

农业机械避障技术研究进展与发展趋势

袁 粼¹, 李佳航¹, 刘欣伟^{1*}

(1.新疆理工职业大学智能制造学院, 新疆维吾尔自治区喀什地区疏勒县, 844004;

* 通讯作者, xwliu_ecjtu@163.com)

摘要: 当下农业机械的智能化发展已成为热点, 在提高机械化水平的同时, 避障技术则在众多智能化技术中脱颖而出, 在复杂田地、丘陵山区作业、以及果园管理、作物采摘、精准农业等场景中, 避障与导航技术是实现农业机械自主作业的关键。近年来, 众多学者围绕农业机械避障与导航技术开展了大量研究, 从传感器技术的应用, 到自主避障算法、路径规划算法的优化, 均取得了显著进展。本文综述了农业机械避障技术的研究现状、关键技术及未来发展方向, 为后续农业机械的智能化发展提供参考和建议。

关键词: 农业机械化; 避障; 多传感器融合; 路径规划算法

引言

随着农业现代化的推进, 农业机械的智能化和自动化成为研究热点。农业机械在提高农业生产效率、减轻农民劳动负担方面发挥了重要作用。然而, 农业机械在复杂多变的田间环境中自主作业时, 如何实现高效、安全的避障与导航成为亟待解决的关键问题。果园管理、作物采摘、精准农业等场景中, 避障与导航技术是实现农业机械自主作业的关键。近年来, 国内外学者围绕农业机械避障与导航技术开展了大量研究, 从毫米波雷达、激光雷达、双目视觉等传感器技术的应用, 到自主避障算法、路径规划算法的优化, 均取得了显著进展[1,2]。本文旨在通过对现有文献的综合评述, 梳理农业机械避障与导航技术的研究现状, 分析当前技术存在的不足, 并展望未来的发展趋势, 为农业机械智能化技术的发展提供参考和建议。

1. 农业机械避障技术的视觉导航与系统设计

农业机械避障技术是确保农业机械在复杂田间环境中安全作业的关键。避障系统的设计需要考虑多种传感器的选型与集成, 以实现障碍物的准确检测与规避。车兴龙 [3]基于毫米波雷达和摄像头设计了一套农业拖拉机田间避障安全系统, 通过搭建拖拉机感知环境, 对硬件设备进行选型, 并设计了专用的数据采集软件, 实现了对田间环境的实时感知和数据采集。这些展示了避障技术在农业机械中的重要性, 通过硬件选型与系统设计, 可以显著提高农业机械的安全性和作业效率。郭金贵 [4]设计了一种基于STC89C52单片机和多个传感器模块的农业机械机器视觉导航系统, 该系统以STC89C52单片机为核心, 结合红外模块、超声波模块、WiFi模块和循迹模块, 实现了农业机械的视觉导航功能(模块化功能如图1所示); 农机可以轻松地在平坦的地面上移动, 自由前进转弯, 穿越障碍物, 实现无碰撞行驶, 并通过机器视觉进行循迹操作; 采用基于DBSCAN算法的密度聚类方法和最小二乘法的目标中心点直线拟合法实现了对农田环境的识别和分析, 为农业机械的行驶路径规划提供了准确的数据支持。

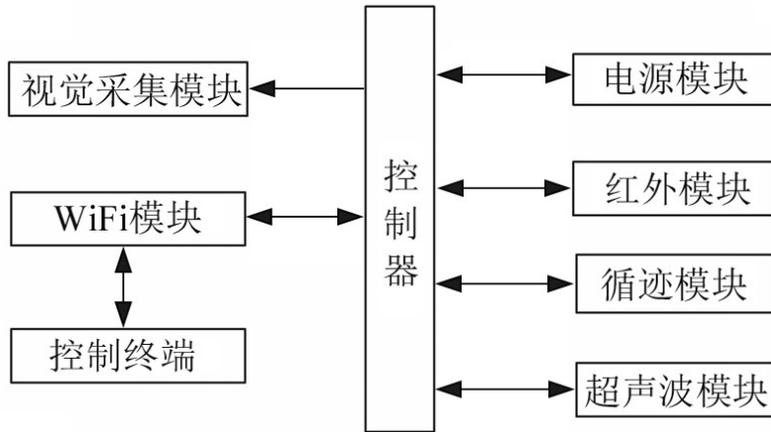


图1 多传感器的农业机械机器视觉导航系统功能图 [4]

