

图像处理在安全壳缺陷检测中的应用

石晓伟

(中科华核电技术研究院北京分院 北京 100086)

摘要: 由一台轮式负压吸附型爬壁机器人携带一台高清摄像机和无线发射器在安全壳外柱面移动,安装在爬壁机器人上摄像机将拍摄的安全壳墙面视频信息经由无线发射器发送至位于地面的无线接收终端,无线接收终端再将视频信息传送至上位机。安装在上位机上的监控测量处理软件系统对接收到的图像进行分析处理和显示,并将存在缺陷的图像发送至缺陷测量模块进行缺陷信息测量,最终测量所得到的缺陷参数和对应图像会存入后台数据库进行存储管理,方便在线或离线浏览历史数据,监测安全壳外壁缺陷的动态变化情况。

关键词: 爬壁机器人;负压吸附;图像处理;缺陷检测;无损检测

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Application of image processing in nuclear power plant containment surface defect detection

Shi Xiaowei

(China Nuclear Power Technology Research Institute Beijing Division, Beijing 100086, China)

Abstract: A wheeled negative pressure adsorption climbing robot carrying a high definition camera and a far distance wireless transmitter moves smoothly on the nuclear power plant containment wall. When the robot moves on the containment wall, the camera fixed on the robot sent the wall video information back to the receiver at the bottom of the containment wirelessly, then the receiver transfers the video information to the local PC. The video will be analyzed, processed and displayed by the monitoring and measuring processing software system installed on the PC, and then the image which contains defect information will be transferred to the defect measure module for defect measuring. Finally the defect information and the corresponding image will be stored into the backstage database. This is quite convenient for online and offline browsing to check and monitoring dynamic change of the containment defect.

Keywords: wall climbing robot; negative pressure adsorption; image processing; defect detection; nondestructive detection (NDD)

1 引言

随着我国核电站建设的快速发展和日趋完善,核电站安全壳墙壁的养护工作也受到了越来越多的重视。核电站安全壳墙壁长期受日照、风吹、高低温冲击等影响而老化开裂破损,特别目前大部分核电站均位于沿海地区,经常受氯离子含量很高的海风的侵蚀和阳光直射,同时要承受台风、地震等环境因素影响,这些环境因素的影响会导致混凝土表面碳化,引起钢筋和预应力系统腐蚀,出现破损或裂缝,降低承载力,影响使用寿命。核电站工作人员也会定期对安全壳进行打压试验和预应力试验等试验,这些试验在实施过程中的也不可避免的存在对安全壳造成损坏风险,因此安全壳的墙面进行定期的外观检查^[1-3],对其外观的缺

陷进行基本评定以及持续跟踪和分析是十分必要的。

裂缝是核电站垂直壁面损坏的早期存在形式,也是评估墙壁质量的重要指标。传统的人工检测与识别的方法已经不能适应核电站快速发展的要求,所以对垂直墙面裂缝的自动检测与识别技术的研究显得尤为迫切,同时也是制定其养护方案的重要依据。根据这些情况提出了用负压吸附式攀爬机器人携带摄像机进行视频检测^[4-5]。摄像机以遍历的方式分区域拍摄到安全壳外表面的图像后,以无线形式发送至上位机,安装在上位机的建筑物缺陷检测软件系统对回送数据进行检测、分析和存储,并根据检测处理结果向机器人发送控制指令。针对核电站安全壳水泥壁面裂缝的视觉检测技术的研究,是爬壁机器人自主环境感知和智能检测系统中最为关键的技术之一,可为爬壁机器人系

统提供关键技术支持,并为进行远端遥控的操作者提供辅助决策支持功能。

2 安全壳表面缺陷图像外理

在爬壁机器人移动过程中,摄像机采集到的垂直壁面图像中包含三类:一是状况良好的壁面,即不存在缺陷背景;二是缺陷图像,即存在裂缝、孔洞和蚀斑等信息的待识别目标图像;三是噪声干扰图像,这类对象是不希望看到的,妨碍了进行壁面图像特征的提取与识别。为了更好地识别壁面图像的裂缝,必须尽量削弱或者消除干扰噪声,并确定出实际存在的缺陷信息。

2.1 图像预处理去除颜色印记

在对核电站垂直壁面裂缝图像数据的采集过程中,由于工作环境的复杂性以及壁面信息本身的多样性严重影响了壁面裂缝图像的质量,对后续图像的分析处理造成了很大的困难。因此,若不对图像进行事先处理工作而直接进行裂缝提取,是无法实现的。为了便于后面对图像进行分析与识别,提高识别的准确度,必须对壁面裂缝图像进行前处理。

