

基于机器视觉的隧道衬砌裂缝检测算法综述

苑玮琦, 薛丹

(沈阳工业大学 视觉检测技术研究所 沈阳 110870)

摘要:《公路隧道养护技术规范》中明确指出隧道裂缝的调查是专项检查项目之一。目前常采用人工检测,漏检不可避免,为克服此缺点,用机器视觉的方法实现自动化检测已成为近年来该领域里国内外主要研究手段。在机器视觉研究方法的背景下,对目前国内外关于隧道混凝土衬砌裂缝检测算法的研究进行了较全面的综述,包括衬砌图像预处理、裂缝的检测、干扰的剔除、裂缝宽度的测量及误差分析4个部分,并对所采用的算法进行了优势及不足的比较,最后给出结论和未来设想。

关键词: 隧道裂缝;机器视觉;图像处理

中图分类号: TN911 TH74 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 520.20

Review of tunnel lining crack detection algorithm based on machine vision

Yuan Weiqi, Xue Dan

(Computer Vision Group, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: "Highway tunnel maintenance technical specifications" clearly pointed out that the investigation of tunnel cracks is one of the special inspection items. At present, manual detection is often used and the missing detection is inevitable. In order to overcome this shortcoming, automatic detection with machine vision has become the main method in this field at home and abroad. In this paper, the background in machine vision methods, the present research on crack of tunnel concrete lining detection algorithms at home and abroad are reviewed. Lining image preprocessing, crack detection, interference elimination, crack width measurement and error analysis are included, while the advantages and disadvantages of different algorithms are compared. Finally, the conclusion and future vision are introduced.

Keywords: tunnel crack; machine vision; image processing

0 引言

衬砌指的是为防止围岩变形或坍塌,沿隧道洞身周边用钢筋混凝土等材料修建的永久性支护结构。目前广泛应用在隧道建筑工程中的衬砌表面,大多由水泥、砂子、粉煤灰、外加剂混合而成的混凝土,用压力喷枪喷涂浇筑而成。隧道衬砌由于受到外荷载作用产生的应力、衬砌结构变形、钢筋腐蚀、施工材料及质量等影响可能引起混凝土开裂形成裂缝。隧道常见裂缝种类包括斜向裂缝、环向裂缝、纵向裂缝、网状裂缝,分布在隧道衬砌各

处,其中拱腰处^[1]是裂缝最常出现的位置。

裂缝是隧道病害产生初期的表现形式之一,不仅降低了衬砌结构的刚度和承载能力,同时有可能成为渗漏水通道,造成钢筋腐蚀,进一步降低衬砌结构的承载能力和耐久性,形成恶性循环,严重影响隧道正常运营与耐久性^[2]。裂缝检查是交通运输部发布的公路工程行业标准《公路隧道养护技术规范》(JTG H12-2015)中明确提到专项检查项目之一-裂缝的调查包括裂缝的位置、宽度、长度、开展范围或程度等。要进行定期检查,宜每年1次,最长不得超过3年1次^[3]。

目前常采用的隧道衬砌裂缝检测手段主要是人工检测,漏检严重。机器视觉检测法是利用高清相机自动触

发拍摄采集隧道衬砌图像,并通过图像处理技术自动识别检测裂缝的位置以及长度、宽度等信息,近年来成为该领域里国内外主要研究手段。

广泛调研文献后,本文在机器视觉研究方法的背景下,对目前国内外关于隧道衬砌混凝土裂缝检测算法的研究,包括图像预处理、裂缝的检测、干扰的剔除、裂缝宽度的测量及误差分析 4 个部分,并对这些图像处理过程中采用的各种算法进行了优缺点较全面的综述。

1 衬砌图像预处理

隧道衬砌表面由于受到混凝土材料、环境等影响,采集的图像中含有大量噪声,这些噪声干扰给裂缝的检测带来很多困难。为更好地提取裂缝,需要去除噪声的同时增强裂缝边缘信息。去噪的常用经典方法是平滑滤波法。

1.1 背景麻点噪声去除

裂缝检测的主要干扰来自于衬砌表面砂石等坑洼麻点噪声的影响。原图如图 1(a)所示,直接对原图进行边缘检测可以提取裂缝,如图 1(b)所示,但同时也检测出大量噪声,且部分噪声在裂缝附近造成裂缝形态出现多余分支,尤其噪声较多的图像,给裂缝提取带来很大困难。由图 1(c)可知,先对图像平滑滤波去除噪声后再做边缘检测效果更好。

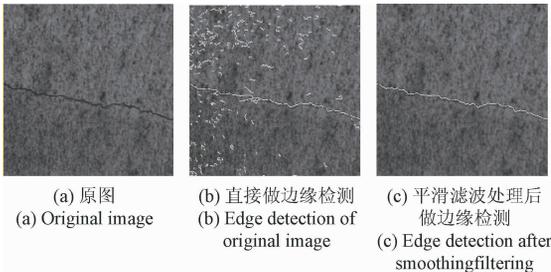


图 1 平滑滤波作用

Fig. 1 Smoothing filtering results

但由于裂缝与噪声同属于高频成分,传统平滑滤波去噪的同时容易破坏裂缝边缘。因此部分学者对其进行了改进。线性平滑滤波器经典方法均值滤波法,能够模糊小区域去除杂散瑕点,但同时也模糊裂缝边缘。文献[4]采用超限邻域平均法,将窗口中心像素的灰度值与邻域均值做差,差值大于一定值,视为噪声被去除,效果不理想;文献[5]采用加权邻域平均算法,除了考虑灰度均值外,还提供邻域信息的梯度变化。在噪声较少和较多的情况下,采用不同权重平滑噪声,增强裂缝。但该文人为加入噪声进行测试,不是实际现场采集的图像。

非线性平滑滤波器中的经典方法—中值滤波法,与

均值滤波相比,裂缝边缘处模糊程度较小,但在低信噪比图像中使用时,其使裂缝边缘模糊的程度也会影响后续的阈值分割和裂缝识别。文献[4]采用梯度倒数加权法平滑滤波法,以梯度倒数作权重因子,区域内部的邻点权重就大于边沿近旁或区域外的邻点。尤其对于处理污染较严重的裂缝图像,去除干扰效果显著,但对裂缝边缘有一定的破坏。文献[6]采用基于梯度决算的中值滤波算法并配合 OSTU 阈值分割,在不改变裂缝形态的同时滤除了绝大部分的随机噪声,结果如图 2 所示。

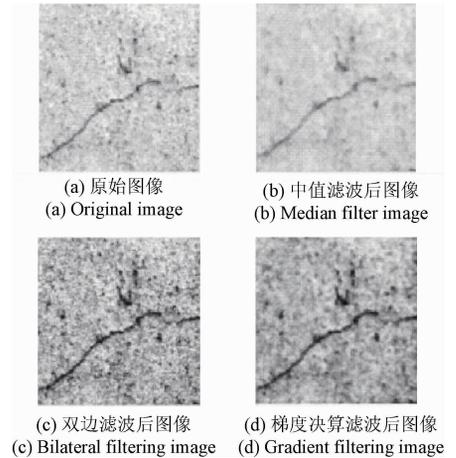


图 2 改进的中值滤波处理结果

Fig. 2 Processed results with improved median filtering

由图 2 可知,中值滤波后图像变得模糊,裂缝边缘与周围噪声区域粘连破坏了原始形态;双边滤波后图像,边缘保留完好,但噪声基本没有被滤除;基于梯度决算的中值滤波算法,裂缝形态保留完好,同时滤除了绝大部分的随机噪声^[6]。