肖坚星等 [5]综述了采用RGB相机、全景相机、双目相机、激光雷达、超声波雷达、毫米波雷达等单一传感器进行障碍物检测的研究进展,根据研究进行优缺点对比见表1,并详细阐述了各传感器的优势与局限性。同时,还概述了采用视觉传感器与激光雷达融合、视觉传感器与毫米波雷达融合等多传感器融合技术在障碍物检测方面的研究进展,分析了不同传感器融合技术的特点与优势。

表1 不同类型视觉传感器对比 [5]

视觉传感器	测距原理	优点	缺点
RGB相机	分析相邻图像的差异、根据先验知识或物体大小计算	成本低、高分辨率	获取的距离信息精度较低
双目相机	RGB图像特征匹配三角测距间接计算	成本低、高分辨率、能够获取物体的距离信息	受光照变化影响较大、不适用缺乏纹理信息的场景、计算复杂度高
全景相机	分析相邻图像的差异、根据先验知识或物体大小计算	视野广分辨率高	成本高、图像处理算法复杂度较高

视觉导航技术在农业机械避障中的应用是指利用摄像头等视觉传感器获取环境信息,通过图像处理和识别来识别障碍物并规划路径。通过合理选择视觉传感器和设计避障算法,可以显著提高农业机械的安全性和作业效率。

2. 农业机械避障技术中的多传感器融合与算法优化

多传感器融合技术在农业机械避障中发挥着重要作用,通过融合不同传感器的信息,可以提高障碍物检测的准确性和可靠性。杨昊霖 [6]提出了一种基于yolov5的障碍物检测改进算法,并研究了基于双目视觉的避障技术,通过引入新型特征融合网络及多检测头设计的改进、优化k-means聚类算法、引入CBAM注意力机制以及对模型进行轻量化的改进,实现了更高的检测精度和速度。

方旭 [7]针对果园环境复杂、单一传感器难以实现精确感知的问题,采用多传感器融合方法,选取相机、激光雷达与IMU传感器,通过张正友标定法进行标定与联合标定,采用决策级融合算法增强目标检测性能和系统鲁棒性。基于激光雷达坐标系进行局部路径规划,通过目标点坐标提取导航点,采用贝塞尔曲线进行避障路径规划,实现果园不同障碍物检测与避障路径规划。

李培东等人 [8]研发的基于多超声波传感器的山地果园搬运车避障功能,通过设置多个超声波传感器并采用多传感器数据融合技术(如图2所示),实现了对搬运车周围环境的全面感知和障碍物的准确检测。实验结果表明,超声波距离测量方法和避障策略在不同角度和距离下均表现出较高的准确性和可靠性,测量误差保持在较小范围内,证明了该方法在不同环境下的稳定性和适应性。多传感器数据融合算法有效提高了测量精度,避障策略能够及时准确地响应不同角度和复杂环境下的障碍物,确保搬运车在山地果园中安全、高效地行驶。

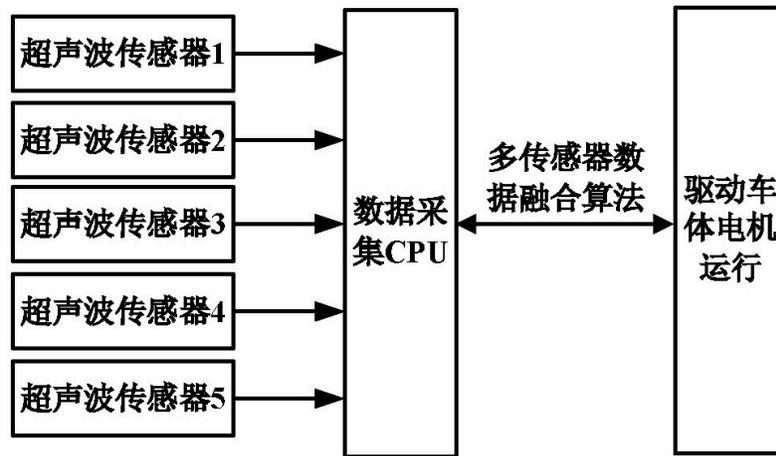


图2 多超声波传感器的山地果园搬运车传感系统图 [8]

