Design of a Somatosensory-Controlled Unmanned Aerial Vehicle Inspection System *

WANG Di, CAO Xiangrong, FENG Tianyi, HAN Ziliang, XIAO Siqi, YANG Kuo *
(School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu 211189, China)

Abstract: Targeting at the problems of confined space and insufficient positioning accuracy in indoor low-altitude inspection scenarios of unmanned aerial vehicles (UAVs), a low-altitude inspection UAV system integrating intelligent path planning and gesture-based somatosensory control is designed and implemented. The system mainly consists of a UAV flight platform, an onboard auxiliary control module, and a ground station, and achieves high-precision indoor positioning and inspection path coverage by introducing ultra-wideband (UWB) indoor positioning technology and path planning algorithms. Based on the visual recognition module, an AI-based recognition model is trained and deployed to realize real-time recognition and indication of ground targets, and the recognized information is statistically processed and displayed on the ground station. On this basis, a gesture interaction scheme based on a wearable somatosensory data glove is designed and implemented, in which real-time direct control of the UAV flight state is achieved through the fusion and estimation of finger bending states and palm posture information, thereby enhancing the control capability of the system via human-machine interaction in complex application environments. Experimental results show that the system exhibits good flight stability and positioning accuracy in indoor inspection environments, and can reliably accomplish inspection tasks in both autonomous inspection mode and somatosensory control mode, verifying the effectiveness and stability of the proposed scheme.

Key words: quadrotor UAVs; low-altitude inspection; indoor positioning; somatosensory interaction; visual recognition
EEACC: 7220 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.03.033

一种可体感操控无人机巡检系统的设计 *

王 镝, 曹向荣, 丰天一, 韩子梁, 肖思齐, 杨 阔 *
(东南大学电子科学与工程学院, 江苏 南京 211189)

摘 要: 针对无人机室内低空巡检场景中存在的空间受限、定位精度不佳等问题, 设计并实现了一种兼具智能路径规划与手势体感操控功能的低空巡检无人机系统。系统主要由无人机飞行平台、机载辅助控制模块和地面站三部分构成, 通过引入超宽带(UWB)室内定位技术与路径规划算法, 实现了无人机在室内环境下的高精度定位与巡检路径覆盖。基于视觉识别模块, 训练并部署了 AI 识别模型, 实现了对地面目标的实时识别与指示, 并完成了识别信息在地面站的统计与显示。在此基础上, 设计并部署了一种基于可穿戴体感数据手套的手势交互方案, 通过手指弯曲状态与手掌姿势信息的融合解算, 实现了对无人机飞行状态的实时直接控制, 增强了系统在复杂应用环境下通过人机交互方式的控制能力。实验结果表明, 系统在室内巡检环境下具有良好的飞行稳定性与定位精度, 在自主巡检与体感操控两种工作模式下均能可靠地完成巡检目标, 验证了方案的有效性与稳定性。

关键词: 四旋翼无人机; 低空巡检; 室内定位; 体感交互; 视觉识别
中图分类号: TP273 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2026)03-0705-07

随着无人机技术与嵌入式技术的快速发展, 低空无人机在巡检[1]、安防[2]、农业生产[3]、应急救援[4]以及货物清点[5]等领域展现出了广阔的应用前景。与室外环境相比, 室内或者半封闭环境下的低空巡检任务往往具有空间受限、环境结构复杂以及定位信号不稳定等特点, 这无疑对无人机的飞行稳定性、定位精度与自主决策能力提出了更高要求。此外, 巡检过程中往往需要对特定目标进行识别与标记, 同时对巡检结果进行实时记录与汇总, 这也进一步增加了系统设计的复杂性。

四旋翼无人机在各种环境下的准确定位一直是国内外研究人员关注的重点, Park 和 Yoo[6]提出了一种用于未知室内环境的四旋翼导航制导算法, 使得无人机可以在规避死胡同的情况下完成室内的测绘。Xiang 等[7]提出了一种基于双 UWB 锚点的无人机室内定位方法, 将三维空间的定位转化为二维空间的定位, 简化了传统的三 UWB 锚点定位方法的同时在一定程度上提高了定位精度。Choutri 等[8]则对通过增

