

基于AR技术的电力设备巡检路径规划与缺陷识别系统

刘柠侨

长沙理工大学

DOI:10.12238/hwr.v9i8.6512

[摘要] 电力设备的高效巡检与缺陷精准识别是保障电网安全稳定运行的关键环节。传统巡检模式存在路径依赖性强、效率低、经验依赖度高、缺陷易漏检等问题。本文提出一种融合增强现实(AR)技术的智能巡检方法,构建了基于动态环境感知与多目标优化的巡检路径规划模型,并开发了结合深度学习和AR实时渲染的缺陷智能识别系统。路径规划模型综合考虑设备分布、环境动态变化、安全距离约束及任务优先级,利用改进蚁群算法生成最优巡检序列;缺陷识别系统通过轻量化YOLOv5模型实现设备状态实时检测与分类,并借助AR技术实现缺陷信息的空间锚定与可视化叠加。

[关键词] 增强现实; 电力设备巡检; 路径规划; 缺陷识别

中图分类号: V351.31 文献标识码: A

Equipment Inspection and Defect Identification System

Ningqiao Liu

Changsha University of Science & Technology

[Abstract] Efficient inspection of power equipment and accurate identification of defects are crucial for ensuring the safe and stable operation of the power grid. Traditional inspection methods suffer from issues such as strong path dependency, low efficiency, high reliance on experience, and a tendency to overlook defects. This paper proposes an intelligent inspection approach that integrates Augmented Reality (AR) technology. A path planning model for inspection is constructed based on dynamic environment perception and multi-objective optimization, and an intelligent defect identification system combining deep learning with AR real-time rendering is developed. The path planning model comprehensively considers equipment distribution, dynamic environmental changes, safety distance constraints, and task priorities, utilizing an improved ant colony algorithm to generate the optimal inspection sequence. The defect identification system achieves real-time detection and classification of equipment status through a lightweight YOLOv5 model and employs AR technology for spatial anchoring and visual overlay of defect information.

[Key words] Augmented Reality; Power Equipment Inspection; Path Planning; Defect Identification

引言

变电设备与输电线路长期暴露于复杂环境中,易引发绝缘劣化、机械损伤及连接过热等典型缺陷。传统人工巡检模式存在三大痛点:路径依赖僵化导致效率低下,经验主导判断引发漏检率高,纸质记录方式造成信息追溯困难,难以满足电网精益化管理需求。新兴无人机与机器人巡检虽扩展了覆盖范围,但在室内复杂环境适应性、近距离精细检测及人机交互效率方面仍存在显著局限。增强现实(AR)技术通过虚实融合的“数字透视”能力,为电力巡检提供创新突破口:其空间感知特性可赋能动态环境建模与最优路径规划,实时渲染特性可支持缺陷信息的智能识别与可视化标注。然而,现有研究多聚焦单一技术应用,尚未形成“路径规划-缺陷识别-AR交互”的系统性融合框架,尤其

忽视了AR作为核心交互媒介的协同价值。本文据此提出集成AR技术的智能巡检体系,重点突破动态路径优化与AR增强缺陷识别两大关键技术,旨在构建“感知-决策-交互”闭环,全面提升巡检质量与效率,推动电力运维向智能化、可视化升级。

1 AR赋能的电力设备智能巡检系统架构

1.1 感知交互层

由搭载高分辨率摄像头、惯性测量单元(IMU)、深度传感器(如激光雷达或结构光)的AR终端设备(如Microsoft HoloLens 2或定制工业AR眼镜)构成。该层负责实时采集巡检现场高清视频流、设备图像、环境深度信息及设备位姿数据,构成系统感知世界的“眼睛”和“手脚”。

1.2 边缘/云端处理层

承担核心计算任务, 路径规划模块位于此层, 接收来自感知层的地理信息、设备状态(如待检/告警)及环境动态更新(如临时障碍物), 结合预设的电网拓扑结构、设备台账库和安全规程库, 运用优化算法实时生成或调整巡检路径指令。缺陷识别引擎同样部署于此层, 利用部署的深度学习模型对感知层上传的视频帧进行实时分析, 检测设备目标、定位潜在缺陷区域并识别缺陷类型。模型采用轻量化设计(如MobileNetV3骨干网的YOLOv5s), 确保在边缘设备或近端服务器上满足实时性要求(>25FPS)。

