

引用格式:张永挺,韩彦微,林永昌,等.变电站室内无人机位姿估计方法[J].电力科学与技术学报,2025,40(1):138-145.

Citation: ZHANG Yongting, HAN Yanwei, LIN Yongchang, et al. Research on pose estimation method for indoor unmanned aerial vehicles in substations[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 138-145.

变电站室内无人机位姿估计方法

张永挺¹, 韩彦微¹, 林永昌¹, 冯一桐¹, 刘剑²

(1. 广东电网有限责任公司中山供电局, 广东 中山 528400; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 变电站室内无人机巡检可有效降低人工巡检作业强度。由于飞行精度要求高, 搭载能力有限, 仅依靠无人机搭载摄像头与惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)数据融合确定位姿无法满足精度要求, 为此, 提出基于变电站室内已有固定摄像头的泛在物联的多视觉-惯导融合框架, 针对室内光线情况对无人机摄像头图像进行强化, 并与IMU数据结合得到初步的无人机位置数据。进一步通过在无人机上布设二维码(quick response code, QR码), 应用改进后的PnP(perspective- n -point)算法优化无人机位姿数据。飞行结束后在无人机巢对IMU的累计误差进行校验。实验证明: 该方法布设与维护的工作量小, 相较于依靠搭载摄像头与IMU数据融合算法, 飞行精度有较大提高, 可满足变电站内无人机巡检作业的需要。

关键词: 变电站; 室内无人机; 位姿估计; 多视觉-惯导融合框架; 改进PnP算法

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.01.014 **中图分类号:** TM930 **文章编号:** 1673-9140(2025)01-0138-08

Pose estimation method for indoor unmanned aerial vehicles in substations

ZHANG Yongting¹, HAN Yanwei¹, LIN Yongchang¹, FENG Yitong¹, LIU Jian²

(1. Zhongshan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhongshan 528400, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Indoor unmanned aerial vehicle (UAV) inspection in substations can effectively reduce the intensity of manual inspection operations. Due to high flight accuracy requirements and limited carrying capacity, relying solely on UAV-mounted cameras and inertial measurement unit (IMU) data fusion to determine pose fails to meet precision requirements. Therefore, a multi-vision-inertial navigation fusion framework based on the ubiquitous IoT with existing fixed cameras in the substation is proposed. The images of UAV-mounted cameras for indoor lighting conditions are enhanced and combined with IMU data to obtain preliminary UAV position data. In addition, by deploying quick response (QR) codes on UAVs, the improved perspective- n -point (PnP) algorithm is applied to optimize UAV pose data. After the flight is completed, the cumulative error of IMU in the UAV nest is verified. Experimental results have shown that the deployment and maintenance workload of this method is small, and the flight accuracy is significantly improved compared to relying solely on cameras and IMU data fusion algorithms. It can meet the needs of UAV inspection operations in substations.

Key words: substation; indoor unmanned aerial vehicle; pose estimation; multi-vision-inertial navigation fusion framework; improved PnP algorithm

变电站是保障电网安全稳定运行的重要组成部分, 承担将输电线路上的高压电能转化为低压电能的任务^[1-2]。为减轻工作强度、减少错漏, 更好地应对一线人力资源紧张的难题, 各种智能巡检技术

得到了广泛的应用, 从设备上巡检终端、机器人及无人机也得到了应用^[3-7], 而物联网技术、图像分析及人工智能分析技术的引入也为变电站智能运维提供了新的技术手段^[8-12]。

收稿日期: 2024-04-17; 修回日期: 2024-09-03

基金项目: 南方电网公司科技项目(GDKJXM20230706)

通信作者: 张永挺(1980—), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统智能运维技术的研究; E-mail: 305135125@qq.com

无人机由于应用灵活、覆盖范围广,在变电站的室外设备巡检中得到了一定程度的普及应用。当前存在大量的半地下和地下变电站,而为了管控环境污染,当前变电站的设计也大量采用室内结构。变电站室内空间狭小,无人机飞行条件严苛,但一般而言现场规范化管理水平较高,无人机执行巡检任务需精准飞行,由此位姿的准确数据尤为重要^[13-14]。变电站室内结构较为坚固,通常无法采用GPS或北斗卫星信号导航^[15];超宽带技术具有发射功率低、带宽大、多径分辨率高以及穿透性好等优点^[16-17],其一度成为室内无人机导航参考的重要解决方案。由于超宽带技术配置复杂,覆盖盲点检测较为困难,后期维护成本较高,在变电站这种电磁环境较为复杂的条件下并不适用。

