

数字图像处理在混凝土路面裂缝中的应用

高凡,贺春光,王鹏章,秦彦平,多化琼*

(内蒙古农业大学 材料科学与艺术设计学院,内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要:使用传统的混凝土路面裂缝检测方法得到的图像存在对比度不强、噪声大等问题,难以满足现代道路工程管理或者无损检测等工作使用要求。为解决裂缝图像中存在的这些干扰,采用数字图像处理技术通过计算机手段来改善图像质量等问题。该文以数字图像处理为核心展开,介绍其在路面裂缝应用中的发展。围绕近年来数字图像处理在道路裂缝上的研究进展与成果,分析数字图像处理在去除裂缝图像噪声、增强、分割、特征提取方面的原理和特点。最后,综述目前存在的问题,并探讨未来的发展趋势和应用前景。数字图像处理技术可有效改善路面裂缝图像的质量、增强重要特征,在混凝土路面裂缝图像处理中具有较大的应用价值。

关键词:图像处理;数字化;裂缝检测;混凝土路面

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

0 引言

数字图像处理最早出现于20世纪50年代,之后图像处理技术深入发展,人们更多地用计算机来处理图形和图像信息,其也逐渐被应用于处理航空航天拍摄传回的图像、医学检测图像分析、遥感图像、工业检测等各方面。在国内外公路建设中,水泥混凝土路面占比大,而混凝土路面结构中的裂缝是最常见和最严重的问题之一^[1-3],也是混凝土路面结构安全性评估的重要参考因素。然而,国内外的目视检查工作,在大多数情况下仍是由人来进行的,手动检查的缺点已经越来越明显,并且人工操作者的专业知识储量、经验积累以及技能的熟练性均会对图像的准确分析造成影响。同时,还要考虑混凝土路面的其他因素,如:阴影、污渍、气泡等,它在可靠性、客观性和可复制性方面也受到限制。

数字图像处理技术将图像信号转换成数字信号并采用计算机等硬件设备进行处理,能进行复杂运算且处理精度高。目的在于恢复图像的本来面目,改善人们的视觉效果,突出图像中标物的某些特征,提

取目标物的特征参数,以方便后续的图像存储、传输等操作^[4]。随着计算机和人工智能的快速发展,数字图像处理技术不断进步且应用更为广泛,为混凝土路面裂缝检测提供一种更为安全、有效和精准的方式,国内外学者对此也进行了更深入的研究^[5-7]。

由此,本文对数字图像处理技术在路面裂缝中的应用进行综述,结合国内外已有成果,总结目前存在的问题,并探讨未来发展与应用前景,为混凝土路面裂缝检测方法提供思路。

1 数字图像的混凝土路面裂缝去噪处理

对于任何采集到的原始图像,由于受到混凝土路面自身情况影响,周围环境的干扰及采集设备的振动,在采集图像过程中不可避免地会采集到含有噪声的裂缝图像。噪声会降低图像的质量,因此,去除或者减弱图像噪声^[8-10]对于后续的图像处理极为重要。混凝土路面通常存在大量的噪声和干扰,近几十年的研究也呈现出了许多方法,使用空间域滤波方法^[11-12]去噪通常是对混凝土路面裂缝图像的像素进行操作,包括有自适应中值滤波算法^[11-13]、形态学滤波^[14]等。

收稿日期:2022-06-19(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:31760185)

作者简介:高凡,女,硕士研究生.E-mail:gaofan730@163.com

*通信作者:多化琼,女,博士,教授.E-mail:duohuaqiong@163.com

如图1为基于空间域滤波的降噪图。但不同噪声的算法稳定性相对较差,易使图像变模糊。

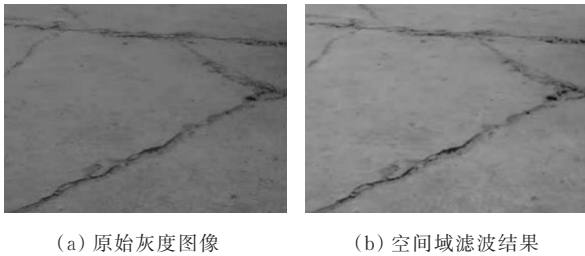


图1 基于空间域滤波的降噪图

使用频域滤波方法去噪则是先对图像的变换值进行操作,包括傅里叶变换、小波变换^[15]等,具

有明显的去噪能力和滤波效果。张宏等^[16]先对原始混凝土路面裂缝图像使用傅里叶变换得到其在频域中的图像,再根据频域中裂缝图像的噪声干扰特征,设计相应的滤波器,提出了一种基于频域滤波的降噪方法。如图2为基于频域滤波的降噪图。

