

工业维修现场智能管理系统的集成穿戴设备与视频监控 平台研发及应用

王亮 干战强 许创 廖先超

长龙（杭州）航空维修工程有限公司，浙江省杭州市，311200；

摘要：工业智能化进程推进，维修现场管理对实时性，安全性以及效率的要求逐步提升，传统管理模式存有信息滞后，监管盲区，人机协同效率低等状况，本文针对这些痛点，给出了面向维修现场管理的集成式穿戴设备以及智能视频监控平台的研发计划，通过融合物联网，人工智能以及视频分析技术，创建起数据采集，实时监控，智能预警为一体的系统架构，研发内容包含穿戴设备的硬件集成，多源数据融合算法以及视频智能分析模型，并在典型工业场景当中实施了应用检验，结果表明，这个平台可以明显改善维修现场的管理效率，削减安全事故发生率，给工业维修数字化转型赋予了有力支撑。

关键词：维修现场管理；集成式穿戴设备；智能视频监控；系统研发；工业应用

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 05. 047

引言

随着工业4.0与智能制造发展，设备变得越发复杂，传统的依靠人工巡查，用纸笔记录的维修现场管理模式已经无法适应，存在信息延迟，监管不全面等弊端。但是穿戴式智能设备和视频分析技术的出现带来了转机，它们结合起来可以打造智慧化的管理方式，不过现在这些技术在多设备集成，数据处理等方面还存在一些难题，所以做这方面的研发应用研究很有理论意义和实际意义。

1 研发背景与意义

1.1 行业需求驱动

工业设备维修现场管理困难重重：老技术人员依存度高，人工巡检耗时长且主观性强，维修决定慢，传统形式下非计划性停机占设备总故障时长的30%以上，极大干扰了生产连续性，高空作业，带电操作这些高危领域实时监管很难，很容易出现保护不够，操作不规范等问题，安全隐患突出，工业物联网促使下^[1]，很多设备数据迫切要高效整合并深入分析才能做到及时洞察，预测性维修，传统模式显然不足，集成式穿戴设备与智能视频监控平台的开发目的在于把技术融为一体，实现实时监测，智能判断和安全高效经营，从而促使维修现场经营朝着主动预防方向发展^[2]。

1.2 现有技术瓶颈

当下维修现场佩戴设备功能比较单一，缺少多传感器整合，无法做到同时收集数据，续航时间不够长，防护水平低，不适合复杂的工业环境，视频监控系统重视

事后录像，缺少即时分析，要依靠人工来判定违规行为和异常状况，十分低效，深度学习在视频分析方面也碰上麻烦，复杂光照和遮挡情况下的识别准确率问题，即时性与耗费计算资源的矛盾，穿戴设备同视频系统之间数据交互受限制，缺少统一的数据规范和融合框架引发信息孤立^[3]，不能做到有效的闭环管理，技术问题成为智慧化维修管理施行的主要难题，必须通过系统研发予以攻克。

1.3 研究价值与创新点

该研究创建起一种结合穿戴设备同智能视频的跨模态数据管理方法，给维修场景里的多源异构数据融合分析打开新道路，具体实施成果包含：一、做到工业级防护并保证长时间续航的模块化设计，整合生理指标监测^[4]，环境传感以及数据通信功能；二、研发依靠时空联系的融合算法，提升复杂环境下的异常识别精确度；三、形成“端-边-云”协同架构，改良数据处理流程效率，研究成果直接助力电力，石化和制造领域的维修管理智能化转型，明显加快工业维持进程，加快有关行业数字化更新，产生高经济效益和社会价值^[5]。

2 系统架构设计

2.1 整体架构框架

系统采取“感知-网络-平台-应用”四层架构，感知层借助集成式穿戴设备（包含多种传感器和通讯模块）以及智能视频监控（高清摄像头搭配边缘计算单元），可以做到对人员状况，环境参数和现场画面的即时采集，网络层采用5G，Wi-Fi等通讯技术，并且联合边缘计算

预先处理视频数据,从而保证传输效率,平台层是关键部分,依靠数据中台把各种来源的数据加以融合,利用算法引擎达成智能分析和预测,而且通过业务管理模块给予权限和服务,应用层创建实时监测,智能警报等功能,支持 Web 和移动端交互,包含维修全阶段的管理。

2.2 集成式穿戴设备硬件设计

硬件使用安全帽以及智能手环做为载体,内置九轴传感器,定位,骨传导语音单元,完成动作捕捉及通信导航功能,安全帽配备的摄像头支持高清拍摄,并且可以实现自动对焦,手环集成了各种生理和环境传感器,可以满足健康监测和环境感知的需求,采用低功耗的 ARM 芯片以及高效的电源管理,可以达到 8 个小时的续航时间,可以支持 5G/Wi-Fi 双模通信以及蓝牙应急通信,外置的壳子是 IP67 级别的防护,适用于较为复杂的工业环境。