项目来源: 国家自然科学基金项目(62305054)
收稿日期: 2026-02-11 **修改日期**: 2026-03-07

强的基于计算机视觉的三角测量方法在室内环境下测量与定位无人机进行了研究。王丽明等[9]提出了一种基于多传感器融合的协同感知与决策架构的无人机自主避障技术。研究人员对于通过超声波测距、激光同步定位与建图(Simultaneous Localization and Mapping,SLAM)、视觉 SLAM 等技术实现无人机高精度定位也进行了大量的研究工作[10-11]。上述研究表明,多类数据融合定位以及引入合适的滤波算法对于实现无人机的准确定位有着重要作用,也是目前无人机定位的主要研究方向[12-14]。

在已有的研究与应用中,室内无人机巡检系统一般基于视觉里程计、光流、激光 SLAM、视觉 SLAM 等定位方式按照预设固定路径巡检[15-16],需要一种具备自主路径规划能力及良好人机交互性能的无人机巡检系统设计。本项目围绕无人机低空巡检的应用需求,设计并实现了一种基于 UWB 定位技术、嵌入式智能视觉识别与智能体感交互的低空巡检无人机系统。本项目的主要工作包括:构建了一种适用于室内场景巡检的无人机系统架构;设计了一种基于 UWB 定位的路径规划与定点飞行方法;实现了基于嵌入式技术的视觉识别及目标指示机制;提出并验证了一种基于智能体感手套的无人机控制方案;通过系统性的实验验证了该项目在稳定性、定位精度与交互实时性方面的有效性。

1 系统总体设计

1.1 系统架构

如图 1 所示,本项目设计的低空巡检无人机系统由无人机飞行平台、机载辅助控制模块以及地面站三大部分构成。无人机飞行平台为系统主要部分,负责稳定飞行姿态,执行定时响应程序并通过数据反馈调节飞行速度与方向;机载辅助控制模块负责实现定位数据处理、视觉识别结果整合、目标指示及任务执行状态管理等功能;地面站则主要用于路径规划、人机交互、任务参数设置、巡检结果显示与数据记录。三者之间通过串口通信和 LoRa 无线通信方式实现数据传递,构成完整的巡检系统。

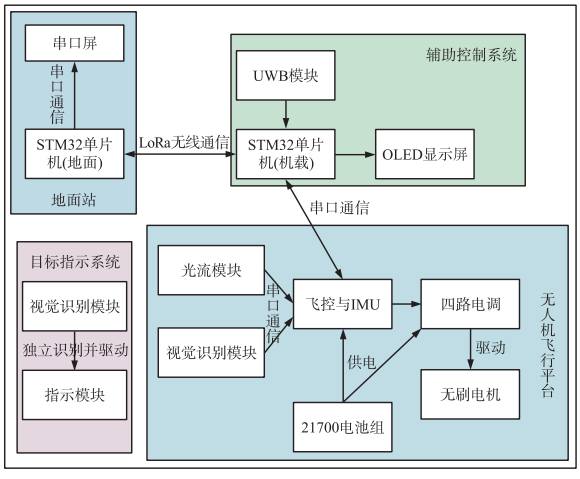
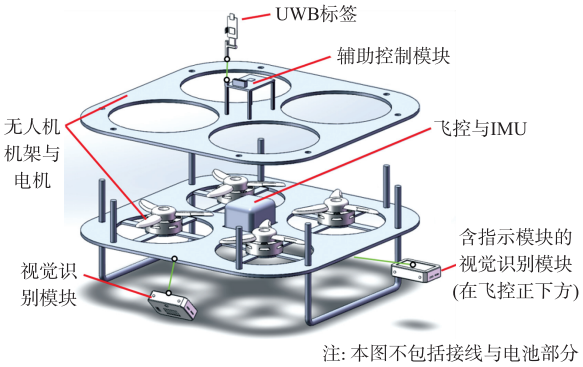


