

文章编号:1671-1637(2019)01-0172-19

路面破损图像自动处理技术研究进展

徐志刚¹,车艳丽²,李金龙¹,赵祥模¹,潘 勇^{1,3},王忠仁⁴,韦 娜¹,宋宏勋¹(1. 长安大学 信息工程学院,陕西 西安 710064; 2. 石家庄华燕交通科技有限公司 西安分公司,陕西 西安 710000;
3. 中咨数据有限公司,北京 100083; 4. 美国加州交通厅 养护处,加利福尼亚 萨克拉门托 95835)

摘 要:总结了路面破损图像自动处理技术的重要研究成果,分析了该领域关键技术的研究进展,包括路面破损检测系统、图像处理算法和识别算法评估;比较了不同路面破损检测系统与目标自动识别算法的检测精度和适用性,给出了路面破损图像自动处理技术未来可能的主要研究方向。研究表明:在路面破损检测系统方面,从早期基于摄影技术的图像采集到目前的 3D 激光扫描技术,路面图像采集技术更加便捷和高效,但破损图像自动分析和目标自动识别算法仍然存在挑战;在路面破损图像处理算法方面,传统的路面裂缝目标分割算法已由过去的基于单一特征(灰度、边缘形状等)的检测方法演化到多特征融合检测方法和图优化检测方法,还出现了一些精细化的裂缝目标连接与恢复算法,大幅提高了裂缝检测精度,但需要的计算资源和人工先验知识库也随之不断增大;在路面裂缝处理算法评估和比较方面,主要利用人工分割来评价自动识别结果,目前迫切需要建立一个面向全球开放的大型路面破损图像数据库,以客观、有效地评估现有各种路面破损图像处理算法;基于 2D 图像特征分析的路面破损图像自动识别算法很难在识别精确性、算法通用性和实时性方面同时取得最佳效果;近年来,大量学者开始尝试借助深度学习神经网络自动识别路面破损,但该技术仍处于活跃的演进过程中;在提高路面破损自动识别精度和效率方面,3D 激光扫描技术和基于人工智能的深度学习技术的发展将对未来路面破损图像自动识别技术的最终突破产生重大推进作用。

关键词:路面养护;路面破损;图像处理;破损识别;裂缝检测;破损分类

中图分类号:U418.6 文献标志码:A

Research progress on automatic image processing
technology for pavement distressXU Zhi-gang¹, CHE Yan-li², LI Jin-long¹, ZHAO Xiang-mo¹, PAN Yong^{1,3},
WANG Zhong-ren⁴, WEI Na¹, SONG Hong-xun¹(1. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Shijiazhuang Huayan
Transportation Technology Co., Ltd., Xi'an Branch, Xi'an 710000, Shaanxi, China; 3. Zhongzi Data Co., Ltd.,
Beijing 100083, China; 4. Division of Maintenance, California Department of Transportation,
Sacramento 95835, California, USA)

Abstract: The important research achievements on the automatic image processing technology for pavement distress were summarized. The research progress of key technologies in this field was analyzed, including the pavement distress detection system, image processing algorithm and evaluation of recognition algorithm. The detection accuracy and applicability were compared for

收稿日期:2018-08-22

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2018YFB010510401);陕西自然科学基金基础研究计划项目(2013JQ8017);交通部基础应用项目(2015 319 812 060);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310824163202,300102248403)

作者简介:徐志刚(1979-),男,湖北鄂州人,长安大学教授,工学博士,从事智能交通系统研究。

the different pavement distress detection systems and target automatic recognition algorithms. The possible future research directions of automatic pavement distress image processing technology were presented. Research result shows that in the aspect of pavement distress detection system, from early image acquisition based on the photography technology to the current 3D laser scanning technology, the pavement image acquisition technology becomes more and more convenient and effective. However, there still exist some challenges in the automatic analysis on distress images and automatic recognition algorithm on targets. In the aspect of pavement distress image processing algorithm, the traditional algorithms of segmenting pavement distress targets evolve from the methods using single feature (such as grayscale and edge shape) to multi-feature fusion-based methods and graph optimization-based detection methods. Furthermore, there emerges some dedicated algorithms for recovering or connecting cracks, greatly improving the detection accuracy of crack recognition. Nonetheless, as the complexity of these algorithms grows up, the required computational resources and the size of prior knowledge base both sharply increase. In the aspect of evaluation and comparison of crack processing algorithms, manual segmentation is mainly used to evaluate automatic recognition results. At present, it is urgent to establish a large-scale pavement distress image database opening to the world, so as to objectively and effectively evaluate various existing image processing algorithms for pavement distress. Automatic image processing algorithms for pavement distress based on 2D image features analysis is difficult to achieve the best results with detection accuracy, algorithm versatility and real-time performance simultaneously. In recent years, a large number of scholars begin to use the deep learning neural network to automatically recognize pavement distress, but the technology is still in an active evolution process. In the aspect of improving the accuracy and efficiency of automatic recognition for pavement distress, the 3D laser scanning technology and the deep learning technology based on artificial intelligence will greatly promote the final breakthrough on automatic image recognition technology for pavement distress in the future. 1 tab, 20 figs, 93 refs.

Key words: pavement maintenance; pavement distress; image processing; distress recognition; crack detection; distress classification

Author resume: XU Zhi-gang(1979-), male, professor, PhD, xuzhigang@chd.edu.cn.

0 引 言

截止 2017 年底,全国公路总里程达到 477.35 万 km,是 1984 年末的 5.2 倍,其中,高速公路里程达到 13.65 万 km,里程规模居世界第一^[1]。由于受交通荷载和自然因素的影响,道路路面破损问题日益突出。可以预见,未来 30 年内中国公路的建设速度将逐步放缓,公路养护问题将日益严峻,大量在役公路在交通荷载和自然因素的作用下,将逐渐产生各种病害,严重影响路面的承载能力、耐久性,以及车辆的行驶速度、燃油消耗、行车安全和乘坐舒适性。1980 年以来,在信息技术与光学技术的飞速发展下,为了应对公路养护难题,西方发达国家开发出多种形式的多功能道路检测车^[2-4]。对比之下,中国虽然起步较晚,但发展迅速。目前路面破损自动检测设备的

开发水平基本与世界保持同步,但在路面破损图像自动处理算法研究方面依然面临众多挑战。

路面破损图像自动识别技术一直是交通信息工程与模式识别领域的经典难题,受到相关研究者的广泛关注。由于路面图像的多纹理性、多目标性、目标的弱信号性和图像光强的多变性,使得路面破损目标的识别难度相对较大。现有算法大多是建立在路面图像质量好、裂缝目标清晰的基础上而开发的,缺乏对复杂环境的适应性,难以满足工程应用的实际需求。国内外关于路面破损图像自动识别的研究主要集中在路面图像采集系统硬件、路面破损图像处理算法与文献综述 3 个方面,其中路面破损图像处理算法所占比例最大,可分为:路面图像预处理与增强,路面裂缝与破损目标分割,路面图像拼接与裂缝连接,路面破损分类、测量与评价 4 个方向。

为进一步了解近 30 年来路面图像自动识别关键技术发展进程,本文综述了路面破损图像自动处理领域的 3 个主要方向(图像采集系统、处理算法、路面图像处理算法评估技术),并详细对比分析了路面裂缝目标分割与分类算法,预测了路面破损识别技术的现有问题和未来走向。

1 路面破损检测系统研究进展

根据路面破损图像采集技术的分类,可将国内外路面破损检测系统的研究进展分为以下几个阶段。

1.1 基于摄影技术的路面图像快速采集系统

这种系统首先借助高速摄像机和车辆定位系统将路面破损图像同步采集到电影胶片上,然后冲洗胶卷,最终经过人工判读将结果输入数据库。该系统未能广泛应用的原因在于其采用夜间工作模式时需要大量的后续处理工作,耗时长,且检测功能单一。

1.2 基于模拟视频技术的路面图像快速采集系统

日本的 Komatsu 系统是该类检测设备的代表,该系统利用氙光灯照明,摄像机采集图像,高密度录像带存储视频。但由于系统的非自动化和低速的夜间工作方式,也未能普及。