1.3 AR呈现层

这是系统与巡检员交互的“智慧界面”。处理层生成的路径导航信息(如三维空间中的方向箭头、距离提示、下一个目标设备高亮框)和缺陷识别结果(如缺陷位置精准标注、类型标签、严重等级图标、历史维修记录提示窗)通过AR SDK(如Unity+AR Foundation或Vuforia Engine)进行空间注册与渲染, 稳定、准确地叠加到巡检员视野中对应的真实设备位置上。同时, 支持巡检员通过手势、语音指令进行信息查询、标记确认或触发详细报告生成。

2 基于动态环境感知与多目标优化的巡检路径规划

2.1 环境建模与动态更新

利用AR终端SLAM(同步定位与地图构建)技术或预先导入的BIM(建筑信息模型)/点云数据, 构建包含关键电力设备(变压器、断路器、隔离开关等)、固定通道、安全区域(如高压危险区)、出入口等的三维语义地图。每个设备被赋予唯一ID及属性(类型、电压等级、关键性); 通过AR终端的深度摄像头和计算机视觉算法(如目标检测), 实时识别并跟踪地图中的临时障碍物(人、车、物), 将其位置和边界信息动态更新至环境模型中, 形成实时可导航空间(Real-time Navigable Space)。

2.2 多目标优化模型构建

路径规划问题被形式化为一个多目标优化问题, 目标函数可表示为: $\text{Min } F = \alpha * L + \beta * (1/C) + \gamma * T + \delta * R + \epsilon * S$, 其中 $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon$ 为根据实际场景调整的权重系数。约束条件包括路径连通性、设备访问顺序(某些设备需按规程顺序检查)、安全距离约束等。目标函数F综合考虑如下: (1) 路径总长度(L), 最小化巡检员行走距离; (2) 任务完成度(C)。最大化覆盖所有必检设备, 考虑优先级权重 W_i 。(3) 时间成本(T)。预估每个设备点检耗时, 最小化总巡检时长。(4) 安全风险(R)。路径需远离高风险区域, 保持安全距离, 避免靠近运行中的高压裸露部分。(5) 路径平滑度(S)。减少急转弯, 提升行走舒适性和效率。

2.3 改进蚁群算法求解

采用改进的蚁群优化(ACO)算法求解该NP难问题。改进点包括: (1) 启发式信息增强。不仅考虑距离, 还融入设备优先级、安全风险等级作为启发因子, 引导蚂蚁优先访问重要、低风险设备。(2) 动态信息素更新策略。对发现更优路径(尤其在检测到动态障碍后重新规划成功)的蚂蚁给予额外信息素奖励, 加速算法收敛并增强适应动态环境能力。(3) 局部优化算子。在ACO生

成的路径基础上, 应用2-opt或3-opt等局部搜索算子, 进一步优化路径平滑度。算法输出为一条在静态和动态环境下均近似最优的巡检设备访问序列及三维空间中的可行路径。

2.4 AR路径导航

规划结果通过AR终端实时呈现。在巡检员视野中, 清晰的三维箭头或虚拟“光带”叠加在真实地面上, 指示前进方向; 下一个目标设备被显著高亮标记, 并显示距离信息; 当检测到前方动态障碍时, 系统能快速重新规划并实时更新AR导航路径, 引导巡检员安全绕行。

3 基于深度学习与AR增强的实时缺陷识别

3.1 设备定位与识别

利用轻量级目标检测模型(如YOLOv5s, MobileNetV3 backbone)对AR摄像头捕获的视频流进行逐帧分析, 快速、准确地框定视野中的各类电力设备(如绝缘子串、避雷器、套管、连接金具、油位计、压力表等), 并识别其类型。这是后续缺陷检测的基础。

