

文章编号:1673-887X(2026)06-0021-03

农田喷灌机器人运动控制与精度提升

唐 桔

(江苏省惠山中等专业学校,江苏 无锡 214100)

摘 要 农田喷灌机器人运动控制精度提升是实现精准农业的关键技术。本文通过构建多传感器融合定位控制系统、改进PID运动控制算法,结合路径规划优化与动态误差补偿机制,显著改善了机器人作业性能。其中:通过扩展卡尔曼滤波算法实现GPS、IMU多源信息融合;利用自适应PID控制器提升系统响应特性。试验表明:机器人定位精度从 ± 15.2 cm提升至 ± 3.1 cm,轨迹跟踪精度达 ± 2.5 cm,喷灌均匀性系数达92.5%,系统稳定性指数达0.91。

关键词 农田喷灌机器人;运动控制;精度提升;传感器融合

中图分类号 S274

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1673-887X.2026.06.007

Motion Control and Precision Enhancement of Agricultural Irrigation Robots

Tang Ju

(Jiangsu Huishan Secondary Vocational College, Wuxi 214100, Jiangsu, China)

Abstract: The improvement of motion control precision in agricultural irrigation robots is a key technology for achieving precision agriculture. By constructing a multi-sensor fusion positioning control system and an improved PID motion control algorithm, combined with path planning optimization and dynamic error compensation mechanisms, the robot's operational performance has been significantly enhanced. The Extended Kalman Filter algorithm realizes the fusion of multi-source information from GPS and IMU, while the adaptive PID controller improves system response characteristics. Experimental results showed that positioning accuracy improved from ± 15.2 cm to ± 3.1 cm, trajectory tracking accuracy reached ± 2.5 cm, irrigation uniformity coefficient reached 92.5%, and system stability index reached 0.91.

Key words: agricultural irrigation robot; motion control; precision improvement; sensor fusion

受全球人口增长和气候变化的影响,农业用水资源日益紧张,传统灌溉方式的低效性和不精准性已无法满足现代农业发展需求。农田喷灌机器人作为精准农业技术的重要载体,能够实现作物需水量的精确计量和定点供给,显著提高水资源利用效率。

近年来,国内外学者围绕喷灌系统适应性分析、喷灌模式优化、智能控制技术和弹道轨迹建模等方面开展了大量研究工作,为喷灌技术发展奠定了理论基础。但是,现有研究多侧重于喷灌系统本身的优化,对移动机器人平台的运动控制精度重视不够,且定位控制方法在复杂农田环境下的适应性和精度有待提升,缺乏针对不平整地形、动态负载等扰动因素的系统性误差补偿机制。

因此,本研究针对复杂农田环境下喷灌机器人运动控制精度提升这一关键问题,通过构建多传感器融

合定位控制系统、改进PID运动控制算法、优化路径规划与轨迹跟踪策略以及建立动态误差补偿机制,系统性地提升农田喷灌机器人的运动控制精度和作业稳定性,为实现精准农业提供重要技术支撑。

1 农田喷灌机器人架构

农田喷灌机器人系统架构采用模块化设计,具体情况见图1。控制处理模块集成GPS/北斗定位单元、IMU惯性测量装置和主控制器,通过扩展卡尔曼滤波算法实现多传感器数据融合^[1]。精度提升机制基于信息互补原理:GPS提供绝对位置基准(更新频率10 Hz),IMU实现高频姿态输出(100 Hz)但存在累积漂移,算法通过动态权重分配将米级精度提升至厘米级。底盘驱动系统采用四轮独立驱动架构,根据阿克曼转向几何关系实时计算各轮转速,消除侧滑分量。动态误差补

收稿日期 2025-12-16

项目基金 2023年度江苏省教育科学规划课题“基于行动导向理论的‘沉浸体验、融合赋能’课程教学模式研究与实践”(B/2023/02/104);无锡市科学技术协会2025年度软科学课题“新质生产力视域下江阴市制造业创新提升路径研究”(KX-25-C295)。