基于视觉的无人机导航技术从非接触式传感器获取图像,可通过多源数据进行融合分析,研究者应用可见光、红外数据及其融合数据对非先验条件下的无人机室内飞行、起降开展了研究^[18-21]。视觉同步定位与地图构建(vizual simultaneous localization and mapping, VSLAM)是当前研究的热点,目前常用的传感器包括单目、双目及RGB-D相机。单目相机输出频率低,而复杂背景、光照变化以及类似物体的遮挡对识别与跟踪的效果都可能产生影响,从而对无人机位姿判定带来困难^[22-24]。

变电站内无人机的视觉信号主要满足站内各项作业任务需求,因此,很难按照VSLAM的数据分析要求采集。虽然AR标记(AR Tag)可以成为视觉辅助识别的工具^[25],但该方法同样也存在维护困难的问题。进一步,结合接触式传感器惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)与VSLAM成为新的研究方向,但IMU的数据累积误差将随着时间的推移而逐渐增加^[26-27]。

变电站无人机室内飞行具有显著的环境特征:环境相对固定;无人机一般配置机巢且机巢位置固定;室内大多有摄像头实现安防覆盖。由此,以室内无人机机巢为IMU坐标参考点,结合无人机摄像头与固定摄像头的视频数据融合,在泛在物联定位框架上采用一种基于无人机二维码(quick response code, QR码)特征融合位姿算法,实现变电站内巡检无人机位姿的精确确定。

1 泛在物联定位框架及系统组成

1.1 泛在物联定位框架

泛在物联定位框架如图1所示, f_i 为摄像头中心

法线; α_i 、 β_i 分别为水平、垂直视场角,即摄像头在水平及垂直方向的覆盖范围,由云台参数决定; r_i 为有效可视的远点距离,在室内无人机飞行的场景下,有效可视的近点距离可以不用考虑。

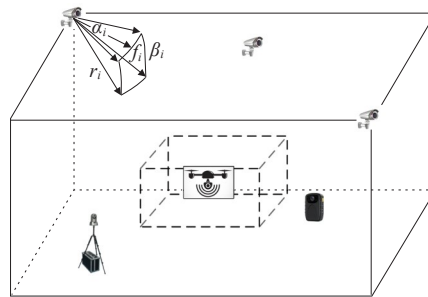


图1 泛在物联定位框架

Figure 1 Ubiquitous IoT positioning framework

变电站室内飞行的无人机在飞行过程中,单纯结合无人机搭载的摄像头及IMU的数据显然不足以精确确定无人机的位姿。由于无人机搭载摄像头的的数据还需要满足巡检、安监等作业要求,因此,无论无人机搭载的是单目还是双目摄像头,其数据都无法全部用于满足导航的需求。图1中,泛在物联定位框架中包括变电站内的固定摄像头、可移动部署的布控球或者执法记录仪的摄像头。设备类型、数量及性能有较大区别,是一个典型的异构、弹性的泛在物联框架。

从技术角度出发,变电站室内固定安装的摄像头一部分可以通过云台移动,另一部分则不能通过云台移动;从管理角度出发,除个别极其重要的摄像头不允许移动外,可通过云台控制摄像头移动配合无人机完成站内巡检任务。应用站内现有的固定摄像头数据与无人机摄像头、IMU配合,无须安装和维护标识物^[25],对无人机位姿判断的精度可大幅提高。

1.2 系统结构及组成

由于变电站室内环境相对固定,光照条件也较为稳定,故无人机在室内和未知环境中的飞行有所不同。泛在物联定位框架下需要融合多种物联终端的数据进行分析,应用边缘计算框架可实现低成本的数据就地分析,在有限无人机图像数据的条件下实现无人机位姿的精确定位。

项目采用的边缘计算框架如图2所示,无人机的摄像头及IMU数据传输到边缘计算服务器上,获取初步的位姿数据;根据变电站的“两票”数据开展巡检、安监等工作,或者根据特定指令查看指定区域的仪表示数等情况时,边缘计算框架对摄像头数

据进行筛选,只对覆盖无人机飞行线路上的摄像头数据进行分析,由此可大幅度减少视频数据的分析量,降低对固定摄像头其他工作的影响;根据摄像头数据筛选的结果,与无人机位姿数据相结合,对位姿数据进行优化。如文 1.1 中所述,室内现有固定摄像头可在不影响原有任务的前提下自动转动云台,以期更好地覆盖无人机飞行的路径,为位姿确定提供更优参考数据;即使无法转动的固定摄像头,由于变电站室内空间有限,其图像数据也可以为无人机飞行提供参考。

