理状态进行监测,在判断作物缺水、缺肥等情况时具有较高的准确性。然而,多光谱传感器成本较高,且数据处理复杂,限制了其大规模应用。此外,温湿度、气体浓度等环境传感器在高湿环境下容易出现测量误差,需要定期校准和维护,以保证数据的准确性。

3.3 运动控制适应性

微小型仿生农业机器人的运动控制需要适应温室狭小空间和复杂地形。在路径规划方面,采用全局路径规划与局部路径规划相结合的方法。全局路径规划利用温室地图信息,规划出从起始点到目标点的最优路径;局部路径规划则在遇到突发障碍物时,实时调整机器人的运动轨迹。实验显示,该方法能够使机器人在温室环境中的路径规划成功率达到90%以上。在运动稳定性控制上,仿生多足机器人通过调整各足的运动时序和步长,保持身体平衡;轮式机器人则采用差速转向、悬挂减震等技术,提高在不平地面上的行驶稳定性。但在温室湿滑地面或松软土壤上,机器人仍可能出现打滑、下陷等

情况,影响运动控制精度。

3.4 算法控制

为便于动力学计算中相应动力学参数的处理,本文综合分析模块运动单元的所有基本运动传递链路结构等效情况。

$$m_{L_i} = \sum_{k \in \Lambda_i} m_k \quad 2-1$$

$$P_{C_{L_i}} = \frac{\sum_{k \in \Lambda_i} m_k \cdot P_{C_{Sub_k}}}{\sum_{k \in \Lambda_i} m_k} \quad 2-2$$

$$G_{L_i} = \begin{bmatrix} I_{L_i}^{J_i} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & m_{L_i} I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad 2-3$$

等效结构体i的运动旋量 $\mathcal{V}_i$ 为:

$$\mathcal{V}_i = A_i \dot{\theta}_i + [Ad_{A_i^{-T}}] \mathcal{V}_{L_{i-1}} \quad 2-4$$

4 微小型仿生农业机器人在温室作物巡检中的案例分析

基于算法研发的微小型仿生草莓巡检机器人,采用四轮驱动结构,机身尺寸为30cm×25cm×20cm,能够在草莓种植垄间自由穿梭。机器人搭载高清摄像头和多光谱传感器,可对草莓的果实成熟度、叶片病害进行监测。

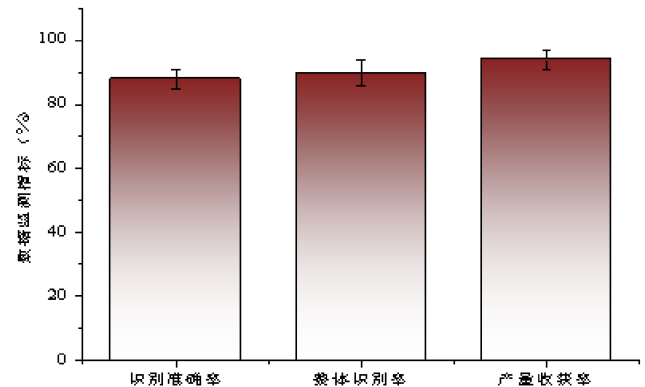


图1 数据监测的指标影响

在实际应用中,该机器人每天可完成1公顷草莓温室的巡检工作,相比人工巡检效率提高了10倍以上。通过对采集数据的分析,能够提前3-5天发现草莓灰霉病等病害,为及时防治提供了有力支持。然而,在连续降雨后的高湿环境下,机器人的电子元件出现短暂故障,导致部分数据丢失,影响了巡检的连续性。通过对采集数据的深度分析,该机器人能够提前3-5天发现草莓灰霉病等病害,为及时防治提供了有力支持。在2024年某草莓种植基地的应用中,在机器人发出灰霉病预警后,种植户及时采取通风降湿、药物防治等措施,使得该基地因灰霉病导致的产量损失从往年的18%降低至6%。然而,该机器人在应对特殊环境时存在一定短板。在连续降雨后的高湿环境下(空气湿度超过90%),机器人的电子元件