1.3 基于数字相机的路面图像快速采集系统

该系统前期使用面阵 CCD 传感器^[5]采集图像,采用 GPS 和陀螺仪惯性系统分别采集路线几何线形和横纵波,并用压缩技术实时压缩图像,然后经过专用总线接口将图像存储于计算机硬盘中。该系统的局限性在于需增加人工照明。

1.4 基于双线阵相机的路面图像快速检测系统

线扫描成像技术和激光技术的特征表现为:利用线扫描相机和红外光照明技术提高图像质量;利用线激光车辙检测技术提高车辙检测精度和系统稳定性。INO 公司生产的激光线扫描成像系统^[6]和美国 ICC 公司生产的多功能路况检测系统^[7]为该系统的代表,见图 1。

1.5 基于红外热成像技术的路面破损检测系统

基于红外热成像技术的检测系统(图 2)^[8]依赖于路面破损处与完好路面的反光率和表面温度特性,使 2 种目标的红外图像表现出较强对比性。但由于红外热成像相机成本昂贵,图像采集速率和分辨率相对较低,且易受自然因素影响,因此,该系统尚未商业化。

1.6 基于 3D 激光扫描技术的路面破损检测系统

美国俄克拉何马州立大学的王柳平教授是最早利用 3D 激光技术检测路面破损的研究者。该系统



图 1 激光线扫描成像系统

Fig. 1 Laser linear scanning imaging system

利用 3D 激光扫描技术采集细微的路面 3D 轮廓^[2],利用面阵相机拍摄经线激光照射后在路面形成的投影,然后计算路面图像上每一点的高程差,见图 3。3D 激光扫描技术因其采集到的路面图像纹理、颜色信息单一,为后期图像处理带来便利,但由于裂缝检测依赖于路面横断面轮廓,微弱裂缝或被填充的裂缝不易被检测出来,因此,该系统常与二维图像采集系统配合使用。

与国外相比^[6-8],国内在路面自动检测系统研究方面起步较晚。1990 年以后,这方面研究才开始启动,但发展迅速,目前北京公路科学研究院^[9]、长安大学^[10]、南京理工大学^[11]等开发的自动化路面检测系统已实现了商业化推广。在商用路面检测系统发展的同时,国内许多高校与研究机构也加入了研发行列,取得了阶段性成果。国内研发的路面图像采集系统在高速图像获取、大容量存储、图像阴影消除、破损程度评估等方面已取得长足进步,但是在破损图像自动分析与破损目标自动识别方面仍然存在技术瓶颈,但已受到研究者的广泛关注^[12]。

2 路面破损图像处理算法研究进展

近年来在多种国际知名杂志上开始陆续有路面破损图像处理算法相关论文发表^[1-4]。伴随着计算机图像处理技术的每一次突破,路面破损图像自动处理技术将出现一次发展的小高潮。路面破损图像处理算法主要包括:破损图像预处理、裂缝目标分割与分类、其他破损目标分割 3 个方面。

2.1 路面破损图像预处理

人工采集的路面破损图像难免受外界环境的影响而存在噪声,因此,进行路面破损图像预处理极其重要。背景差法和细节增强法是当前路面破损图像预处理的主要方法。

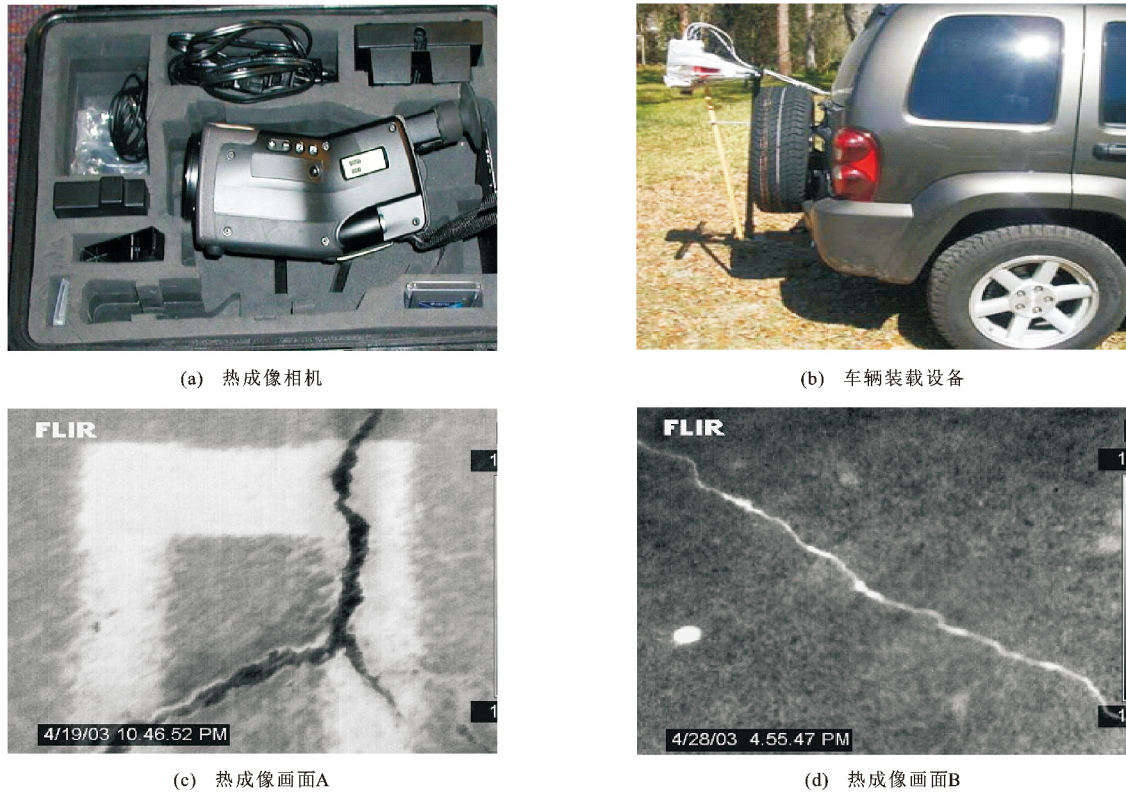


图 2 基于红外热成像的路面破损图像采集与处理

Fig. 2 Image acquisition and processing of pavement distress based on infrared thermal imaging

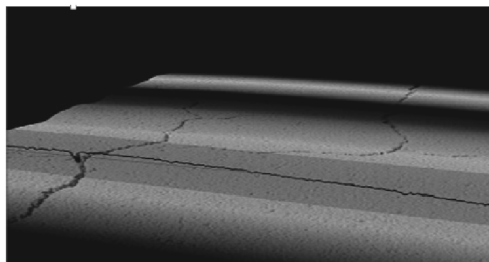


图 3 采用 3D 激光扫描技术采集的路面破损图像

Fig. 3 Pavement distress image collected by 3D laser scanning technology

2.1.1 背景差法

背景差法是利用采集的路面原始图像减去经过预处理的背景图像求其图像差的方法。该图像差可以消除光照不均匀、道路白色标线、轮胎印等噪声,保留裂缝信息。Cheng 等做了类似研究^[13-14]。Xu 等在背景差法的基础上,提出了一种利用全局增强与局部增强相结合的方法,得到了较为理想的预处理效果^[15],其处理结果见图 4。

2.1.2 细节增强法

细节增强法是利用裂缝等破损目标在频域图像上的高频特征抑制低频噪声,增强图像中的细节部分,从而增强破损部分与背景之间的差异。Zhang 等运用基于多尺度几何的 Ridgelet 方法实现了裂缝

目标的有效增强和背景噪声的抑制^[16],处理结果见图 5。除此之外,Zuo 等也做了类似研究^[17-20]。

通过对比分析可知:背景差法是对图像进行整体处理,计算量小,对于光照不均匀和阴影等低频噪声的处理效果较好,适应性强,但容易平滑掉细微裂缝信息;细节增强方法则是局部增强处理,其优点是对细微裂缝的增强效果较好,但其模型参数选择复杂,计算量大,算法适应性一般。