近年有研究者将基于渗流模型^[17-20]的去噪算法应用于混凝土路面裂缝图像中。Qu等^[21]提出一种引入加速算法^[18]的渗流模型去噪方法,将每个像素值为 $Fc \times 255$ 的灰度图像通过亮度特征和裂缝长度特征去除噪声区域,表现出不错的去噪效果。如图3为基于渗流模型的降噪图。

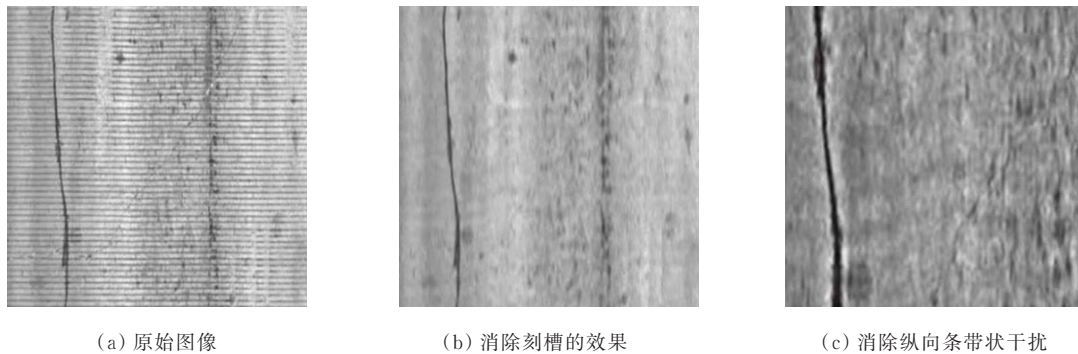


图2 基于频域滤波的降噪图

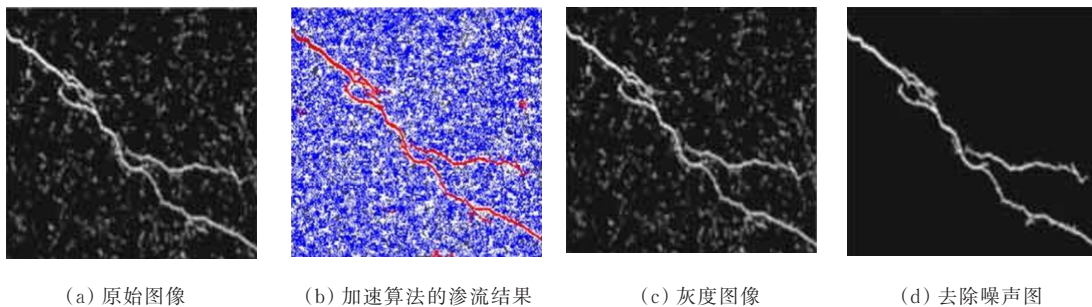


图3 基于渗流模型的降噪图

2 数字图像的混凝土路面裂缝增强处理

图像增强已广泛应用在各个领域^[22-24],其主要目的是改善图像的视觉效果,通过对图像的噪声、清晰度、外界环境条件影响等因素的分析,采用计算机手段,将本身不清晰的图像变得清晰或者重点突出某些需要的特征,抑制不必要的影响因子,增强图像的质量、强调图像特征、加强图像的判读和识别效果。

一般情况下,在初步滤除噪声之后得到的混凝土路面裂缝图像依然不能满足使用要求。尽管图像噪声减弱了,但仍会出现一些其他问题,如:图像对

比度不明显,图像变得更加模糊,裂缝边缘特征不清晰等,因此需要进一步对图像进行增强处理。如:对数字图像进行二值化^[25-26]处理、形态学^[27-29]处理、基于局部图像增强的方法^[23]、灰度强度调整方法^[30]、基于分数微分^[31]等方法进一步改善增强效果。但上述方法多少都存在一些缺陷,如:基于局部图像增强的方法增加了直接操作局部区域的难度。基于边缘检测方法^[32-35]能够较好地增强图像,突出所需区域特征,包括Sobel、快速Haar变换等。Nnolim^[36]提出了一种基于偏微分方程的预处理算法,与图像增强处理相结合,对混凝土路面裂缝边缘的增强有明显效果,但对于粗糙复杂的纹理图像处理产生不必要的