多传感器融合技术在农业机械避障中发挥着重要作用，通过融合不同传感器的信息，可以提高障碍物检测的准确性和可靠性。同时，算法优化也是提高避障性能的关键。

3. 农业机械避障技术在特定环境下的应用研究

3.1. 丘陵山地中机械化作业的应用研究

农业机械避障在特定环境下的应用研究，如丘陵山区和果园环境，具有重要的现实意义。丘陵山区地形下路面跌宕起伏、大量的阶梯块也是影响农业机械作业的主要因素之一，林先印等 [9] 针对丘陵山区田间道路复杂的环境，提出了一种基于栅格地图优化方法和改进A星算法的自主行驶避障方案，通过优化的Bresenham's算法和滚动更新原理投射障碍物位置信息，使栅格地图更具有实时性和可靠性，形成一种动态栅格地图。余帅振 [10] 则研究了基于视觉的丘陵整地作业导航方法与避障规划，提出了一种基于田埂边界和已耕部分与未耕部分边界的导航方法，通过点云过滤和Canny边缘检测算法提取田埂边界，设计了一种滑动窗口的方法确定已耕部分与未耕部分边界点，并采用五次多项式拟合其边界。农业机械避技术在丘陵山地状态下的应用研究，主要能够解决提高农业机械在该环境中的作业效率和安全性。

3.2. 果园与田间中割草作业的应用研究

农业机械避障技术在果园、田间割草基础实际应用广泛，众多学者研发出相对应的样机用来检验割草过程中避障技术的效果。史璐 [11] 则设计了一种基于激光雷达的果园割草机避障系统，利用激光雷达对果园障碍物进行检测，通过动态窗口法（DWA）作为避障算法，实现了割草机在遇到静态和动态障碍物时的100%避障成功率。沈帅 [12] 设计了一种集行间割草清扫和株间避障割草于一体的果园割草清扫机（如图3所示），并通过机械式触碰避障杆来检测树干位置，控制避障装置的避障作业。试验结果表明，避障通过率为100%，平均留茬高度109.2 mm，当前进速度为3.44 km/h，割刀转速为2344.11 r/min，液压缸压缩速度25254 mm/s时可以达到最优的作业效果。



图3 果园割草清扫机 [12]

杨毅 [13]研制了一种适用于主干型果园的株间避障割草机，通过正交试验确定了割草机工作效率的主要影响因素，试验表明，机具前进速度对株间漏割率的影响最显著，液压缸压缩速度与复位弹簧弹性系数对株间漏割率的影响显著。刘澳 [14]通过对多种障碍物检测技术的，展示了果园避障割草机在复杂环境中的应用潜力。在割草机领域中避障研究单目视觉技术设备简单但深度计算复杂，立体视觉技术能够提供详细的障碍物识别信息，激光雷达技术具有高精度但成本较高，超声波和红外传感器在短距离探测中具有优势但易受环境影响。

未来，果园避障割草机的障碍物检测技术在不断进步，但仍面临成本、环境适应性等方面的挑战，需进一步优化和改进。

4. 我国农业机械避障技术存在的问题与未来方向

尽管目前我国的农业机械避障技术取得了显著进展，仍面临诸多挑战。首先，环境复杂性对传感器数据处理速度和算法实时性提出了更高要求。其次，极端天气条件下的稳定性与可靠性仍需进一步提升。此外，数据需求与计算效率之间的平衡问题亟待解决。

总的来说，目前农业机械避障技术存在以下问题[15,16]:

环境不确定性影响：设施环境复杂且遮挡严重，包括动植物动态变化、场地结构布局改变、光照变化等因素，这些都会影响传感器数据质量和模型决策，进而影响农业机器人的避障效果。

突发障碍物应对：农业机器人可能面临各种突发障碍物，如行人、移动物体、其他机器人、逃逸动物等，需要迅速采取避障措施，现有技术在对这类突发情况时仍存在挑战。

复杂环境下的实时性和灵活性不足：农业机械手的驱动控制系统在复杂环境中难以保持灵活的高精度控制，导致作业效率低下，尤其是在应对不规则地形和动态障碍物时，现有系统的表现不佳。

标准化程度低，应用受限：果园等复杂环境的标准化程度低，完全自主导航机械设备的应用短期内难以实现，影响了自动导航技术的推广。

这些问题的存在表明，虽然农业机械避障技术取得了显著进展，但在实际应用中仍面临诸多挑战，需要进一步的研究和改进以提高其适应性和效能[17,18]。

未来研究可以从以下几个方面展开：

- 1) 改进传统避障控制算法：动态调整势场参数，优化DWA的速度选择策略，结合强化学习进行路径规划。
- 2) 减少数据需求：采用数据增强技术和迁移学习方法，探索无监督学习和半监督学习策略。
- 3) 多机器人协同作业：通过任务分工提升农业生产效率，减轻单个机器人的工作负荷。
- 4) 构建标准化测试平台：建立设施避障技术的标准化测试平台和开放数据集，促进技术进步和应用推广。

