

基于数字孪生的植保无人机全流程自主作业系统构建

王启然 马广宇 王立国 赖东博

黑龙江农业职业技术学院

DOI:10.12238/as.v8i10.3352

[摘要] 当前,植保无人机存在作业路径规划粗糙、环境感知精度不足、决策响应滞后等问题,导致作业效率与喷洒精度难以兼顾。为此,本文从感知层、数字孪生层、应用层三个方面提出一种基于数字孪生技术的植保无人机全流程自主作业系统构建方法。结果表明,该系统在作业精度、响应延迟与覆盖率方面均较传统系统显著提升,具有推广价值。

[关键词] 数字孪生; 感知层; 路径规划

中图分类号: S126 **文献标识码:** A

Construction of a full-process autonomous operation system for agricultural drones based on digital twins

Qiran Wang Guangyu Ma Ligu Wang Dongbo Lai

Heilongjiang Vocational College of Agriculture

[Abstract] Currently, agricultural drones for plant protection have problems such as rough operation path planning, insufficient environmental perception accuracy, and lagging decision-making response, which makes it difficult to balance operation efficiency and spraying accuracy. To this end, this paper proposes a construction method of a full-process autonomous operation system for agricultural drones based on digital twin technology from three aspects: the perception layer, the digital twin layer, and the application layer. The results show that this system has significantly improved in terms of operation accuracy, response delay and coverage compared with the traditional system, and has promotion value.

[Key words] Digital twin; Perception layer; Path planning

引言

随着无人机技术在农业领域的逐步应用,植保作业模式得到一定优化,但当前无人机植保系统仍存在诸多局限。多数系统仅能实现简单的路径规划与作业执行,缺乏对作业环境、作物生长状态的实时感知与动态调整能力,导致作业精度受地形、作物长势等因素影响较大,无法实现全流程的智能化与自主管控。数字孪生技术作为一种融合多物理量、多尺度、多概率的仿真技术,能够构建与物理实体高度一致的虚拟模型,实现对物理对象的实时映射、动态监测与优化控制^[1]。将数字孪生技术引入植保无人机作业系统,可打破传统作业模式的信息壁垒,通过构建包含农田环境、无人机设备、作物生长等多维度信息的数字孪生体,实现从作业规划、实时监控、故障预警到作业效果评估的全流程自主化管理。基于上述背景,本研究旨在构建基于数字孪生的植保无人机全流程自主作业系统,以提升植保作业的精准度与效率。