2.2 路面破损目标分割与分类

路面破损目标的多样性直接影响其后期分类评估的好坏。裂缝目标是最常见的破损目标,但由于其具有多纹理性、多目标性、背景光照多变性等复杂性,使得裂缝目标成为路面破损图像中最难识别的一种目标。

2.2.1 裂缝目标分割

本文调研分析了近 30 年的文献,将路面裂缝识别算法划分为如下 8 种类型。

(1) 阈值分割法。阈值分割算法通过不同灰度等级来区分裂缝目标与背景。由于路面破损目标的灰度等级在整幅图像中相对较低,因此,许多学者利用该方法分割路面破损目标^[21-24],图 6 为文献^[23]中的阈值分割结果。

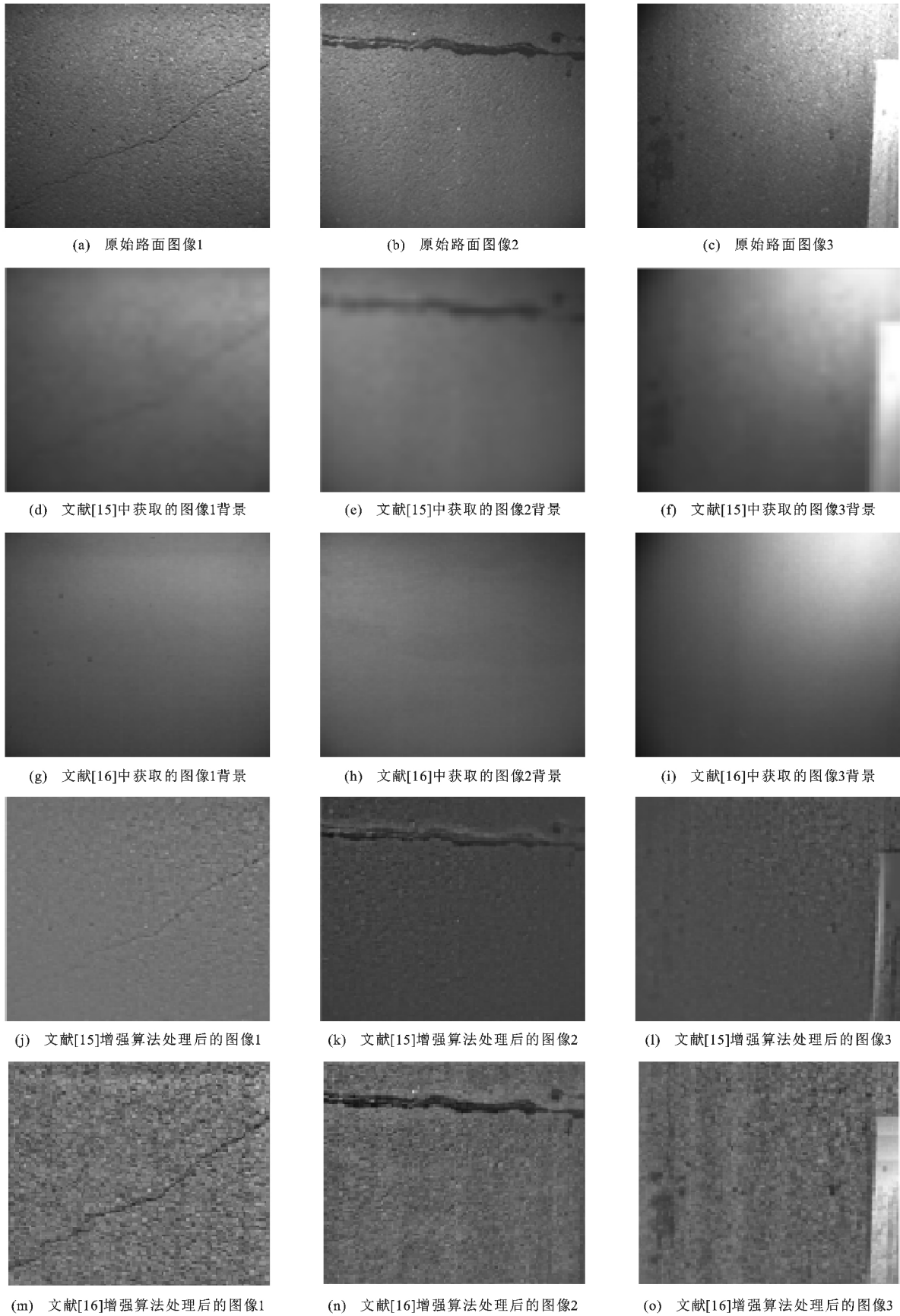


图 4 增强的路面图像

Fig. 4 Enhanced pavement images

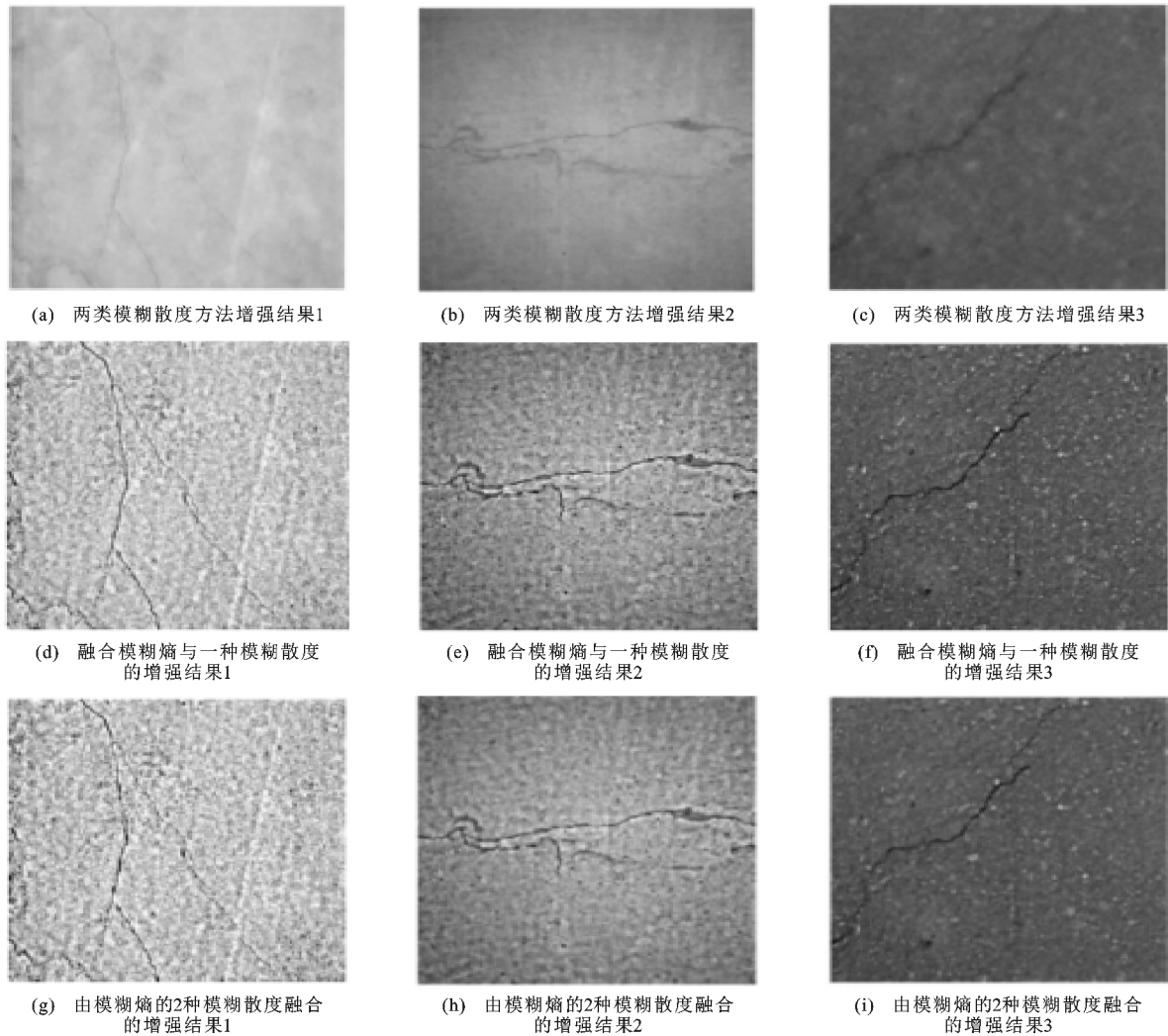


图 5 采用不同方法对路面裂缝图像进行对比增强的结果

Fig. 5 Results of contrast enhancement of pavement crack images using different methods