因为实际采集到的包含缺陷信息图像中壁面裂缝与背景之间的对比度不是很大,裂缝的特征不是太明显。首先,所想到的红色和蓝色相对于灰色的特点是 RGB 值中 R 值或者 B 值相对较高,所以初步的设想是分别设置阈值去掉红色和蓝色,然后用一个为 (150, 150, 150) 的常用的灰色 RGB 值去填充之前的干扰噪声颜色所在的位置。使用后却发现,几乎没有任何效果。查找原因后发现,除了 (0, 0, 0) 和 (255, 255, 255) 外, R、G、B 值接近且不是特别大和特别小的时候,都是呈现灰色,因而不能单独通过 R 值和 B 值来判断出红色和蓝色,所以这种方法不可行。

分析实际图像中各个像素点的 RGB 值发现,灰色的 R、G、B 值相对接近,而红色和蓝色的 R、G、B 值相对偏离。最终采用了方差的方法对其特征进行分离。方差公式如式 (1) 所示。

$$s^2 = \frac{1}{n} [(x_1 - m)^2 + (x_2 - m)^2 + \dots + (x_n - m)^2] \quad (1)$$

在这里,每个像素点的 R、G、B 值设为 x_1, x_2, x_3 , 然后设定一个阈值来和方差作比较,大于该阈值的方差所对应的像素点表示该处有非缺陷噪声印记^[6]。通过使用这种方法,有效地分离了干扰的颜色,同时补上一个为 (150, 150, 150) 的 RGB 值后,有了明显的改善效果,下面 3 幅图像从左至右依次为原始有干扰噪声图像,仅用 (150, 150, 150) 的常用的灰色 RGB 值去填充检测出的干扰噪声颜色所在的位置,使用设定阈值判定再用 (150, 150, 150) 的常用的灰色 RGB 值去填充检测出的干扰噪声颜色所在的位置的效果图如图 1 所示。

由图 1 可以看出,裂缝图像中的噪声很大,几乎完全掩



图 1 原始图片与预处理后效果对比

盖了裂缝目标,导致想要获取的裂缝目标几乎都无法显现,这就达不到裂缝检测的目的。因此,先对图像进行预处理是十分必要的。针对垂直壁面裂缝图像的特点,首先对图像进行滤波处理和图像增强处理。

2.2 图像滤波

图像滤波的算法有很多^[7],主要有中值滤波法、均值滤波算法、自适应滤波法、加权邻域平均法等。在测试的时候,研究了几种常用的滤波算法,并从中选取均值滤波对垂直壁面图像进行滤波处理。

加权邻域均值滤波算法的基本思想是:对相同尺寸的模板可针对不同的位置系数用不同的数值加权。通常认为离模板中心位置近的像素对滤波结果的影响较大。因此离模板中心近的像素的系数应较大,相应的离模板中心位置越远的模板边界附近的系数应越小。根据系数与模板中心像素点距离的大小反比例地确定模板内系数的值,常用的模板如式 (2) 所示。

$$\frac{1}{5} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \frac{1}{10} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

根据实际的多次试验和检验可知,当采用式 (3) 中 55 的模板运用加权邻域平均法时效果较好,对示例图片进行加权邻域平均法平滑滤波的效果如图 2 所示。

$$\frac{1}{48} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 4 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 8 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 4 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$



图 2 加权邻域均值滤波后的效果

通过对大量的壁面裂缝图像进行滤波实验发现,加权邻域均值滤波的效果相对于均值滤波和中值滤波的效果主要有两个优点:一是加权邻域均值滤波去除噪声明显,对图像的平滑效果更好;二是加权邻域均值滤波对图像的边缘

模糊影响较小。因此,文中采用加权邻域均值滤波方法对图像进行滤波。

2.3 图像灰度变换边缘检测

边缘是一幅图像最基本的特征,边缘是指其周围像素的灰度值有“剧烈变化”的像素的集合。通常使用一阶或二阶微分算子来检测边缘。传统的边缘检测算子是考察原始图像内部各个元素的某个邻域内灰度值的阶跃变化,通过边缘邻近一阶或二阶方向导数的变化规律来确定边缘像素点,达到检测边缘的目的。对壁面裂缝来说,检测与分类的效果与精度在很大程度上受边缘检测算法的好坏的影响。文中介绍几个经典的梯度边缘检测算子,并从中选择一种对裂缝图像做边缘检测。