噪点。韩锟等^[37]设计了一种基于拟合图像背景的匀光算法,并结合最小值滤波器增强裂缝图像对比度,有效改善了混凝土路面裂缝图像的质量。

以上方法虽然能够较好地达到图像增强的目的,但在雾霾等恶劣天气条件下得不到满足使用要求的图像质量,裂缝不能清晰地呈现出来。因此,针对雾霾天气或者能见度不高的情况下进行的裂缝检测,孙乐乐等^[38]提出了除雾算法与裂缝检测相结合的方法,此算法通过引入参数来调节去雾效果,还原图像的景深效果,增强空间感;采用导向滤波算法优化运算时间和透射率,从而去除或者退化图像中的雾霾颗粒,达到增强图像的效果。此算法一般用于前期的裂缝图像处理,去除图像中的雾霾,为后续裂缝检测提供更高清晰度的图像输入,便于及时制定合适的混凝土路面裂缝解决方案。如图4为去雾效果图。



(a) 原始图像

(b) 去雾后图像

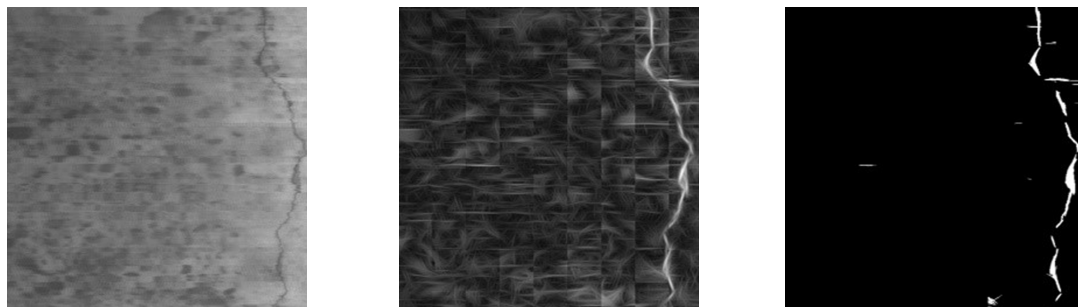
图4 去雾效果图

此方法去雾效果明显,对雾霾天气或者能见度

不高的情况下采集到的图像能发挥很好的作用,但是前期图像处理步骤繁多,根据实际情况确定引入参数又增大了计算工作量,前期图像处理表现出的效率并不理想,需要进一步试验研究,以便快速选择出合适的参数。

3 数字图像的混凝土路面裂缝分割处理

混凝土路面裂缝数字图像分割是图像识别分析和裂缝特征提取的重要处理步骤,现有的图像分割方法主要包括:阈值法^[39-40]、区域分割法、边界探测法等。Kamaliardakani等^[39]在混凝土裂缝图像分割中,基于局部最小法开发了一种启发式确定阈值法,以将前景与背景区分开。使用改进的Otsu方法^[30]进行图像阈值处理,然而Otsu对噪音和目标大小比较敏感,虽然不是最佳的分割方法,但是比较适合于混凝土裂缝图像分割。但无论是全局阈值法、局部阈值法还是自适应阈值法^[41-42],最关键的都是确定阈值。Medina等^[43]提出一种基于图像局部空间频率信息的方法,即基于Gabor滤波器^[44-45]的新方法,将其称为旋转不变的Gabor滤波器,旋转不变的Gabor滤波器过滤后图像的最大值将组成一个新图像,采用差分进化算法的变体对旋转不变的Gabor滤波器的参数进行设置后,得到清晰的混凝土隧道中的路面裂缝分割图像,图5为其分割结果图。



(a) 原始图像

(b) 过滤后的图像

(c) 分割图像

图5 分割结果图

4 数字图像的混凝土路面裂缝特征提取及检测

经过图像增强、分割处理后,对混凝土路面裂缝

数字图像进行裂缝特征提取,如:裂缝存在位置,裂缝宽度、长度或者其面积参数,以便于后续检测。裂缝特征提取方法非常多,如:基于改进Canny算子的裂缝可靠边缘特征提取^[37],递归树边缘修剪提取^[46],基于机器学习方法的裂缝特征提取^[47]。构建