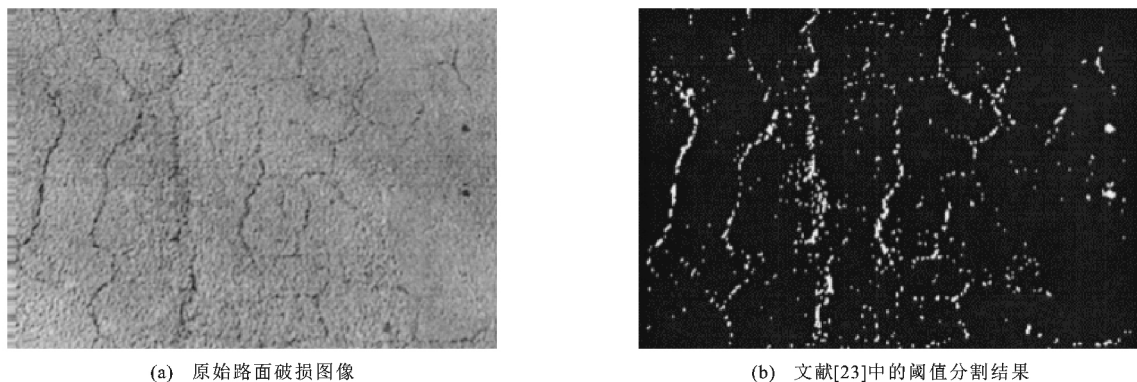


图 6 阈值分割结果

Fig. 6 Threshold segmentation results

(2)边缘检测法。边缘检测法充分利用了裂缝目标的边缘特性,突出显示像素灰度值变化较大的区域,且屏蔽灰度值变化不大的区域或者降低其灰度值显示^[25-32],图 7 为受光照和阴影影响的示例图像,图 8 是对图 7 中的图像采用 GCA 链边缘检测方

法处理后的结果。

(3)基于多尺度的裂缝检测方法。裂缝目标具有多样性特征,研究表明:针对自然界的检测目标中,多尺度检测方法一般要优于单一尺度检测方法。Subirats 等人在多尺度检测方面做了详细研究,

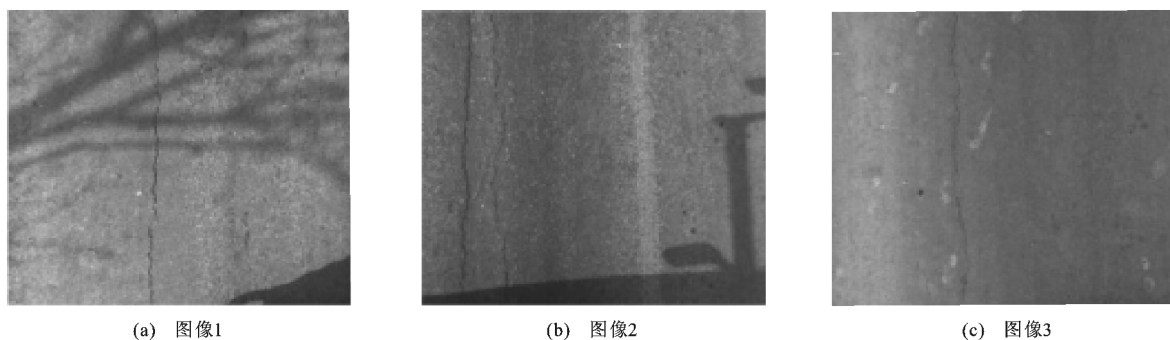


图7 受光照和阴影影响的示例图像

Fig. 7 Example images affected by light and shade

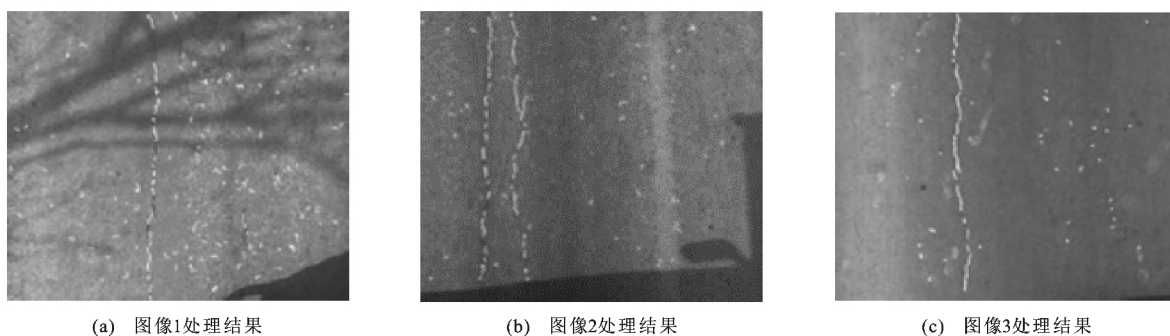


图8 GCA方法处理结果

Fig. 8 Processing results of GCA method

结果表明:被复杂背景掩盖的微弱裂缝可以通过该类算法进行有效检测^[33-38],见图9。

(4)基于纹理的分割方法。路面图像中的裂缝纹理是一种或多种纹理的集合,通常用更详细的特性表示纹理特性,如纹理的粗细度、对比度、方向性等。初秀民等利用纹理特征识别裂缝目标,取得了较好的效果^[39-45]。

(5)基于多特征融合的方法。大量试验研究发现,路面破损目标具有多维特征。且由于图像采集时的环境光线、路面材料和路面破损演变阶段不同,同一类型的破损目标在不同特征维度上表现出不同的强度,导致仅用单一特征很难实现破损目标的精确识别。利用多特征融合的方法实现破损目标的分割得到了越来越多学者的关注。Nguyen等以每个像素为中心,选择穿过该中心的4条线段(方向分别为 0° 、 45° 、 90° 和 135°)作为备选裂缝,然后以线段上像素的灰度、纹理、连续性、剖面形状等多个特征计算该线段是否为裂缝的概率,从而实现目标分割^[46];徐威等也做了类似研究^[47-50];徐志刚等融合裂缝灰度和形状特征,实现了裂缝的有效提取^[49],结果见图10。

(6)基于图论的分割方法。图论算法思想是将待处理的图像用带权重的无向图表示。图像中的单

个像素对应于图的每个节点;图像中的相邻像素对应于图的边。图中边的权重表示图像各个属性方面的非负相关性。基于图论方法的最优分割策略为:分割后的子图内部耦合性强,子图间耦合性小。利用图论进行裂缝目标分割方法的本质就是将图像中的每个像素看成一个图节点,通过移除特定的边将图划分为若干个子图,从而实现裂缝目标的分割^[51-52],图11为Alekseychuk提出的最短路径检测算法处理结果^[51]。

(7)基于深度学习的方法。2012年,AlexNet在大规模视觉识别挑战赛(Large Scale Visual Recognition Challenge, LSVRC)中刷新了图像分类的记录,由此基于人工智能的深度学习算法开始被广为人知,并快速、广泛地应用于图像处理领域。传统的图像处理算法需要专业工程师和专家来设计图像特征提取器,且图像处理全程需要人工处理数据,耗时长,准确率易受人因素为影响。相比之下,深度学习算法完全端到端,中间无需人为参与,具有极好的便捷性和可操作性,得到了工程界的广泛关注。将深度学习算法应用于裂缝识别与分类,可大大减少基于人工经验的特征描述、提取、识别等环节,有利于提升裂缝识别算法的准确性和通用性^[53-54]。