Canny 算子是二阶微分算子,其边缘检测的基本思想是:把二维高斯函数在任一方向上的一阶方向导数作为噪声滤波器,然后与图像做卷积运算进行滤波,最后通过对得到的图像寻找局部的梯度极大值,来确定图像的边缘^[8]。

$$S(x,y) = G(x,y,\sigma) \times I(x,y) \quad (4)$$

其中,式(4)是高斯函数的散布参数,表征平滑的程度。Canny 算子边缘检测必须满足能够有效地抑制噪声和尽量精确确定边缘位置的要求。对文中经过前期处理的示例图片分别进行简单边缘提取和经过分段线性灰度变换后使用 Canny 算子进行边缘提取操作,得到了图 3 所示的(a)、(b)两幅效果对比图。

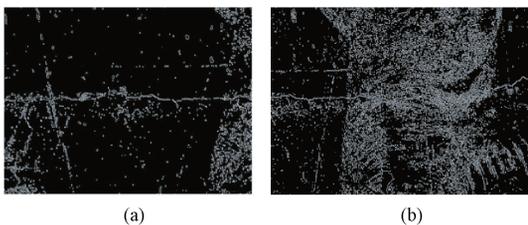


图3 边缘检测效果

由图 3 两幅边缘提取效果对比图片可知,该方法不仅对轮廓边缘敏感,而且较好的保留了裂缝的轮廓,在这一步骤中的宗旨是:宁可多出一些小轮廓,也要保证裂缝的边缘尽可能地保留,这样可以确保以更高的准确率检测出缺陷,防止遗漏。

2.4 边界特征法识别缺陷

本文采用的是形状特征法中的边界特征法^[9],用提取轮廓函数遍历每个轮廓的长度、面积,通过设定相关阈值,将小于该阈值的轮廓去除,大于该阈值的轮廓保留。与此同时,对所保留下来的轮廓进行膨胀,使得十分接近的轮廓能够连接在一起,从而得到一条完整度较好的裂缝图。对示例图片进行该项操作的效果图如图 4(a)所示。为了方便比较裂缝提取效果,特将裂缝提取图与原图以 30% 和 70% 的比例混合,混合效果图如图 4(b)所示。

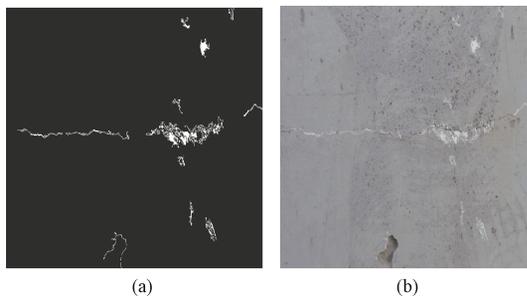


图4 边缘检测效果

2.5 图像拼接

当摄像机所拍摄一幅图像不包含一条裂缝的全部信息时,就无法测量整条裂缝的长度,此时需要多张图像进行拼接,形成包含一条裂缝完整图像,这就用到了图像拼接技术。图像拼接技术就是将数张有重叠部分的图像(可能是不同时间、不同视角或者不同传感器获得的)拼成一幅大型的无缝高分辨率图像的技术。本模块方便机器人爬行过程中,遇到裂缝,按照裂缝的方向移动,并连续抓拍数张图片,从而拼接。拼接过程如下。

1)图像匹配,采用一定的匹配策略,找出待拼接图像中的模板或特征点在参考图像中对应的位置,进而确定两幅图像之间的变换关系。根据模板或者图像特征之间的对应关系,计算出数学模型中的各参数值,从而建立两幅图像的数学变换模型。本模块寻找图像的 ORB 特征。通过提取角点而达到提取特征^[10]。该特征具有局部不变性,可以适应旋转、平移、缩放,同时提取速度是 SURF 特征的 10 倍。

2)统一坐标变换,根据建立的数学转换模型,将待拼接图像转换到参考图像的坐标系中,完成统一坐标变换。该步骤可以保证机器人摄像头拍摄的图片尺度大小不一时,顺利完成拼接任务。



图5 图像拼接效果

3)融合重构将带拼接图像的重合区域进行融合得到拼接重构的平滑无缝全景图像。

具体图片演示见下图所示,其中前 6 幅图像为待拼接图像,最后一张为拼接后的效果图。

3 物缺陷检测软件系统

安全壳缺陷检测软件系统总体上可分为 6 个大的功能模块,这 6 大功能模块分别为:接收和发送驱动模块、底层通讯模块、上位机界面模块、后台运行数据库模块、后台服务系统和 11 个子功能模块。11 个子功能模块又包括控制模块、定位模块、视频系统、图像系统、工具模块、菜单模块、Excel 模块、检索模块、CAD 模块、存储模块和算法模块 11 部分。

