

# 面向智慧农场的履带车辆自动驾驶关键技术研究综述

姬虹<sup>1</sup>, 李康<sup>1</sup>, 何豪<sup>1</sup>, 冯伟<sup>2</sup>

<sup>1</sup>河南职业技术学院, 河南郑州, 中国

<sup>2</sup>河南农业大学, 河南郑州, 中国

**【摘要】**全球农业劳动力紧缺、粮食增产压力加剧, 农业智能化升级已成发展大势。履带式农机适配复杂田间地形, 是精准农业重要作业装备, 目前普遍自动化程度偏低, 作业效果受人工操作制约。本文综述智慧农场履带车辆自动驾驶相关技术, 剖析其研究特征与发展趋势。履带车辆滑移转向带来非线性运动、履带滑移等路径跟踪难点; 北斗 RTK 与惯性单元多传感器融合可实现高精度稳定导航; 深度学习算法显著提升农田障碍物检测能力, 云端与移动端协同模式可平衡检测精度与实时性; PID-模糊组合控制搭配分段转弯策略, 有效优化车辆行进控制效果。该技术现阶段仍存在复杂环境定位不稳、控制算法优化难、系统集成不完善等问题。未来需深耕多传感融合、智能决策等核心技术, 加快技术落地应用, 助力国内智慧农业高质量发展。

**【关键词】**智慧农场; 履带车辆; 无人驾驶; 北斗卫星导航; RTK 技术; 深度学习

**【基金项目】**河南省科学技术厅 2025 年科技发展计划河南省科技攻关面向智慧农场的履带车辆自动驾驶关键技术研究(编号: 252102110365); 河南省中央引导地方科技发展资金项目“智慧农业收获机械装备作业技术应用推广”(Z20251831131); 河南省科学技术厅 2024 年科技发展计划河南省软科学研究新形势下农机装备产业发展现状及对策研究(编号: 242400411017)。

## 1. 引言

随着全球人口持续增长以及城市化进程不断推进, 农业劳动力不足以成为制约农业可持续发展的突出问题, 根据联合国粮农组织提供数据, 到 2050 年, 全球粮食产量仍有 60% 的缺口[1], 在这种宏观背景下, 推动农业进行信息化、智能化转型已成为世界各国的共识。我国作为农业大国, 正积极迈进智慧农业的新时代, 进行农机装备向智能化、绿色化升级, 《中国制造 2025》规划明确指出, 要加速发展大型拖拉机及其复式作业机具、大型高效联合收割机等高端农机装备的制造, 全力发展农机装备信息接收、智能决策和精准作业的相关能力。

履带车辆由于与地面接触面积大、接触压强小、牵引力大、对地面破坏小等独特优势, 很适合在山区、丘陵和平原小地块等复杂地形条件下开展田间植保、农田耕种、农情监测等相关作业, 是实现精准农业的必要组成部分。目前我国履带车辆的自动化程度尚不够理想, 大部分作业仍旧手动完成, 作业效率和作业质量较低, 且较为依赖驾驶员操作经验。

履带车辆自动驾驶技术可以解放生产力的同时避免产生安全事故, 同时提高作业精度

及效率, 自动驾驶技术随着自动控制、卫星定位等技术飞速发展, 也得到了飞速的提高, 可根据作业环境的不同对搭配的农机局进行灵活调整, 逐步让我国精准农业实现自动化、智能化和无人化。

## 2. 履带式农机研究特点与趋势

当前无人驾驶农机的研究体现出以下特点和趋势: 轮式车辆自动驾驶技术相对来说是成熟的, 而履带式车辆因为转向机理有特殊性(借助改变两侧履带速度差实现转向), 其控制所面临的难度更大, 相关的研究在数量上较少。多传感器融合定位已成为主要的技术方式, RTK - GPS 与 IMU 联合起来能够有效弥补单一传感器的不足。从单车智能到多车协同发展是显著趋势, 多机器人拖拉机系统研究为大规模农业生产提供了不同的解决方案[2]。随着北斗卫星导航系统不断完善, 基于北斗的农机导航技术正成为我国农机智能化发展的重要特色方向。

## 3. 履带车辆路径跟踪的特殊性

与轮式车辆相比, 履带车辆路径跟踪控制所面临的特殊挑战更多, 履带车辆采用的是滑移转向方式, 即通过改变两边履带的行驶速度来实现转向。这种转向方式使车辆运动学模型具有强非线性特征, 且横向运动和纵向运动之间存在强耦合关系。履带与地面间的相互作用十分复杂, 履