了包含多类支持向量机(Support Vector Machine, SVM)和人工蜂群优化算法的机器学习模型^[48],以进行混凝土路面裂缝分类检测;将SVM应用于定向梯度直方图或局部二进制模式^[24,37,49],在局部特征描述符上使用经过训练的分类器进行裂缝检测;Hoang等^[50]将传统的图像增强方法与机器学习相结合,采用SVM分类器进行裂缝检测,而采用机器学习模型也可以对混凝土路面裂缝图像样本分类为“裂缝”和“无裂缝”类别^[51]。采用SVM的机器学习算法检测混凝土路面裂缝图像的鲁棒性不佳,并且基于学习算法的检测速度取决于标记训练数据的特征和数量,在提升检测速度的同时也产生了额外的工作量。

近些年有关将深度学习技术应用于混凝土路面裂缝检测的研究^[52-56]越来越多,大多数使用典型的卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)^[57-61]或

其变体(如 AlexNet^[62-66])对裂缝图像进行分类检测。为了检测高分辨率图像中的裂缝,现有方法使用在子图像(例如 256×256)上训练的深度CNN分类器,以滑动窗口扫描整个图像^[67-68]。

Kim等^[26]提出的一种使用机器学习方法进行混凝土路面裂缝检测的框架是基于裂缝候选区域(Crack Candidate Region, CCR)的有效分类框架,包括CCR的生成以及基于加速鲁棒特征(Speeded-Up Robust Features, SURF)和基于CNN方法的分类。生成CCR后,将基于SURF的方法和基于CNN的方法应用于CCR,以提取裂缝和非裂缝的重要特征,随后将其用于构建分类模型。图6为SURF和CNN的特征提取过程。