另外,针对中值滤波运算中涉及多次数据比较和交换,尤其分辨率较高的图像,会使处理速度非常慢的缺点,文献[7]采用一种快速并行中值滤波方法,计算次数上减少近 2 倍,且该算法适用于在实时处理器上做并行处理,在图像模糊程度较小的同时提高了速度。

为去除弱裂缝低信噪比图像中的噪声,文献[8-11]提出一种改进阈值函数的小波阈值图像去噪算法。通过重构阈值函数来克服软硬阈值函数的缺陷并突显其优势,改进效果去除噪声较多,失真度低、图像细节过渡平滑自然、重构精度较准且信噪比高,提升了原始信号和去噪信号之间的相似度。

1.2 裂缝的增强

图像去噪时使用的平滑滤波法,在去噪的同时会使裂缝边缘处变得模糊,尤其背景和裂缝灰度较近或者裂缝细小,边缘处难以区分,因此需要加强裂缝与背景之间的对比度。增强图及边缘检测结果如图 3 所示,图 3(a)

边缘处较弱,尤其图像左右两边裂缝边缘附近梯度变化不明显,提取裂缝信息容易丢失;图3(b)对整幅图像增强效果可见加重了光照不均匀,裂缝信息被淹没不利于提取;图3(c)对梯度变化较大的边缘处增强,裂缝及细小衬砌上的纹理变得清晰可见,更利于提取裂缝边缘、不容易漏检。

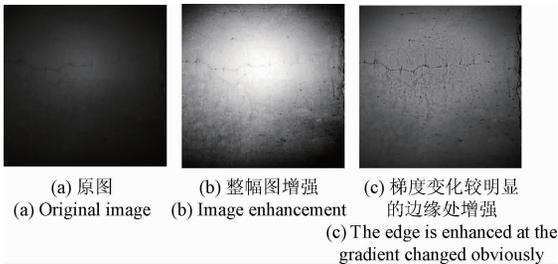


图3 增强图及边缘检测结果

Fig. 3 Enhancement image and edge detection results

由于衬砌表面坑洼造成的噪声很多,干扰了裂缝的提取。因此通常平滑滤波去噪和裂缝增强同时进行能得到更好的预处理效果。

1) 基于灰度变换的裂缝增强

由于裂缝灰度值比背景低,因此主要采用灰度变换法,对图像中低灰度值变的更低,高灰度值变的更高的方法实现增强,包括直方图均衡、线性变化等。直方图均衡会导致只要与裂缝有相似灰度的地方就都会被增强。这些区域在阈值分割时难以滤除;线性变化的前提是选择合适的参数。尤其在低信噪比的裂缝图像中,参数选择是影响裂缝识别率的关键。文献[6]采用该方法实验效果并不好,文献[12]在此方法基础上又配合中值滤波、维纳滤波等方法对图像进行增强,发现扩展灰度级虽然可以提高图像的反差,但会使得动态范围变的更大,容易造成图像增强过度而失真,尤其不适用光照不均匀图像。

2) 基于梯度锐化的裂缝增强

由于裂缝在图像中表现为屋脊边缘,因此采用梯度算子进行锐化达到增强效果。文献[13-14]采用一种基于梯度域的图像增强算法。在图像的层次、细节方面有较好的处理效果,适合图像阴影区或者高光区细节的增强。但增强的同时会出现锐化现象,且梯度修改后图像的重建算法较复杂。

由于裂缝边缘处梯度差较大属于高频成分,因此有学者从频域角度研究。文献[6]采用频域滤波中典型的同态滤波法,其中低频反映的是照明分量,高频反映的是反射分量,利用滤波函数对两者分别评估,并调节滤波器系数实现图像增强。但目前没有一个很好的方法对这两个分量进行估计^[15-16],因此该方法适用于局部灰度值低的图像。由于裂缝和噪声同属于高频成分,在分辨率较高的图像中,加强裂缝的同时噪声也随之加强。有学者

从多尺度空间进行改进,文献[17-18]采用一种基于 Guided 滤波的 Retinex 算法,利用小波函数将图像分解为多个尺度,分解后对各阶高频系数进行阈值处理;低频系数采用基于 Guided 滤波^[19]的 Retinex 算法^[20-21]进行处理。Guided 滤波器既能很好地保持图像的梯度,也能很好地保持图像边缘。Retinex 算法对图像细节的增强效果较好,但其算法复杂度较高、计算量大,增强的过程中难以做到压缩动态范围和提高局部对比度的统一,使图像缺乏柔性,对比结果如图4所示。

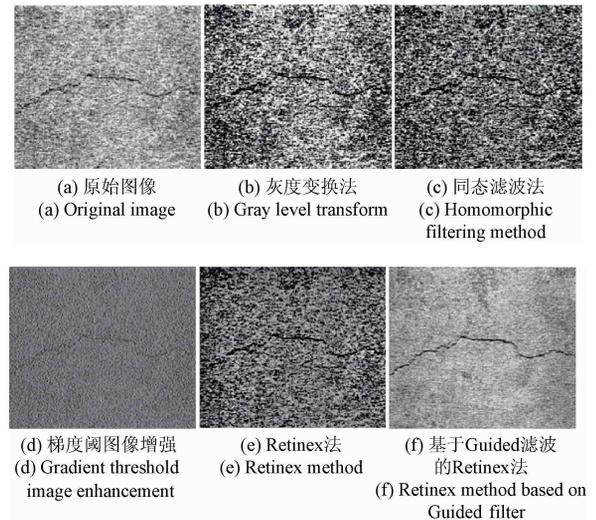


图4 不同滤波法对比

Fig. 4 Comparison of different filtering methods

由图4可知,用灰度变换法、空域的梯度域图像增强法、频域的同态滤波法、Retinex 算法对裂缝增强的同时,噪声也被增强;而改进的基于 Guided 滤波的 Retinex 算法对裂缝增强的同时抑制了噪声,取得较好增强效果^[18]。

3) 基于 SFC 结合的裂缝增强

同时考虑裂缝的灰度值小与梯度值大的特点,将灰度变换和平滑锐化滤波相结合。文献[8]采用了基于中值滤波和拉普拉斯算子锐化相结合的方式对裂缝图像进行多次处理,再利用图像灰度阈值进行拉伸来提升对比度,取得较好效果;文献[4]首次提出增强滤波结合法 (enhanced filter combination, SFC),反复多次交替使用改进的直方图灰度拉伸、四邻域平均平滑和拉普拉斯锐化进行对比度增强处理;文献[19]中也有使用 SFC 结合法,实验结果表明较好地改善了由于图像亮度范围不足或非线性等引起的对比度不强的缺陷,能保留裂缝细节同时有效地去除了噪声和锐化了边缘,从而更好地突出了背景和裂缝的区别,取得了较好效果。裂缝图像及对应的增强效果如图5所示。由5(b)可知,对比度得到明

显的提高,图 5(c)中裂缝的突出尖角得到了很好的增强,边缘得到了较好的平滑和锐化。

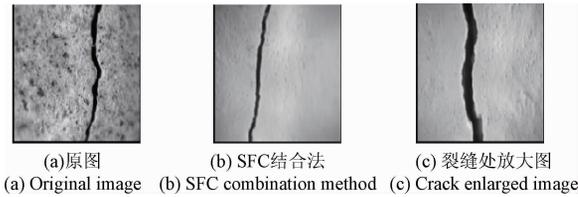


图 5 裂缝图像及对应的增强效果

Fig.5 Crack image and the corresponding enhancement results

SFC 结合法对比效果如图 6 所示。图 6 中 SFC 结合法对裂缝图像的处理要优于单一的算法,尽管对裂缝的细节有所损失,但大量的平滑处理基本消除了其他噪声的影响^[19]。但针对不同图像中裂缝不同明暗不同宽窄的复杂情况,提出该方法的文中并未给出多次灰度变换时阈值大小、平滑窗口大小的选取依据,适应性并不强。