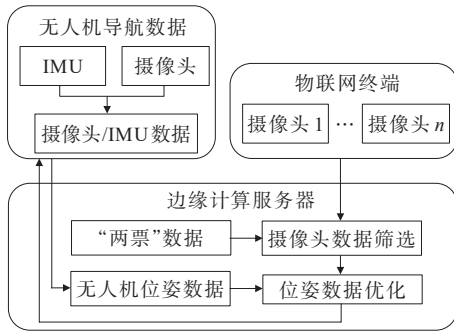


图2 边缘计算框架

Figure 2 Edge computing framework

2 无人机位姿解算

2.1 IMU 初始化及位姿计算

变电站室内无人机部署需要配置机巢,从而实现充电或换电功能,且位置基本固定,由此可作为IMU的初始校准参考。初始校准的目的是获得IMU的初始位姿,从而获得IMU与导航坐标系的初始对应关系,实现后期在飞行过程中导航坐标系的变换。

由于机巢处于静止状态,利用高精度惯导装置确定机巢和无人机的初始姿态则可作为无人机飞行的初始校准依据。高精度惯导装置基于地球引力与地球自转的角速度解析对准,得到精确的位姿参考数据。

每次飞行结束后无人机都会回到机巢,由此根据自身低精度IMU的数据与精确位姿数据校对,以减小累计误差。机巢的高精度位姿数据校准只需要在机巢移位时或每年完成一次校准即可。变电站室内空间相对有限,由此无人机的翼展不宜超过40 cm,出于成本和搭载能力的考虑,只能采用低精度IMU用于飞行过程中提供位姿数据。通常低精度IMU无法使用解析对准进行计算,提供无人机的初始对准信息。

IMU定位采用体轴坐标系(B坐标系)对无人机进行定位,其X、Y轴向前指示纵向及横向,Z轴与前两者右手坐标系指向无人机的垂直向下方向。在导航坐标系(N坐标系)中,X、Y轴分别指向局部水平面的北向及东向,而Z轴是地球垂直向下的方向。假定无人机的航向角为 φ 、俯仰角为 θ 、横摇角为 γ ,这3个角度构成一个欧拉角,可描述N、B坐标系之间的空间角位置关系。

不失一般性,将IMU从B转化到N坐标系中, $x、y、z$ 轴上的加速度设为 $\alpha^N = [\alpha_x^N, \alpha_y^N, \alpha_z^N]^T$,对应 t 时刻的速度为 $v^N = [v_x^N, v_y^N, v_z^N]^T$,则对应 $t+1$ 时刻的无人机在N坐标系中的三维位置为

$$\begin{bmatrix} N_x(t+1) \\ N_y(t+1) \\ N_z(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_x(t) \\ N_y(t) \\ N_z(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_x^N(t) \\ v_y^N(t) \\ v_z^N(t) \end{bmatrix} \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \alpha_x^N(t) \\ \alpha_y^N(t) \\ \alpha_z^N(t) \end{bmatrix} \cdot \Delta t^2 \quad (1)$$

IMU在计算位移时,由于需要对加速度进行二次积分,随着时间的推移或者飞行距离的增加,定位误差会逐渐增加,实际轨迹与单纯依靠IMU的轨迹计算结果会产生较大偏差。

在单次飞行结束回到无人机机巢后,可以利用定期校验的高精度IMU数据对搭载的IMU进行校准。若机巢N坐标系中的重力矢量为 $g = [g_x, g_y, g_z]^T$,IMU的磁强计输出为 $M = [M_x, M_y, M_z]^T$,则首先计算IMU的俯仰角和横摇角,分别为

$$\theta = \arctan(g_y/g_x) \quad (2)$$

$$\gamma = -\arcsin(g_x/g) \quad (3)$$

进一步计算航向角,计算公式为

$$\varphi = \arctan(M_y/M_x) \quad (4)$$

其中,

$$M_x = \cos \gamma \cdot M_x + \cos \gamma \cdot \sin \theta \cdot M_y - \cos \theta \cdot \sin \gamma \cdot M_z$$

$$M_y = \cos \theta \cdot M_y + \sin \theta \cdot M_z$$

2.2 摄像头图像强化

一般室内无人机搭载单目相机和低精度IMU是综合成本、搭载能力以及续航能力的综合要求。低精度IMU精度有限、输出噪声较大;单目相机因输出频率较低而无法满足室内无人机飞行的高动态需求,即使搭载双目相机,其采集的图像也不能全部用于导航。