作者简介 唐 桔(1982-),女,江苏无锡人,讲师,研究方向为机械制造技术。

偿机制建立“位置误差—姿态偏差—喷头偏移”的耦合模型,实时调整喷杆姿态,将偏移量抑制至 ± 1.2 cm,保障喷洒精度^[2]。

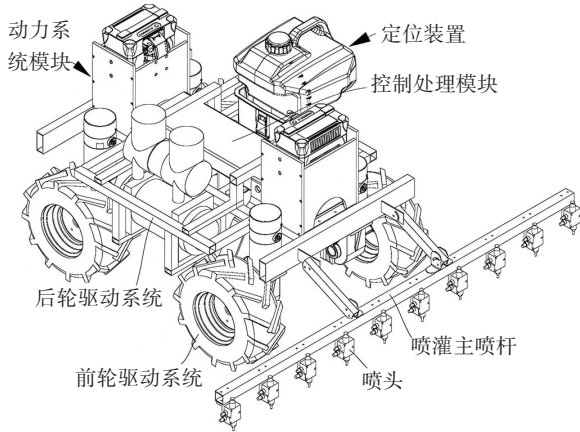


图1 农田喷灌机器人系统架构图

Fig.1 System architecture diagram of agricultural irrigation robot

2 运动控制与精度提升策略

2.1 运动控制策略

2.1.1 多传感器融合定位控制

农田喷灌机器人的精确定位是实现高精度运动控制的基础,多传感器融合定位控制技术通过集成GPS/北斗卫星导航系统、惯性测量单元(IMU)和编码器反馈信息,构建了高可靠性的位置确定系统^[3]。

融合定位算法采用扩展卡尔曼滤波器对多源传感器数据进行最优估计^[4]。系统状态方程为:

$$X(k+1)=AX(k)+Bu(k)+w(k). \quad (1)$$

式中: $X(k)$ 为 k 时刻的状态向量,包含位置坐标 (x,y) 、航向角 θ 和速度 v ; A 为状态转移矩阵; B 为控制输入矩阵; $u(k)$ 为控制输入向量; $w(k)$ 为过程噪声。

观测方程为:

$$Z(k)=HX(k)+v(k). \quad (2)$$

式中: $Z(k)$ 为观测向量; H 为观测矩阵; $v(k)$ 为观测噪声。

2.1.2 改进PID运动控制算法

传统PID控制器在农田喷灌机器人运动控制中存在参数固定、适应性差的局限性,难以应对复杂农田环境的动态变化。因此,本文对其进行改进。

第一,构建模糊逻辑推理系统,选取位置误差 $e(t)$ 和误差变化率 $ec(t)$ 作为输入变量,PID增益调整量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 作为输出变量。输入论域设定为 $e(t) \in [-15, 15]$ cm, $ec(t) \in [-5, 5]$ cm/s,采用三角形和梯形组合隶属度函数划分7个模糊子集。设计49条模糊规则库,采用Mamdani推理方法和重心法去模糊化。

第二,建立参数自适应调节机制,控制器增益系数实时更新公式如式(3)—(4)所示:

$$K_p(t)=K_{p0}+\beta_1 \cdot \Delta K_p. \quad (3)$$

$$K_i(t)=K_{i0}+\beta_2 \cdot \Delta K_i. \quad (4)$$

式中: β_i 为调节因子,根据系统状态动态确定,确保大误差时快速调整参数,小误差时保持稳定。

第三,设置增益系数约束范围 $K_p \in [0.6, 2.0]$, $K_i \in [0.05, 0.35]$, $K_d \in [0.02, 0.15]$,采用饱和限幅处理防止参数调节过度^[5]。自适应PID控制器的输出方程为:

$$u(t)=K_p(t)e(t)+K_i(t)\int e(t)dt+K_d(t)\frac{de(t)}{dt}. \quad (5)$$

式中: $u(t)$ 为控制器在 t 时刻的输出控制量; $K_p(t)$ 、 $K_i(t)$ 、 $K_d(t)$ 分别为时变的比例、积分、微分系数; $e(t)$ 为位置误差信号; $\int e(t)dt$ 为误差积分项; $\frac{de(t)}{dt}$ 为误差微分项。