图 1 系统整体框图

如图 2 所示,无人机平台上集成了飞行控制单元、惯性测量单元(Inertial Measurement Unit,IMU)、光流模块、UWB 定位标签以及嵌入式视觉识别模块。飞行控制单元负责根据 IMU 及光流模块反馈的数据实现姿态解算与基于 PID 的电机闭环控制,并根据程序规划完成对应步骤的飞行动作;UWB 定位标签用于与 UWB 定位基站交互,通过三边定位等算法解算无人机在室内环境中的三维位置信息;视觉识别模块用于对地面目标进行实时检测与分类。辅助控制模块基于 STM32 单片机通过串口与飞控及 UWB 模块通信,对多类数据进行融合处理,并通过无线通信模块与地面站进行信息传递。



注: 本图不包括接线与电池部分

图 2 无人机结构简图

1.2 工作流程

如图 3 所示,在 UWB 定位模式下,地面站会根据手动录入的禁飞区参数完成路径规划并在屏上显示。在收到人工起飞信号后,无人机起飞至巡检高

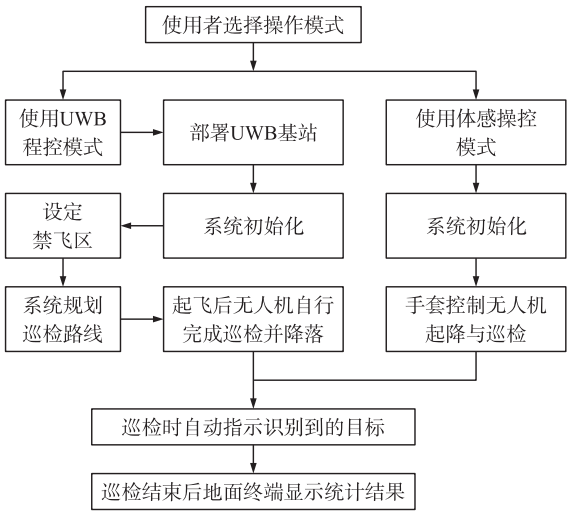


图 3 巡检系统工作流程

度，飞控根据光流及 IMU 反馈信息，通过 PID 算法及时调节自身速度与姿态、修正飞行路径，并按照辅控单元传入飞控的路径点逐点完成巡检。在体感控制模式下，操作人员通过采集手势数据的体感手套直接控制无人机完成起飞、各处巡检、降落的动作流程，无需 UWB 定位数据。

在巡检过程中，机载嵌入式视觉模块会持续采集地面图像信息并执行目标识别任务，识别结果将即时更新到地面站显示器，并在结束后生成完整日志。当检测到目标时，系统将驱动指示装置实现目标即时指示。巡检任务结束后，无人机按照预设路径返回起始区域并完成降落。

2　基于 UWB 定位的控制方案设计

2.1　巡检环境建模

本项目将巡检区域分割为规则的栅格地图，以便明确无人机在巡查区域的实际运动状况，进一步地，根据实际环境信息，操作人员将存在障碍物的地区标记为禁飞区，其余区块则视为可访问区块。为保证路径规划结果的可执行性，需要首先确定从起始位置出发能够到达的所有区块的集合，这一步由地面站接收禁飞区坐标数据并计算得出。

2.2　连通性检查

为了保证巡检区域无遗漏，本项目采用了广度优先搜索（Breadth First Search，BFS）算法对栅格地图进行遍历。以无人机起点区块为源节点，将其加入搜索队列，然后依次访问一步到达的可访问区块，并将对应尚未访问区块的节点存入搜索队列，直到队列为空。通过 BFS 算法，系统能够快速剔除禁飞区并获取包含起点在内所有与起点连通的可访问区块的集合。该方法计算复杂度低，实用性强，在嵌入式开发环境中易于实现。

2.3　巡检路径生成

在完成连通性检查后，对所有可访问区块生成遍历的巡检路径。考虑到节约计算资源且室内巡检区域规模适中，本项目选用最近邻启发式策略规划巡检路径。具体过程为：以无人机当前所在区块为起点，在尚未访问的区块集合中计算其与当前区块之间的距离，选择距离最小的单元格作为下一巡检目标；完成移动后，将该单元格标记为已访问，并重复上述过程，直至所有可访问单元格均被遍历。