目前比较好的单目算法是关键点扫描检测—

同步定位与建图(oriented fast and rotated brief-simultaneous localization and mapping, ORB-SLAM)算法,在VSLAM算法基础上加入了闭环检测,提高了程序的运行效率^[26]。在弱光照或黑暗等复杂条件下,利用多尺度高斯函数提取输入图像的照度分量,根据照度分量对校正因子进行动态调整,可有效增强视觉图像的特征匹配^[28]。校正后的图像亮度为

$$V^*(x, y) = 255 \left[\frac{V(x, y)}{255} \right]^\mu \quad (5)$$

式中, $V(x, y)$ 为原始图像的亮度; $V^*(x, y)$ 为增强后的图像强度; μ 为自适应的校正因子, 本文对此讨论从略。

3 无人机位姿优化

3.1 多视觉-惯导融合框架

在采用视觉-惯导融合前,通常需要进行外参标定,从而得到IMU与相机之间的相对位姿关系,两者的数据才能由此进行有效融合。目前二维码标定板由于抗干扰能力强、标定精度高而被普遍采用。开源标定包Kalibr是本文采用的外参标定工具,以相机的内部参数及IMU的零偏值等数据为输入,最终得到外参标定结果。

常规的视觉-惯导融合算法可分为紧耦合和松耦合两大类。松耦合算法将IMU数据和摄像头数据分开处理,最后融合得到综合位姿信息;紧耦合算法将2种数据先融合再计算位姿信息。一般而言,紧耦合算法的鲁棒性更强。

综合外参标定和算法选择的需求,为保持搭载装置体系的灵活性,不选择IMU与摄像头的一体化方案,硬件上采用松耦合,算法上选择紧耦合,确保在不同成本、精度要求约束条件下的灵活组合。

由于变电站室内装有监控用摄像头,其数据可以通过共享进一步优化对无人机位姿的判断,更为重要的是,当无人机出现在危险区域时可及时预警。采用多视觉-惯导融合的无人机位姿优化框架如图3所示,而在该框架下主要执行以下操作。

1) 无人机数据融合位姿定位。以无人机机巢为精确的基准参考点,无人机搭载的单目相机和IMU数据融合,在紧耦合方式下实现位姿信息的初始校准和位姿信息计算。

2) 筛选摄像头。变电站室内无人机多采用自动飞行方式对设备巡检,飞行线路已提前预设,由

此可以筛选出变电站内覆盖飞行线路的固定摄像头,或者对固定摄像头云台进行调整,覆盖飞行路线。

3) 位姿优化。通过变电站内固定摄像头的图像数据分析,为无人机位姿数据提供更为精确的参考数据,或者在无人机出现严重偏差时上报预警。

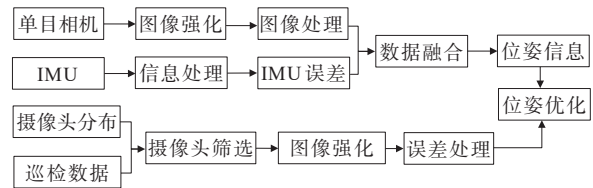


图3 多视觉-惯导融合框架

Figure 3 Multi-vision-IMU fusion framework

3.2 QR码特征融合

现有基于标识的室内无人机导航往往需要在室内布设多个标识点,标识的读取、校对的工作量较大,后期的标识维护工作也非常繁重。

尽管采用IMU与搭载摄像头的数据融合可以得到无人机的位姿数据,但由于搭载能力的限制,不能选择大重量、高精度的设备。综合室内无人机高精度定位的需求,在无人机上喷涂QR码,如图4所示;在无人机飞行过程中(如图5虚线),通过1个或多个摄像头读取QR码信息,优化无人机位姿数据。