出现短暂故障,导致部分数据丢失,影响了巡检的连续性。据统计,在高湿环境持续48小时的情况下,数据丢失率达到12%,且故障修复平均耗时约2小时,对巡检工作的时效性产生了明显影响^[8]。

5 微小型仿生农业机器人在温室作物巡检中的适应性优化策略

5.1 结构优化设计

针对不同温室环境和作物种植模式,设计多样化的机器人结构。对于立体种植温室,开发具有攀爬和伸展功能的仿生机器人,如仿尺蠖机器人,通过伸缩身体实现对高层作物的巡检。在材料选择上,采用防水、防潮、耐腐蚀的特殊材料,提高机器人在高湿环境下的使用寿命。同时,优化机器人的质量分布和重心位置,增强其在复杂地形下的稳定性。

5.2 感知系统升级

为解决光照变化对视觉传感器的影响,研发自适应光照调节的视觉系统,可根据环境光照强度自动调整摄像头参数,提高成像质量。融合多种传感器信息,建立多源数据融合模型,如将视觉信息与光谱信息相结合,提高对作物病虫害和生长状态判断的准确性。降低多光谱传感器等高端设备的成本,通过技术创新和规模化生产,推动其在微小型巡检机器人中的广泛应用。

5.3 运动控制改进

引入先进的传感器技术,如激光雷达、超声波传感器等,提高机器人对障碍物的感知精度,优化局部路径规划算法,减少路径规划时间,提高机器人的反应速度。针对湿滑地面和松软土壤等特殊环境,开发具有自适应能力的驱动系统,如采用可调节胎压的轮胎或仿生足垫,增强机器人的抓地力和通过能力。同时,加强机器人的运动控制算法研究,提高其在复杂环境下的运动稳定性和控制精度。

6 结论与展望

本研究通过对微小型仿生农业机器人在温室作物巡检中适应性的研究,分析了温室环境特点和作物巡检需求,探讨了机器人在结构设计、感知系统、运动控制

等方面的适应性表现。研究表明,微小型仿生农业机器人在温室作物巡检中具有一定的优势,但也存在诸多问题,如在复杂环境下的运动稳定性不足、感知系统受环境影响较大等。通过实际案例分析和实验验证,提出了相应的优化策略,为提高微小型仿生农业机器人在温室环境中的适应性提供了可行的解决方案。但是本研究在机器人与温室环境的交互作用研究方面还不够深入,对长期处于高湿、高温环境下机器人性能的变化规律缺乏系统研究。未来研究可以进一步开展机器人在不同温室环境下的长期稳定性实验,探索环境因素对机器人各部件性能的影响机制。同时,随着人工智能、物联网等技术的不断发展,可将更先进的技术应用于微小型仿生农业机器人,如开发基于深度学习的自主决策系统,实现机器人对作物生长异常情况的智能诊断和自主处理,推动温室农业向更高水平的智能化发展。

参考文献

- [1]基于改进A*算法和Bezier曲线的多机协同全局路径规划[J].曹如月;张振乾;李世超;张漫;李寒;李民赞.农业机械学报,2021(S1).
- [2]基于有效拐点和最短最小路径的蚁群路径规划方法[J].褚凯轩;常天庆;王全东;闫晓东.农业机械学报,2021(12).
- [3]农业机械导航路径规划研究进展[J].周俊;何永强.农业机械学报,2021(09).
- [4]基于改进RRT*FN算法的机器人路径规划[J].谭建豪;潘豹;王耀南;崔昊韵.控制与决策,2021(08).
- [5]基于改进SSD的柑橘实时分类检测[J].李善军;胡定一;高淑敏;林家豪;安小松;朱明.农业工程学报,2019(24).
- [6]基于自适应步长RRT的双机器人协同路径规划[J].李洋;徐达;周诚.农业机械学报,2019(03).
- [7]5-DOF仿人型机械臂关节空间轨迹规划研究[J].张程;张卓.组合机床与自动化加工技术,2017(09).
- [8]农业机器人技术研究进展[J].张铁中;杨丽;陈兵旗;张宾.中国科学:信息科学,2010(S1).