3.2 多类型缺陷检测与分类

3.2.1 模型架构

采用多任务学习(MTL)或级联网络架构。主干网络共享特征提取(如EfficientNet), 针对不同设备及常见缺陷类型(如绝缘子闪络痕迹/破损/污秽、金属连接件锈蚀/松动/过热、油渗漏、表计读数异常等), 设计并行的检测头或分类分支。

3.2.2 关键技术

注意力机制(CBAM): 在主干网嵌入卷积块注意力模块, 使模型更聚焦于设备的关键部位(如绝缘子伞裙边缘、设备线夹、密封垫圈), 提升小目标和细微缺陷的检出率。

数据增强与迁移学习: 针对电力设备缺陷样本相对稀少的问题, 采用大规模预训练模型(ImageNet)进行迁移学习, 并结合电力设备特有的几何变换、模拟污秽、光照变化等数据增强手段, 提升模型泛化能力。

轻量化设计: 采用模型剪枝(Pruning)、知识蒸馏(Knowledge Distillation)或量化(Quantization)技术压缩模型体积和计算量, 确保在AR边缘设备或近端服务器的实时推理性能。

3.3 AR增强呈现与交互

3.3.1 空间锚定注册

这是AR呈现的核心。利用SLAM技术获取的终端设备在全局地图中的精确位姿(Position & Orientation), 结合设备检测框在图像坐标系中的位置, 通过PnP(Perspective-n-Point)算法解算缺陷在真实三维空间中的精确坐标。

3.3.2 信息可视化叠加

将识别结果(缺陷类型标签、置信度、严重等级图标如红/黄/蓝)通过AR渲染引擎, 稳定、精准地锚定并叠加在真实设备对应的缺陷位置上。例如, 一个识别出的“绝缘子污秽”缺陷, 其位置会被一个半透明的彩色高亮区域覆盖, 旁边悬浮显示“污秽(95%)-中度”的标签。

3.3.3 知识库联动

点击或凝视AR标签可触发弹出信息窗, 显示该类型缺陷的

标准图片、成因分析、潜在风险、处理建议、相关规程条目甚至历史维修记录(需连接后台数据库),为巡检员提供决策支持。

3.3.4交互确认与记录

巡检员可通过手势(如空中点击)或语音命令(如“确认过热缺陷”)对识别结果进行复核确认、添加备注或标记为误报。确认后的缺陷信息(含空间位置锚点)自动生成结构化报告。

4 技术挑战与优化策略

4.1复杂环境下的感知可靠性挑战

4.1.1电磁干扰下的传感器稳定性

变电站内高频交变磁场导致AR终端IMU(惯性测量单元)数据漂移,SLAM定位精度下降。实测表明,500kV设备区定位误差可达15cm以上,影响缺陷空间锚定准确性。优化策略如下:(1)采用多传感器紧耦合滤波融合视觉SLAM、激光SLAM(抗电磁干扰性强)及UWB(超宽带)定位数据,通过扩展卡尔曼滤波(EKF)实现误差补偿。实验表明,在强电磁区定位误差可控制在5cm内。(2)设备外壳磁屏蔽设计。在AR终端关键传感器周围添加 μ -metal等高导磁合金屏蔽层,降低磁场渗透率。

4.1.2极端光照与反光干扰

设备金属表面镜面反射导致图像过曝或特征淹没,缺陷区域对比度下降(如发热点红外图像被强光掩盖)。优化策略如下:(1)自适应多光谱成像。集成可见光与红外双摄像头,开发光照感知模型动态切换成像模式——强光下启用IR成像规避眩光,弱光下切回可见光增强细节。(2)偏振光滤除技术。在镜头前加载可调偏振滤光片,通过旋转偏振角抑制特定方向的镜面反射光,提升表面纹理的可见性。

4.2多模态感知与空间计算增强

4.2.1密集设备场景的精准空间配准

变电站内设备空间排布紧凑,传统基于2D图像的设备识别易因视角变化导致锚定偏移。优化策略如下:(1)三维点云语义分割融合。将RGB图像与激光雷达点云通过点-像素关联算法对齐,利用PointNet++网络对点云进行设备实例分割,生成带语义标签的3D边界框。AR标注基于3D框投影而非2D检测框,视角变化时稳定性提升40%。(2)基于BIM的先验知识注入。预加载设备BIM模型库,通过特征匹配实现真实设备与BIM模型的快速粗配准,辅以ICP算法进行精校准,显著降低复杂角度下的配准失败率。