图4 无人机QR码标识

Figure 4 QR code identification of UAV

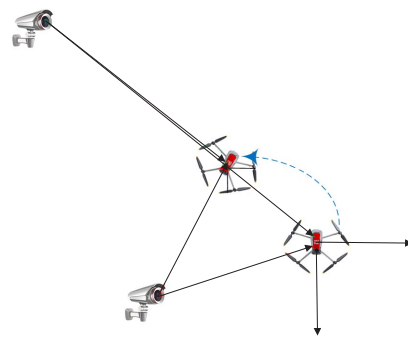


图5 室内无人机QR码特征融合位姿优化

Figure 5 Optimization of QR code feature fusion pose of indoor UAV

固定摄像头的位置是确定的,其与云台的参数结合下通过对QR码的旋转情况、大小判定无人机与摄像头的距离及姿态信息。本文无人机QR码识别方式大幅度缩小了导航所需布置、调试和维护的工作量,而且只需识别一个二维码对象,数据分析量即大幅度缩小。

二维码识别采用经典的PnP(perspective- n -point)算法^[29],在标准P3P算法执行得到QR码的多组三维空间数据后,将迭代最近点(iterative closest point, ICP)算法进行改进,由摄像头位置反推得到无人机的当前位置。

记C为相机坐标系;K为QR码坐标系,是变电站室内无人机摄像头和IMU融合后的坐标数据;W为世界坐标系,则有

$$k_{WC} = k_{WK} \cdot k_{KC} = R_{WK}(R_{KC} \cdot c + m_{KC}) + m_{WK} \quad (6)$$

式中, k_{WC} 为相机坐标系到世界坐标系的变换; k_{KC} 为相机坐标系到QR码坐标系的变换; k_{WK} 为QR码坐标系到世界坐标系的变换; R_{WK} 、 m_{WK} 分别为QR码坐标系到世界坐标系的旋转和平行变换矩阵; R_{KC} 、 m_{KC} 分别为相机坐标系到QR码坐标系的旋转和平行变换矩阵; c 为坐标系下无人机的三维位置矢量。

为此,假定无人机摄像头与IMU融合后得到的无人机位置为 (x_1, y_1, z_1) ,有 n 个摄像头识别到的QR码位置为 (x_2, y_2, z_2) (x_3, y_3, z_3) \cdots $(x_{n+1}, y_{n+1}, z_{n+1})$,则优化后的无人机位置为

$$\begin{cases} x^* = \frac{1}{n+1} \sum_{k=1}^{n+1} x_k \\ y^* = \frac{1}{n+1} \sum_{k=1}^{n+1} y_k \\ z^* = \frac{1}{n+1} \sum_{k=1}^{n+1} z_k \end{cases} \quad (7)$$

由于引入了多个摄像头数据,因此在不影响正常生产和作业的情况下,提高了无人机的定位精度。

3.3 总体算法流程

总体算法流程如图6所示。在不同摄像头中获取的图像分析QR码的距离后,可获取无人机的位置,通过式(9)可计算出优化后的无人机精确位置。

在实际无人机巡检过程中,考虑可能会产生较大的飞行偏差,为安全起见需要向后台预警并尽快降落;随后需人工干预,判断及分析预警原因,解决导致无人机偏航较大的问题;正常降落后以无人机巢中的精确位姿数据为基础,校准无人机的初始位姿数据,避免累计飞行误差。