2.3 智能视频监控平台的软件架构设计

平台依托微服务和容器化技术,扩展性强,主要包含视频预处理模块,做到多路视频实时接入并加以改良,智能分析引擎采用深度学习算法,达成行为识别,设备状态检测以及异常预警,可在边缘侧迅速推理,数据融合模块关联穿戴设备数据,形成多维评价模型,可视化界面给予全流程监控和追溯功能,平台通过开放 API 同企业 ERP, MES 系统对接,冲破数据壁垒,做到业务协同。

3 关键技术研发

3.1 多传感器数据融合技术

为了应对维修现场多源数据的协同分析难题,开发了基于时空对齐的多传感器数据融合技术,先创建统一的时间戳同步机制,通过硬件时钟同步和软件插值算法,保证穿戴设备各传感器(惯性,生理,环境)数据以及视频流的时间同步,时间同步误差控制在 50ms 以内,按照不同种类数据的特性,规划分层融合架构,在数据层,利用卡尔曼滤波算法融合惯性传感器数据,去除运动噪声,改善姿态解算精度,姿态识别准确率可以达到 95%以上,在特征层,用深度自编码器提取生理数据和环境数据的隐含特征,形成多维特征向量,在决策层,采取 D-S 证据理论,联合维修场景知识图谱,对多源特征展开综合决策,做到人员疲劳状况评判,环境风险评估等。以人员高空作业为例,惯性传感器检测到异常姿态(身体失衡),同时心率传感器数据上升,系统快速判断为高危状态并预警,相较于单一传感器检测,误报率降低 40%。

3.2 智能视频分析算法优化

结合工业维修现场复杂场景对智能视频分析算法进行针对性优化。在目标检测上使用 YOLOv8 算法做基础模型,并加入注意力机制和跨尺度特征融合模块,能够更好的对小目标如维修工具、仪表指针等进行检测,在安全帽佩戴检测场景上将小目标检测精度提升到 92%,针对复杂光照下识别的问题提出一种基于动态阈值的图像增强算法,并且通过红外与可见光图像融合的方法达到全天候的场景覆盖效果,在夜间或者强反射光情况下,对异常行为识别准确率提升 30%。对于维修操作流程规范性的检测,设计了基于时空图卷积网络(ST-GCN)的动作序列分析模型,构建操作动作的时空依赖关系,判断维修步骤是否合规,在电气设备维修场景中,可以自动检测“验电-接地-挂牌”等标准流程,流程违规检测准确率 90%以上。为了平衡算法的实时性和准确性,设计了模型轻量化压缩技术,采用知识蒸馏、量化剪枝的方法,将深度学习模型的参数量减少 70%,保证模型在边缘计算节点上的实时推理(推理速度 $\geq 30\text{fps}$)。

3.3 低功耗与系统集成技术

集成式穿戴设备研发里,低功耗设计是主要难题,通过硬件和软件协同改善,达成了设备的长时间续航,硬件上,采用动态电压频率调整(DVFS)技术,按照任务负载自动调节处理器功耗,选取低功耗传感器,像休眠模式电流小于 $1\mu\text{A}$ 的环境传感器,而且设计传感器分时唤醒机制,不必要的时候关闭一些传感器,软件方面,开发自适应功耗管理算法,依照网络品质和数据重要性动态改变采样频率和传输速率,比如在网络堵塞的时候,把非实时环境数据的采样频率从 10Hz 降到 1Hz,保证关键数据(人员生命体征)的传输优先级。实测得知,在 50%时间视频录制,30%时间数据传输的情况下,续航时长可达 10 小时,满足全天作业的需求。系统集成方面,创建穿戴设备与视频平台的数据交互协议,明确统一的数据格式与接口标准,达成生理数据,姿态数据与视频帧的精准对齐,开发设备管理中间件,做到多品牌,多型号穿戴设备的接入与管理,解决异构设备的兼容问题,系统可支撑 3 类穿戴设备,5 种视频监控设备的集成应用。

4 应用案例分析

4.1 案例背景与实施过程

选取某大型石化企业的设备维修现场为应用案例,该企业下属炼化装置众多,设备类型繁杂,维修工作频次高,传统的管理方式存在安全隐患多、维修效率低等

不足之处,项目实施分成三个阶段,第一阶段依照现场需求制作集成穿戴设备,给维修人员发放智能安全帽和手环,在重点设备区域布置智能视频监视点,一共安装高清摄像头 32 个,边缘计算节点 8 个,第二阶段创建智能视频监控平台,把企业现有的安防体系及设备经营体系衔接起来,做到数据互通,第三阶段执行系统联调并开展人员培训,针对石化行业的特殊状况,像易燃易爆的环境,受限空间作业之类的,改良算法模型,增添可燃气体浓度监测,防静电服穿戴监测这样的功能模块。系统试运行周期为 6 个月,包括装置检修、日常维护等场景,共采集维修作业数据 12 万条,视频数据 2T B。