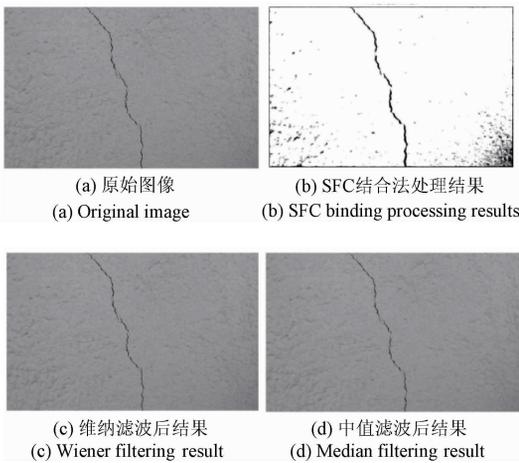


图 6 SFC 结合法对比效果

Fig.6 SFC combination method contrast effect result

以上文献中增强的算法,应用在对对比度较强较宽的裂缝增强的效果较好,但对细小裂缝进行增强的更好的算法还有待进一步研究。

1.3 光照均衡化

由于公路隧道检测车在行走中没有固定轨道,与隧道衬砌表面的距离是不定的,因此成像时需要采用面阵相机。另外隧道较黑暗,为采集到清晰的图像,必须外加光源,这样就会带来光照不均匀的现象,这种现象会导致图像阈值分割时严重影响阈值、参数等的选取造成错误。尤其过渡曝光的图像,对比度小的裂缝会淹没其中难以分割提取。

为解决光照不均匀的问题,相关学者进行研究的核

心思想为采用一种合适的滤波器处理图像,并用原图像与处理后图像做差。

1) 基于形态学光照均衡化

文献[6,20]采用形态学的底帽变换进行处理,即用闭运算的结果与原始图像做差得到。闭运算是用高像素填充比结构元素小的低像素的洞,减去原图像后,低像素部分被明显的反映出来。效果如图 7 所示。

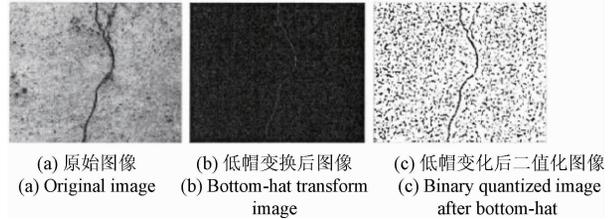


图 7 数学形态学处理结果

Fig.7 Mathematical morphology processing results

由图 7(b)阈值分割后可见,裂缝被明显的分割出来取得良好效果^[6]。但不足之处是由于闭运算本质是膨胀、腐蚀运算的结合,会破坏细小裂缝形态,因此不适合识别细小裂缝,且裂缝特征参数计算精度较低。

2) 基于低通滤波器的光照均衡化

文献[9,21-24]采用 Mask 匀光算法,首先对原始图像进行低通滤波得到背景图像,再用原始图像与背景图像做差,最后将得到的图像进行亮度值拉伸,并配合灰度级腐蚀等预处理算法平衡图像的光照,增强裂缝的对比度,取得的良好效果如图 8 所示^[21]。缺点是匀光的同时噪声也增强,为后面裂缝提取带来误判,具体如图 9 所示,并且采用直接分割无法除去图像中存在的大量噪声^[9]。

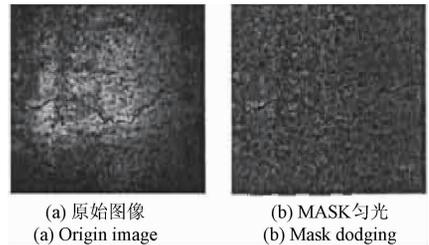


图 8 均衡光照

Fig.8 balanced illumination

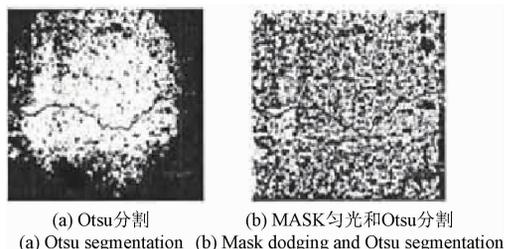


图 9 光照问题影响的分割结果

Fig.9 Segmentation affecting by illumination

3) 基于线性滤波器的光照均衡化

文献[25-26]中引入海森矩阵构建线性滤波器,用增强图像中的线性结构进行平滑处理后的图像与原始图像做差,达到平衡光照的目的。缺点是对一些低灰度噪声较敏感,对复杂图像进行处理时,极易造成误判,不具有普适性。

光照不均匀问题会直接影响后续图像分割,但目前解决得并不理想。由于很多研究机构是在实验室模拟或者在现场采用多个照明光源拍摄,基本避免了该问题,但是若想降低成本,那么减少光源数量光照不均匀问题不容忽视。

2 裂缝的检测

裂缝的检测方法主要包括边缘检测法和灰度级阈值分割法。

2.1 边缘检测法

由于裂缝与背景交界处有明显的梯度差,因此可通过梯度进行边缘检测提取裂缝,包括利用梯度检测算子进行边缘检测、跟踪法、以及亚像素进行精确定位。

2.1.1 边缘检测

经典的边缘检测梯度算子,分为一阶梯度算子,主要对阶跃型边缘检测效果较好;二阶梯度算子,主要对屋脊型边缘检测效果较好。裂缝边缘在图像中表现为屋脊边缘。

文献[5]对以上经典梯度算子在隧道裂缝检测中进行了实验,如图10所示。

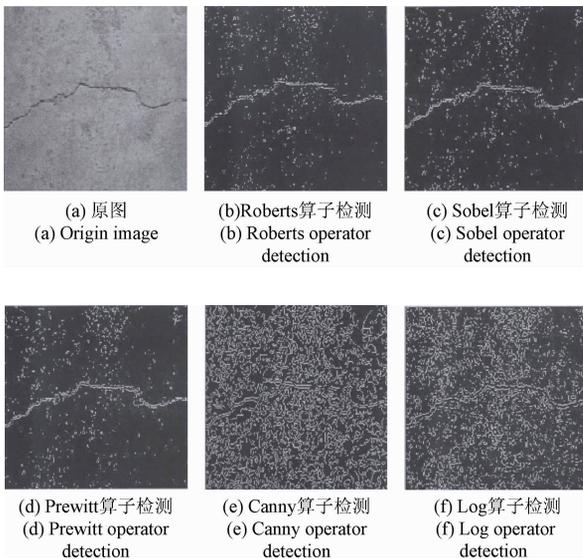


图10 边缘检测算法对比处理结果

Fig. 10 comparison of different edge detection methods

由图10可知,一阶经典的Roberts算子对具有陡峭的低噪声的图像处理效果较好,但提取的边缘较粗,且定位不准确;Sobel算子对噪声较多和灰度渐变的图像处理效果较好,对边缘方向较敏感,但对于局部边缘信息定位不够准确;Prewitt算子与Sobel算子类似,由于隧道衬砌图像通常不是灰度渐变图像,因此都不太适合隧道内裂缝的检测;Canny算子实质是用一个准高斯函数作平滑运算,然后以带方向的一阶微分算子定位导数最大值,不易受噪声干扰和填充,更容易检测出弱边缘,但运算量较大、速度较慢。二阶典型的拉普拉斯算子(Laplacian)用于检测屋脊型边缘的效果不错,但对噪声非常敏感,有可能使噪声加强,常产生双像素宽的边缘且不能提供边缘方向信息,不适合精确定位^[5]。另外Marr D等人^[27]在1980年提出一种Log算子,先用高斯函数对原始图像作平滑,经Laplacian算子运算后,再用提取零交叉点的方法作边缘检测,其精度明显提高^[5]。