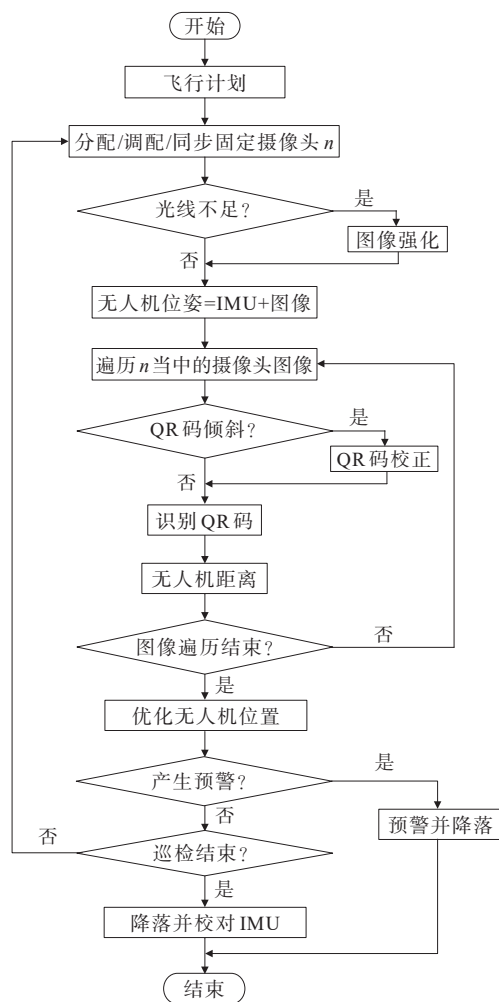


图6 算法流程

Figure 6 Algorithm flowchart

4 实验结果及分析

在中山某变电站选择典型室内环境开展无人机巡检作业。采用的无人机硬件型号为大疆御3,室内导航软件根据本文提出的算法编制;高精度IMU采用爱普生的M-G370系列六轴陀螺仪作为无人机飞行累计误差校正参考,初始校正选择广东的磁偏角为 2.2° ;无人机搭载的IMU型号为MTI 300,输出频率为200 Hz,该设备可得到加速度、角速度及磁强计信息;无人机采用单目相机;室内2个摄像头,分辨率为 $1\ 280 \times 720$;采用Dell Precision 7910服务器进行计算,采用Intel® Xeon® E5-2600 v4处理器,64 G内存,显卡为NVIDIA Quadro M 6000 12 GB,系统环境为Ubuntu 16.04。

室内无人机在变电站内飞行的控制情况如图7所示,可以看出,设备布置较为密集,容错率较低。本文所提多视觉-惯导融合框架及改进的PnP算法有效结合,使得飞行的稳定性和飞行控制精度得到

了大幅度的提升,在实际应用中得到了很好的验证。典型的飞行场景及飞行线路如图8所示,其中黄色线路为去程路径,红色为去程及返程均需要飞行的线路,而蓝色表示返程飞行线路,线路总长度为93 m。



图7 室内无人机飞行及位姿控制

Figure 7 Indoor UAV flight and pose control



图8 室内无人机巡检路线

Figure 8 Indoor UAV inspection route

从图8中可以看到,该场景下主要特点:飞行控制精度要求较高,以满足不规则空间中的自主飞行;光线分布不均匀,因此在无人机飞行过程中,需要针对光照强度对图像进行调整,满足无人机位姿分析的需求。

选择标准ORB-SLAM算法、IMU与摄像头基础融合算法^[26]与本文所提算法进行绝对轨迹的误差比较,设定螺旋上升曲线为期望路径的实际飞行轨迹,如图9所示;计算结果如表1所示,从结果可知,本文所提算法在计算速度上有明显优势,在误差控制和鲁棒性上也具有较好的表现。

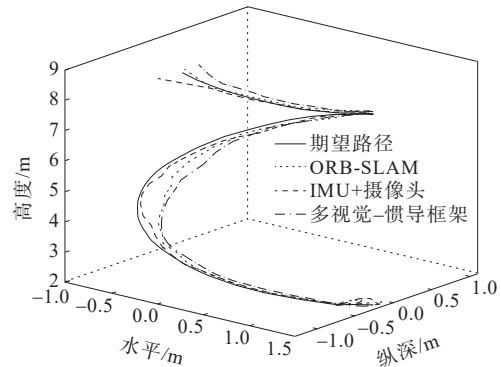


图9 室内无人机飞行轨迹对比

Figure 9 Comparison of indoor UAV flight trajectories

表1 算法绝对轨迹误差对比

Table 1 Comparison of absolute trajectory errors of algorithm

分析算法	最大误差/ cm	最小误差/ cm	平均误差/ cm	误差标准 差/cm	误差中值/ cm	算法执行 时间/ms	飞行时间/ s
ORB-SLAM	36.12	3.71	9.15	5.55	7.92	72.483	622
IMU+摄像头	12.13	0.82	5.79	2.33	5.73	65.329	473
多视觉-惯导框架	9.23	0.78	5.43	2.19	5.48	37.817	395

5 结语

无人机可在三维空间中飞行,与机器人相比,采集巡检数据更为灵活。与室外无人机巡检相比,室内无人机搭载能力有限,难以获取直接的GPS定位信号,飞行精度要求也高。从变电站内的固定摄像头中获取图像数据,将无人机飞行过程中的“客观”位置数据作为无人机搭载摄像头与IMU融合后位姿数据的修正依据。本文针对室内环境对图像进行了强化,而多视觉-惯导融合框架可适应不同型号和不同数量摄像头数据覆盖条件下的无人机位姿数据预估优化。

基于多视觉-惯导融合框架,下一步本文将无

人机巡检工作票与生成式AI深度结合,实现对飞行过程、决策及预警的实时分析与处理,为变电站室内无人机飞行的智能化提供更为有力的支撑。

参考文献:

- [1] 彭明智,许尧,胡永波,等.基于人工智能技术的变电站二次设备智能巡检技术[J].高电压技术,2023,49(增刊1):90-96.
PENG Zhiming, XU Yao, HU Yongbo, et al. Intelligent inspection technology for secondary equipment in substations based on artificial intelligence technology[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(sup 1): 90-96.
- [2] 柯清派,史训涛,袁智勇,等.基于改进遗传算法的变电站巡检机器人路径规划[J].电测与仪表,2023,60(8): 144-149.