图7为基于SURF、CNN方法对4种路面裂缝样品典型分类检测结果,实线框和虚线框分别表示将样本图像中的CCR成功地分类为裂缝和非裂缝。

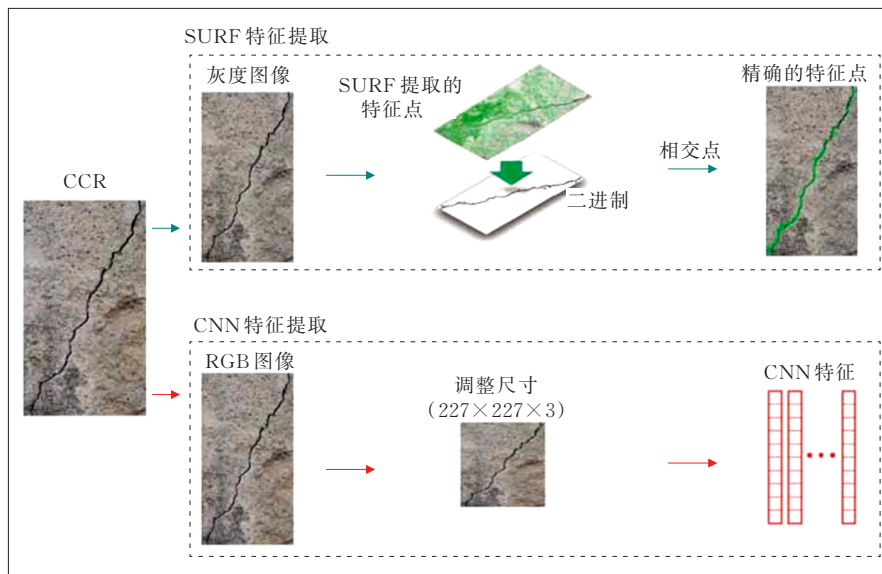


图6 SURF和CNN的特征提取过程

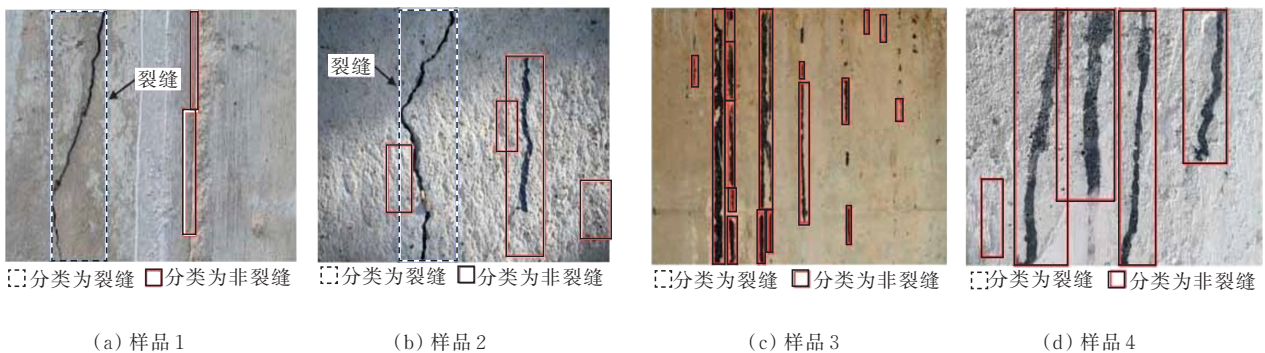


图7 基于SURF和CNN方法的典型分类检测结果

CNN是深度学习中最具代表性的一种模型,近年来研究发现,CNN分类器提取出的裂缝纹样表现最佳,速度快,精度高,CNN的特征提取能力在混凝土路面裂缝数字图像检测中展现出巨大优势。随着深度学习技术的发展进步,其在图像分类处理领域的优势更加显著,将是未来混凝土裂缝检测发展的重要方向之一,具有良好前景。

5 结 论

基于数字图像技术、计算机视觉的处理方法已经应用在各个领域内^[69-74]。数字图像处理技术在混凝土路面裂缝检测中的应用发展也很快,但也呈现出了一些问题,如:在图像去噪过程中造成了边缘过度模糊、处理过程慢等。总结国内外已有文献的研究成果,认为以下几个方面值得深入研究:

(1) 改进传统的图像增强方法时,注重多方面性能的改进提升,如:在解决有污渍、水渍、划痕、阴影等噪声干扰问题时,尝试深入识别裂缝,区分裂缝是属于横向、纵向还是孔隙结构^[75]的裂缝等,做好裂缝图像的分类处理^[76-77],检测出更加细微的裂缝结构,保证分割出完整全面的裂缝结构图像。

(2) 适用不同状况条件下的混凝土路面裂缝识别算法研究,包括公路路面、复杂条件下的桥梁路面,尤其是桥梁路面背部,处于高空,再遇到雾霾天气,环境更为复杂,桥梁底部裂缝识别难度加大,极大地考验算法的鲁棒性^[48,51]。

(3) 基于数字图像处理的混凝土路面裂缝检测的硬件设备整体智能化、便捷化、安全化、物联网化,加快与无人机、机器人等智能便捷设备结合,构建一套物物相连、人网同步,更加安全可靠的无人监督方法^[78-79]的实时在线的裂缝图像处理系统。

(4) 在处理路面裂缝图像中,不仅要提升检测速度,更要保证图像处理算法的精度。避免在提高精度时引起裂缝图像失真,在平衡质量、速度与精度上作进一步研究。

(5) 目前分割提取出来的裂缝图像多为二维平面图像,直观度效果有差别,达不到满意的效果,因此在三维裂缝图像的构建上可作更加深入的探索。

参考文献:

[1] KOCH C, GEORGIEVA K, KASIREDDY V, et al. A

review on computer vision based defect detection and condition assessment of concrete and asphalt civil infrastructure[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2015, 29(2):196-210.

[2] CHO H W, YOON H J, YOON J C. Analysis of crack image recognition characteristics in concrete structures depending on the illumination and image acquisition distance through outdoor experiments[J]. *Sensors*, 2016, 16(10):1646.

[3] PEREIRA E B, FISCHER G, BARROS J A O. Image-based detection and analysis of crack propagation in cementitious composites[J]. *RILEM Proceedings*, 2011: 343-350.

[4] 徐黎明,刘航江.数字图像处理技术研究综述[J]. *软件导刊*, 2016, 15(3):181-182.

[5] MOHAN A, POOBAL S. Crack detection using image processing: A critical review and analysis[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2018, 57(2):787-798.

[6] YEUM C M, DYKE S J. Vision-based automated crack detection for bridge inspection[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2015, 30(10):759-770.

[7] HUANG Y, HE X, WANG Q, et al. Deformation field and crack analyses of concrete using digital image correlation method[J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2019, 13(5):1183-1199.