3.1 发送接收驱动模块及底层通讯模块

发送接收驱动模块与底层通信模块相配合使用,所接收到的原始视频流信息、机器人回送的位置高度信息和发送给机器人的运动控制指令等信息通过底层通信模块再经由发送接收驱动模块与外部无线通信硬件进行通信,最终实现数据收发。

3.2 上位机界面模块及子功能模块

建筑物缺陷检测系统上位机在正常运行过程中,主运行界面一直处于播放摄像机所传输回来的视频流状态,同时主运行界面还包括机器人运行状态控制、机器人遥控串口通讯设置和机器人无线回送信息实时显示等功能,上位机主界面如图 6 所示。

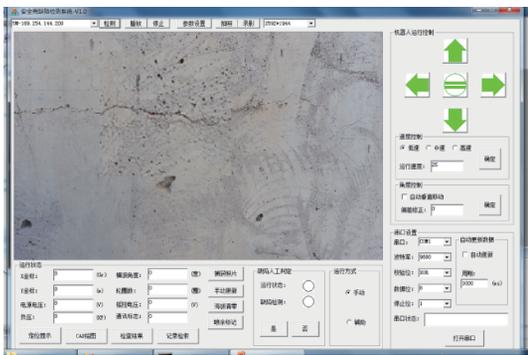


图 6 建筑物缺陷检测软件系统主界面

多个子功能模块与监控主界面配合使用,控制模块负责将人工或计算机发出的控制命令进行整合传递;定位系统功能是确定机器人当前的位置信息并转换成相应坐标,同时将坐标信息发送给相关模块进行计算和存储;视频系统的功能是将无线传至上位机的视频信息进行编解码,并转换成可视的视频流进行显示;图像模块功能是将带有建筑物裂缝和破损的视频画面进行拍照并放大,然后进一步深入分析的子功能模块;工具模块是指附带的各种工具,如裂缝尺、宽度尺、视频播放控件、曲线、直线、面积等小工具的集合;菜单模块是指附加的各个功能菜单,菜单模块

一般与各种控制和转换指令结合;Excel 模块是指将裂缝长度、宽度、位置坐标、时间等信息进行整合的一个模块,可自动生成易识别的 Excel 数据格式;检索模块负责整个缺陷检测系统内总的数据库检索服务和数据调配服务,相当于一个数据接口;CAD 系统是指在完成或部分完成建筑物缺陷检测任务时,可以自动将建筑物外表面上的裂缝和破损信息进行二维图形重绘的功能模块,便于建筑物检查和历史数据查看;存储系统是指整个缺陷检测系统的数据存储与分发系统,负责系统数据变量等的存储与分配;算法模块是指安全壳外表面图像算法、裂缝尺度对比算法、图像重绘算法等算法,用于在图像和视频流中检测出裂缝或破损信息的方法。

3.3 数据库和后台服务模块

建筑物缺陷检测系统由很多个功能子系统构成,各个子系统之间可共享数据和信息,同时各子系统间还会有控制和计算数据进行传递。后台服务系统是指协调各子模块之间的服务程序,负责整个系统的运行逻辑与运行顺序,协调各子系统之间的数据交换和数据暂存,保证整个系统能够正常有序的运行。

数据库系统是建筑物缺陷检测系统中大量数据存储调用的仓库,负责整个系统大部分数据的存储分类管理等任务。数据库系统又可分为两个子系统:建筑物检测系统数据库系统和用户信息数据库系统。建筑物缺陷检测系统负责大量建筑物缺陷检测数据的存储和管理;用户信息数据库系统负责建筑物缺陷检测系统使用用户的管理,包括用户建立删除、用户基本信息存储管理、用户级别和相应权限分配等。

3.4 缺陷检测和测量

缺陷检测模块是利用基于图像的物体表面缺陷检测技术^[11],该模块负责从回传的视频流中监测图像帧中是否存在裂缝、孔洞和蚀斑等缺陷信息,缺陷检测模块将图像进行灰度变换、滤波、边缘提取、轮廓处理等步骤得到缺陷信息的轮廓,再根据实际图像中缺陷信息设定裂缝孔洞蚀斑的判定阈值依据,最终判定出当前图像是否存在缺陷,同时置位缺陷存在标志位。