由于障碍物及其对应的禁飞区的存在，为了便于执行，无人机行进路线只有横向与纵向的设定，所以在遍历巡检的要求下必然存在地块重复经过的现象，但是该方法能够在较低计算复杂度下生成重复路径尽量少、总路程尽量短的巡检路径，虽然不能保证总为全局角度下的最优解，但是其在室内低空巡检的环境下仍然具有良好的工程适用性。实验结果表明，该路径规划方法支持无人机以较短路径有效完成存在禁飞区情况下的室内巡检任务，且路径规划计算时间需求较低。典型的路径规划结果如图 4 和图 5 所示。

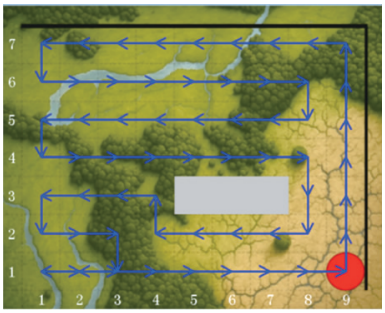


图 4　单禁飞区路径规划结果示例

图 5　双禁飞区路径规划结果示例

2.4　UWB 定位设计

系统主要应用场景为低空室内环境，光流传感器与 IMU 惯导融合的速度解算方案具有即时性和平滑性的特点，但是其对于位置的反馈由积分得出，工作时间的延长会导致误差持续累计且无法通过算法修正，导致系统无法正常工作，所以需要引入基于 UWB 数据解算得到的绝对空间位置作为定位依据。

针对室内环境下的高精度即时定位需求，本项目采用了基于超宽带定位技术的定位方案。系统通过在巡检区域周边布设 4 个 UWB 基站，构建三维空间的定位坐标系，无人机上搭载的 UWB 标签通过双向异步测距（Two-Way Ranging，TWR）方法结合三边定位算法解算出自身空间坐标。在实验场地条件下，当 UWB 基站在长宽比 3∶2 的矩形四角布设时，该 UWB 系统能够正常工作，并且其定位误差控制在±5 cm 的范围内，能够满足室内巡检的定位精度需求。

在实际的工作环境下，UWB 数据可能受到嘈杂无线环境和多径效应的影响出现瞬间的大幅跳变，导致错误数据被采用、定位效果明显下降。为了提升 UWB 定位数据的平滑性与可靠性，本项目采用

了基于滑动窗口的轻量化滤波方法。该方法对连续数次采集到的有效坐标数据进行了取极值和加权平均处理,在产生一个不影响系统正常运行的小延时的情况下有效地抑制了 UWB 异常跳变对飞行稳定性的影响,提高了无人机定点飞行时的方向修正能力以及路径跟随效果。UWB 定位流程如图 6 所示。

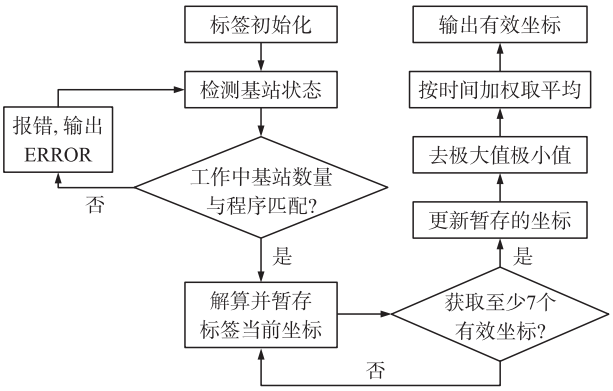


图 6 UWB 定位工作流程

3 基于体感交互的控制方案设计

3.1 体感数据采集系统

进一步地,为了满足在较复杂环境下需要人为控制的工作需求,本项目引入了基于体感数据手套的人机交互控制方案。体感手套集成多路手指弯曲传感器以及 IMU 以采集操作者的手指弯曲信息和姿态信息,在处理成对应的飞行控制数据后通过无线通信的方式发送至无人机系统。