[8] YANG G, WU J, HU Q. Rapid detection of building cracks based on image processing technology with double square artificial marks[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2019, 22(5):1186-1193.

[9] DAWOOD H, IQBAL M, AZHAR M, et al. Texture-preserving denoising method for the removal of random-valued impulse noise in gray-scale images[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(2):1-14.

[10] GAI S. Multiresolution monogenic wavelet transform combined with bivariate shrinkage functions for color image denoising[J]. *Circuits Systems & Signal Processing*, 2018, 37(3):1162-1176.

[11] PENG B, JIANG Y S, PU Y. Review on automatic pavement crack image recognition algorithms[J]. *Journal of Highway & Transportation Research & Development*, 2015, 9(2):13-20.

[12] 徐爱华,皋军.结合图像增强和数学形态学的水泥混凝土路面裂缝识别方法[J]. *公路*, 2015, 60(10):55-58.

[13] 陈家益,董梦艺,战荫伟,等.中值检测的迭代中值滤波算法[J]. *现代电子技术*, 2020, 43(7):70-73, 77.

[14] KHEIRALIPOUR K, KAZEMI A. A new method to

- determine morphological properties of fruits and vegetables by image processing technique and nonlinear multivariate modeling[J]. *International Journal of Food Properties*, 2020, 23(1):368-374.
- [15] KATUNIN A, HOLEWIK F. Crack identification in composite elements with non-linear geometry using spatial wavelet transform[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2013, 13(3):287-296.
- [16] 张宏, 英红. 频域滤波的水泥路面图像降噪增强方法[J]. *土木建筑与环境工程*, 2015, 37(3):48-52.
- [17] YAMAGUCHI T, NAKAMURA S, SAEGUSA R, et al. Image-based crack detection for real concrete surfaces [J]. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2008, 3(1):128-135.
- [18] YAMAGUCHI T, HASHIMOTO S. Fast crack detection method for large-size concrete surface images using percolation-based image processing[J]. *Machine Vision & Applications*, 2010, 21(5):797-809.
- [19] YAMAGUCHI T, HASHIMOTO S. Image processing based on percolation model[J]. *IEICE Transactions on Information & Systems*, 2006, E89-D(7):2044-2052.
- [20] 瞿中, 鞠芳蓉, 陈思琪. 结构森林边缘检测与渗流模型相结合的混凝土表面裂缝检测[J]. *计算机科学*, 2018, 45(11):288-291, 311.
- [21] QU Z, LIN L D, GUO Y, et al. An improved algorithm for image crack detection based on percolation model[J]. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2015, 10(2):214-221.
- [22] RATHOD V R, ANAND R S. A comparative study of different segmentation techniques for detection of flaws in NDE weld images[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2012, 31(1):1-16.
- [23] ZHANG L, ZHANG Y, DAI B, et al. Welding defect detection based on local image enhancement[J]. *IET Image Processing*, 2019, 13(13):2647-2658.
- [24] ZAKERI H, NEJAD F M, FAHIMIFAR A. Image based techniques for crack detection, classification and quantification in asphalt pavement: A review[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2017, 24(4): 935-977.
- [25] KIM H, AHN E, CHO S, et al. Comparative analysis of image binarization methods for crack identification in concrete structures[J]. *Cement and Concrete Research*, 2017, 99:53-61.
- [26] KIM H. Crack and noncrack classification from concrete surface mages using machine learning[J]. *Structural Health Monitoring*, 2019, 18(3):725-738.
- [27] SU T C, YANG M D. Morphological segmentation based on edge detection-II for automatic concrete crack measurement[J]. *Computers & Concrete*, 2018, 21(6): 727-739.
- [28] HANZAEI S H, AFSHAR A, BARAZANDEH F. Automatic detection and classification of the ceramic tiles' surface defects[J]. *Pattern Recognition*, 2017, 66(C): 174-189.
- [29] NGUYEN H N, KAM T Y, CHENG P Y. An automatic approach for accurate edge detection of concrete crack utilizing 2D geometric features of crack[J]. *Journal of Signal Processing Systems*, 2014, 77(3):221-240.
- [30] HOANG N D. Detection of surface crack in building structure using image processing technique with an improved Otsu method for image thresholding[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 2018(Part 3): 3924120.
- [31] CAO T, WANG W, TIGHE S, et al. Crack image detection based on fractional differential and fractal dimension[J]. *IET Computer Vision*, 2019, 13(1):79-85.
- [32] 刘丹, 王运宏. 限制型自适应 SUSAN 边缘检测算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2020, 32(6):971-978.
- [33] ABDEL-QADER I, ABUDAYYEH O, KELLY M E. Analysis of edge-detection techniques for crack identification in bridges[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2003, 17(4):255-263.
- [34] WANG X, CAO J, HAO Q, et al. LBP-based edge detection method for depth images with low resolutions[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(1):1-11.
- [35] GAI S. Multiresolution monogenic wavelet transform combined with bivariate shrinkage functions for color image denoising[J]. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2018, 37(3):1162-1176.
- [36] NNOLIM U A. Partial differential equation-based enhancement and crack detection[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019, 2019(1):1-16.
- [37] 韩锟, 韩洪飞. 基于区域级和像素级特征的路面裂缝检测方法[J]. *铁道科学与工程学报*, 2018, 15(5):90-98.
- [38] 孙乐乐, 温常磊, 张亚坤, 等. 雾霾天气下的桥梁裂缝检测[J]. *交通工程*, 2020, 20(1):12-19.
- [39] KAMALIARDAKANI M, SUN L, ARDAKANI M K. Sealed-crack detection algorithm using heuristic thresholding approach[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2016, 30(1):1-10.
- [40] SUN L, KAMALIARDAKANI M, ZHANG Y.