- KE Qingpai, SHI Xuntao, YUAN Zhiyong, et al. Route planning for substation patrol robot based on improved genetic algorithms[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(8): 144-149.
- [3] 唐旭辰, 潮铸, 段秦尉, 等. 基于分层测量数据的高压变电站概率负荷预测方法[J]. *中国电力*, 2023, 56(8): 143-150.
TANG Xuchen, CHAO Zhu, DUAN Qinwei, et al. Probabilistic load forecasting method of high voltage substation based on hierarchical measurement data[J]. *Electric Power*, 2023, 56(8): 143-150.
- [4] 杜奇伟, 张超, 韩洪夫. 基于间隔分图的智能变电站运维关键技术研究[J]. *电网与清洁能源*, 2023, 39(7): 67-72.
DU Qiwei, ZHANG Chao, HAN Hongfu. A study on key technologies of intelligent substation operation and maintenance based on bay detail drawing[J]. *Power System and Clean Energy*, 2023, 39(7): 67-72.
- [5] 谷梦瑶, 徐新胜, 何雨辰. 面向变电站机器人巡检的加权嵌套决策树数据质量协同评价方法[J]. *智慧电力*, 2024, 52(9): 65-71.
GU Mengyao, XU Xinsheng, HE Yuchen. Data quality collaborative evaluation method for substation robot inspection using weighted nested decision tree[J]. *Smart Power*, 2024, 52(9): 65-71.
- [6] 李杰, 董林杰, 汤小兵, 等. 变电站二次设备全向巡检机器人精确定位与作业辨识[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(3): 234-243.
LI Jie, DONG Linjie, TANG Xiaobing, et al. Precise positioning and identification of omnidirectional inspection robot for substation secondary equipment[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(3): 234-243.
- [7] 焦嵩鸣, 首云锋, 白健鹏, 等. 变电站巡检无人机分层运动规划方法研究[J]. *系统仿真学报*, 2023, 35(9): 1975-1984.
JIAO Songming, SHOU Yunfeng, BAI Jianpeng, et al. Research on hierarchical motion planning method for UAV substation inspection[J]. *Journal of System Simulation*, 2023, 35(9): 1975-1984.
- [8] 赵伟达, 陈海文, 郭陆阳, 等. 基于YOLO-E与改进OCRNet图像分割的变电站仪表读数自适应识别方法[J]. *电力建设*, 2023, 44(11): 75-85.
ZHAO Weida, CHEN Haiwen, GUO Luyang, et al. Substation meter readings and dial information identification method based on YOLO-E and enhanced OCRNet image segmentation[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(11): 75-85.
- [9] 常俊晓, 应宇鹏, 廖小兵, 等. 基于图像处理的继电保护装置定值自动核对方法[J]. *电测与仪表*, 2023, 35(6): 50-58.
CHANG Junxiao, YING Yupeng, LIAO Xiaobing, et al. The automatic checking method of setting value for relay protection device based on image processing[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 35(6): 50-58.
- [10] 凌刚, 赵希才, 刘千宽, 等. 继电保护智能运维检修标准体系构建研究[J]. *供用电*, 2023, 40(9): 36-42.
LING Gang, ZHAO Xicai, LIU Qiankuan, et al. Research on standard system construction of intelligent operation and maintenance for relay protection[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(9): 36-42.
- [11] 戴志辉, 杨鑫, 耿宏贤, 等. 基于电力物联网的继电保护定值智能运维系统研究[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2023, 35(6): 50-58.
DAI Zhihui, YANG Xin, GENG Hongxian, et al. Intelligent operation and maintenance system for relay protection setting based on power internet-of-things[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2023, 35(6): 50-58.
- [12] 王幸主, 文明浩, 李嘉琪, 等. 双重化继电保护系统可靠性分析方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(17): 168-176.
WANG Xingzhu, WEN Minghao, LI Jiaqi, et al. A reliability analysis method of dual-redundant relay protection systems[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(17): 168-176.
- [13] WANG Y. An efficient algorithm for UAV indoor pose estimation using vanishing geometry[C]//12th IAPR Conference on Machine Vision Applications(MVA), Nara, Japan, 2011.
- [14] 肖洋, 李志强, 程林, 等. 西北电网集中式调相机AVC综合协调控制策略[J]. *发电技术*, 2023, 44(2): 270-279.
XIAO Yang, LI Zhiqiang, CHENG Lin, et al. AVC comprehensive coordinated control strategy of centralized condenser in northwest power grid[J]. *Power Generation Technology*, 2023, 44(2): 270-279.
- [15] WEISS S, ACHELNIK M W, LYNNEN S, et al. Monocular vision for long-term micro aerial vehicle state estimation: a compendium[J]. *Journal of Field Robotics*, 2013, 30(5): 803-831.
- [16] 何一, 张亚妮, 王永生. 超宽带微型无人机数据链传输性能分析[J]. *西北工业大学学报*, 2009, 27(2): 245-249.
HE Yi, ZHANG Yanni, WANG Yongsheng. On the propagation performance of UWB-MAV data links[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2009, 27(2): 245-249.
- [17] 普子恒, 陈志刚, 史星涛, 等. 考虑合成电场影响的换流站直流场巡检机器人路径优化[J]. *高压电器*, 2023, 59(5): 178-184.
PU Ziheng, CHEN Zhigang, SHI Xingtao, et al. Path optimization of dc field patrol inspection robot in

