

Optimization of navigation accuracy and field application effect of intelligent agricultural machinery

Juan Che¹ Zhipeng Cao^{2*} Zhangteng Yan¹

1. Qufu Municipal Finance Bureau, Qufu, Shandong, 273100, China

2. Qufu Municipal Bureau of Agriculture and Rural Affairs, Qufu, Shandong, 273100, China

Abstract

Against the backdrop of accelerated agricultural modernization and digital transformation, precision agriculture has emerged as a critical pathway to address the fundamental challenges of “who will farm the land and how to farm it effectively.” Intelligent agricultural machinery navigation technology serves as the core enabler of precision farming. Functioning as the “smart brain” of agricultural production, navigation systems empower agricultural machinery with autonomous driving and precision operation capabilities. These systems enable uniform row spacing control, precise fertilizer distribution, and accurate trajectory tracking throughout the entire farming cycle—from sowing and fertilization to harvesting—thereby minimizing seed and fertilizer waste while enhancing operational efficiency and crop yields. This study aims to overcome the accuracy limitations and adaptation challenges of traditional navigation systems in complex field environments. By providing technical support for large-scale, cost-effective implementation of intelligent agricultural machinery navigation technology, the research seeks to elevate China’s precision agriculture capabilities and contribute to food security and high-quality agricultural development.

Keywords

smart agricultural machinery; GNSS/INS fusion; algorithm optimization; precision agriculture

智能农业机械导航精度优化及田间应用效果分析

陈娟¹ 曹志鹏^{2*} 闫章腾¹

1. 曲阜市财政局, 中国·山东 曲阜 273100

2. 曲阜市农业农村局, 中国·山东 曲阜 273100

摘要

在农业现代化与数字化转型加速推进的背景下, 精准农业已成为破解“谁来种地、如何种好地”难题的关键路径, 而智能农业机械导航技术则是实现精准农业的核心载体。作为农业生产的“智慧大脑”, 导航系统赋予农业机械自动驾驶、精准作业能力, 可在播种、施肥、收割等全流程作业中实现行距均匀控制、用量精准分配、轨迹精准跟踪, 最大限度减少种子、肥料浪费, 提升作业效率与作物产量。研究旨在解决传统导航系统在复杂田间环境中的精度瓶颈与适配难题, 为智能农业机械导航技术的规模化、低成本应用提供技术支撑, 推动我国精准农业技术水平提升, 为保障粮食安全、促进农业高质量发展提供有力保障。

关键词

智能农业机械; GNSS/INS融合; 算法优化; 精准农业

1 引言

随着全球农业现代化进程加速, 精准农业已成为解决粮食安全、资源浪费与环境压力问题的关键路径。智能农业机械作为精准农业的核心执行载体, 其导航系统的精度与稳定性直接影响播种、施肥、收割等田间作业的精准度, 决定

农业生产的资源利用效率与经济效益。在我国农业规模化、集约化发展趋势下, 传统依赖人工驾驶的作业模式存在劳动强度大、作业精度低、资源消耗高等弊端, 已难以适应现代农业生产需求。因此, 开展智能农业机械导航精度优化研究, 提升复杂田间环境下的导航可靠性, 具有重要的现实意义。

2 智能农业机械导航系统构成与精度影响因素

2.1 导航系统核心构成

智能农业机械导航系统主要由定位模块、姿态感知模块、控制模块与执行模块四部分组成。定位模块以 GNSS 接收机为核心, 接收 GPS、北斗等卫星信号实现位置定位,

【作者简介】陈娟（1979—），女，中国山东曲阜人，本科，工程师，从事机械工程相关的研究。

【通讯作者】曹志鹏（1980—），男，中国山东曲阜人，本科，农艺师，从事农业机械化相关的研究。

部分高精度系统集成 RTK（实时动态差分）技术提升定位精度；姿态感知模块采用惯性测量单元（IMU），获取机械的姿态角（滚转角、俯仰角、航向角）与运动加速度，辅助定位模块实现连续导航；控制模块基于定位与姿态数据，通过控制算法生成转向、速度控制指令；执行模块包括电动转向系统、自动变速装置等，响应控制指令实现农业机械的自动驾驶作业。