文献[4]提出一种比梯度算子应用更广的基于灰度差阈值的边缘检测方法,文献[8]在此基础上提出一种改进的canny算子的灰度阈值边缘检测和提取方法实现裂缝粗定位。该方法能选择性的处理裂缝区域,可以避免受到噪声、周围小缺陷、污点等干扰因素的影响,得到图11(c)所示的光滑单像素边缘。

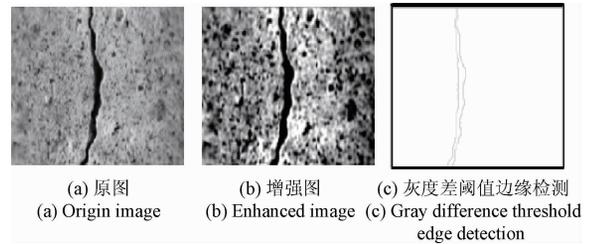


图11 灰度差阈值边缘检测结果

Fig. 11 Grayscale threshold edge detection results

另外有学者从多尺度进行改进。文献[30]提出一种基于非下采样Contourlet变化(nonsubsampled contourlet transform, NSCT)的隧道裂缝图像检测算法。分别对高频子带图像采用模极大值方法筛选系数极值点和对低频子带图像采用Canny算子进行边缘检测,对比结果如图12所示。

由图12可知,Sobel算子误检边缘点数最多,存在很多噪声点,定位准确性最差;Canny算子误检边缘点数较少,但由于高斯平滑的模糊特性,定位准确性较差;小波模极大边缘检测方法误检边缘点数较多,定位准确性较好,但由于降噪效果仍不理想和缺乏弱边缘连接,存在较多的孤立噪声点;NSCT变换误检边缘点数最少,定位准确性最好,具有更好的方向性和平移不变性,该算法无论在分割正确率还是精度上均表现出良好的性能^[28]。

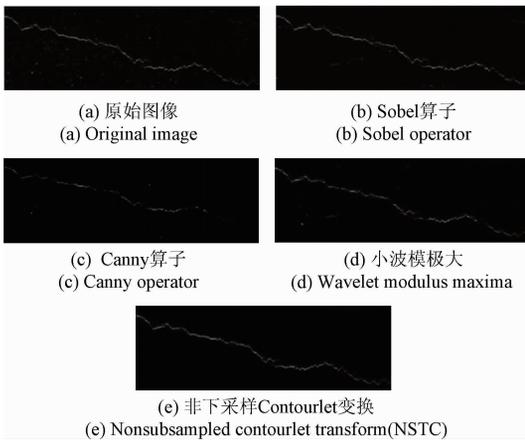


图 12 基于多尺度空间算法对比结果

Fig. 12 Comparison based on multi-scale spatial algorithms

2.1.2 跟踪法

除经典梯度算子外,近年来相关学者还采用跟踪法进行裂缝的提取。即先通过对图像上的点的简便运算来检测出可能存在的物体上的点,然后在检测到的点的基础上通过跟踪运算来检测物体的边缘轮廓。

文献[29-30]采用基于最小路径的裂缝识别算法,该算法以裂缝点作为起始点,根据最短路径的原则向周围扩张,可快速准确地检测出连续的裂缝;文献[31]提出一种基于种子点扩散的半自动提取隧道裂缝的方法,通过用户在裂缝上选取起始种子点实现裂缝的自动追踪,同时允许在种子点拟合扩散的过程中人工干预来处理拟合偏差及失败的情况。由于这些起始种子点需要手动选取,并不符合自动识别的要求。

文献[32]对文献[29]进行了改进,采用一种 F^* 种子生长 (F^* seed-growing approach, FOSEA) 算法,设定种子生长策略,自动选择路径中的起始点和终止点。同时算法缩小处理范围,用局部搜索代替全局搜索,大大提高了处理效率。但噪声较多时,容易出现初始点选择不当的情况。

文献[33]中提出裂缝树的概念,先初步预测图像中的裂缝点,再采用张量投票法增强图像中的裂缝信息,根据投票结果进行裂缝种子取样,构建裂缝的最小生成树,最后对树进行剪枝,检测图像中的裂缝。这种检测方式的准确率优于一般的裂缝边缘检测,但仅滤除了光照不均这一种噪声。

文献[34-35]采用渗流原理模型,从初始点开始,按照某种规则向周围扩散渗漏,直至边界。该算法根据背景和裂缝的不同渗流表现获取裂缝点,进而提取裂缝,成功达到了降低误判率的目的。为降低时间复杂度,改为从疑似裂缝区域选取某些点作为初始点,并以圆度来描

述渗漏区域的形态或者利用终止-跳过程序以减少计算时间,适用于大幅混凝土图像裂缝的快速识别。文献[6]对其进行改进,采用一种基于概率松弛和渗漏的裂缝搜索法,将渗漏标准由灰度值改为概率,该方法考虑到了相邻像素点之间的影响,同时更新迭代的过程使整个图像内像素点的概率趋于收敛,达到归一化的目的。实验结果表明裂缝区域能被完整地提取出来,解决了裂缝断裂问题,但搜索到的裂缝区域变宽。

文献[36]提出一种基于图像局部网格特征的隧道衬砌裂缝自动识别方法。先将图像划分为 $8 \text{ pixel} \times 8 \text{ pixel}$ 的局部网格,基于局部网格内不同方向之间的对比度差异和亮度差异特征设计十字形模板,通过模板计算将网格中灰度值最小的像素识别为潜在的裂缝种子,再采用种子连接算法将离散的裂缝种子像素连接成完整的连续裂缝,并自动计算裂缝的走向、长度和宽度,取得良好的裂缝识别效果如图 13 所示,特别是对细微裂缝和存在渗漏水的衬砌图像,算法的可靠性和识别率均高于常规的图像识别方法^[36]。但该方法适用于处理理想背景的裂缝图像,不适合噪声较多的图像,难于有效识别隧道表面裂缝网格和背景网格复杂的灰度剖面图和计算裂缝宽度^[37]。

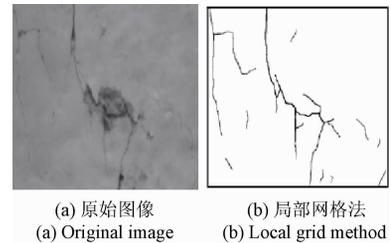


图 13 基于跟踪法典型实验结果

Fig. 13 Typical experimental results based on tracking method

2.1.3 亚像素定位

随着测量精度要求的提高,像素级已无法满足要求,更高精度的亚像素算法得到关注。亚像素级精度对边缘的定位算法是先像素级精度进行粗定位,再亚像素精度的精确定位。

最早应用的亚像素算法是重心法,后来又发展了应用不同原理的亚像素提取算法,如概率论法、解调测量法、切线法、滤波重建法、矩法、插值法、多项式拟合法、一阶微分期望值法等^[4]。相关学者在具体应用时作了一定改进,文献[4]提出一种基于水平划线法的改进的重心法亚像素提取方法,其优点是将传统重心算法中水平、垂直双向方向都需要进行处理,变成只需在水平方向处理即可,提高了运算速度。但对于计算平均宽度的离散程度而言,没有传统重心算法好。文献[38]采用基于 Zernike