带滑移和滑转现象普遍存在,导致车辆实际运动轨迹与理论轨迹存在较大偏差,农田作业环境复杂,地形起伏和土壤条件变化等因素都会影响履带车辆的行驶稳定性。履带车辆路径跟踪控制需要综合考虑运动学模型、动力学特性、地面交互作用以及环境扰动等诸多要素,设计具有高鲁棒性和高精度的控制算法是当前研究的要点和难点。[3-5]

#### 4. RTK 与多传感器融合技术

基于国内外研究现状,RTK 与多传感器融合技术成为农机高精度导航的主流发展方向,虽然 RTK - GPS 定位精度较高,但存在信号易受遮蔽、更新频率有限的不足,IMU 虽然自主性较好、更新频率高,但存在误差随时间累积的问题。对 RTK - GPS 与 IMU 加以融合,可以充分发挥各自的优势之处,加入视觉传感器、激光雷达等感知设备,可以进一步提高导航系统在复杂环境中的鲁棒性。尤其是当卫星信号短时间中断时,惯性导航和视觉传感器仍可提供有效的定位信息,使导航系统能够连续可靠地开展作业,多传感器融合的核心是信息融合算法的设计,卡尔曼滤波、扩展卡尔曼滤波、无迹卡尔曼滤波和粒子滤波等方法,在农机导航领域有应用[6,7]。如何根据具体应用场景选择合适的融合算法,仍是一个需要深入研究的问题。

#### 5. 基于深度学习的农田障碍物检测研究

##### 5.1 农田障碍物检测的挑战

农田作业环境十分复杂,障碍物检测面临许多难题,这些挑战可概括为以下方面:道路环境背景复杂,农田中的作物、杂草、田埂等因素构成了十分杂乱的视觉背景,导致障碍物难以从背景中区分,存在障碍物相互遮挡以及障碍物与作物相互遮挡的问题。例如,人在弯腰工作时,作物会挡住人的大部分身体,使得检测算法无法获取完整的目标特征。在不同时间段,光照强度差异很大,从早到晚光照的变化以及阴天、晴天等天气状况的改变,都会显著影响图像的视觉效果,增加检测难度。障碍物姿态具有多种形态,尤其是人在农田工作时姿态变化范围很大,包括站立、弯腰、蹲下等。

除了上面说的通用挑战之外,在农田环境中开展人检测还碰到两个特殊问题:一是农田背景复杂程度进一步提高,作物对人体的遮挡更厉害,二是对检测速度和检测距离有更高要求,要能达到对障碍物进行避让的功能,要求检测速度快、检测距离远,以使农机有充分的制动及避让时间。

##### 5.2 深度学习方法在农田环境中的应用

传统障碍物检测方法大多借助人工设计出来的特征(如 HOG、SIFT 之类)和传统分类器

(如 SVM、AdaBoost 之类),这些方法在简单场景中表现还行,然而在复杂农田环境里,鲁棒性和精度都无法满足实际要求,深度学习技术蓬勃发展,为农田障碍物检测提供了新方法。卷积神经网络(CNN)可自动学习图像中的深层特征,较传统方法具有更强的特征表达和泛化能力。

目前普遍的深度学习目标检测算法可分为两大类:一类是两阶段检测算法,以 Faster R R CNN 这类为代表,这类算法先生成候选区域,接着进行分类及回归,检测精度高,但速度相对较慢;另一类是单阶段检测算法,以 YOLO 系列和 SSD 为代表,这类算法将目标检测当作回归问题,直接预测目标的类别和位置,检测速度快,但精度略差[8]。在农田进行障碍物检测的场景中,要根据具体应用需求对精度和速度进行权衡,对于云端的障碍物检测平台,可以凭借服务器强大的计算能力运行更复杂、更精准的检测模型;对于移动端障碍物检测平台,则需考虑计算资源有限的约束,选用轻量级检测模型。