此外，部分先进导航系统还集成机器视觉模块与激光雷达模块。机器视觉模块通过摄像头采集田间图像，识别作物行、田埂等特征信息，辅助修正导航偏差；激光雷达模块用于障碍物检测与距离测量，提升作业安全性。各模块协同工作，确保农业机械在田间作业中精准定位、平稳行驶与高效作业。

2.2 导航精度核心影响因素

2.2.1 卫星导航信号干扰

田间环境中，树木、作物、建筑物等遮挡物会导致 GNSS 信号衰减或中断，引发定位误差；多路径效应（信号经地面、作物表面反射后被接收机接收）会导致定位结果偏离真实位置，在作物生长旺盛期，多路径误差可达到 5-10cm，严重影响导航精度。某玉米田作业实验中，玉米株高超过 1.5m 时，GNSS 单点定位误差从无遮挡时的 $\pm 3\text{cm}$ 增至 $\pm 8\text{cm}$ 。

2.2.2 惯性导航系统漂移

惯性测量单元（IMU）在长时间工作中易产生累积误差，包括零偏漂移、刻度系数误差等，导致姿态角与位置估算偏差增大。在 GNSS 信号中断时，仅依赖惯性导航系统的情况下，10 分钟内的定位误差可超过 1m，无法满足连续作业需求。

2.2.3 多源数据同步误差

GNSS 与惯性导航等多源传感器的采样频率、时间戳存在差异，数据同步不准确会导致融合结果偏差。例如，GNSS 采样频率为 10Hz，IMU 采样频率为 100Hz，若时间同步误差超过 10ms，会导致位置与姿态数据匹配错误，引入额外导航误差。

2.2.4 机械执行机构延迟

控制指令从生成到执行机构响应存在时间延迟，包括电动转向系统的转向延迟、液压系统的响应延迟等。在高速作业场景下，执行延迟会导致机械转向不及时，引发导航轨迹偏离，例如作业速度为 8km/h 时，100ms 的转向延迟会导致轨迹偏差超过 20cm。

2.2.5 田间环境动态变化

田间土壤湿度、地形坡度等环境因素会影响农业机械的行驶稳定性，进而影响导航精度。在泥泞地块，机械易发生打滑、侧移，导致实际行驶轨迹与规划轨迹偏差增大；丘陵山地的坡度变化会影响 IMU 的姿态测量精度，引入导航误差^[1]。

3 智能农业机械导航精度优化核心技术

针对上述影响因素，从多源数据融合、算法优化、抗干扰设计与田间标定四个维度，构建导航精度优化技术体系，提升复杂田间环境下的导航可靠性与精度。

3.1 多源导航数据融合优化

采用 GNSS+INS+ 机器视觉多源数据融合技术，弥补单一导航方式的不足，实现优势互补。通过设计基于联邦卡尔曼滤波（FKF）的融合算法，将 GNSS 提供的高精度绝对位置信息、IMU 提供的高频姿态与运动信息，以及机器视觉识别的相对位置信息进行融合处理。

在数据预处理阶段，采用时间戳对齐与坐标系统一方法，消除多源数据的同步误差与坐标偏差；在滤波融合阶段，联邦卡尔曼滤波算法将系统分为 GNSS 子系统、INS 子系统与机器视觉子系统，各子系统独立滤波后，通过主滤波器进行信息融合，输出最优位置与姿态估计结果。实验表明，该融合算法相比传统卡尔曼滤波，定位误差降低 40%，在 GNSS 信号中断 120 秒内，定位误差可控制在 $\pm 5\text{cm}$ 以内，显著提升导航连续性与稳定性。

3.2 导航算法优化设计

3.2.1 自适应抗干扰滤波算法

针对田间 GNSS 信号遮挡与多路径干扰问题，设计自适应卡尔曼滤波算法，实时监测 GNSS 信号质量（通过载波噪声比、定位精度因子等指标评估）。当信号质量良好时，增大 GNSS 数据权重；当信号受干扰时，自动降低 GNSS 数据权重，提升惯性导航与机器视觉数据权重，避免干扰信号引入较大误差。某小麦田作业实验中，采用该算法后，多路径干扰导致的定位误差从 $\pm 7\text{cm}$ 降至 $\pm 2\text{cm}$ 。