正交矩的图像亚像素边缘检测算法,描绘出以亚像素点表示的精确边缘图,可实现远距离拍摄裂缝检测宽度平均误差为0.20 mm。文献[8]提出一种基于邻域梯度特征的高斯曲线拟合亚像素定位算法,与一维灰度矩和二次多项式插值法在各信噪比水平下比较,其边缘定位精度最高且可重复性最好。

改进算法在检测和提取图像裂缝边缘时定位精度更高、边缘特征更明显,但是都存在计算复杂、计算机处理耗时长等缺点。

2.2 灰度级阈值分割法

对于光照均匀、裂缝清晰,直方图中呈现双峰特征的图像,采用该方法分割效果较好。文献[38]通过全局和局部阈值的循环迭代动态获取和区域的灰度特性相匹配的自适应阈值得到裂缝区域,具体如图14所示。

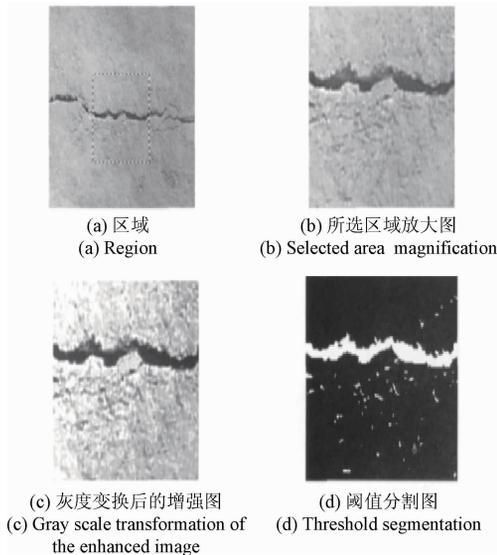


图14 全局阈值和局部阈值的循环迭代算法

Fig. 14 Cyclic iteration algorithm with global threshold and local threshold

由图14可知,该方法裂缝区域是人为选择,在阈值选择中忽略了大部分背景噪声干扰,属于理想情况下的灰度阈值分割。但实际情况背景复杂,需要自动最佳阈值分割,最常用的方法是基于最大类间方差分割法,它是1979年由日本学者 Otsu N. A. 提出^[39],该方法解决了最佳阈值点的选择问题,是一种自适应的阈值确定方法,又叫大津法(Otsu)。文献[12,18-19,21,39]都采用该方法对图像进行分割,该方法能够将背景与裂缝分割开,去除背景噪声较干净,但裂缝有断开现象,二值化图像基本无多余信息,减少后续处理的数据量,提高运算效率^[19]。但在光照不均匀或者背景存在杂色点时,会导致背景区域与裂缝区域存在灰度接近或者一致的点,通过计算得到的最佳阈值不是太合适,因此分割效果不理想^[18]。文

献[40]对比进行改进,与 Prewitt 算子进行结合,并用数学形态学对图片进一步优化,从而得到裂缝区域完整而杂质区域较少的二值图像。文献[19]使用基于直方图修正的迭代剪枝法与最大类间方差法进行对比实验,效果如图15所示。

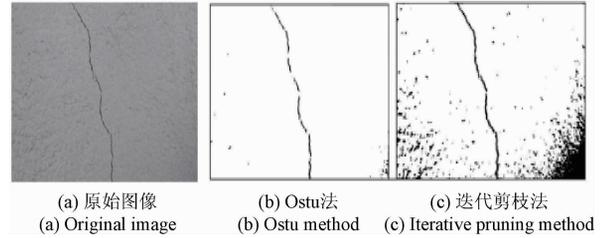


图15 区域分割法处理结果

Fig. 15 Region segmentation results

由图15可知,两种算法都能较好地地区分出目标裂缝和背景。Otsu法分割后,裂缝有断开现象,但噪声得到了很好的抑制,对直方图双峰不明显,或图像背景和目標比例差异悬殊时,效果更佳;而迭代剪枝法较好地保留了裂缝细节,但图像处理中仍有多余的噪声^[19],适合于直方图双峰明显,谷底较深的图像。

3 干扰信息剔除

裂缝检测分割提取后,除了裂缝本身还有非裂缝部分,为了后续裂缝宽度的测量,需要在此剔除非裂缝的干扰信息。采用的方法主要包括基于二值图的形态学法、基于二值图与灰度图相结合法以及机器学习法。

3.1 基于二值图的干扰剔除

裂缝检测分割后将灰度图转换成二值图,从中可见裂缝与干扰信息的差别主要集中于几何形态特征上。文献[5,12,40-41]采用基于二值图的数学形态学识别法,通过对试验图片集合特征的分析确定描绘子为面积、周长、集中度、分散度、外接矩形长宽比、外接矩形占有率、密度、长度、分形维数、斜裂缝夹角、裂缝间距、宽度等。文献[42]对其进行改进,将基于结构的几何形状和裂纹的图案相结合识别裂缝,取得一定效果。

然而,当裂缝形态复杂时,使得形态变量的定义变得十分困难。分形理论属于非线性科学,适合用来描述无序的混乱现象和不规则的形态。分形学作为信息科学的基础数学理论,已经被广泛地应用到计算机图形学和图像处理等领域^[43]。现今的研究成果已经表明,物体的裂缝(陶瓷、岩石、路面、混凝土等)均为分形结构,具有很好的自相似性,满足分形规律^[44]。文献[45]通过分析混凝土裂缝图像面积-周长关系的分形规律,提出一种结合简单灰度骨架提取和分形优化的裂缝识别算法,能够较