3.2 手势识别与飞行指令映射

与基于 UWB 的程序控制下的自动巡检不同,基于体感手套的操控的无固定起降地点,巡检路径也由使用者自行决定,具备较高的灵活性,便于对特定区块进行针对性巡检,减少在低重要性区块上浪费的行程。此外,体感操控时仅需单手即可完成各项动作,且手势动作与无人机飞行动作的映射关系可以人为设置,这也提供了一定的便利性,是传统的遥控器操作之外的一种有效操控方式。

其工作流程较为简洁,如图 7 所示,体感手套的 MCU 对采集到的各项体感数据进行滤波、归一化和阈值判断后,结合预定义的手势信息对操作人员当前手势进行识别。匹配到的识别结果被映射为对应的无人机飞行指令,包括起飞、降落、前后平移、侧向平移和旋转等操作。

工作时,系统首先采集与五指对应的五路电位器的模拟数据量,并将原始数据滑动滤波后映射到 0 到 2 500 的数值范围,便于统一地设定手指弯曲判断阈值。原始数据范围在初始化时完成采集,对应

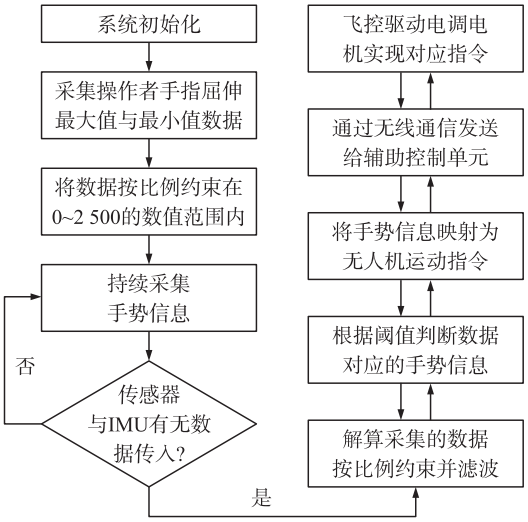


图 7 体感操控工作流程

于不同操作者的手指弯曲范围,这使得手势识别时更为精准与个性化。在此之后,系统获取 MPU6050 六轴姿态传感器的数据,滤波去除高频噪声、零偏。根据陀螺仪对翻转等手势动态变化敏感但存在积分漂移,加速度计数据响应慢但稳定性高的特点,将陀螺仪数据与加速度计数据进行融合解算。系统以 10 Hz 的频率采样佩戴者当前手势,对应的无人机动作信息则通过无线通信发送至辅助控制模块,进而实现对应的飞行动作。

本项目通过建立手指弯曲状况与手势信息融合判断机制,有效降低了智能手套的误触误判可能性,提高了人机交互下的控制稳定性。手势动作信息与无人机飞行指令对应如表 1 所示。

表 1 手势动作与无人机飞行动作对应表

序号	手势动作	无人机飞行动作
1	手掌朝上,五指分开	起飞至预设高度
2	手掌朝下,五指分开	降落
3	只伸出食指	向前飞行,速度 15 cm/s
4	伸出食指和中指	向后飞行,速度 15 cm/s
5	拇指和食指伸直,手掌向左/向右旋转约 90°	向左/向右飞行,速度 15 cm/s
6	拇指、食指和中指伸直,手掌向左/向右旋转约 90°	向左/向右旋转,角速度 15°/s

4 视觉识别模块与目标指示

为实现对巡检过程中动态情况下的物体识别与统计,本项目在无人机上安装了嵌入式视觉处理模块 K230,在部署轻量化识别模型的情况下识别帧率可达 40 frame/s,满足项目对于识别性能与器件功耗的需求,适合在无人机低空巡检环境中应用。