Cha等采用卷积神经网络(Convolutional Neural

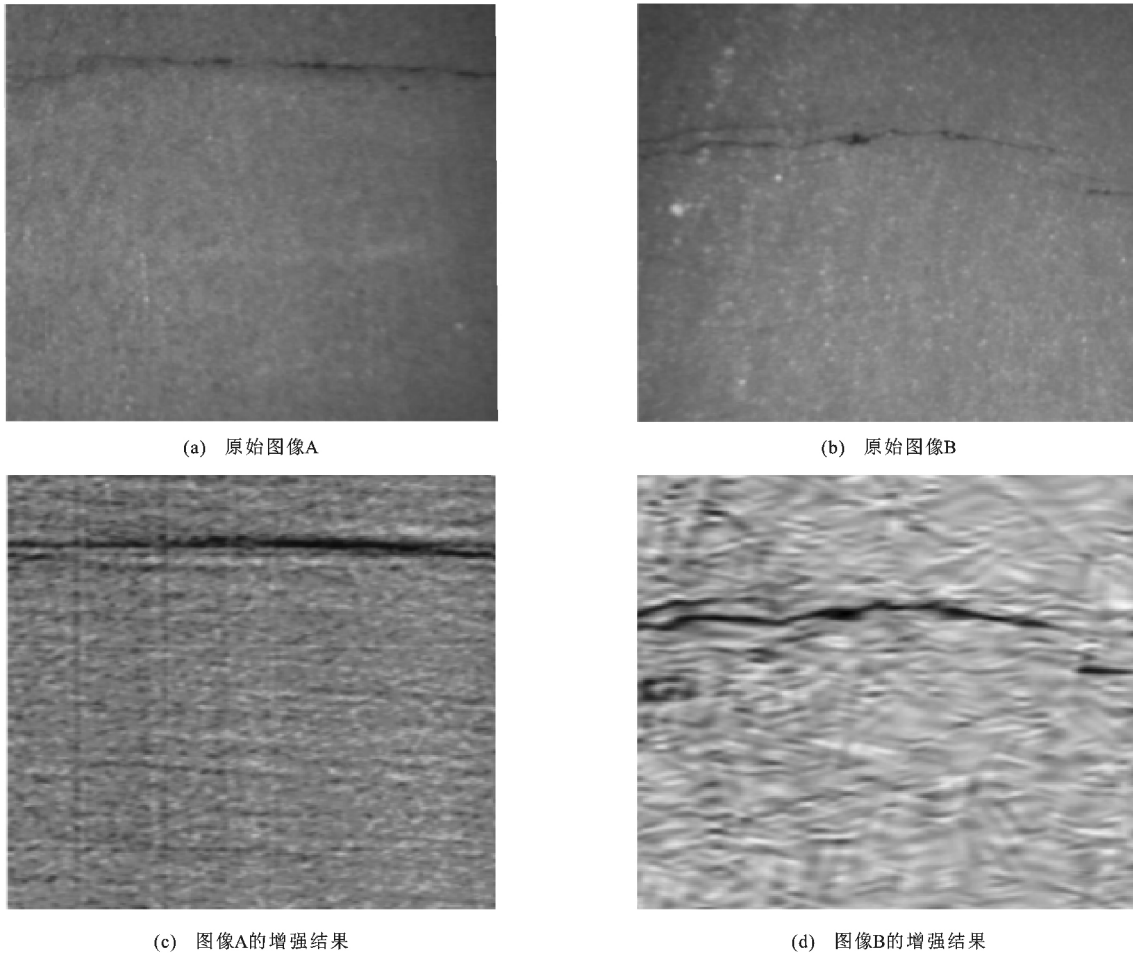


图 9 多尺度检测方法检测结果

Fig. 9 Detection results of multi-scale detection method

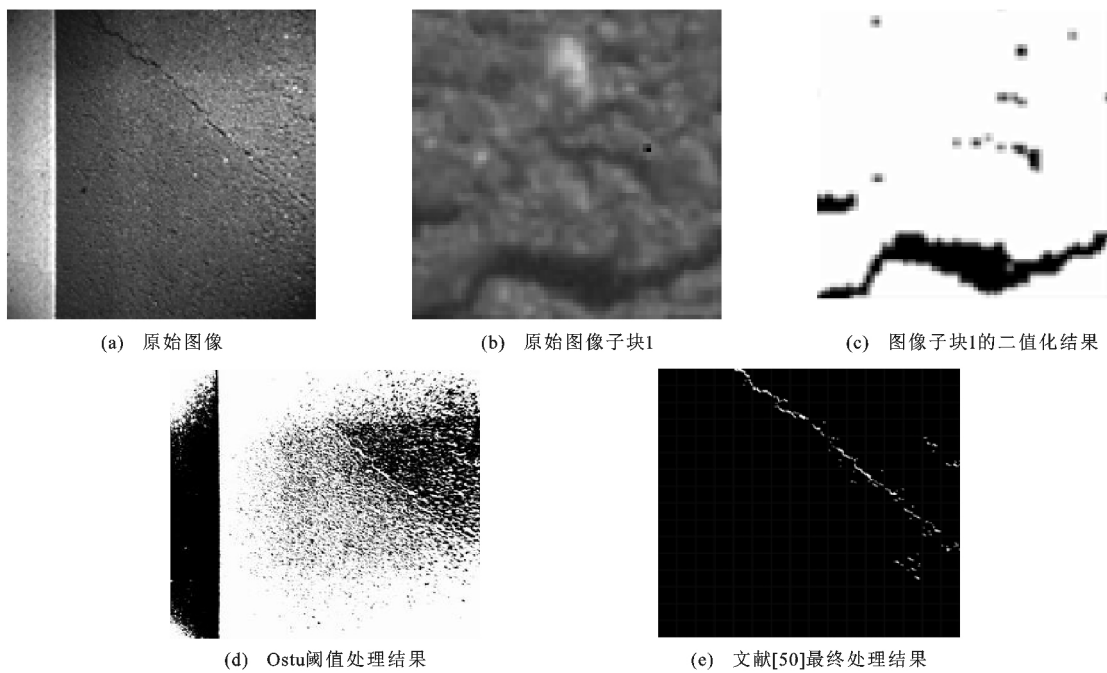


图 10 采用直方图估计和形状分析算法识别路面裂缝的结果

Fig. 10 Recognition results of pavement crack using histogram estimation and shape analysis algorithm

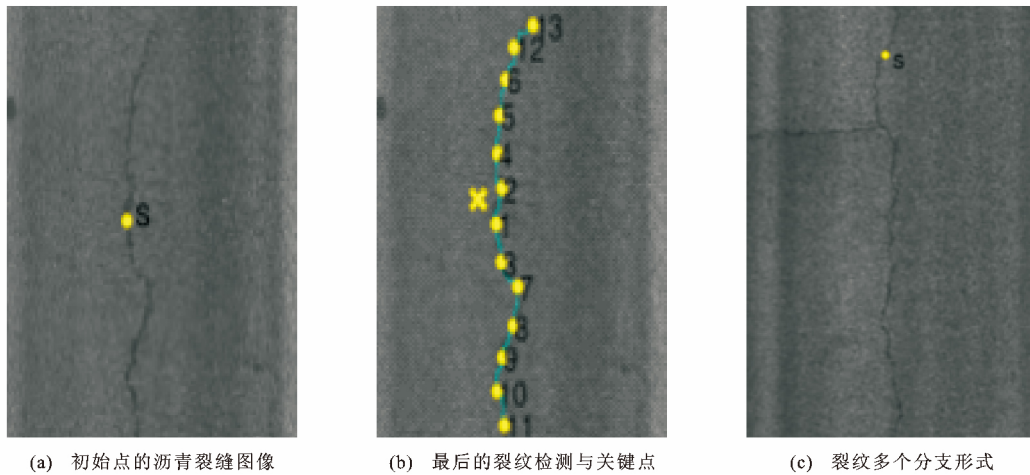


图 11 最短路径裂缝检测算法处理结果

Fig. 11 Processing result using crack detection algorithm with shortest path

Network, CNN) 架构, 将大量路面图像分割为 256 像素×256 像素的子图像, 进行 CNN 训练, 然后利用训练后的网络测试未知路面破损图像, 最终测试结果显示, 该方法的准确度高达 98%。图 12 为该算法的流程, 图中路面裂缝图像来源于单反相机拍摄的混凝土路面图像, 采用人工方式将训练图像分为含有裂缝的和不含裂缝的 2 类, 这 2 类图像均为原始图像, 包含不同的光照亮度、阴影遮挡与噪声等。