##### 5.3 云端与移动端检测模型

在云端做检测相关工作时,能够采用计算量较大然而精度更高的模型架构,基于 ResNet、EfficientNet 等骨干网络形成的 Faster R - CNN 或 Cascade R - CNN 等检测框架,在复杂农田环境中能够获得较高的检测精度。云端检测具有的优势是可以利用大规模的训练数据与强大计算资源来训练模型,而且模型推理过程不受终端设备计算能力的限制。云端检测也有数据传输延迟、依赖网络连接等方面的不足,在偏远农田地区,可能会遇到网络信号不稳定的情况。

在移动端检测相关工作中,得选计算量不大、推理快的轻量级模型,YOLO 系列最新的几个版本(如 YOLOv5、YOLOv8 等)以及 MobileNet 系列与 SSD 或 YOLO 结合的检测框架,是当下移动端障碍物检测常用的方法。这些模型通过深度可分离卷积、模型剪枝、知识蒸馏等技术,大幅减少了计算量和模型参数量,在保持较高检测精度的同时,满足了移动端实时性要求。TensorFlow Lite、ONNX Runtime 等移动端推理框架的不断发展,也为深度学习模型在移动设备上的部署带来了便利。

选择恰当的检测模型,要综合权衡检测精度、推理速度、模型大小、功耗等因素,在实际应用阶段,可采用云端与移动端协同检测的方式,移动端负责实时检测近距离障碍物,云端承担处理更复杂检测任务和更新模型的责任,两者相互协作以达到最优的检测效果。

#### 6. 基于 RS/GIS 开展农田导航信息获取的技术

RS/GIS 技术可高效获取农田环境信息,为履带农机路径规划提供可靠的数据支撑,常用技

术主要包括卫星遥感与无人机遥感两种方式。卫星遥感依托 Landsat、Sentinel、国产高分系列卫星采集农田地块、作物、土壤等基础信息,凭借覆盖范围广、成本低的优势,可完成农田范围划定、作业面积测算、田间通行路线提取等宏观规划工作,适用于大面积农田整体管控与作物长势监测,但分辨率有限,无法识别小型田间障碍物,难以适配精细化导航作业。无人机遥感可有效弥补卫星遥感的短板,具备灵活机动、时效性强、成像精度高的优势,能够低空采集厘米级农田影像,精准获取田块边界、障碍物分布、作物行距等细节信息[9]。

卫星遥感适配大范围、低精度的农田信息采集,无人机遥感更适用于小范围、高精度的细节探测,二者互补性极强。结合两种遥感手段的优势,采用多源遥感数据融合方法,融合卫星遥感的大田基础信息与无人机遥感的精细边界、障碍物数据。通过几何配准、辐射校正、特征提取和信息融合关键技术,完成多源影像空间对齐、数据校准与有效导航信息筛选整合,构建出高精度农田导航地图。同时通过多组分辨率对比试验,筛选出适配田间障碍物检测的最优影像参数,在满足农机导航精度要求的前提下,合理控制数据采集与处理成本。

## 7. 履带车辆自动驾驶系统关键技术分析

### 7.1 自动导航系统平台设计

自动导航系统平台是履带车辆实现自动驾驶的关键硬件载体,整套系统由显示终端、嵌入式导航控制器、RTK 定位设备、转角传感器、惯性导航模块与视觉传感器构成,各组件借助 CAN 总线完成数据互通。显示终端负责人机交互与数据展示,工作人员可实时查看车辆位置、路径偏移及运行状态,也能按需修改导航参数。嵌入式导航控制器为系统控制核心,汇总各类传感数据后,运算得出转向角度、行驶速度等控制参数,下发指令操控液压机构,让车辆沿既定路线行驶。RTK 结合北斗、GPS 信号,可实现厘米级精准定位;惯性导航模块实时检测车体俯仰、横滚、航向角度,掌握车辆姿态变化。视觉传感器采集前路作物、障碍物影像,卫星信号不佳时可补足定位数据,保障导航作业平稳开展[10]。

### 7.2 多传感器融合定位技术

多传感器融合定位是提高导航系统精度和鲁棒性的关键技术,在农田作业环境中,单一的定位方法一般难以满足全天候、全地形的导航要求,GPS/北斗 - RTK 系统在开阔区域可以实现厘米级定位,但在树木遮挡、建筑物旁等信号受限区域,其定位精度会大幅降低,直至完全失去定位效果,惯性导航传感器虽然自主性强、不受