- converter station considering the influence of synthetic electric field[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(5): 178-184.
- [18] AHRENS S, LEVINE D, ANDREWS G, et al. Vision-based guidance and control of a hovering vehicle in unknown, GPS-denied environments[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'09, Kobe, Japan, 2009.
- [19] ABEYWARDENA D, WANG Z, KODAGODA S, et al. Visual-inertial fusion for quadrotor micro air vehicles with improved scale observability[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Karlsruhe, Germany, 2013.
- [20] MIAO C, LI J. Autonomous landing of small unmanned aerial rotorcraft based on monocular vision in GPS-denied area[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2015, 2(1): 109-114.
- [21] PHANG S K, ONG J J, RONALD T C, et al. Autonomous mini-UAV for indoor flight with embedded on-board vision processing as navigation system[C]//IEEE Region 8 International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering (SIBIRCON), Listvyanka, Irkutsk, Russia, 2010.
- [22] CHEN F, CHOPRA I, POTYAGAYLO S, et al. Towards model-free SLAM using a single laser range scanner for helicopter MAV[C]//AIAA Guidance, Navigation, & Control Conference, Portland, OR, United States, 2013.
- [23] CADENA C, CARLONE L, CARRILLO H, et al. Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: toward the robust-perception age[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2016, 32(6): 1309-1332.
- [24] WEISS S, ACHTELIK M W, LYNEN S, et al. Monocular vision for long-term micro aerial vehicle state estimation: a compendium[J]. *Journal of Field Robotics*, 2013, 30(5): 803-831.
- [25] 周克旻, 周蓉, 滕婧, 等. 多标记室内小型无人机定位与姿态估计方法[J]. *计算机工程与应用*, 2019, 55(22): 231-238.
- ZHOU Kemin, ZHOU Rong, TENG Jing, et al. Method of location and attitude estimation for small indoor UAV with multiple markers[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(22): 231-238.
- [26] 王继红, 吴伯彪, 张亚超, 等. 视觉和惯导信息融合小型无人机位姿估计研究[J]. *中国测试*, 2021, 47(11): 134-140+152.
- WANG Jihong, WU Bobiao, ZHANG Yachao, et al. Pose estimation of small UAV based on vision and INS information fusion[J]. *China Measurement & Test*, 2021, 47(11): 134-140+152.
- [27] MUR-ARTAL R, MONTIEL J M M, TARDOS J D. ORB-SLAM: a versatile and accurate monocular SLAM system [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2015, 31(5): 1147-1163.
- [28] 黎萍, 操超超. 适应于弱光环境的 ORB-SLAM 算法[J]. *北京邮电大学学报*, 2024, 47(1): 106-111.
- LI Ping, CAO Chaochao. ORB-SLAM algorithm for low light environment[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2024, 47(1): 106-111.
- [29] 周宁. 基于二维码标记的视觉惯性定位方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- ZHOU Ning. Research on visual-internal localization with two-dimensional code maskers[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.