将上述路面破损图像数据集随机分配为训练路面破损图像识别分类器的训练集和验证集。图 13 为 Cha 等设计的 CNN 架构^[54], 其中: C1~C4 分别为 CNN 网络架构的第 1~4 个卷积层; P1、P2 分别为第 1、2 个池化层; Softmax 为分类层; Dropout 为特征选择策略; L1~L7 为网络所在层数。网络的第 1 层输入层输入的路面图像为 256 像素(高)×

256 像素(宽)×3 像素(通道数)。输入的图像经过 CNN 到达第 5 层时, 图像被缩小到 1×1×96(容器中含有的像素元素数); 随后会经过纠正线性单元(Rectified Linear Unit, ReLU)进行处理; 最后经过卷积层处理后, 在 Softmax 层进行裂缝子图像与完好子图像的最终分类。利用 CNN、Canny 边缘检测和 Sobel 算子检测强光照下微弱裂缝的效果对比见图 14, 可知: CNN 的识别准确率远优于传统算法。

Tong 等将深度卷积神经网络(Deep Convolutional Neural Network, DCNN)应用于自动路面裂缝检测中, 用灰度预处理后的路面图像作为训练集和测试集, 经过设计 DCNN 架构、训练与测试等处理检测输入图像^[55], 利用 CNN 对沥青路面图像中的隐藏裂缝进行识别、定位、测量和三维重建, 并与传统方法进行对比, 结果表明: 使用 CNN 方法能够弥补传统方法在准确率和检测效率方面的不足, 利用该

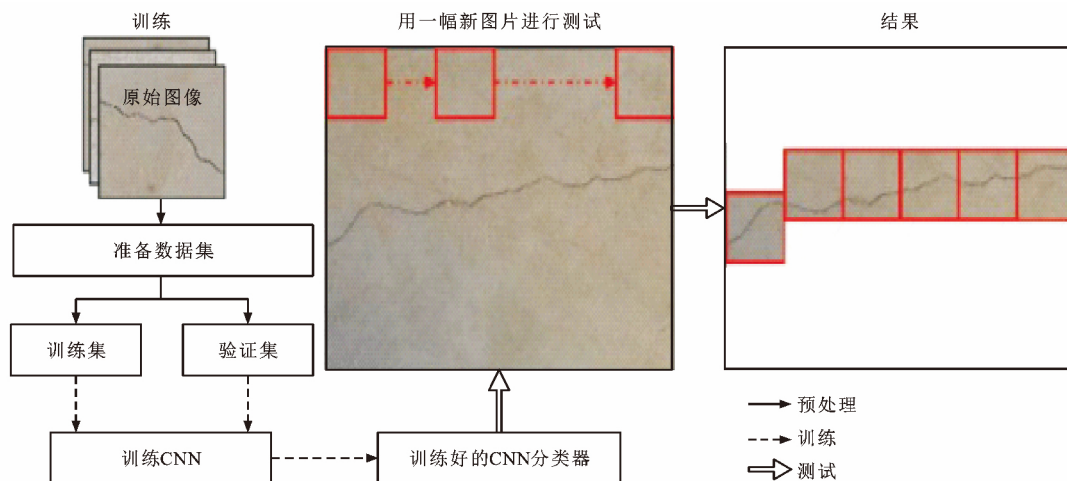


图 12 基于 CNN 的混凝土路面图像检测流程

Fig. 12 Image detection flow of concrete pavement based on CNN

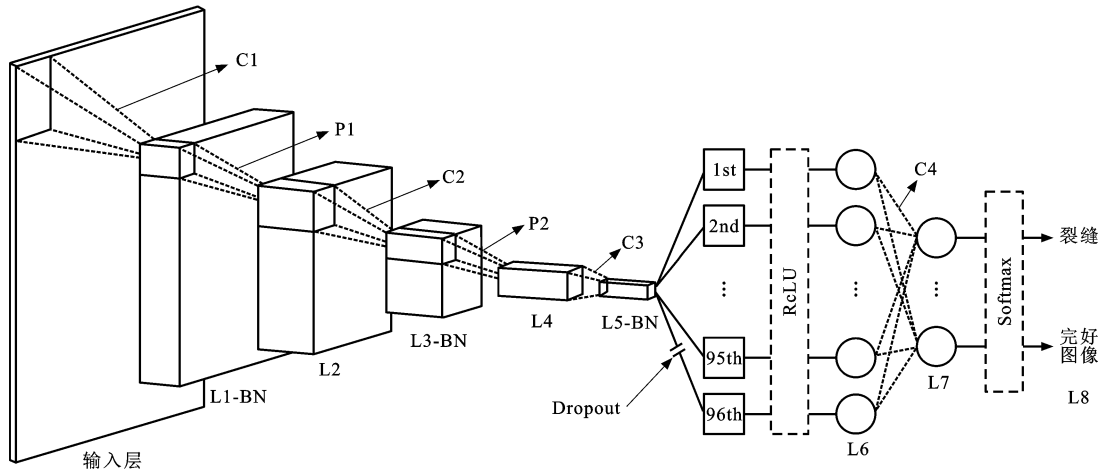


图 13 CNN 总体框架

Fig. 13 Overall architecture of CNN

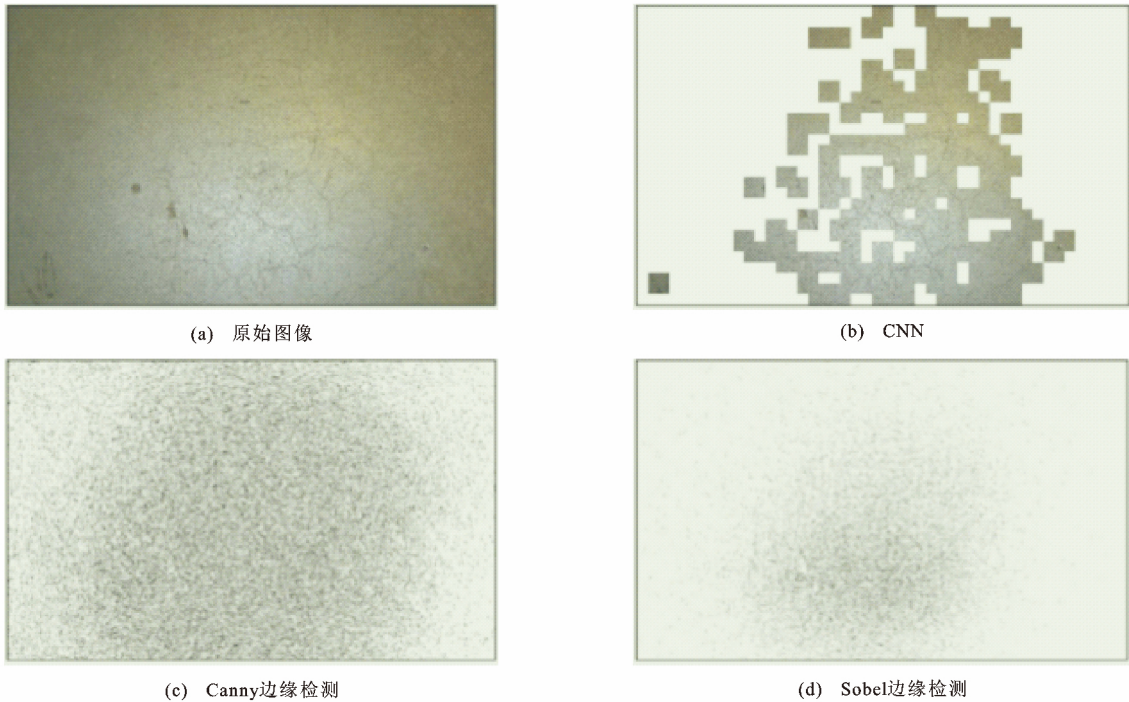


图 14 强光照下的微弱裂缝

Fig. 14 Thin cracks with strong light

方法进行裂缝长度检测的误差仅为 0.254 cm^[56]。

(8) 其他分割方法。除了以上分割算法之外, Tanaka 等还提出了基于形态学、区域增长、马尔科夫随机场、人工种群、灰色理论的路面破损目标分割方法^[57-73]。