外部信号干扰,但其定位误差会随时间逐渐累积,难以长时间独立工作,视觉传感器可以通过识别作物行实现相对定位,但它受光照条件和作物生长状态的影响较大。

选用 GPS/北斗 - RTK 系统与惯性导航传感器融合进行定位的策略成为最优选择,在正常工作条件下,将 RTK 定位信息作为主信息、惯性导航信息作为辅信息进行融合定位;在卫星信号丢失时,系统可以借助视觉传感器跟踪作物行实现路径跟踪,同时利用惯性导航信息在短时间内进行位置推算。这种多传感器融合定位策略,很好地保证了导航系统在各种工作环境下的连续性和可靠性。

### 7.3 组合控制算法与地头转弯策略

路径跟踪控制算法的优劣直接影响履带车辆的导航精度。就履带车辆特殊的运动学属性而言,本项目采用 PID - 模糊组合控制算法实现路径跟踪,PID 控制器在误差较小时有较好的控制精度,但在误差比较大或者系统参数变化比较大时,其控制效果说不定不理想。模糊控制器开展工作不依靠精确的数学模型,拥有不错的鲁棒性以及适应能力,然而稳态精度是相对偏低的,将两者结合到一起,能充分发挥彼此的优势——当偏差较大的时候由模糊控制器粗调,在出现小偏差的时候,由 PID 控制器来进行精调,以此达成快速又精确的路径跟踪[11-13]。

地头转弯属于农机田间作业不可避免的操作步骤,也是路径跟踪控制的难点之一,跟直线跟踪在情况上不同,地头转弯要求车辆在有限的空间里完成大角度转向操作,对控制算法动态性能的要求达到了更高的标准,分段地头转弯策略把转弯的整个过程分为若干阶段,每个阶段采用不一样的控制参数、策略,以此实现顺畅且高效的转弯动作。可以先使车辆减速至转弯的速度,之后按照预定的转弯半径开展转向作业,在转弯完成之后将速度提升到正常作业速度,把 Simulink 仿真和田间实验结合起来的方法,可有效验证和优化控制算法参数,保证系统在实际作业环境里稳定可靠地工作。

## 8. 未来发展趋势与挑战

### 8.1 技术发展趋势

针对智慧农场的履带车辆自动驾驶技术正快速进步,未来会有以下的发展趋势,深度进行多源信息融合,未来的导航系统会更凸显卫星定位、惯性导航、视觉感知、激光雷达等多种传感器信息深度融合的重要性,凭借深度学习等先进算法使信息高效融合及互补,进一步增进导航系统在复杂环境下的鲁棒性和精准度[14,15]。智能决策与自主规划,随着人工智能技术的发展,履带车辆能有更强的环境感知以及自主决策本领,

可以依据实时感知的农田环境信息自主规划最优作业路径,并且动态改变作业参数,以适应不同作业需求,多辆车协同作业。[16-19]在大规模农田作业的进程中,多台履带车辆开展协同控制可有利提高作业效率,未来的研究将进一步加大对多车通信、任务分配、编队控制和冲突避免等关键技术的关注,数字孪生和云端协同,通过搭建农田和农机的数字孪生模型,可在虚拟空间中实时映射、估计农机的作业情况,为控制策略优化提供决策支持,云端协同计算平台可向农机提供强大的计算资源以及数据分析能力。

## 8.2 面临的挑战

虽说履带车辆自动驾驶技术有了显著进步,但还是面临诸多难题,在定位技术方面,如何在树冠被遮蔽、地形有起伏等复杂环境中保障稳定的高精度定位,还是需要解决的难题,在路径跟踪控制的相关领域,履带车辆强非线性动力学特性和复杂的地面交互,使得高精度跟踪控制的难度很大,尤其是在高速作业和紧急避障的场景中。在障碍物检测的相关工作中,如何在计算资源有限的移动平台上实现实时、精确的障碍物检测,尤其是在对被农作物遮掩的人体进行可靠检测,还是一个技术方面的难题,在系统集成方面,如何对多种传感器、控制器和算法进行有机集成,实现稳定可靠的商业化产品,还需要开展大量工程实践和田间验证,在标准化和法规方面,明确无人驾驶农机的安全标准、操作规范和法律地位等问题,这对技术的推广应用也十分重要。

## 9. 结论

面向智慧农场的履带车辆自动驾驶技术是推动我国农业农村现代化、智能化转型的重要技术方向,本文对无人驾驶农机、路径跟踪控制、北斗导航定位、RTK 农机导航系统、深度学习障碍物检测以及遥感/GIS 农田导航信息获取等关键技术的研究现状和发展前景做了系统的综述。