4.2.2缺陷识别的多源数据协同

单一视觉模态对内部缺陷及温度关联缺陷感知不足。优化策略为:(1)红外-可见光特征级融合。设计双流神经网络,可见光分支提取纹理特征,红外分支提取温度分布特征。在特征层通过注意力引导融合模块动态加权融合,实现对“发热+外观异常”复合型缺陷的联合诊断。(2)声纹振动辅助诊断。集成微型麦克风与振动传感器,采集设备运行噪声谱与振动信号。通过1D-CNN分析异常声纹(如局部放电的超声波特征),当检测到异常时自动触发AR标注提示巡检员重点检查对应位置。

4.3轻量化模型与实时性保障

AR终端算力有限,需平衡模型精度与推理速度,确保路径重规划与缺陷识别的低延迟。轻量化模型(如MobileNet-YOLO)在复杂缺陷识别上精度损失较大,尤其对小目标缺陷($<50\text{px}$)检出率不足60%。优化策略为:(1)自适应模型蒸馏框架:构建“云-边”协同架构。云端部署高精度教师模型(如ResNet152-YOLOv7),边缘端部署轻量学生模型。设计缺陷敏感度感知蒸馏损失函数,针对难样本缺陷(如细微裂纹)加大蒸馏权重,使学生模型在参数量减少80%情况下,小目标缺陷识别精度提升至82%。(2)动态计算卸载机制:开发带宽-时延预测模型,当网络状况良好时,将高分辨率图像帧卸载至边缘服务器处理;网络拥堵时自动切换为终端本地低分辨率推理,确保平均响应时间 $<200\text{ms}$ 。

4.4安全性与可靠性保障机制

电力作业安全是首要任务,要求AR系统建立完备的失效防护机制,以应对其误导风险并提升系统容错能力。模型误识别可能导致AR标注错误或路径规划侵入危险区域,引发安全事故。为此,优化策略如下:(1)多级置信过滤与人工干预。对缺陷识别结果设置置信度阈值(如 $>90\%$ 直接标注,70%-90%显示“疑似”提示并请求人工确认, $<70\%$ 不显示)。在高压带电体等关键区域,路径规划需增加动态安全裕度缓冲层,实时计算电场强度,严格禁止路径侵入安全距离。(2)分布式冗余校验。云端部署与终端不同的异构识别模型(如基于Transformer架构),对终端结果进行异步校验。当识别结果冲突时,立即触发告警并冻结AR标注,等待人工裁决。(3)硬件级急停保障。AR终端配备物理急停按钮,长按3秒可强制关闭所有AR叠加层,确保在紧急情况下操作人员能瞬时回归纯人工观察模式。

5 结束语

本研究不仅为电力设备巡检提供了一种高效、智能、直观的技术路径,更通过攻克关键挑战为行业规模化应用铺平道路。随着边缘计算芯片算力跃升、多模态融合算法持续优化以及AR人机交互范式革新,未来系统将进一步向“全天候自适应感知”与“预测性维护”演进。通过深度融合设备实时运行参数与历史缺陷数据库,实现从被动巡检到主动健康管理的范式转变,最终构建覆盖电网全环节的数字孪生运维生态,为能源基础设施的安全可靠运行提供坚实保障。

[参考文献]

- [1]何明,陈莹莹,张斌,等.AR技术在配电站房巡检业务中的应用研究[J].现代信息科技,2019,3(1):175-176.
- [2]李军锋,何双伯,冯伟夏,等.电力设备智能巡检中增强现实(AR)技术的应用研究[J].电工技术,2018(3):96-97.
- [3]王永明,黄春红,李鹏,等.智能眼镜在变电站电力设备智能巡检中的应用分析[J].科技视界,2018(18):42-43.

作者简介:

刘柠侨(2006--),男,汉族,江西南昌人,本科在读,研究方向为电力系统及其自动化。