2.2.2 裂缝目标连接与恢复

裂缝深度和严重程度沿裂缝曲线变化, 裂缝强度并非总低于周围路面环境强度, 因此, 对局部增强后的裂缝目标进行连接与恢复, 可以识别不完整的、不相交的裂缝图像。Zou 等开发了一种名为 CrackTree 的全自动检测裂缝连接方法^[74], 见图 15。本文首先

提出一种阴影消除算法, 可在去除路面阴影的同时保留裂缝; 然后通过张量投票表决法建立了一个裂缝概率分布图; 最后从裂缝概率分布图中采样一批裂缝种子集合, 利用图模型推导出一种描述裂缝的最小生成树, 并通过修剪最小生成树边缘来确定最终裂缝。206 幅真实路面图像的评估结果表明: 该算法提高了裂缝碎片的连接性。

Wu 等提出了一种新的路面裂缝片段连接技术 MorphLink-C^[75], 见图 16, 其包括 2 个子流程, 分别为: 使用片段膨胀变换进行碎片分组和使用腐蚀变换连接碎片。所提出的片段连接技术自适应于不同裂

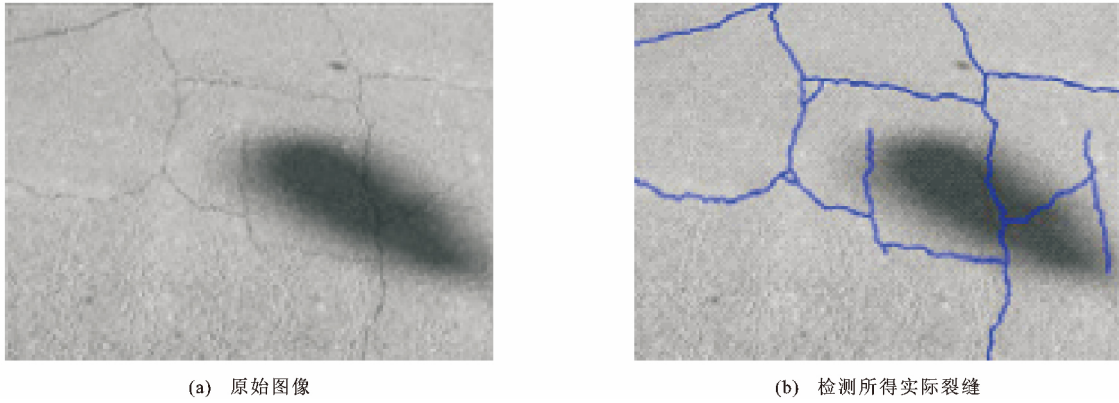


图 15 裂缝检测结果
Fig. 15 Crack detection result

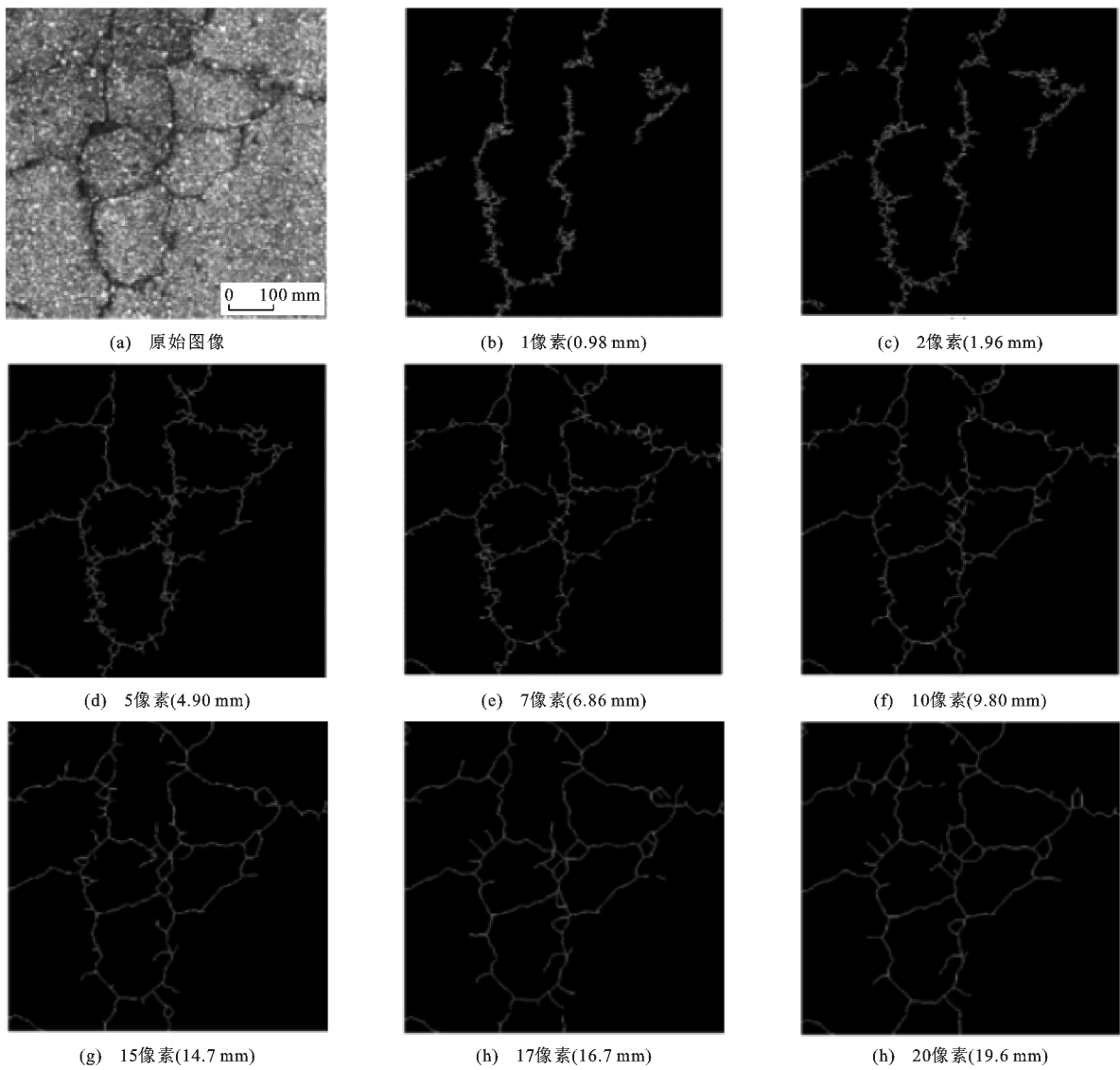


图 16 针对不同尺寸的标准差提出的片段连接方法的自适应机制

Fig. 16 Adaptive mechanism of fragment connection methods for standard deviation with different sizes

缝类型,且不涉及裂缝取向、长度和强度的耗时计算。本文采用佛罗里达运输部(Florida Department of Transpatation, FDOT)采集的柔性路面图像库进行评