好地抑制背景干扰,与传统的阈值分割和分形维数分割相比更为有效,如图 16 所示。

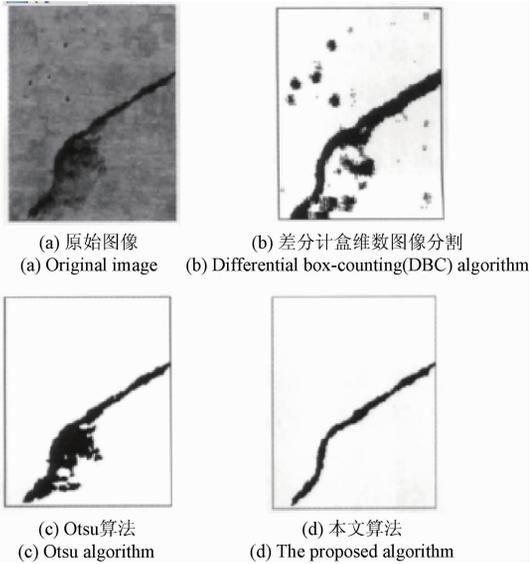


图 16 分形优化结果

Fig. 16 Fractal optimization results

3.2 基于二值图与灰度图结合的干扰剔除

对于形态上与裂缝十分相近的干扰,在二值图中无法分开,再重新回到灰度图,分析信息量(熵)、灰度平均值、灰度众数、灰度中值、灰度方差等统计信息剔除干扰。

文献[41]采用选择式掩膜平滑滤波,掩模均值滤波后利用方差特征进行裂缝提取,但方差反应图像高频部分的大小,裂缝和噪声都有高频成分,因此很难区分。文献[46]采用结合形态学处理和逻辑回归算法检测裂缝,利用统计学分类方法滤除噪声,提高检测精度。为去除形状不规则噪声,如紧密型块状、延展性块状、近似裂缝线条状噪声等。文献[47-48]采用一种基于连通区域的多级滤波算法,通过连通区域零阶矩、矩形度和特殊区域这 3 个滤波特征,滤除图像中大量的不规则噪声。文献[49]采用一种基于特征分析的多级滤波算法,包括基于矩形模板的滤波、基于连通区域的滤波和基于变换的线性特征滤波,能滤除图像中的大量背景成分和纹理噪声。文献[21]采用一种基于支持向量机(support vector machine, SVM)的裂缝识别算法,选取最大连通区域的矩形度、目标像素点比率、最大连通区域的宽高比、Hu 不变矩 1、Hu 不变矩 2、最大连通区域的偏心率这 6 个统计特征,为后续 SVM 训练构造特征向量。为改善传统识别分割算法对受多噪点干扰的裂缝图像处理效果不佳的情况,文献[50]对此进行改进,引入二维大津法^[51]和马尔科夫随机场^[52]两种分割算法,较好地结合了预处理与分割处理的优点,考虑其邻域要求,通过局部运算就能获得全局的优化结果,对于裂缝中的断裂处也可以较好地填充和修补。

3.3 基于机器学习的干扰剔除

近几年,机器学习法在系统辨识、模式识别、智能控制等领域中广泛应用,可自动将裂缝与非裂缝进行分类。

3.3.1 神经网络

与传统的神经网络相比,2006 年由 Huang G. B. 等人提出的一种单隐层前馈型神经网络(extreme learning machine, ELM),有避免局部最小值、训练速度快、参数选择随机等优势^[53-54]。文献[6]采用此方法,将面积、平均灰度值、距离直方图、样本间线性关系这 4 个特征变量提取出来,通过训练 ELM 分类器实现二值图中裂缝和非裂缝的分类,处理后的图像中裂缝的主体区域均被正确的识别出来,且识别出的裂缝完整性更高。

从 20 世纪 90 年代开始,由 Eckhorn R 等人对猫的视觉皮层神经元脉冲串同步震荡现象的研究,得到了哺乳动物神经元模型,对 Eckhorn 提出的模型进行改进得到了脉冲耦合神经网络模型(pulse coupled neural network, PCNN)。它是由若干个神经元互连形成的有连接域的非线性的反馈型神经网络。文献[18,55]分别采用了该方法,实现裂缝图像的自动分割。但由于隧道衬砌裂缝图像比较复杂,使用该分割方法不能完整地获取到图像中的信息,图像分割效果不佳。

3.3.2 SVM

Corts C 等人于 1995 年首次提出的 SVM 可以克服神经网络难以避免的问题,受到各领域的重视。文献[21,56]均采用了该方法,将统计出的特征进行训练,再用 SVM 进行分类识别裂缝。其中文献[21]将矩形度、不变矩等特征提取出来作为训练对象,利用前处理算法构造裂缝和非裂缝的样本库,设计样本特征,构造特征向量,训练采用交叉验证和网格搜索法选择的参数。最后对传统图像进行实验,识别准确率为 97%;对北京地铁隧道表面图像进行实验,识别准确率为 81%。该方法缺点是在噪声复杂的隧道图像中,样本特征定义不明确、识别率较低。

目前来看,虽然神经网络、SVM 均为机器学习领域非常流行的方法,但是针对裂缝的识别问题,尤其在复杂背景情况下的裂缝与干扰具有相似的灰度值、梯度值、形状特征等,如电缆线、砖块、网格等,甚至有相交叉的情况,即使对于近年来新提出的深度学习理论也存在着训练特征时不够充分准确的现象而导致实际应用时识别率并不高的缺点。

4 裂缝的宽度测量及误差分析

裂缝宽度是主要衡量裂缝严重程度的因素,因此需定量计算裂缝平均宽度和最大宽度。国际标准大于 0.2 mm 宽的裂缝需要修补。

1) 二值图的线测量法

对环向裂缝宽度测量主要采用裂缝边缘距离法。文献[4]采用水平标尺法结合最小距离法,求裂缝某一行左边缘点的坐标与各行右边缘点的各坐标的距离,取距离最小值作为该行的裂缝宽度值。为了使计算量减小,文献[8]将右边缘点的搜索范围控制在以同一行右边缘点为中心的 5×5 窗口内。

对斜向裂缝、纵向裂缝宽度的测量主要采用裂缝边缘或骨架切线垂线法。文献[8]采用裂缝边缘选取切线,即将左边缘点以及上下相邻行的左边缘点一起确定抛物线,计算左边缘点处的一阶导数为抛物线切线斜率,过左边缘点处作切线垂线,并相交于右边缘点,若右边缘没有点在该垂线上,则遍历右边缘寻找与该垂线距离最短的点,左右边缘点之间的距离即为裂缝宽度。但裂缝边缘弯曲严重或拐角过多时,误差很大。文献[57]采用裂缝骨架选取切线,即对裂纹提取骨架后上下或者左右搜索,并结合链码决定的裂纹走向得到宽度。但对于复杂的多分支细小裂纹,算法难以处理。

2) 二值图的区域测量法

文献[6]采用邻域扩张的思想来计算裂缝的宽度,即选取裂缝的一个内部点,向两侧扩张直至到裂缝边界。计算4个宽度方向上扩张的像素点个数,取所有内部点宽度的最小值作为裂缝区域的宽度。

3) 灰度图的测量法

文献[47]先对裂缝二值图像细化、提取裂缝骨架、去除分支后,再结合灰度图中邻域均值和标准差计算裂缝宽度。

裂缝检测结果与真实情况存在着一定误差,相关学者对这些误差的产生原因进行了研究总结。文献[38]总结为误差主要是由图像成像质量、相机标定、图像识别算法自身不足、拍摄角度变化及拍摄距离变化等5个方面引起的。文献[58]分析了有效像素、检测距离、检测速度、光照强度等因素对检测精度的影响。有效像素增大会导致检测距离减小,对图像分布的特征影响不大,检测精度增大;检测速度增大会导致检测精度降低,光照强度高或过低都会影响检测精度。

5 结 论

本文在机器视觉研究方法的背景下,对目前国内外关于隧道衬砌混凝土裂缝检测算法的研究进行了较全面的综述并给出如下结论及未来研究方向的建议。

隧道衬砌表面粗糙,形成了一种特定的纹理。在提取裂缝的同时,也会提取到背景的纹理。因此,一些学者提出了通过滤波的方法消除背景纹理信息,从结果来看,并没有彻底消除背景纹理;一些学者提出了裂缝增强算

法,对于背景纹理对比度不大的图像看起来有一定效果。但是,如何确保背景纹理不被增强,没有看到有效的方法。至于图像均衡化,对于裂缝提取的作用有待磋商。总之,所有旨在消除背景纹理的操作,都应该确保裂缝信息不被消除或者削弱。

关于裂缝检测,一些学者从边缘检测、目标跟踪、多分辨率分析角度出发,提出了一些实现方法,在一定环境下取得了一定效果。由于拍摄的图像可能存在如下情况:1)图像特别是裂缝区域对比度小;2)衬砌表面粗糙度大,使得背景纹理清晰;3)裂缝呈现断断续续、宽度变化大、裂缝内部亮度变化大的特点,本项目对目前一些算法在采集的图像中进行测试,未发现有能适应上述环境条件的算法。

关于如何消除衬砌上悬挂的灯箱、灯、电线对于裂缝检测结果的影响,目前还缺少相关文献报道。

6 未来设想

高速公路衬砌表面裂缝存在的环境比较复杂,从实际应用角度出发,无论采用什么数学模型,都要针对以下环境开展算法研究,提高算法的鲁棒性,特别是将漏检率为零作为研究目标。

1)裂缝区域图像对比度小;2)衬砌表面粗糙度大,使得背景纹理清晰;3)裂缝呈现断断续续,宽度变化大,裂缝内部亮度变化大;4)渗水、水印与裂缝共存;5)修好的裂缝不被误识;6)背景干扰的剔除,包括砖缝、灯箱、电线管线、灯、笔迹、以及其他结构等。

致 谢

辽宁省高速公路养护中心在本项目建立高速公路隧道衬砌裂缝图库中给予了大力支持,在此表示感谢!