1 系统架构设计

基于数字孪生的植保无人机全流程自主作业系统如图1所示。

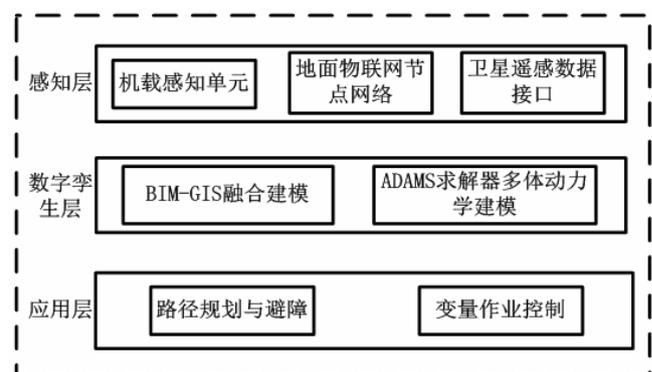


图1 系统架构设计

下文将详细表述每个模块的具体实现方案。

2 软件设计

2.1 感知层

感知层是数字孪生植保无人机全流程自主作业系统的底层支撑模块,其核心任务是实现对作业环境、作物生长状态以及无

人机运行参数的多维度高精度感知与数据采集。该层主要由机载多源传感系统、地面物联网节点网络以及卫星遥感数据接口三部分构成。其中,机载感知单元包括Velodyne HDL-32E三维激光雷达(用于构建农田地形点云模型)、SONY IMX571 RGB相机(用于高分辨率作物纹理识别)、FLIR Vue Pro R热红外相机(用于监测植被水分状况),以及MSP432传感控制模块。地面节点通过部署在农田边界的LoRaWAN传感站(频段为470MHz,通信距离>10km)实时采集气象因子,包括风速、湿度、温度、光照强度,并通过MQTT协议上传至云端孪生数据中台。数据融合采用基于扩展卡尔曼滤波与时序注意力网络(Temporal Attention Network, TAN)相结合的多源信息融合算法。EKF通过对非线性系统的状态和观测模型进行线性化处理,将系统状态预测与观测更新相结合,实现对姿态、速度、位置等状态的高精度实时估计与动态跟踪^[2]。TAN模型进一步在时间维度上提取特征相关性,实现作业状态与环境参数的动态自适应匹配。卫星遥感模块通过Sentinel-2 MSI数据补充NDVI、SAVI等宏观植被指数信息,用以修正局部传感误差。最终,所有数据通过NVIDIA Jetson AGX Xavier边缘计算节点完成初步特征提取与冗余剔除,上传至孪生云平台构建实时虚拟农田模型。

2.2 数字孪生层

数字孪生层作为系统核心的数据与模型融合枢纽,采用虚实双向映射+实时动态仿真的体系结构,以实现农田环境、作物生长状态及无人机作业行为的多维同步映射与仿真推演。该层首先基于感知层采集的多源异构数据,通过BIM-GIS融合建模技术实现空间信息与语义信息的一体化表达。在农田建模环节中,采用PointNet++点云语义分割算法对原始点云进行特征嵌入与局部上下文聚合,其损失函数定义为式(1):

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 + \lambda \sum_j \|f_j - f_{j-1}\|^2 \quad (1)$$

其中, L 表示总损失函数值, N 表示参与训练的样本总数, y_i 表示第*i*个点云样本的真实类别标签, \hat{y}_i 表示模型预测的第*i*个样本的输出值, λ 为特征平滑正则化系数, f_j 表示网络中第*j*层提取到的特征向量, f_{j-1} 表示上一层的特征向量,用于构建层间连续性约束。该损失函数通过结合点级监督误差项与特征连续正则项,实现对模型预测精度与空间特征平滑性的双重约束,保证农田数字孪生模型在高维语义空间中的准确性与一致性。在作物孪生模型中嵌入式(2)的积温计算公式,以量化作物生长所需热量累积:

$$T_a = \sum_{v=1}^n (T_{avg} - T_0) \quad (2)$$

其中, T_a 为某生育期有效积温, n 为该生育期天数, T_{avg} 为第天的日平均气温, T_0 为作物生长下限温度。针对无人机实

体孪生体,采用基于ADAMS求解器的多体动力学建模方法,结合无人机电机转速、推力曲线及电池状态参数,实现动力学与能耗特性耦合建模,并通过其分析模块对机臂、螺旋桨等关键结构件进行应力分布与形变分析,实时更新无人机在不同飞行姿态下的受力状态。数据交互层采用基于MQTT协议的发布-订阅(Pub/Sub)通信机制,并引入时间戳对齐算法实现感知层数据向孪生模型的实时输入,同时通过将孪生模型的仿真结果反向映射至物理无人机,实现物理作业过程与虚拟孪生场景的毫秒级同步与闭环交互。

2.3 应用层

2.3.1 路径规划与避障

在基于数字孪生的植保无人机全流程自主作业系统中,路径规划与避障模块是实现高精度作业与安全航行的核心功能。该模块通过融合A*启发式搜索算法、动态窗口法(Dynamic Window Approach, DWA)完成全局路径规划与局部动态避障。首先,系统基于数字孪生虚拟环境中建立的高精度三维地形模型,利用激光雷达与多光谱相机采集的地形与植被分布数据生成栅格地图;通过A算法计算出全局最优路径,以保证搜索的方向性与高效性。在执行过程中,考虑无人机飞行的动态约束与实时障碍物检测信息,DWA算法根据无人机当前线速度与角速度的可行空间,通过式(3)评价函数实时选取最优控制指令,实现局部避障。

$$G(v, w) = \alpha \times h_e + \beta \times d_i + \gamma \times v_e \quad (3)$$

其中, $G(v, w)$ 表示无人机在当前速度空间下某一组速度与角速度组合的综合评价函数值, v 表示无人机的线速度, w 表示无人机的角速度, h_e 表示无人机当前朝向与目标点连线方向的一致性指标, d_i 表示无人机与最近障碍物的距离, v_e 代表无人机的运动速度贡献项, α 、 β 、 γ 分别为权重系数,用于平衡路径目标方向性、安全性和速度效率三者的影响。