4.1　目标识别算法与模型部署

针对巡检过程中需要识别并统计的目标物体，本项目首先使用 K230 在不同高度拍摄了 300 张包含 1 个~6 个不同待识别目标的照片，上传至在线模型训练平台，对照片中各个物体进行人工标注，构建了一个基本的图像训练集。之后，设置迭代次数为 240 次以保障模型充分训练，批数据量设为 8，最大学习率设为 0.001 以保证数据拟合速度不过低的同时不发生损失值爆炸和震荡，在线训练平台基于实时目标检测机器学习算法 YOLO（You Only Look Once）v5 版本完成模型初步训练，这是 YOLO 各个版本中模型较小，识别速度较快的版本，基于 YOLO 训练的模型通过 nncase 模型转换工具轻量化为可在 K230 上使用的 kmodel 模型。在线训练在数据充分拟合后会在最大迭代次数前停止，训练完成后除了生成识别程序与 kmodel 模型以外还会生成检测验证的结果，方便快速观察模型识别效果。通过继续增加各类飞行中可能出现的拍摄状态的待识别物体图像并优化训练参数，模型的识别可靠性上升，在实验高度为 1 m~1.5 m 的情况下识别基本准确。充分优化后的识别模型被部署在视觉模块上，实现无人机巡检过程中的实时目标检测与分类。训练过程中 Loss 随迭代次数变化情况如图 8 所示，ROC 图如图 9 所示。

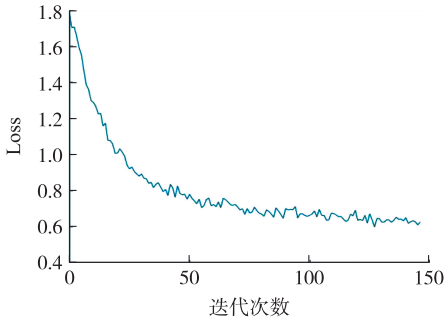


图 8　训练中 Loss 随迭代次数变化状况

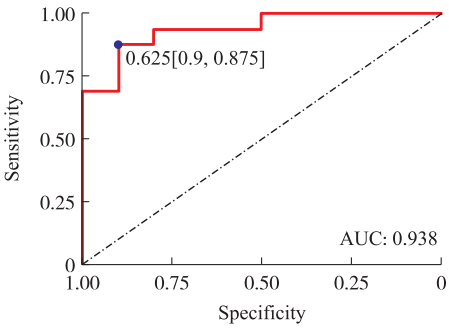


图 9　识别模型的 ROC 图

可见，在 100 次迭代之后，模型 Loss 较难进一步下降，在线训练平台上根据均值平均精度（Mean Average Precision，mAP）已达到 1，认为模型已充分拟合，在 148 次后停止了迭代。经过优化后的识别模型对于实验中的待识别物体判断能力良好，巡检过程中不易发生误判的情况。

4.2　目标定位与指示

如图 10 所示，在程序初始化过程中，飞机本次巡检的高度数据 H 会经辅助控制模块传入视觉识别模块作为计算参考，当视觉模块识别到目标物体时，程序会自动对目标物体生成一个基本包围目标的矩形识别框，以其中心作为物体中心可信度较高。每次识别时系统都会获取识别框中心在摄像头拍摄的图像中相对视野中心的距离 Δx 与相对于图像纵中轴线的角度 θ_1，可以基于 $\theta_2 = \arctan\dfrac{\Delta x}{H}$ 解算出另一个需要的角度 θ_2，视觉识别模块可以基于 θ_1 和 θ_2 调节引脚占空比输出，驱动以舵机为动力的指示装置完成目标标记。每一次识别到目标物体时，程序都会对角度信息进行更新，从而保证了舵机在识别到目标时能够快速完成指示方向的调整，持续紧跟目标。该方法基于无人机飞行高度与识别框的位置快速完成计算，无需复杂的三维空间重建过程，适用于在嵌入式系统上的实现。实验结果表明，此指示方法在巡检任务中的实时指示效果具有良好的准确性与即时性，能够满足项目需求。