缺陷测量模块是在缺陷检测模块检测到缺陷信息后,对检测到缺陷的图像进行拍照捕获合格照片,再将合格照片进行等比例压缩处理等过程导入到缺陷测量界面中,然后在缺陷测量界面模块中调用裂缝长度尺、宽度尺和面积尺等工具自动测量出裂缝长度、宽度和面积等缺陷信息并显示在相应信息框中。

4 试验环境搭建及试验结果

在对所设计开发的建筑物缺陷测量系统进行前期的试验和验证并满足要求后,将所开发的系统应用于实际环境中进行检测。实际环境中包括公司所在的中电信息大厦室内地面和墙面、大连理工大学创新园大厦试验室内地面、哈

尔滨工业大学机电学院试验楼外墙面、福建宁德核电站安全壳外表面和辽宁红沿河核电站安全壳外表面,试验对像环境涵盖了各种实际建筑物表面情况。

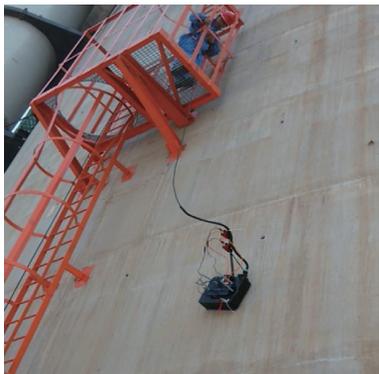


图7 试验环境

试验中所有检测区域实际存在的缺陷信息是提前由人工检测确认的,先选定特定区域,然后根据实际情况由多人对选定区域中缺陷进行判定,并将判定结果进行标定确认。缺陷包括裂缝、孔洞、破损和近似圆形蚀斑等。由于受到光线及实际环境中干扰因素影响,不同区域的检测率会有差异,但总体的缺陷检出率可达到95%。

5 结 论

本文所设计开发的安全壳缺陷检测系统以负压吸附式爬墙机器人为平台基础,结合网络与通信、模式识别、图像处理和数据库技术等,可以快速检测出建筑物表面存在的缺陷信息,并将缺陷信息进行测量计算和存储管理。通过多次试验可知该系统对缺陷检出率可达95%,同时该系统可使用建筑物等各种不同的平整物体表面,如桥梁柱体、平整大坝基建、城墙等人工不易达到的建筑物表面,对待检测表面实现无损检测。所设计开发的该系统已经成功应用于国内多座核电站的安全壳缺陷检测,在目前世界上核电站安全壳缺陷无损自动检测方面尚属首例。

参考文献

- [1] 詹淑文,常华健,蒋坚毅,等. 巴基斯坦恰希玛核电站安全壳整体密封性试验[J]. 环境工程,2006,24(4): 60-65.
- [2] 魏盛辉. CPR1000 核电机组安全壳试验浅析[J]. 科技视界,2014(31):319-321.
- [3] 陈炼,常华健,李玉全,等. ACME 整体性能试验设施工作压力选取方案分析[J]. 原子能科学技术,2011, 45(10):1215-1220.
- [4] 闫久江,赵西振,左干,等. 爬壁机器人研究现状与技术应用分析[J]. 机械研究与应用,2015, 28(3): 52-54.
- [5] LI J, GAO X SH, FAN N J. Adsorption performance of sliding wall-climbing robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(6):67-75.
- [6] 王宣银,梁冬泰. 基于多元图像分析的表面缺陷检测算法[J]. 浙江大学学报:工学版, 2010, 44(3): 448-452.
- [7] 熊建平. 基于计算机视觉的墙地砖表面缺陷检测[J]. 电子测量技术,2015, 38(5):53-55.
- [8] 李新科,高潮,郭永彩,等. 利用改进的 SIFT 算法检测桥梁拉索表面缺陷[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2015, 40(1):71-76.
- [9] 刘春,江伟荣,吕淑琴. 密封橡胶圈缺陷检测算法的研究[J]. 电子测量与仪器学报,2011,25(5): 438-442.
- [10] 张桂华,冯艳波,陆卫东. 图像处理的灰度化及特征区域的获取[J]. 齐齐哈尔大学学报,2007, 23(4): 49-52.
- [11] 曾伟,王海涛,田贵云,等. 基于能量分析的激光超声波缺陷检测研究[J]. 仪器仪表学报,2014, 35(3): 650-655.

作者简介

石晓伟,2009年于河南大学获得学士学位,2012年于北京工业大学获得硕士学位,现工作于中广核研究院,工程师,主要从事核电仪控电气方面设计研究。

E-mail: luck2shi@163.com