$G(v, w)$ 的输出值越大,代表对应的速度组合在路径跟踪、避障安全与能效平衡方面越优,系统将选取该组合作为当前控制指令输入,实现无人机在动态环境中的实时最优运动控制。

2.3.2 变量作业控制

无人机实时采集作物叶片NDVI、RVI及其他植被指数,并将数据传输至数字孪生平台;同时,土壤水分、氮磷钾含量等环境参数由分布式传感网络采集并同步至孪生模型。数字孪生体通过BP神经网络与多层感知算法构建作物需肥量与需药量预测模型,实现对不同生长阶段作物营养状态的精准估算。基于预测结

果,系统自动生成变量作业指令,包含喷头流量、飞行速度、喷洒路径及喷洒高度等控制参数,并通过飞控系统的PID闭环调节,实现喷洒动作与飞行轨迹的高精度匹配。同时,孪生平台内嵌的作业仿真模块可实时模拟不同喷洒参数组合下农药/肥料覆盖均匀度与作物吸收效率,通过PSO粒子群优化算法迭代调整喷头高度、雾化压力及飞行速度,当仿真均匀度低于设定阈值时,自动生成优化方案反馈至无人机,确保物理作业与虚拟优化一致。

3 测试实验

测试场景选取江苏盐城100亩稻麦田,该地块呈不规则多边形,含20处电线杆障碍、2处坡度15°斜坡;设置对比组为传统无人机自主作业系统(基于预编程航线,无孪生反馈),实验组为本文系统。两组均执行小麦蚜虫防治作业,作业参数统一设定:飞行高度2.5m、速度4m/s、喷洒压力0.3MPa、亩用药量300ml。实验结果如表1所示。

表1 实验结果

指标	数字孪生自主作业系统	传统无人机自主作业系统
喷洒均匀性(%)	95.37	81.65
作物覆盖率(%)	98.61	72.45
药液使用量(L/亩)	8.82	12.01
航线偏差(m)	0.12	1.35
高低地形适应性	自动调整高度与喷洒流量	人工干预
作业效率(亩/min)	20.25	46.75
障碍物躲避成功率(%)	100	75

如表1所示,基于数字孪生的植保无人机全流程自主作业系统在各项核心指标上均表现出显著优势。喷洒均匀性较传统系统提升13.72个百分点,作物覆盖率提升26.16%,表明数字孪生模型通过实时环境重建与参数自适应优化显著改善了喷洒精度和作物受药一致性;药液使用量减少26.6%,显示该系统在路径规划与喷洒控制环节能实现精准计量与重复覆盖抑制,从而提升资源利用率;航线偏差降低91.1%,充分说明孪生反馈在动态姿态修正与航迹约束中的高效性;障碍物躲避成功率提升至100%,验证了系统在复杂环境下基于多传感融合的避障算法可靠性;此外,系统能够自动实现地形识别与喷洒高度实时调整。

4 结束语

基于数字孪生技术的植保无人机全流程自主作业系统,能够实现从任务规划、环境感知到作业执行的闭环管理。未来,随着5G通信、人工智能和多源传感数据融合技术的进一步发展,数字孪生植保系统将朝着更高层次的智能协同与群体自主方向演进,构建出全域数字农业生态。

[参考文献]

[1]陈灿,施兆阳.基于“AI算法+数字孪生”无人机智能识别下倾角算法研究[J].中国宽带,2025,21(11):16-18.

[2]柴艳峰,张蕾,张阳.装备制造数字孪生平台建设研究[J].科技创新与应用,2025,15(27):88-91.

作者简介:

王启然(1993--),男,汉族,黑龙江省佳木斯市人,助教,本科,研究方向:机械设计及其自动化,航空制造。