

Visual Positioning and Equipment State Recognition Method for Nuclear Power Plant Inspection Robot

Chengxiang Jiang

Daya Bay Nuclear Power Operation Management Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

Nuclear power plant inspection serves as a critical component in ensuring the safe and stable operation of nuclear facilities. Traditional manual inspections, constrained by radiation environments and operational intensity, suffer from inefficiency, safety deficiencies, and significant subjectivity. Intelligent inspection has thus become an inevitable trend in industry evolution. This paper addresses the unique inspection scenarios in nuclear power plants by integrating visual positioning and pattern recognition technologies. It systematically analyzes the core requirements for visual positioning and equipment status identification in inspection robots, developing a tailored approach for complex nuclear environments. The methodology optimizes image preprocessing, positioning algorithms, and status classification models to overcome challenges posed by radiation, dust, and unstable lighting conditions. This research provides theoretical support and methodological references for the intelligent upgrading of inspection robots, enhancing automation and precision in nuclear power plant inspections to ensure safe and efficient operations.

Keywords

nuclear power plant; inspection robot; visual positioning; equipment status identification; intelligent inspection

面向核电厂巡检机器人的视觉定位与设备状态识别方法

江承祥

大亚湾核电运营管理有限公司，中国·广东深圳 518000

摘要

核电厂巡检事项为保障核安全平稳运转的关键环节，传统人力巡检受辐射环境、作业强度等要素制约，存在效率低下、安全性不足、主观性明显等弊病，智能化巡检业已成为行业演进必然趋势。本文针对核电厂特殊巡检情景，联合视觉定位与模式识别相关技术，拆解巡检机器人视觉定位与设备状态辨识的核心需求，设计一套适配核电厂繁复环境的视觉定位与设备状态辨识方法，优化图像预处理、定位算法及状态分类模型，解决传统方式在核电厂辐射、粉尘、光照不稳定等情景下的适配性难题，为核电厂巡检机器人的智能化升级提供理论支撑与方法参照，助力提升核电厂巡检的自动化、精准化程度，保障核电厂安全高效运作。

关键词

核电厂；巡检机器人；视觉定位；设备状态辨识；智能化巡检

1 引言

核电厂作为清洁能源供给的重要载体，其运行安全性涉及公共安全与生态环境，巡检工作作为核电厂安全防控的关键手段，需对反应堆、管道、阀门、仪表等核心设备实施常态化、全方位监测，及时察觉设备异常与安全隐患。传统核电厂巡检主要依靠人工落实，巡检人员需步入高辐射、高温、空间狭小的危险区域，长期作业不但会对人体健康产生严重危害，还易于因疲劳、操作差错引发巡检漏检、误检，难以契合核电厂精细化、常态化巡检需求^[1]。

【作者简介】江承祥（1987-），男，中国福建南平人，本科，工程师，从事核电运行研究。

2 相关理论与技术基础

2.1 核电厂巡检机器人系统组成

核电厂（Nuclear Power Plant）又称核电站，是利用铀或钚的核裂变反应产生热能，驱动汽轮机组发电的设施，主要堆型包括压水堆、沸水堆、重水堆等。其燃料消耗量仅为同等规模火电厂的百万分之一，核心设备包含主泵、稳压器、蒸汽发生器和安全壳。核电厂巡检机器人系统为一个集成多种功能模块的复杂系统，核心围绕视觉定位与设备状态辨识功能，由移动平台、视觉感知模块、控制系统、通信模块及数据处理模块构成。移动平台作为机器人的运动载体，需适配核电厂狭窄通道、高低落差等复杂地形，具备抗辐射、防尘、防水等特性，可实现自主移动与路径调控；视觉感知模块为实现视觉定位与设备状态辨识的核心，主要由工业相

机、镜头、红外传感器等构成,负责收集巡检场景的图像信息与环境数据,为后续定位与辨识提供原始数据支撑。

2.2 视觉定位相关技术基础

特征点依托的定位方法借助图像里角点、边缘、纹理等特征点的提取操作,和预设参考图像当中的特征点实施匹配动作,相机标定参数被用来联合计算机机器人的空间方位情况,该方法具备计算量处于较小范畴、实时性呈现强劲态势的优势特征,场景特征具备明显特性的巡检环境是其适用之处;场景模型依靠的定位方法则借助巡检场景三维模型的构建工作,把实时收集得到的图像和三维模型开展匹配事宜,精准定位得以达成,该方法定位精度处于较高水平,但场景模型完整性方面的要求较为严苛,计算复杂程度呈现相对较高的状态。