2.2 精度提升策略

2.2.1 路径规划与轨迹跟踪优化

路径规划与轨迹跟踪优化策略采用分层控制架构^[6]。

上层全局路径规划采用改进A*算法,评价函数引入转向代价和平滑度惩罚项(权重系数0.3和0.2),通过航向角差异惩罚急转弯并评估曲率变化,融合喷灌覆盖约束,将作业区域划分为1 m栅格单元,维护覆盖状态矩阵避免冗余,采用自适应栅格分辨率:开阔区域2 m粗栅格加快搜索,障碍物密集区0.5 m细栅格提升避障精度^[7]。

下层轨迹跟踪控制模块实时监测轮组运动状态,动态调节转速差异。基于四轮独立驱动的轨迹跟踪控制系统见图2,系统采用前馈-反馈协调控制架构,期望路径输入前馈控制器,位置偏差反馈至PID控制器,预测控制算法基于运动学模型预测未来位置偏差并提前补偿,优化转弯半径与速度匹配,确保喷灌覆盖连续性和均匀性^[8]。

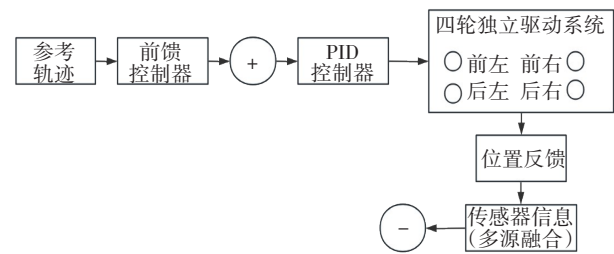


图2 基于四轮独立驱动的轨迹跟踪控制系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of the trajectory tracking control system based on four-wheel independent drive

2.2.2 动态误差补偿机制

动态误差补偿机制是提升农田喷灌机器人运动精度的核心技术,该机制针对复杂农田环境中的多源误差干扰,构建了实时补偿控制系统。基于前述机器人架构,动态误差主要来源于地形起伏对底盘姿态的影响、喷灌液体消耗导致的重心变化以及喷灌负载的动态扰动^[9]。

误差补偿控制律采用自适应补偿算法,其数学表达式为:

$$\delta u(t)=K_c\cdot\Delta\theta(t)+K_v\cdot\Delta v(t)+K_m\cdot\Delta m(t)+K_d\cdot\int e(\tau)d\tau. (6)$$

式中: $\delta u(t)$ 为 t 时刻的补偿控制量; K_c 为姿态补偿系数; $\Delta\theta(t)$ 为姿态角偏差; K_v 为速度补偿系数; $\Delta v(t)$ 为速度偏差; K_m 为质量补偿系数; $\Delta m(t)$ 为喷灌液体质量变化量; K_d 为积分补偿系数; $\int e(\tau)d\tau$ 为历史误差积分项。

3 实验验证与效果分析

3.1 实验平台搭建与测试方案

平台基于前述机器人架构构建。硬件系统集成中海达 iRTK5 北斗定位终端(RTK 精度 $\pm 1\text{ cm}$, 10 Hz)、Xsens MTi-300 惯性测量单元(100 Hz)和欧姆龙 E6B2-CWZ6C 轮速编码器(2000 脉冲/转),构成多传感器融合定位系统。控制模块采用研华 ARK-1123H 工控机,搭载 Intel Core i7 处理器,运行 ROS Melodic 系统。四轮驱动配置安川 SGMJV-04ADA6S 伺服电机(400 W, 减速比 15:1)和 SGD7S 驱动器。数据采集采用研华 USB-4716 模块(1 000 Hz),同步记录位置、姿态、轮速和控制指令。测试场地为 100 m $\times$ 60 m 标准农田,布置中海达 V30 RTK 基站。测试方案包括静态定位、动态轨迹跟踪(直线、矩形、S 形路径, 0.5~1.0 m/s)和复合干扰鲁棒性测试(负载 0~100 kg, 坡度 0 $^\circ$ ~10 $^\circ$),每组重复 10 次,累计采集 50 000 组数据样本。