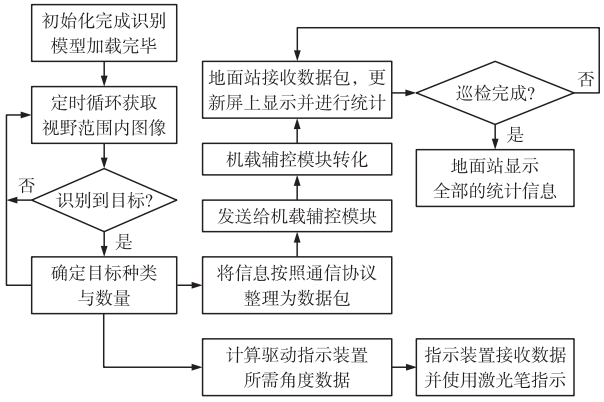


图 10　视觉模块工作流程

5　实验与结果分析

为验证系统整体性能，实验人员在设置了禁飞区的室内环境中对系统飞行稳定性、定位精度、路径规划效果、视觉识别效果、目标指示灵敏度以及体感交互可靠性进行了实验测试。

5.1　实验环境与测试条件设置

实验选取一室内实验室作为测试场地，地面平整并铺设彩色喷绘布，室内光照条件良好，除待测试设备外没有其他无线模块处于工作状态。测试空间为 5 m×4 m 的长方形区域，用虚线划分 0.5 m×

0.5 m 的正方形区块,场地限高 3 m,禁飞区在测试中用数个 0.5 m×0.5 m 灰色喷绘布方块覆盖,便于观察无人机机身投影是否存在误入情况。各待识别目标尺寸在 0.15 m×0.10 m 至 0.2 m×0.2 m 之间,随机摆放但单一目标不跨地块。无人机程控巡检起终点为长方形区域的一顶角,以一直径大于机身尺寸 10 cm 的红色圆形示意。无人机中心有一朝正下方的常亮激光笔,便于确认无人机中心所处位置

测试主要包括程控巡检测试、体感控制巡检测试以及在两个测试过程中进行的视觉识别及指示效果测试。测试前已布置好 UWB 基站并为 UWB 标签录入基站坐标。

5.2 实验流程

首先进行无人机程控巡检测试,这一测试包含了对路径规划效果、系统飞行稳定性与定位精度的检验。测试共进行 5 次,每次录入一个或两个包含 3 至 4 个连续地块的禁飞区,地面站显示禁飞区与路径规划结果,之后无人机起飞并按路径进行巡检,巡检完成后回到起点降落。实验人员观察无人机飞行时指示中心位置的激光笔光点移动路径是否存在明显偏离预定路径(即中心超出路径预期所处区块)的现象。

完成程控巡检测试后,进行体感控制巡检测试。因为体感控制巡检用时往往短于程控巡检用时,为保证测量结果可靠,减少偶发现象干扰,此项测试进行 15 次。实验人员通过手势控制无人机起飞,并根据观察到的目标位置控制无人机到达目标位置完成巡检,在对全部目标完成巡检后控制无人机回到出发点降落。在这一测试中,实验人员需要对无人机响应各个手势控制的准确率与延迟时间进行测量与记录。

在这两种巡检测试中,实验人员在无人机飞抵待识别目标时观察并记录指示装置准确度及反应时间、地面站上物体信息及所处地块号。在巡检完成后,实验人员在地面站上调出巡检统计结果,验证统计结果是否正确且无遗漏。

5.3 实验结果记录与分析

程控巡检测试中,地面站上能准确无误地在录入禁飞区后显示规划好的巡检路径,典型路径规划结果如前述图 4 和图 5 所示。五次程控巡检测试中,无人机飞行过程中仅有两次在接近场地边界时因为飞行速度较快发生了中心超出预定区块的现象,但没有进入禁飞区或离开测试场地,且在前往下一待巡检区块时自行完成了修正,这表明此巡检系统可以进一步引入接近边界时适度降低巡检速度的算法,以及系统的 PID 参数仍有调整空间。在未发生偏移的巡检过程中,无人机中心光点全程距离所在区块边框不少于 10 cm,可以认为实际程控巡检路径与规划路径基本贴合。在体感手套控制模式下,无人机对于各手势对应动作的平均响应延迟在 0.5 s 以内,且 15 次完整飞行巡检的测试中未发生手势误判现象,体现了其在需要有效人机交互手段的情况下的应用潜力。在视觉识别与指示效果测试中,对于尺寸在 0.15 m×0.10 m 至 0.2 m×0.2 m 的各待识别物体,系统可在 0.5 s 的平均用时内完成识别与指示,指示准确率大于 95%,且指示未成功的情况主要为无人机飞行过程中因为物体形状不规则导致的指示偏移。地面站上实时显示的物体种类与所处地块编号、巡检结束后的地面站统计结果均无错误。

