

基于多传感器融合的农业机械播种方向自适应调整研究

苏宏毅¹ 张琳² 张世奇³

1 广东药科大学, 广东省广州市, 510006;

2 河北医科大学, 河北省石家庄市, 050017;

3 湖北工业大学工程技术学院, 湖北省武汉市, 430070;

摘要: 针对传统播种机作业易受地形及操作影响, 进而导致播行不直、重漏播严重的问题, 给出了一种借助多传感器融合的自适应调整办法, 该方法借助融合 GNSS、IMU 及视觉传感器数据, 形成了坚实的状态估计模型, 切实突破单一传感器的局限, 构建了模型预测控制器 (MPC) 及在线参数自优化策略, 达成针对预设路径的高精度、强鲁棒跟踪控制, 经田间试验验证, 该系统显著增进播行直线度, 切实减小播种误差, 为精准农业装备智能化发展奠定了可靠技术根基。

关键词: 农业机械; 播种方向; 多传感器融合; 自适应控制

DOI: 10.69979/3041-0673.25.09.007

引言

精准农业乃现代农业发展关键导向, 其中播种作业质量直接关乎作物产量, 以人工驾驶为依托的传统播种方式难以实现直线度的保证, 容易引发重播及漏播现象, 引发土地与种子资源的浪费, 虽然卫星导航技术已应用至农机导航, 但处于动态环境时, 其精度跟可靠性仍有挑战, 多传感器信息融合技术凭借整合互补信息, 成为提升导航系统性能的关键切入点, 针对基于多传感器融合的播种方向自适应智能调整技术展开研究, 对提升作业效率与品质、推动农业生产自动化转型升级有着重大的理论价值与现实意义。

1 多传感器信息融合技术在农业中的应用价值

多传感器信息融合技术在农业领域应用极具价值, 它借助协同处理源自不同物理特性的多个传感器数据, 大幅增进了农业系统感知环境的精确性、可靠性以及智能化水平, 在复杂多变的农田环境当中, 单一传感器易因受遮挡、光照、尘土或信号干扰出现失效或精度下降情况, 融合技术切实利用了不同数据源的互补及冗余性, 因而突破了这一阻碍。把全球导航卫星系统 (GNSS) 提供的高精度位置信息、惯性测量单元 (IMU) 的动态姿态数据以及视觉传感器捕捉的作物行或障碍物图像融合起来, 可产生对农机位置、航向及周边环境更周全、更稳固的估计, 为自动导航筑牢坚实根基。此项技术不仅作为精准农业的核心使能器, 还直接推进了播种、施肥、收割等关键作业环节的效率跟质量提升, 既杜绝了

重复与遗漏, 降低了投入品浪费, 也大幅减轻劳动强度, 降低了生产耗费, 深度借助多传感器融合是推动农业生产达成自动化、智能化转型的手段, 且是达成资源优化及可持续发展目标的关键技术途径^[1]。

2 播种方向自适应调整系统总体方案设计

2.1 感知层的多源异构传感器协同感知方案设计

感知层作为整个系统信息的起始点, 其设计核心是借助多源异构传感器协同运作, 建立一个兼具鲁棒性与高精度的环境及自身状态感知系统, 该方案选取全球导航卫星系统 (GNSS) 实时差分定位 (RTK) 模块作为绝对位置传感装置, 其能给出厘米级精度的经纬度与高程数据, 乃路径跟踪的基准凭借。GNSS 信号易遭受地形遮挡、多路径效应及电磁干扰影响, 致使更新频率偏低且在特定情形下有跳变风险, 为消除这一弊端, 此方案采用了惯性测量单元, 其内部所设三轴加速度计与陀螺仪能够以数百赫兹的高频速率对农机三轴角速度及线性加速度展开实时测量, 经积分运算可推算出车辆的瞬时姿态角与航向变化, 有效补偿 GNSS 动态响应延迟, 在其信号短暂丢失时给出短时高精度航迹推算。

为进一步增进系统在复杂农田环境里的感知冗余和容错能力, 方案也考虑纳入机器视觉传感器, 摄像头可获取作物残茬、已播种行或田间标志线等视觉特征, 利用图像处理算法提取导航基准线, 进而在 GNSS 信号完全失效的极端情形下 (如 under tree canopies) 具备相对导航能力。视觉信息跟 GNSS/IMU 融合, 达成了

绝对定位与相对定位优势的相互补充，借助统一的时空对齐处理所有传感器数据，保证数据融合时时间同步以及坐标系一致，为决策层呈上一个连续、稳定、可信的综合性状态估计，囊括车辆绝对位置、速度、航向角、横摆角速度以及相对于目标播种线而言的横向偏差与航向偏差，这是达成方向自适应调整的先决基础^[2]。