以 GPS/北斗 - RTK 系统和惯性导航传感器融合为代表的多传感器融合定位技术,已是农机高精度导航的主流方案;以 PID - 模糊组合控制算法和分段地头转弯策略构建的路径跟踪方法,在履带车辆上有良好的应用前景;在农田障碍物检测方面,深度学习技术性能比传统方法更好,云端和移动端协同的检测方法可兼顾检测精度与实时性;将卫星遥感和无人机遥感融合的多源数据融合方法,给农田导航信息的获取提供了全面的技术保障。

履带车辆自动驾驶技术在定位的鲁棒性、控制的精准度、障碍物检测的实时性能以及系统集成的可靠性能等方面依旧有很多挑战,未来的研究要进一步拓展多传感器信息融合理论,开展适

应履带车辆强非线性特性的智能控制方法研究,促使轻量高效深度学习模型在移动端的部署开展,进而加强田间实验验证以及工程化应用进程,给我国智慧农业建设提供有力的技术支持。

## 参考文献

- [1] O'CONNOR M, ELKAIM G P B. Kinematic GPS for Closed-Loop Control of Farmland Construction Vehicles. Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 1995.
- [2] ZHANG C, NOGUCHI N. Development of a multi-robot tractor system for agriculture field work. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 142: 79-90.
- [3] 卞永明, 杨蒙, 刘宇超. 履带式移动机器人轨迹跟踪控制技术研究[J]. 中国工程机械学报, 2018, 16 (03): 5-9+22.
- [4] 王博洋, 龚建伟, 高天云. 基于双层驾驶员模型的履带车辆纵向与横向协同跟踪控制方法[J]. 兵工学报, 2018, 39 (09): 14-21.
- [5] 邓伟. 履带式排爆机器人的路径规划和轨迹跟踪研究[D]. 山东大学, 2018.
- [6] Yoshisada Noguchi, Kazunobu Ishii, Hikaru Terao. Development of an agricultural mobile robot using an RTK-GPS and a fiber optic gyroscope. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 1997, 59(5): 23-29.
- [7] TAKAI R, YANG L, NOGUCHI N. Development of a crawler-type robot tractor using RTK-GPS and IMU. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2014, 7(4): 143-147.
- [8] BALL D, UPCROFT B, WYETH G, et al. Vision-based obstacle detection and navigation for an agricultural robot[J]. Journal of Field Robotics, 2016, 33(8):1107-1130.
- [9] 于鉴麟. 无人农机控制系统设计实现与控制算法研究[D]. 沈阳航空航天大学, 2020.
- [10] 罗锡文, 张智刚, 赵祚喜, 等. 东方红 X-804 拖拉机的 DGPS 自动导航控制系统[J]. 农业工程学报, 2009, 25 (11): 139-145.
- [11] 许正荣, 王文周, 辜丽川. 基于轨迹跟踪的农用履带机器人自适应滑模控制[J]. 江苏农业学报, 2018, 34 (03): 236-245.
- [12] 焦俊, 陈靖, 乔焰. 直流电机驱动农用履带机器人轨迹跟踪自适应滑模控制[J]. 农业工程学报, 2018, 4: 64-70.

- [13]周建军,张漫,汪懋华,等.基于模糊控制的农用车辆路线跟踪[J].农业机械学报,2009,40(4):151-156.
- [14]付家豪.基于北斗和视觉的农机装备导航系统研究[D].安徽理工大学,2023.
- [15]付家豪.基于北斗和视觉的农机装备导航系统研究[D].安徽理工大学,2023.
- [16]刘学,曹卫彬,刘姣娣,等.RTK-GPS系统在智能化农业机械装备中的应用[J].农机化研究,2007(9):182-183.
- [17]杨雪.黑龙江省胜利农场开始批量应用凯斯RTK高精度自动导航系统[J].现代化农业,2009(8):47-47.
- [18]伟利国,张权,颜华,等.XDNZ630型水稻作业车GPS自动导航系统[J].农业机械学报,2011,42(7):186-190.
- [19]张美娜,尹文庆,林相泽,等.RTK-DGPS融合惯性传感器的车辆导航参数计算方法[J].农业机械学报,2015,40(5):7-12.