- Weighted neighborhood pixels segmentation method for automated detection of cracks on pavement surface images [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2016, 30(2):1-11.
- [41] LI G, HE S, JU Y. Image-based method for concrete bridge crack detection[J]. *Journal of Information & Computational Science*, 2013, 10(8):2229-2236.
- [42] FUJITA Y, HAMAMOTO Y. A robust automatic crack detection method from noisy concrete surfaces[J]. *Machine Vision and Applications*, 2011, 22(2):245-254.
- [43] MEDINA R, LLAMAS J, GÓMEZ-GARCÍA-BERMEJO J, et al. Crack detection in concrete tunnels using a gabor filter invariant to rotation[J]. *Sensors*, 2017, 17(7):1670.
- [44] ZALAMA E, GÓMEZ-GARCÍA-BERMEJO J, MEDINA R, et al. Road crack detection using visual features extracted by gabor filters[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2014, 29(5): 342-358.
- [45] NISHIKAWA T, YOSHIDA J, SUGIYAMA T, et al. Concrete crack detection by multiple sequential image filtering[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2012, 27(1):29-47.
- [46] ZOU Q, CAO Y, LI Q Q, et al. CrackTree: Automatic crack detection from pavement images[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2012, 33(3):227-238.
- [47] 周志华. 机器学习[M]. 北京:清华大学出版社, 2016.
- [48] HOANG N D, NGUYEN Q L, BUI D T. Image processing-based classification of asphalt pavement cracks using support vector machine optimized by artificial bee colony[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2018, 32(5):04018037.
- [49] QUINTANA M, TORRES J, MENÉNDEZ J M. A simplified computer vision system for road surface inspection and maintenance[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(3):608-619.
- [50] HOANG N D, NGUYEN Q L. A novel method for asphalt pavement crack classification based on image processing and machine learning[J]. *Engineering with Computers*, 2019, 35(2):487-498.
- [51] MOKHTARI S, WU L, YUN H B. Comparison of supervised classification techniques for vision-based pavement crack detection[J]. *Transportation Research Record*, 2016, 2595(1):119-127.
- [52] FANG F, LI L, GU Y, et al. A novel hybrid approach for crack detection[J]. *Pattern Recognition*, 2020, 107:107474.
- [53] LI Y D, ZHAO W G, ZHANG X Y, et al. A two-stage crack detection method for concrete bridges using convolutional neural networks[J]. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 2018, E101D(12):3249-3252.
- [54] SATTAR D, THOMAS R J, MARC M. Comparison of deep convolutional neural networks and edge detectors for image-based crack detection in concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 186:1031-1045.
- [55] KIM B, CHO S. Automated vision-based detection of cracks on concrete surfaces using a deep learning technique[J]. *Sensors*, 2018, 18(10):3452.
- [56] FEI Y, WANG K C P, ZHANG A, et al. Pixel-level cracking detection on 3D asphalt pavement images through deep-learning-based crackNet-V[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019: 1-12.
- [57] TONG Z, GAO J, ZHANG H. Recognition, location, measurement, and 3D reconstruction of concealed cracks using convolutional neural networks[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 146:775-787.
- [58] 常海涛, 苟军年, 李晓梅. Faster R-CNN 在工业 CT 图像缺陷检测中的应用[J]. *中国图象图形学报*, 2018, 23(7): 1061-1071.
- [59] 程宇, 邓德祥, 颜佳, 等. 基于卷积神经网络的弱光照图像增强算法[J]. *计算机应用*, 2019, 39(4):1162-1169.
- [60] SŁOŃSKI M. A comparison of deep convolutional neural networks for image-based detection of concrete surface cracks[J]. *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*, 2019, 26(2):105-112.
- [61] SHIN H C, ROTH H R, GAO M, et al. Deep convolutional neural networks for computer-aided detection: CNN architectures, dataset characteristics and transfer learning[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2016, 35(5):1285-1298.
- [62] CHEN F C, JAHANSHAH R M R. NB-CNN: Deep learning-based crack detection using convolutional neural network and naïve bayes data fusion[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(99): 4392-4400.
- [63] DUNG C V, ANH L D. Autonomous concrete crack detection using deep fully convolutional neural network[J]. *Automation in Construction*, 2018, 99:52-58.
- [64] NGUYEN H T, YU G H, NA S Y, et al. Pavement crack detection and segmentation based on deep neural network [J]. *Journal of Korean Institute of Information Technology*, 2019, 17(9):99-112.
- [65] DORAFSHAN S, THOMAS R J, MAGUIRE M.