2.2 决策层的分层智能决策与控制算法架构设计

决策层充当系统的“大脑”，接收感知层的融合数据之后生成转向控制指令，其设计借助分层智能控制架构兼顾算法精准性、实时性与鲁棒性，该架构的上层为路径跟踪控制器，其核心工作是依据感知层所算出的横向偏差与航向偏差，以及当下车速，算出能让车辆回归预设路径的期望前轮转向角。方案未采用单一算法，而是创设了一种基于模型的优化控制策略，诸如线性二次调节器，这类控制器借助车辆运动学或简化动力学模型，在满足各类约束（如转向角速度限制、轮胎侧偏角约束）的情形中，滚动优化未来一段时间的控制序列，进而实现顺畅、精准且前沿的控制成效，明显胜过传统的PID控制，特别是在处理大曲率转弯以及土壤条件突变时表现卓越。控制架构的下层有一个自适应调整与补偿模块，该模块赋予系统以智能决策能力，它始终监测作业环境及系统状态，囊括实时车速、借助IMU数据估算的地面对坡度以及执行机构的响应延迟，按照这些信息，该模块对上层控制器参数实施动态调整，诸如根据车速自适应调整预瞄距离以及控制增益，保证高速状态下系统具备稳定性，低速时维持灵活。同时，该模块还集成了故障诊断与容错逻辑，能够识别传感器数据的异常置信度（如RTK固定解变为浮点解），并自动降低异常数据的融合权重或切换至纯惯性导航/视觉导航模式，极大提升了系统在复杂农田工况下的可靠性^[3]。

2.3 执行层的线控转向与系统集成实施方案设计

执行层是把决策层控制指令化作农机转向轮实际物理动作的关键要点，其设计直接主宰整个控制系统的最终性能，方案运用电控液压转向系统（EHS）充当执行机构，此为对传统大中型拖拉机及播种机实施自动化改造的最为可行且高效的方案，该实施方案留存原车的机械转向机构及液压系统，经由加装一套比例控制阀组与转向油缸串联或并联，且由车载控制器发出的脉冲宽度调制（PWM）信号精准调控该阀的开口尺寸与方向，进而驱动油缸形成所需的转向力矩与角度。此方案运用非侵入手段改造原车结构，留存了手动驾驶的冗余安全

性，其成本比全电动转向系统低，且可提供农业劳作所需的大力矩输出，系统集成实施覆盖硬件在环的仿真测试与田间标定，就硬件范畴而言，所有传感器、车载工业计算机（作为决策单元）、电液转向阀以及电源管理单元被收纳进坚固、防水、防震的机箱，形成一个独立的自动驾驶单元，利于安装及维护。

3 基于多传感器融合的农业机械播种方向自适应调整策略

3.1 基于多源信息加权融合的鲁棒状态估计策略

该策略的核心是搭建一个能够应对农田复杂干扰的坚实状态估计器，其依托于对异质传感器数据开展深度加权融合，全球导航卫星系统（GNSS）给出高精度的绝对位置及航向基准，但其信号质量显著受卫星可见度、电离层扰动及多路径效应影响，特别是在靠近树林及障碍物时误差剧增明显。惯性测量单元（IMU）可凭借极高频率输出角速度与加速度信息，经积分可得出短时间内极为精确的姿态变化及位移情况，但其误差会随时间累积而延展，视觉传感器借助识别作物行、垄线或其他地理特征，可给出不依靠外部信号的相对导航信息，但其有效性受光照、天气及作物生长阶段的严格限制。此策略采用自适应卡尔曼滤波（Adaptive Kalman Filtering）这一框架，并非对所有传感器数据一视同仁，而是针对每个数据源，根据其瞬时可信度动态给予权重因子，该权重借助实时监测各传感器的输出特性（如GNSS的载波噪声比、IMU的偏差稳定性、视觉特征的清晰度与匹配度）来开展自适应计算。倘若GNSS信号质量高，其观测噪声协方差被降低，对融合结果起主导作用；车辆穿过信号遮挡区之际，算法会自动下调GNSS权重，转而愈发依赖IMU的轨迹推算与视觉的相对定位，进而在任何时刻均可输出一个兼具平滑性、连续性且为最优估计的车辆综合状态，为后续控制决策筑牢坚实可靠的数据根基，从源头层面保障了系统的稳定性与精确性。