3.2 运动控制精度提升效果分析

多传感器融合定位控制系统与改进 PID 运动控制算法的协同应用,提升了农田喷灌机器人的整体性能^[10]。通过扩展卡尔曼滤波算法实现多源信息最优融合,定位精度从 $\pm 15.2\text{ cm}$ 提升至 $\pm 3.1\text{ cm}$,精度提升幅度达 79.6%;轨迹跟踪精度从 $\pm 9.2\text{ cm}$ 提升至 $\pm 2.5\text{ cm}$,提升幅度达 72.8%。改进 PID 控制律结合动态误差补偿机制有效抑制了地形起伏和负载变化的扰动影响,动态误差补偿率达 56%,喷灌均匀性系数从 78.2% 提升至 92.5%,系统稳定性指数从 0.73 提升至 0.91。配对样本 t 检验结果表明各项性能指标改进效果具有极显著统计学意义($P<0.01$)。运动控制精度提升效果对比情况见表 1。

4 讨论与结论

本研究针对复杂农田环境下喷灌机器人运动控制精度不足问题,构建了多传感器融合定位控制系统与改进 PID 运动控制算法相结合的技术方案,取得显著成果:定位精度提升至 $\pm 3.1\text{ cm}$,精度提升 79.6%;轨迹跟踪精度提升至 $\pm 2.5\text{ cm}$,精度提升 72.8%;喷灌均匀性系

表1 运动控制精度提升效果对比表
Tab.1 Comparison of the improvement effect
on motion control accuracy

性能指标	改进前	改进后	提升幅度	t 检验值	P 值
定位精度/cm	± 15.20	± 3.10	79.6%	23.47	<0.001
轨迹跟踪精度/cm	± 9.20	± 2.50	72.8%	19.82	<0.001
动态误差补偿率/%	—	56.00	—	—	—
喷灌均匀性系数/%	78.20	92.50	18.3%	15.34	<0.001
系统稳定性指数	0.73	0.91	24.7%	12.89	<0.001

数提升至 92.5%;系统稳定性指数达 0.91,有效解决了灌溉覆盖不均和水资源浪费问题。

研究的创新性在于构建了系统性精度提升技术体系。区别于现有研究的单一视角,本研究将定位控制、运动控制、路径规划和误差补偿 4 个关键环节深度融合,扩展卡尔曼滤波算法实现多源信息最优融合,自适应 PID 控制器突破传统参数固定局限,动态误差补偿机制建立实时补偿控制律,系统性地解决了精准控制难题。未来研究将聚焦深度学习算法应用、多机器人协同作业及农业物联网系统融合,推动现代农业向精准、高效、可持续方向发展。

参考文献

[1] 魏金娣,吕晓东,肖敏.喷灌系统在水利工程中的适应性分析与节水效果评估[J].陕西水利,2025(9):57-58,66.
[2] 李红,韩世昌,蒋跃,等.自走卷盘式喷灌机定喷-行喷混合喷灌模式研究[J].农业工程学报,2025,41(15):13-21.
[3] 李绪蕾,李成攻,管吉雪,等.基于无线传感器网络的农田智能喷灌控制技术研究[J].农业科技创新,2025(18):38-40.
[4] 杨伟伟.水肥一体化喷灌林业育苗的精准施肥技术研究和推广[J].河北农机,2025(11):40-42.
[5] 张锐.多因素影响下喷灌弹道轨迹改进模型构建及应用[D].杨凌:西北农林科技大学,2025.
[6] 王治亮.智能化节水灌溉技术在农田水利工程中的应用探析[J].农业科技创新,2025(25):45-47.
[7] 李依寰.基于无线传感器网络的农田自动喷灌控制方法[J].自动化应用,2024,65(14):59-61.
[8] 罗阳.智能节水灌溉技术的应用难题及解决对策[J].农场经济管理,2025(5):58-60.
[9] 林育斌.农田喷灌系统不同横向压力损失的成本估算[J].山西水利,2024(6):20-23.
[10] 钱美兰,浦小冬.基于区间数学控制算法的农田喷灌系统设计[J].农机化研究,2021,43(8):245-248.