参考文献

- [1] 唐亮. 隧道病害调查分析及衬砌结构的风险分析与控制研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.
TANG L. Tunnel disease diagnosis and risk analysis and control research of lining structure[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [2] 中国公路学报编辑部. 中国隧道工程学术研究综述2015[J]. 中国公路学报,2015,28(5): 1-65.
Editorial Department of China highway journal. Summary of academic research on Chinese tunnel engineering 2015[J]. Journal of China highway, 2015, 28(5): 1-65.
- [3] 重庆市交通委员会. 公路隧道养护技术规范(JTG H12-2015)[S]. 北京:人民交通出版社,2015.
Chongqing Traffic Committee. Technical specifications for

- highway tunnel maintenance (JTG H12-2015)[S]. Beijing: People Communications Press, 2015.
- [4] 尹兰. 基于数字图像处理技术的混凝土表面裂缝特征测量和分析[D]. 南京:东南大学, 2006.
YIN L. Measurement and analysis of crack feature of concrete surface based on digital image processing techniques [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [5] 王睿. 隧道衬砌裂缝车载检测图像分析研究[D]. 成都:西南交通大学, 2012.
WANG R. Research on image processing of in-vehicle tunnel lining crack detection [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [6] 元大鹏. 地铁隧道图像数据分析系统[D]. 北京:北京交通大学, 2016.
YUAN D P. Analysis system for subway tunnel image [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [7] 吴欢欢. 混凝土裂缝图像测量系统研究与开发[D]. 南京:南京航空航天大学, 2009.
WU H H. Research and development of an image measurement system for concrete crack [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [8] 崔磊. 基于图像处理技术的建筑物表面裂缝测量方法的应用研究[D]. 北京:北京工业大学, 2013.
CUI L. Applied study of crack measurement methods in the surface of buildings based on image processing technology [D]. Beijing University of Technology, 2013.
- [9] DONOHO D L. Denoising by soft- thresholding [J]. IEEE Transformation Theory, 1995, 41(3): 613-627.
- [10] DONOHO D L. Neo-classical minimax problems, thresholding and adaptive function estimation [J]. Bernoulli, 1996, 2(1): 39-62.
- [11] DONOHO D L, JOHNSTONE I M. Adapting to unknown smoothness via wavelet shrinkage [J]. Journal of American Statistical Association, 1995, 909 (432): 1200-1224.
- [12] 王华夏. 高速铁路隧道衬砌裂缝图像快速采集系统研究[D]. 成都:西南交通大学, 2013.
WANG H X. Research on rapid acquisition image system for the cracks of high-speed railway tunnel lining [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [13] 梁琳, 何卫平, 雷蕾, 等. 光照不均图像增强方法综述[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(5): 1625-1628.
LIANG L, HE W P, LEI L, et al. Survey on enhancement methods for non-uniform illumination image [J]. Application Research of Computers, 2010, 27(5): 1625-1628.
- [14] 蒋永馨, 王孝通, 徐晓刚, 等. 一种基于光照补偿的图像增强算法 [J]. 电子学报, 2009, 37(增刊1): 151-155.
JIANG Y X, WANG X T, XU X G, et al. A method for image enhancement based on light compensation [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(Suppl. 1): 151-155.
- [15] ZHANG X M, SHEN L S. Image contrast enhancement by wavelet based homomorphic filtering [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(4): 531-533.
- [16] FATTAL R, LISCHINSKI D, WERMAN M. Gradient domain high dynamic range compression [C]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2002: 249-256.
- [17] 肖创柏, 赵宏宇, 禹晶. 基于引导滤波的 Retinex 快速夜间彩色图像增强技术 [J]. 北京工业大学学报, 2013(12): 1868-1873.
XIAO CH B, ZHAO H Y, YU J. Rapid retinex algorithm for night color image enhancement based on guided filtering [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013(12): 1868-1873.
- [18] 成艳枝. 基于图像处理的隧道衬砌裂缝检测系统设计与研究[D]. 太原:太原理工大学, 2015.
CHENG Y ZH. Research and design of tunnel lining crack detection system based on image processing [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.
- [19] 刘晓瑞, 谢雄耀. 基于图像处理的隧道表面裂缝快速检测技术研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(增刊2): 1624-1628.
LIU X R, XIE X Y. Rapid crack inspection of tunnel surface based on image processing [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(Suppl. 2): 1624-1628.
- [20] IYER S, SINHA S K. Segmentation of pipe images for crack detection in buried sewers [J]. Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, 2006, 21(6): 395-410.
- [21] 白彪. 地铁隧道表面图像裂缝识别算法研究 [D]. 北京:北京交通大学, 2015.
BAI B. Research on crack identification algorithm of subway tunnel surface image [D]. Beijing Jiaotong University, 2015.
- [22] SHI C, LIU F, LI L L, et al. Pan-sharpening algorithm to remove thin cloud via mask dodging and nonsampled shift-invariant shearlet transform [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2014, 8(1): 083658-083658.
- [23] HU Q, LI Q. A cloud change detection algorithm in MODIS image based on mask dodging technique [C]. IEEE Congress on Image and Signal Processing, 2008: 249-253.
- [24] WANG M, PAN J, CHEN S, et al. A method of removing the uneven illumination phenomenon for optical remote sensing image [C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005: 3243-3246.
- [25] FUJITA Y, MITANI Y, HAMAMOTO Y. A method for crack detection on a concrete structure [C]. 18th IEEE International Conference on Pattern Recognition, 2006:

- 901-904.
- [26] FUJITA Y, MITANI Y, HAMAMOTO Y. A method for crack detection on a concrete structure[C]. 18th IEEE International Conference on Pattern Recognition, 2006: 901-904.
- [27] MARR D, HILDRETH E. Theory of edge detection[J]. Proceeding of the Royal Society of London, Series B; Biological Sciences, 1980,207(1167):187-217.
- [28] 沈瑜. 基于 NSCT 的隧道裂缝图像检测[J]. 城市道桥与防洪,2013(10):176-177.
SHEN Y. Image detection of tunnel crack based on NSCT[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2013(10):176-177.
- [29] YAMAGUCHI T, HASHIMOTO S. Fast crack detection method for large-size concrete surface images using percolation-based image processing[J]. Machine Vision and Applications, 2010, 21(5):797-809.
- [30] TSAI Y J, KAUL V, YEZZI A. Automating the crack map detection process for machine operated crack sealer[J]. Automating in Construction, 2013,31(5):10-18.
- [31] 张硕,张尤赛,许智勋,等. 一种基于种子点扩散的隧道裂缝半自动提取方法[J]. 计算机与数字工程, 2017,45(2):387-391.
ZHANG SH, ZHANG Y S, XU ZH X, et al. A semi-automatic extraction method for tunnel cracks based on seed point diffusion[J]. Computer & Digital Engineering, 2017,45(2):387-391.
- [32] LI Q Q, ZOU Q, ZHANG D Q, et al. FoSA: F* seed-growing approach for crack-line detection from pavement images[J]. Image and Vision Computing,2011,29(12):861-872.
- [33] ZOU Q, CAO Y, MAO Q Z, et al. CrackTree: Automatic crack detection from pavement images[J]. Pattern recognition letters, 2012,33(3):227-238.
- [34] ZHU Z H, GERMAN S, BRILAKIS I. Visual retrieval of concrete crack properties for automated post-earthquake structural safety evaluation[J]. Automation in Construction, 2011, 20(7):874-883.
- [35] YAMAGUCHI T, HASHIMOTO S. Fast crack detection method for large-size concrete surface images using percolation-based image processing[J]. Machine Vision and Applications,2010,21(5):797-809.
- [36] 王平让,黄宏伟,薛亚东. 基于图像局部网格特征的隧道衬砌裂缝自动识别[J]. 岩石力学与工程学报, 2012,31(5):991-999.
WANG P R, HUANG H W, XUE Y D. Automatic recognition of cracks in tunnel lining based on characteristics of local grids in images[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012,31(5):991-999.
- [37] 吴晓军,白韶红,啜丙强,等. 基于 CMOS 线阵相机地铁隧道裂缝快速检测系统[J]. 路基工程,2015(3):185-190.
WU X J, BAI SH H, CHUAI B Q, et al. Fast detection system for metro tunnel crack based on CMOS line-scan digital camera[J]. Subgrade Engineering, 2015(3):185-190.
- [38] 刘学增,叶康. 隧道衬砌裂缝的远距离图像测量技术[J]. 同济大学学报:自然科学版,2012,40(6):829-836.
LIU X Z, YE K. A long-distance image measuring technique for crack on tunnel lining[J]. Jourvai of Tongji University :Natural Science, 2012, 40(6):829-836.
- [39] OTSU N A. Threshold selection method from gray 2 level Histogram[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics, 2007,9(1):62-66.
- [40] 王睿,漆泰岳,雷波,等. 隧道衬砌裂缝特征提取方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(6):1211-1217.
WANG R, QI T Y, LEI B, et al. Characteristic extraction of cracks of tunnel lining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015,34(6):1211-1217.
- [41] 卫军,曹龙飞,曾艳霞,等. 混凝土结构裂缝特征提取研究[J]. 武汉理工大学学报,2011(11):72-75.
WEI J, CAO L F, ZENG Y X, et al. Study on feature extraction of concrete structure cracks[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011(11):72-75.
- [42] YU S N, JANG J H, HAN C S, et al. Auto inspection system using a mobile robot for detecting concrete cracks in a tunnel[J]. Automation in Construction,2007,16(3):255-261.
- [43] 朱华,姬翠翠. 分形理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2011.
ZHU H, JI C C. Fractal theory and its applications[M]. Beijing: Science Press,2011.
- [44] 熊兆贤. 陶瓷材料的分形研究[M]. 北京:科学出版社,2000.
XIONG ZH X. Fractal research on ceramics materials[M]. Beijing: Science Press,2000.
- [45] 杨松,邵龙潭,郭晓霞,等. 基于骨架和分形的混凝土裂缝图像识别算法[J]. 仪器仪表学报,2012,33(8):1850-1855.
YANG S, SHAO L T, GUO X X, et al. Skeleton and fractal law based image recognition algorithm for concrete crack[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012,33(8):1850-1855.
- [46] LANDSTRM A, THURLEY M J. Morphology based crack detection for steel slabs[J]. IEEE Signal Processing Society,2012,6(7):866-875.
- [47] 王耀东,余祖俊,白彪,等. 基于图像处理的地铁隧道

- 裂缝识别算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(7): 1489-1496.
- WANG Y D, YU Z J, BAI B, et al. Research on image processing based subway tunnel crack identification algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(7): 1489-1496.
- [48] 余祖俊, 王耀东, 朱立强, 等. 一种地铁隧道表面裂缝的检测方法: 中国, CN2014100802. X [P]. 2014-03-18.
YU Z J, WANG Y D, ZHU L Q, et al. A method for detecting surface cracks of subway tunnel: CHINA, CN2014100802. X [P]. 2014-03-18.
- [49] 朱力强, 白彪, 王耀东, 等. 基于特征分析的地铁隧道裂缝识别算法[J]. 铁道学报, 2015, 37(5): 64-70.
ZHU L Q, BAI B, WANG Y D, et al. Subway tunnel crack identification algorithm based on feature analysis[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(5): 64-70.
- [50] 陈绍磊. 混凝土裂缝特征信息识别与辨析研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
CHEN SH L. Recognition and identification research on concrete crack characteristic information[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [51] TSAI R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, 3(4): 323-344.
- [52] YAMAGUCHI T, HASHIMOTO S. Fast crack detection method for large-size concrete surface images using permutation-based image processing [J]. Machine Vision and Applications, 2010, 21(5): 797-809.
- [53] HUANG G B, ZHOU H M, DING X J, et al. Extreme learning machine for regression and multiclass classification[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part B Cybernetics A Publication of the IEEE Systems Man & Cybernetics Society, 2012, 42(2): 513-529.
- [54] ZHANG W, ZHANG Z. Belief function based decision fusion for decentralized target classification in wireless sensor networks [J]. Sensors, 2015, 15(8): 20524-20540.
- [55] 赵慧洁, 葛文谦, 李旭东. 最小误差准则与脉冲耦合神经网络中的裂缝检测[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(3): 637-642.
- ZHAO H J, GE W Q, LI X D. Detection of crack defect based on minimum error and pulse coupled neural networks[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(3): 637-642.
- [56] LIU Z, SUANDI S A, OHASHI T, et al. Tunnel crack detection and classification system based on image processing[J]. Electronic Imaging, 2002, 4664(11): 495-499.
- [57] 刘清元, 谈桥. 基于图像处理的混凝土裂缝的检测[J]. 武汉理工大学学报, 2005, 27(4): 69-71.
LIU Q Y, TAN Q. Concrete crack detection based on image processing [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2005, 27(4): 69-71.
- [58] 周建, 段中兴, 陈胜, 等. 隧道裂缝自动识别性能影响因素的研究[J]. 公路, 2016(5): 216-222.
ZHOU J, DUAN ZH X, CHEN SH, et al. Study of factors affecting automatic detection performance of cracks in tunnel[J]. Highway, 2016(5): 216-222.

作者简介



苑玮琦, 1982年于湖南大学获得学士学位, 分别在1988年和1997年于东北大学获得硕士学位和博士学位, 现为沈阳工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为生物特征识别和机器视觉。

E-mail: yuan60@163.com

Yuan Weiqi received his B.Sc. degree from Hunan University in 1982, and received his M.Sc. and Ph.D. degrees both from North-eastern University in 1988 and 1997, respectively. Now he is a professor and doctoral supervisor in Shenyang University of Technology. His main research interests include biometric identification and machine vision.



薛丹(通讯作者), 分别在2005年和2008年于沈阳工业大学获得学士学位和硕士学位, 现为沈阳工业大学讲师、博士研究生, 主要研究方向为机器视觉和图像处理。

E-mail: x2d2003@163.com

Xue Dan (Corresponding author) received her B.Sc. and M.Sc. degrees both from Shenyang University of Technology in 2005 and 2008, respectively. Now she is a lecturer and Ph.D. candidate in Shenyang University of Technology. Her main research interests include machine vision and image processing.