5. 结论

当前农业机械避障技术的研究使基于多种传感器技术、机器视觉技术融合避障算法后广泛应用于障碍物检测与避障系统中，提高了农业机械在复杂环境下的自主作业能力。同时，诸多技术的融合也进一步提升了系统的可靠性和效率。这些技术的发展不仅提高了农业机械的安全性和作业效率，也为智慧农业的发展提供了坚实的技术支持。

尽管如此，农业机械避障与导航技术仍面临诸多挑战，如复杂环境适应性、传感器成本、数据标准化与共享平台建设等。未来研究应重点关注多传感器融合技术的优化、先进算法的创新、多机器人协同作业以及数据标准化与共享平台的建设，以进一步提升农业机械在复杂环境下的导航精度、效率和适应性，农业机械化和智能化水平的提升。

参考文献

- [1] 何勇, 黄震宇, 杨宁远, 李禧尧, 王玉伟, 冯旭萍. 设施农业机器人导航关键技术研究进展与展望 [J]. 智慧农业(中英文), 2024(5): 1-19.
- [2] 孔庆霞, 杨洪文, 李爱胜. 人工智能在农业机械领域的应用调查 [J]. 山东农机化, 2024(5): 52-54.
- [3] 车兴龙. 农业拖拉机田间避障安全系统设计 [J]. 农机使用与维修, 2024(7): 84-86.
- [4] 郭金贵. 农业机械机器视觉导航系统设计 [J]. 农业装备与车辆工程, 2025, 63(1): 35-42.
- [5] 肖坚星, 王天海, 王宁, 李顺达, 李寒, 张漫. 农业机器人障碍物检测与避障技术研究进展 [J]. 农业工程学报, 2025(13): 35-49.
- [6] 杨昊霖. 基于双目视觉的履带机器人障碍物识别与避障技术研究 [D]. 山东理工大学, 2023. DOI: 10.27276/d.cnki.gsdgc.2023.001151.
- [7] 方旭. 基于多传感器融合的果园植保机械导航系统研究 [D]. 安徽农业大学, 2023. DOI: 10.26919/d.cnki.gannu.2023.000246.
- [8] 李培东, 卿笛, 余娜. 基于多超声波传感器的山地果园搬运车避障功能研究 [J]. 河北农机, 2024(20): 15-18. DOI: 10.15989/j.cnki.hbnjzss.2024.20.043.
- [9] 林先印, 李云伍, 赵颖, 王月强, 杨洪涛. 丘陵山区田间道路智能农业装备的自主避障算法研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022(12): 77-86.
- [10] 余帅振. 基于视觉的丘陵整地作业导航方法与避障规划研究 [D]. 贵州大学, 2024. DOI: 10.27047/d.cnki.ggudu.2024.000412.
- [11] 史璐. 基于激光雷达的果园割草机避障系统设计与试验 [D]. 河北农业大学, 2022. DOI: 10.27109/d.cnki.ghbnu.2022.000732.
- [12] 沈帅. 果园避障割草清扫机的设计与试验 [D]. 塔里木大学, 2024. DOI: 10.27708/d.cnki.gtlmd.2024.000122.
- [13] 杨毅. 主干型果园株间避障割草机的设计与试验 [D]. 塔里木大学, 2023. DOI: 10.27708/d.cnki.gtlmd.2023.000178.
- [14] 刘澳, 刘莉滋, 闫一飞, 等. 果园避障割草机障碍物检测技术研究进展 [J]. 中国农机装备, 2024(7): 6-9.
- [15] 陈希. 基于激光雷达的农业无人机避障控制系统研究 [D]. 河南科技大学, 2023. DOI: 10.27115/d.cnki.glygc.2023.000495.
- [16] 马志涛. 自然环境下柑橘避障采摘机器人设计与试验 [D]. 华中农业大学, 2024. DOI: 10.27158/d.cnki.ghznu.2024.000605.
- [17] 吴正国. 农业自动化机械障碍物检测研究 [J]. 河北农机, 2023(19): 13-15.
- [18] 宋成文. 农业机械导航技术的发展及应用分析 [J]. 农业开发与装备, 2024(7): 71-73.