3.2 面向非线性动力学与前瞻性的智能路径跟踪策略

得到精准状态估计后，方向调整策略的关键在于一个能应对农机非线性特性且有前瞻能力的智能路径跟踪控制器，像纯追踪（Pure Pursuit）这类几何算法虽说简单，但难以应对速度变化且易出现超调；传统PID控制极大依赖参数设定，在非线性系统中表现欠佳。此策略采用的核心算法是模型预测控制（Model Predicti

ve Control，采用 MPC 作为核心算法，其优势在于能够明确地处理系统的各类约束并主动去预测未来状态，MPC 控制器内部融入一个简化的农机动力学模型，该模型顾及车辆侧偏特性、转向响应延迟与执行机构能力限制。在各控制周期，控制器并非单单计算当前所需的转向角，而是按照当前状态及模型，针对未来一个有限时域内的一系列控制输入（转向角序列）实施滚动优化，并通过对一个包含横向偏差、纵向偏差、控制量变化率及约束违反度的目标函数求最小化，解出最优序列，仅执行该序列首个控制量。这种“前瞻”能力令系统可提前预判路径曲率的变化，进而顺利地发起转向动作，大幅降低了超调与震荡，MPC 框架会自然地把车速视作一个关键状态变量，控制器可依据速度自行调整控制的激进程度：低速时采用更积极的控制方式以快速消除偏差，高速时优先维持行驶平稳，实现了性能与鲁棒性的最佳适配^[4]。

3.3 基于工况自感知的控制参数在线优化策略

为保证上述高级控制算法在多变农田环境中始终维持最佳性能，本系统添加了一个基于工况自感知的控制参数在线优化层面，为系统赋予真正的“自适应”能力，该策略察觉，固定的控制参数（像 MPC 的预测时域、成本函数权重，甚至动力学模型参数）无法处理所有工况。设计出一个并行的元优化模块以实时监测外部作业环境与内部系统状态，该模块凭借分析多传感器融合数据，持续完成多项关键指标的识别及评估，包含但不限于：实时地面坡度与崎岖度（经 IMU 数据高频加速度信号分析获取）、土壤坚实度（通过驱动轮滑转率模型间接测算），以及当前作业速度。把这些识别出的工况指标当作输入，借助一个预先训练的模糊逻辑规则库或轻量级神经网络模型，实时动态调控 MPC 控制器的核心参数，当系统检测到正在坡地开展作业或土壤湿软引起附着力下降时，会自动放宽转向控制方面的约束限制并增加跟踪误差的权重，防止因过度转向引发的滑移；当车速随作业需求上升时，元优化模块会相应拉长预测时域的长度，令控制决策更具前瞻性以实现稳定。这种以规则为基础的持续参数微调，致使核心控制器仿佛有一位经验丰富的驾驶员随时调整“方向盘手感”于侧，涉及从平坦干燥的壤土直至湿滑崎岖的坡地，系统均能呈现出高度自适应的一贯高性能。

3.4 面向执行延迟与不确定性的容错补偿策略

最终精准地把优化后的控制指令转变为车轮转角的执行进程，同样面临诸多不确定性，所以一套针对执

行延迟与不确定性的容错补偿策略十分关键，农机的电液转向系统（EHS）作为一类典型的液压执行机构，面临固有的响应延迟、死区非线性以及参数时变等问题，若直接按照理想控制指令追踪，必然造成实际效果偏离预期目标。于控制指令发至执行器前，添加了一个动态逆补偿器，该补偿器之中内置一个基于数据的 EHS 系统辨识模型，可精准刻画控制信号（PWM 占空比）与最终车轮转角间的动态映射关系，涵盖了其响应时间及死区特性，补偿器的功效是针对 MPC 计算出的理想前轮转角指令进行“预矫正”，即依据系统当下的延迟特性与死区，反向算出一个恰好能抵消这些负面效应的修正控制信号，进而让执行器的最终输出与控制器期望无缝契合。该策略还存有一个坚实的故障诊断与降级机制，依据比对期望转角与实际转角（可由加装的转角传感器反馈）的残差，实时对执行机构工作状态予以监测，一旦察觉异常，系统会马上触发容错响应，或尝试采用备份控制方案，或安全地发出警报并逐步将控制权归还驾驶员，极力避免因局部故障造成整车作业失效或产生安全事故，于最终执行环节实现了整个自适应调整策略的可靠性、精确性与安全性。

4 结语

研究活动成功架构并核验了一套齐全的播种方向自适应调整系统，多传感器融合策略大幅提升了状态感知的可靠性，将模型预测控制与自适应算法相结合，保障了系统于不同工况下的控制精度及鲁棒性，该成果不仅证明了所讲方法于提升播种质量方面的有效性，还为复杂农业环境中的智能装备研发筑牢了坚实根基，未来研究可继续探索深度学习等在环境感知与决策中的相关应用，以此达成更高层次的全自主作业。

参考文献

- [1]晏清. 多传感器融合在农业机械性能评估中的应用[J]. 南方农机, 2025, 56(9): 67-69.
- [2]马若飞, 伟利国, 赵博, 等. 基于多传感器数据融合的旋耕耕深检测系统研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 52-64.
- [3]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.
- [4]胡军, 封超, 刘昶希, 等. 基于多传感器同步采集的喷雾机喷嘴性能检测仪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 305-313.