4.2 应用效果与价值分析

系统应用之后,维修现场管理效率和安全性得到了明显改善,在效率上,借助穿戴设备即时采集维修数据并传送到平台,维修工单处理时间缩减了 40%,故障定位时间平均少了 25 分钟,非计划停机时间下降了 28%,智能视频分析功能可做到维修操作的即时指导,新手维修人员的作业耗时比传统模式少 35%,在安全管理方面,系统对未戴防护面罩,超时受限空间作业等违规行为的即时识别率达到 90%以上,预警响应时间小于 5 秒,安全隐患整改效率提升了 60%,试运行期间该企业维修现场安全事故发生率同比减少了 45%。系统通过对历史数据加以分析之后,创建起设备故障预测模型,对于压缩机振动异常检测来说,预先发出警报的准确率达到 85%,这给预测性维修赋予了数据方面的支撑,就经济效益而言,这个企业通过系统的运用,每年缩减的维修费用大约为 300 万元,设备综合效率(OEE)提升了 12%,而且,系统做到了对维修过程的数字化存档,为后面工艺改进以及人员培训给予了数据上的积累,促使企业维修管理朝着智能化方向转变。

5 结论与展望

5.1 研究结论

本研究针对工业维修现场管理的实际需求,开发出集成式穿戴设备以及智能视频监控平台,利用技术融合与系统集成的方式,形成了“感知-分析-决策-执行”的智慧化管理闭环,通过研究发现,集成式穿戴设备凭借多传感器融合设计,做到了对维修人员状态及其作业环境的全方位感知,设备的续航能力和防护性能符合工业现场的需求,智能视频监控平台依靠深度学习算法改良,改善了复杂场景下的异常识别水平,同穿戴设备的数据融合分析又加强了管理决策的精确度,应用实例显

示,该系统在改善维修效率,巩固安全经营等方面有着明显的成效,给工业维修现场的数字化转型给予了可行的技术途径。

5.2 未来展望

尽管该系统在现实应用场景里获得了较好的应用成果,但以后还是可以从以下几个方面加以改善,从技术角度来讲,探寻人工智能大模型同边缘计算的融合途径,改善多场景泛化能力,做到更准确的故障预测以及维修策略建议,在硬件层面,促使穿戴设备朝着更小体积,更低能耗的方向发展,探讨柔性电子技术的应用情况,以加强穿戴的舒适感受,在应用层面,扩展该系统在新能源,航空航天等行业中的适用范围,塑造跨越行业的维修经营标准体系。而且,5G-A 和卫星通信技术的发展,可研究偏远地区或特殊环境下的远程维修协作方式,做到“专家资源-现场作业”的高效协同,从而更好地发挥智能系统的应用效能,未来,集成式穿戴设备和智能视频监控技术的深度融合,会促使维修现场管理朝着全场景感知、全流程智能、全要素协同的方向不断发展。

参考文献

- [1] 屈波. 工程机械液压系统故障的现场检测与诊断探究[J]. 液压与气动, 2012, (06): 116-118.
- [2] 徐华平. 搭建视频监控与电子监察综合平台[N]. 中国纪检监察报, 2009-08-05(001).
- [3] 饶晓明. 微机智能仪器现场维修初探[J]. 计算机应用研究, 1988, (03): 20-21.
- [4] 高建刚, 程金彪, 高自华, 等. 基于国产工业软件的智能硫化系统的研发及应用[J]. 智能制造, 2024, (03): 88-93.
- [5] 高昕. 工业机器人视觉识别系统研发及应用. 宁夏回族自治区, 一工机器人银川有限公司, 2023-10-08.

作者简介: 王亮(1989.7-), 男, 汉族, 陕西西安人, 本科, 学士学位, 中级工程师, 专业: 飞行器动力工程, 研究方向: 航空器维修。

作者简介: 干战强(1993.11-), 男, 汉族, 浙江省台州市温岭人, 中级工程师, 工学学士, 研究方向: 航空器维修。

作者简介: 许创(1982.2-), 男, 汉族, 江苏宿迁人, 本科, 中级工程师, 专业: 机械工程自动化, 研究方向: 航空器维修。

作者简介: 廖先超(1989.3-), 男, 汉族, 湖北荆州人, 本科, 中级工程师, 专业: 机械工程自动化, 研究方向: 航空器维修。