综上,无人机能够按照规划路径完成巡检任务,路径规划方法具有良好的覆盖性和可执行性;嵌入式视觉模块能够实时完成目标识别与指示任务,地面站上可以实时显示识别信息,巡检结束后也可以稳定调出总结信息;体感手套控制延迟较低,手势识别准确度高,系统整体运行稳定性与可靠性均良好。

6 总结

本项目设计并实现了一种可体感操控的低空无人机巡检系统,通过融合 UWB 定位、基于 BFS 算法和最近邻启发式算法的路径规划方法、视觉识别模块,实现了程序控制下的无人机室内复杂环境下的自主巡检与信息统计。通过引入基于体感手套的控制方案,实现了人机交互方式下的低延迟操控。实验结果证明了此系统定位稳定、人机交互可靠、路径规划效率高、视觉识别准确。以此设计为基础的电子设计作品曾获 2025 年全国大学生嵌入式芯片与系统设计竞赛国家一等奖。

参考文献:

[1] 汤明文,戴礼豪,林朝辉,等. 无人机在电力线路巡视中的应用[J]. 中国电力,2013,46(3):35-38.

[2] 罗颖,张敏,刘军. 鹰击长空织就“天网”——无人机及其警务应用现状[J]. 警察技术,2014(5):54-62.

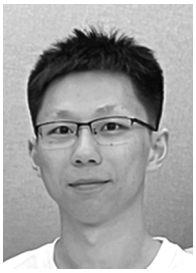
[3] 汪沛,罗锡文,周志艳,等. 基于微小型无人机的遥感信息获取关键技术综述[J]. 农业工程学报,2014,30(18):1-12.

[4] 梁宁,袁新利,刘晓东. 无人机在森林防火领域的应用及发展[J]. 森林防火,2020(1):50-54.

[5] 潘楠,陈启用,刘海石,等. 复杂工业品仓储环境无人机盘库任务规划[J]. 计算机集成制造系统,2021,27

(10):2940-2949.
[6] Park J,Yoo J. Indoor Mapping Guidance Algorithm of Rotary-Wing UAV Including Dead-End Situations[J]. Sensors,2019,19(22):4854.
[7] Xiang Z,Chen L,Wu Q,et al. An Improved UWB Indoor Positioning Approach for UAVs Based on the Dual-Anchor Model[J]. Sensors,2025,25(4):1052.
[8] Choutri K,Lagha M,Meshoul S,et al. Vision-Based UAV Detection and Localization to Indoor Positioning System[J]. Sensors,2024,24(13):4121.
[9] 王丽明,辛朝阳. 基于多传感器融合的无人机自主避障技术研究[J]. 科技创新与应用,2025,15(34):37-40.
[10] 蔡伯根,李智宇,王剑,等. 面向铁路巡检的低空无人机智能感知与精密定位研究[J]. 铁路通信信号工程技术,2025,22(1):1-12.
[11] 李平伯. 基于双目和结构光的弱特征 SLAM 研究[D]. 南京:东南大学,2019.
[12] 向奉卓. 多传感器组合的室内自主定位技术研究[D]. 郑州:战略支援部队信息工程大学,2018.
[13] 张军. 多传感器融合算法的四旋翼无人机室内定位技术研究[J]. 物联网技术,2025,15(1):67-71.
[14] 赵红梅,赵杰磊. 超宽带室内定位算法综述[J]. 电信科学,2018,34(9):130-142.
[15] 何芳. 基于双目视觉的四旋翼无人机定位系统设计与实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
[16] 宋春林. 四旋翼无人机在未知环境中自主导航和飞行控制方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.

王　镝(2005—),东南大学电子科学与工程学院 2023 级本科生,专业为电子科学与技术;



杨　阔(1994—),东南大学电子科学与工程学院讲师,硕士生导师,专业为物理电子学,k_yang@ seu.edu.cn。