2.3 设备状态识别相关技术基础

传统模式识别手段通过人工方式进行特征提取算子的设计工作,设备图像内形状、颜色、纹理等特征被提取出来,支持向量机、决策树等分类算法被结合运用以实现设备状态的分类任务,简单场景条件下的设备识别效果在该手段下较为良好,但核电厂复杂场景中设备出现的变形现象、遮挡情况、光照产生的变化等状况,该手段的适应能力较差,泛化能力呈现较弱态势。深度学习手段通过神经网络模型的构建过程,设备图像的特征提取以及状态分类工作得以自动完成,特征提取算子无需人工进行设计,抗干扰能力以及泛化能力更强的特点使其具备,核电厂复杂巡检场景下的设备状态识别工作是其适用范畴。

3 核电厂巡检场景分析与需求拆解

3.1 核电厂巡检场景特殊性分析

核电厂巡检场景同普通工业巡检场景相比较,特殊性呈现显著状态,这些特殊性对视觉定位以及设备状态识别方法的设计方向起到直接决定作用,常规方法难以适配。首先,强辐射环境存在于核电厂巡检场景之中,巡检机器人的视觉感知模块以及电子元件需要具备较强的抗辐射能力,同时辐射会对图像采集工作造成一定程度的干扰,图像出现噪声、模糊等问题,定位以及识别效果受到影响。其次,核电厂巡检区域光照条件呈现复杂态势,部分巡检区域属于密闭空间,光照处于不足状态,部分区域则受外界光线反射的影响,光照强度呈现不均匀状况,设备图像出现明暗不均、阴影等问题,特征提取以及匹配的难度得以增加^[2]。再次,核电厂巡检区域粉尘数量较多,设备表面容易附着粉尘,采集到的设备图像清晰度出现下降情况,设备关键特征被遮挡,设备状态识别的准确性受到影响。

3.2 视觉定位与设备状态识别需求拆解

巡检机器人在实时性层面,需于移动进程当中对视觉定位实施实时完成,将移动路径进行快速调整操作,对巡检效率予以确保,使机器人因定位滞后造成碰撞设备、偏离巡检路线的状况得以避免。定位方法在抗干扰能力方面,可对

辐射、粉尘、光照变化等场景干扰进行抵抗,对于图像质量产生下降的情形下,依然对较高的定位精度加以保持,让定位功能的稳定性获得确保。设备状态识别需求主要涵盖识别准确性、泛化能力、实时性这三个核心维度。在识别准确性方面,可对核电厂各类核心设备的运行状态实施精准识别,将设备正常、异常、故障等状态进行准确区分,使误判、漏判现象得以规避,给巡检人员供给可靠的决策依据。识别方法于泛化能力方面,需对核电厂不同巡检区域、不同类型设备进行适配,可对设备遮挡、变形、粉尘附着等复杂状况进行应对,同时可对不同光照、辐射强度下的图像采集场景加以适应,具备较强的适应性能。在实时性方面,需对设备图像的处理、特征提取与状态分类进行快速完成,对识别结果实施实时输出,使能够及时察觉设备异常、发出预警信号得以保障,对巡检工作的及时性进行维护。

4 面向核电厂巡检机器人的视觉定位方法设计

4.1 视觉定位总体方案设计

借助视觉感知模块的工业相机与红外传感器,对巡检场景的实时图像信息进行采集作业,同时对机器人的初始位置与运动参数加以记录;其次,对采集的原始图像开展预处理举措,将辐射、粉尘、光照变化等因素带来的干扰进行消除,使图像质量得以提升;再次,从预处理后的图像里对特征点进行提取操作,与预设参考图像库中的特征点实时匹配,对有效匹配点进行筛选,将错误匹配加以排除;然后,把相机标定参数与有效匹配点进行结合,通过定位算法对机器人的实时空间位置坐标进行计算,同预设巡检路径开展对比;最后,依据定位偏差情况,通过控制系统对机器人的移动路径实施调整,实现定位校正操作,让机器人能够精准抵达指定巡检点位,将巡检任务进行完成。

4.2 图像预处理优化设计

图像去噪层面,针对辐射和粉尘造成的图像噪点,运用自适应去噪算法,让中值滤波与高斯滤波的长处相契合,既可以对图像中的随机噪点实施有效剔除,又能够对图像中的特征点信息加以留存,防止出现因去噪而造成的特征遗失状况。图像增强范畴,针对光照不均衡形成的图像明暗差别,借助直方图均衡化算法对图像的灰度分布作出调整,使图像的对比度得以提升,让设备和背景的边界变得更为清晰,给特征点提取工作带来便利。图像校正领域,针对相机镜头畸变与图像采集角度偏差产生的图像失真现象,把相机标定参数结合起来,运用几何校正算法对图像开展畸变校正以及角度校正操作,保证图像信息同空间位置信息存在对应关系,让定位计算的精准度获得提升^[3]。通过上述优化构造,对核电厂复杂场景当中的图像质量实施有效改良,让预处理之后图像的可用程度得以增强。