3.2.2 惯性导航误差补偿算法

针对 IMU 累积误差问题，引入基于扩展卡尔曼滤波（EKF）的误差补偿模型，通过 GNSS 信号对 IMU 的零偏、刻度系数等误差进行实时估计与补偿。同时，结合田间作业轨迹特征，设计分段误差校准策略，每隔 500m 利用 GNSS 定位结果对惯性导航累积误差进行清零校准，有效抑制误差累积。经测试，该补偿算法可使 IMU 的姿态角测量误差降低 50%，长时间作业的定位精度稳定性显著提升。

3.2.3 模型预测控制算法

针对机械执行机构延迟问题，采用模型预测控制（MPC）算法优化控制指令生成逻辑。通过建立农业机械的动力学模型与执行机构延迟模型，预测未来一段时间内的机械运动状态，提前生成控制指令，补偿执行延迟。实验表明，该算法可将执行延迟导致的轨迹偏差从 $\pm 20\text{cm}$ 降至 $\pm 3\text{cm}$ ，显著提升高速作业场景下的导航精度。

3.3 抗干扰硬件与结构设计

3.3.1 多频多模 GNSS 接收机配置

选用支持 GPS、北斗、GLONASS 多系统多频点的 GNSS 接收机，提升卫星信号接收数量与抗遮挡能力。通过

多频点信号融合,减少电离层、对流层延迟对定位精度的影响,在作物遮挡区域的信号捕获能力提升30%。

3.3.2 天线优化布局

将GNSS天线安装于农业机械顶部最高位置,减少作物与机械自身结构的遮挡;采用扼流圈天线设计,抑制多路径信号接收,多路径误差可降低40%-60%。

3.3.3 惯性测量单元减震安装

将IMU安装于机械底盘振动最小的位置,配备专用减震支架,减少机械作业时的振动对IMU测量精度的影响。实验测试表明,减震处理后,IMU的加速度测量误差降低35%,姿态角测量精度显著提升。

3.4 田间动态标定技术

构建“预标定+动态校准”的双重标定体系,提升导航系统与田间作业环境的适配性。预标定阶段,在作业前通过RTK基站建立田间局部高精度坐标系统,对GNSS接收机、IMU等传感器进行静态标定,获取初始误差参数;动态校准阶段,在作业过程中,利用机器视觉识别田间固定地标(如预设的标杆、田埂拐角等),实时修正导航系统的累积误差。

针对不同作物类型与作业场景,设计差异化标定方案:在播种作业中,利用播种行距的均匀性反向校准导航轨迹偏差;在收割作业中,通过作物边缘轮廓识别修正导航位置。某玉米田施肥作业实验中,采用动态标定技术后,导航轨迹偏差从 $\pm 4\text{cm}$ 降至 $\pm 1.5\text{cm}$,施肥均匀性提升显著^[2]。

4 智能农业机械导航精度优化田间应用效果分析

4.1 实验设计与测试指标

实验搭载优化前后的导航系统,分别在平原小麦田、丘陵玉米田、水稻田三种场景开展作业实验。测试指标包括:定位误差采用RTK基站提供的真实位置作为参考,计算导航系统定位结果与真实位置的偏差、轨迹偏差、作业重叠率、作业效率、资源消耗。每种场景下,优化前后各开展3组实验,每组实验作业面积为10亩,取平均值作为最终测试结果。

4.2 小麦播种作业应用效果

小麦播种作业对行距均匀性与播种深度一致性要求较高,导航精度直接影响出苗率与后期田间管理效率。优化前,导航系统采用单一GNSS定位,定位误差为 $\pm 5.2\text{cm}$,轨迹偏差为 $\pm 6.8\text{cm}$,作业重叠率达12.5%,导致部分区域播种过密,种子浪费率为8.3%;作业效率为15.2亩/小时,因轨迹偏差需频繁人工修正,影响作业连续性。

采用优化后的导航系统后,定位误差降至 $\pm 1.8\text{cm}$,轨迹偏差控制在 $\pm 2.3\text{cm}$,作业重叠率降低至4.2%,种子浪费率降至2.1%,显著减少资源消耗;作业效率提升至17.6亩/小时,提升幅度达15.8%。同时,播种行距均匀性提升,后期小麦出苗整齐,为后续施肥、灌溉等作业提供便利,经