- SDNET2018: An annotated image dataset for non-contact concrete crack detection using deep convolutional neural networks[J]. Data in Brief, 2018, 21(1):1664-1668.
- [66] LI Y D, LI H G, Wang H G. Pixel-wise crack detection using deep local pattern predictor for robot application[J]. Sensors, 2018, 18(9): 3042.
- [67] CHA Y J, CHOI W, BÜYÜKÖZTÜRK O. Deep learning-based crack damage detection using convolutional neural networks[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, 32(5):361-378.
- [68] CHENGYANG L, DAN S, RUOFENG T, et al. Illumination-aware faster R-CNN for robust multispectral pedestrian detection[J]. Pattern Recognition, 2019, 85: 161-171.
- [69] LIU Y, YEOH J K W, CHUA D K H. Deep learning-based enhancement of motion blurred UAV concrete crack images[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2020, 34(5): 1-14.
- [70] 马金林, 邓媛媛, 马自萍. 肝脏肿瘤 CT 图像深度学习分割方法综述[J]. 中国图象图形学报, 2020, 25(10): 2024-2046.
- [71] SEO J O, HAN S U, LEE S H, et al. Computer vision techniques for construction safety and health monitoring [J]. Advanced Engineering Informatics, 2015, 29(2): 239-251.
- [72] JAHANSHAHI M R, MASRI S F. A new methodology for non-contact accurate crack width measurement through photogrammetry for automated structural safety evaluation[J]. Smart Material Structures, 2013, 22(3):1-12.
- [73] 李学威, 张瑞. 计算机辅助处理技术的船舶图像增强方法[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(18):64-66.
- [74] 周颖, 刘彤. 基于计算机视觉的混凝土裂缝识别[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(9):1277-1285.
- [75] JIN X, LI B, TIAN Y, et al. Study on fractal characteristics of cracks and pore structure of concrete based on digital image technology[J]. Research Journal of Applied Sciences Engineering & Technology, 2013, 5(11): 3165-3171.
- [76] 雷宏卫. 路面网状裂缝图像识别技术研究[J]. 南方农机, 2020, 51(1):238.
- [77] LI L, WANG K C P, et al. Bounding box-based technique for pavement crack classification and measurement using 1 mm 3D laser data[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2016, 30(5):1-13.
- [78] ZHONG X, PENG X, YAN S, et al. Assessment of the feasibility of detecting concrete cracks in images acquired by unmanned aerial vehicles[J]. Automation in Construction, 2018, 89:49-57.
- [79] ELLENBERG A, KONTOSOS A, MOON F, et al. Bridge related damage quantification using unmanned aerial vehicle imagery[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2016, 23(9):1168-1179.