4.3 视觉定位算法优化与实现

特征点匹配环节引入特征点描述子优化算法,对所提取的特征点进行描述,使特征点的区分程度得到增强。同时,

采用随机抽样一致性算法对有效匹配点进行筛选,把错误匹配以及冗余匹配排除出去,让特征点匹配的准确概率得以提高。定位计算方面,将相机内参和外参相结合,对定位计算模型进行优化,使计算流程得到简化,让计算量有所减少,让定位计算的速度获得提升。同时,引入误差补偿机制,对定位过程中产生的系统误差和随机误差进行补偿,使定位精度得到提升。通过算法优化,让视觉定位方法可以和核电厂复杂巡检场景相适配,在对定位精度进行保证的情况下,满足实时性方面的需求,让巡检机器人的精准自主定位得以实现。

5 面向核电厂设备的状态识别方法设计

5.1 设备状态识别总体方案设计

借助巡检机器人的视觉感知模块,对核电厂各种设备的实时图像信息进行采集,将图像预处理技术结合起来,对设备图像质量进行优化。接下来,采用设备目标分割算法,从复杂背景图像里把设备区域分离出来,将背景、粉尘、杂物等干扰因素排除掉,获取精准的设备图像;再往后,对分割之后的设备图像开展特征提取工作,获取设备的形状、颜色、纹理等关键特征信息,构建设备状态特征向量;随后,把特征向量输入到训练好的设备状态分类模型当中,实现对设备运行状态的分类判断;最后,将设备状态识别结果实时传送到后台监控中心,若识别出设备存在异常情况,及时发出预警信号,提醒巡检人员进行处理。

5.2 设备目标分割与特征提取

于特征提取维度,融合核电厂设备所具备的特性情况,施行混合特征提取的相关方式,对设备的浅层特征以及深层特征予以同时考虑。设备浅层特征主要涵盖设备形状、设备颜色这类直观性的特征内容,凭借传统特征提取算子实施获取操作;设备深层特征主要包含设备纹理、设备结构等细节方面的特征信息,通过深度学习模型自主开展提取工作。与此同时,针对所提取到的特征信息实施优化筛选的举措,剔除冗余特征成分,留存能够体现设备状态改变情况的关键特征内容,搭建简洁且有效的设备状态特征向量体系,进而提升后续状态分类工作的效率以及准确性水平。除此之外,针对设备出现粉尘附着状况、发生变形现象等情形,对特征向

量开展归一化处理操作,增强特征所具备的鲁棒性能,提升识别方法的抗干扰能力程度。

5.3 设备状态分类模型训练与优化

在模型训练领域,收集核电厂各个类型设备的正常状态样本、异常状态样本、故障状态样本等,构建设备状态样本资源库,对样本实施预处理操作以及标注工作,划分出训练集、验证集和测试集;运用梯度下降算法,对模型进行迭代训练,调整模型相关参数,让模型可以准确学习设备不同状态之间的特征差异;在模型优化层面,引入正则化技术和数据增强技术,提升模型的泛化能力,规避模型出现过拟合现象,同时针对核电厂设备样本数量有限的问题,采用迁移学习方法,借助已完成训练的模型参数,减少模型训练工作的任务量,提升模型的训练效率以及分类准确性。通过开展模型训练和优化工作,使分类模型能够精确识别核电厂各类设备的运行状态,输出可靠的识别结果,契合设备状态识别方面的需求。

6 结论

本文以核电厂巡检机器人的视觉定位以及设备状态识别问题为核心要点,结合核电厂巡检场景所具有的特殊性表现,拆解视觉定位和设备状态识别的核心需求内容,设计出一套适配于核电厂复杂场景状况的视觉定位与设备状态识别方法体系。通过优化图像预处理流程环节、改进视觉定位算法内容以及设备状态分类模型结构,解决常规方法在核电厂强辐射环境、多粉尘环境、光照不稳定环境等场景下出现的定位精度偏低问题、识别稳定性较差问题、抗干扰能力较弱问题等,达成巡检机器人的精准定位效果以及设备状态的精准识别成效,为核电厂巡检机器人的智能化升级进程提供理论层面的支撑内容以及方法层面的参考依据。

参考文献

- [1] 沈云海 黄捷 唐涌涛 蔡鼎阳 余小.核电厂可视化智能巡检技术研究[J].科技世界,2022,8:22-25
- [2] 杨再恩 李文骥.基于机器视觉的工业机器人智能抓取系统设计[J].科技与创新,2023(24):29-31
- [3] 李会玲,赵辉;张风刚.基于机器视觉检测设备的多功能应用分析[J].中国设备工程,2023(24):164-166