测算,优化后的导航系统可使小麦每亩增产约5%^[3]。

4.3 玉米施肥作业应用效果

玉米施肥作业需精准控制施肥量与施肥位置,避免肥料浪费与环境污染。实验所在的丘陵玉米田地地形起伏较大,且玉米生长中期株高较高,对导航系统的抗遮挡能力与姿态测量精度要求较高。优化前,导航系统受作物遮挡与地形影响,定位误差为 $\pm 7.5\text{cm}$,轨迹偏差为 $\pm 8.2\text{cm}$,施肥重叠率达15.3%,肥料浪费率为12.6%;因地形起伏导致的姿态测量误差较大,部分区域施肥深度偏差超过3cm,影响肥料吸收效果。

优化后,采用多源数据融合与自适应抗干扰算法,定位误差降至 $\pm 2.2\text{cm}$,轨迹偏差为 $\pm 2.5\text{cm}$,施肥重叠率降至6.1%,肥料浪费率降至2.4%;通过惯性导航误差补偿与动态标定技术,姿态角测量精度提升,施肥深度偏差控制在 $\pm 1\text{cm}$ 以内,肥料利用率显著提升。作业效率从优化前的14.3亩/小时提升至16.8亩/小时,提升幅度为17.5%,且减少了人工干预频次,降低了操作人员劳动强度。

4.4 水稻收割作业应用效果

水稻收割作业需精准控制收割轨迹,避免漏割与过度碾压作物。水稻田土壤湿度大,易导致机械打滑,且作物冠层密集,对GNSS信号有一定遮挡。优化前,导航系统定位误差为 $\pm 6.8\text{cm}$,轨迹偏差为 $\pm 7.5\text{cm}$,漏割率达3.2%,作物碾压损失率为2.8%;因土壤打滑导致实际轨迹偏离规划轨迹,需人工频繁调整,作业效率为12.5亩/小时。

优化后,采用多频多模GNSS接收机与模型预测控制算法,定位误差降至 $\pm 2.5\text{cm}$,轨迹偏差控制在 $\pm 3.0\text{cm}$,漏割率降至0.8%,作物碾压损失率降至0.9%;通过机械动力学模型优化与执行延迟补偿,有效抑制土壤打滑导致的轨迹偏差,作业效率提升至14.6亩/小时,提升幅度为16.8%。同时,收割轨迹的精准性提升,减少了后续田间清理工作量,降低了作业成本。

4.5 应用效果综合分析

综合三种典型作业场景的实验结果,导航精度优化技术的应用效果显著:定位误差平均从 $\pm 6.5\text{cm}$ 降至 $\pm 2.2\text{cm}$,轨迹偏差平均从 $\pm 7.5\text{cm}$ 降至 $\pm 2.6\text{cm}$,作业重叠率平均降低70%以上,资源浪费率(种子、肥料等)平均从11.2%降至2.2%;作业效率平均提升16.7%,显著提升农业生产效率。此外,优化后的导航系统在复杂田间环境下的稳定性与可靠性显著提升,适应不同作业场景的能力增强,为规模化、精准化农业生产提供了有力支撑^[4]。

5 结语

智能农业机械导航精度受卫星信号干扰、惯性导航漂移、多源数据同步误差等多种因素影响,在复杂田间环境下误差显著增大,通过多源数据融合、导航算法优化、抗干扰硬件设计与田间动态标定等核心技术,可构建科学有效的导

航精度优化体系，显著提升导航系统的定位精度与稳定性。构建的“作业前准备 - 作业中控制 - 作业后评估”标准化应用流程，为导航精度优化技术的规模化应用提供了规范路径，有效解决了传统应用中存在的参数设置不合理、误差补偿不及时等问题，提升了技术应用的规范性与可靠性。

参考文献

- [1] 胡小波,徐阳. 大数据驱动的智能农业机械决策支持系统研究[J].南方农机,2025,56(17):64-66.
- [2] 杨鹏. 智能农业机械大势下农业机械从业人员技能提升路径分析[J].河北农机,2025,(17):73-75.
- [3] 张正君. 农业机械设计与机械制造技术研究[J].农机使用与维修,2025,(09):99-102.
- [4] 马启明. 智能农业机械在精准农业中的应用与挑战研究[J].农机市场,2025,(08):81-83.