估,结果表明:MorphLink-C 提高了裂纹的检测精度。

2.2.3 路面破损分类

路面破损分类也是路面破损图像自动处理技术

的一个重要环节,破损分类的准确性直接影响到路面破损程度指数的计算,直接影响后期的养护决策。Chua 等对此进行了深入研究^[76-85];Nejad 等提出了

一种专家系统^[86],用于路面破损分类,见图 17。分析结果表明:该专家系统是一种有效的路面破损分类方法,具有快速、操作方便、结构简单等优点^[87-88]。

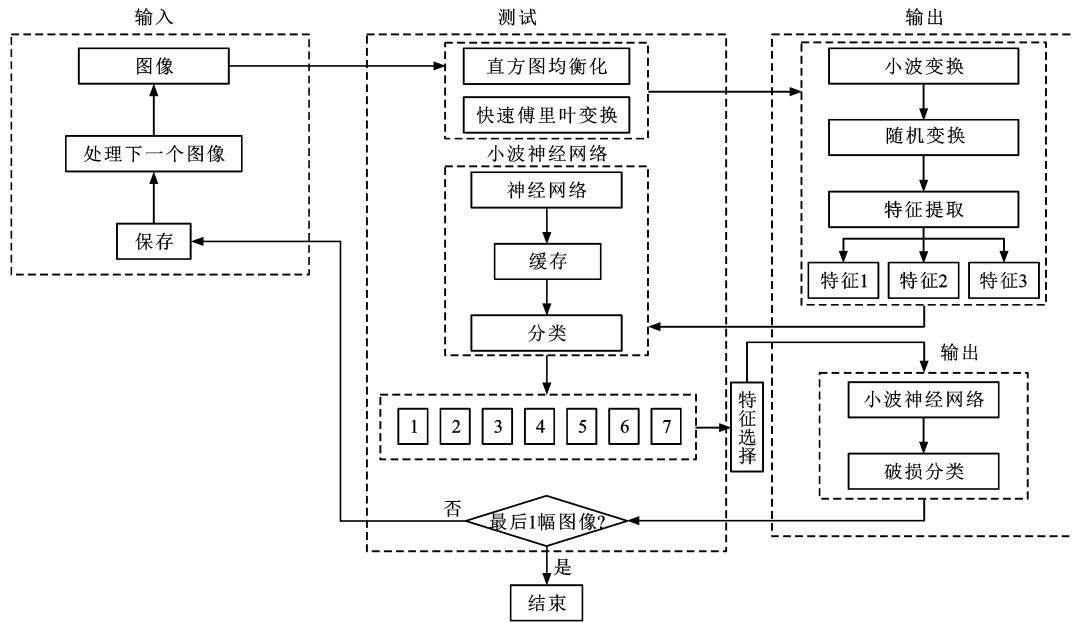


图 17 专家系统

Fig. 17 Expert system

段璠等提出的路面破损分类算法流程见图 18^[89]。模糊支持向量机(Fuzzy Support Vector Machine, FSVM)算法利用灰度共生矩阵法提取纹理特征,并将其与 HSV 颜色空间进行融合,训练样本为模糊支持向量机,分析结果表明:FSVM 算法具有较高的识别率。

方法将图像分割成缺陷和非缺陷区域,为了确定感兴趣区域是否为实际坑槽,该算法通过对比潜在缺陷区与周围非缺陷路面的纹理差异来实现坑槽的最终定位^[90],该方法的最终检测结果见图 19。

Radopoulou 等提出了一种使用滤波和直方图均衡化的方法来检测沥青路面中的坑槽,采用闭合的形态学方法,依据坑槽的纹理特征来求其面积^[91]。检测结果见图 20。

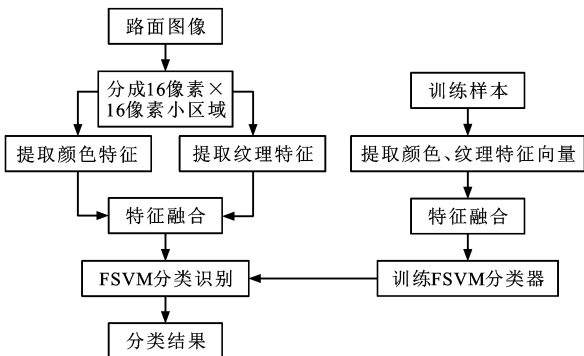


图 18 基于 FSVM 的路面破损分类流程

Fig. 18 Flow of pavement distress classification based on FSVM

现有的很多破损图像分类算法局限于在较小的试验数据集上进行仿真试验,没有实现大规模图像集的准确分类,在图像特征提取与分类算法上仍需要进一步深入研究。

2.3 其他破损目标的检测

Koch 等提出了一种沥青路面坑槽目标的自动检测方法,该方法首先使用基于直方图形状的阈值

3 路面破损识别算法的评估方法

目前路面破损识别算法主要还是利用人工分割作为判断标准来评价自动识别结果,通常采用基于缓冲的 Hausdorff 距离分值测量方法进行评价。Hausdorff 距离用于表示 2 个点集合之间的相似度。如果有 2 个点集合分别为 $M = \{a_1, a_2, \dots, a_i\}$, $N = \{b_1, b_2, \dots, b_j\}$, 其中: a_i 和 b_j 分别为不同数值的离散点, i, j 分别为集合 M, N 中点的个数。则这 2 个点集合间的双向 Hausdorff 距离 $H(M, N)$ 为

$$H(M, N) = \max\{h(M, N), h(N, M)\} \quad (1)$$

$$h(M, N) = \frac{1}{i} \sum_a \min_b (a - b) \quad (2)$$

$$h(N, M) = \frac{1}{j} \sum_b \min_a (b - a) \quad (3)$$

式中: a, b 分别为集合 M, N 中的数值点; $h(M, N)$ 为集合 M 中元素到集合 N 中元素的单一方向上的



图 19 沥青路面中被检测出的坑槽

Fig. 19 Detected pits in asphalt pavement

Hausdorff 距离; $h(N, M)$ 为集合 N 中元素到集合 M 中元素的单一方向上的 Hausdorff 距离。

由式(1)可知:双向 Hausdorff 距离 $H(M, N)$ 是单向距离 $h(M, N)$ 和 $h(N, M)$ 中的较大者,它度量了 2 个点集间的最大不匹配程度。

Tsai 等对现有的 6 种路面裂缝处理算法进行了黑盒测试,应用人工分割、动态优化、Canny 边缘检测、阈值统计、多尺度小波、分支验证 6 种算法对同一批采集的路面图像进行了自动识别测试,并应用 Hausdorff 距离对这些算法进行评估^[92],其



(a) 检测的补丁



(b) 检测的坑槽

图 20 Radopoulou 所提算法检测的坑槽与补丁

Fig. 20 Pit and patch detected by algorithm proposed by Radopoulou

部分结果见表 1,可知:动态优化方法用于分割低信噪比的路面破损图像,其分割结果优于其他 5 种方法,对于不同的路面裂缝识别具有一定的鲁棒性,其缺点是计算较复杂,计算时间较长,但该对比试验的样本图像仅为 20 幅,很难保证评估结果的客观性和准确性。目前的国际惯例是针对不同

行业图像处理算法评估,建立规模庞大、内容多样、格式统一的标准测试数据库(生物特征识别、行为动作识别、交通环境识别),来自世界各地的研究者可以通过标准数据库对比所提出的算法与同行工作在性能和效率等方面的差异,从而保证算法评估结果的公正性。

表 1 六种分割方法的部分评估结果

Tab. 1 Partial evaluation results of six segmentation methods

方法	不同检测对象的分值/%														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
人工分割	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
动态优化	82	95	98	92	97	85	92	96	87	97	98	98	98	99	98
Canny 边缘检测	0	0	7	10	8	0	73	46	53	48	60	58	52	82	51
阈值统计	42	34	40	51	9	54	0	74	48	19	71	76	42	58	0
多尺度小波	7	3	4	3	8	80	73	33	29	32	42	30	29	58	46
分支验证	33	86	0	80	0	26	0	84	71	69	0	60	88	94	0

4 存在的问题与未来发展趋势

(1)全自动路面图像自动识别系统仍未得到大规模应用。现有路面图像自动采集技术已趋于成熟并成功商业化,但路面破损自动识别算法仍处于较为活跃的研究阶段。由于路面破损形式的多样性,目前在工程应用中,路面破损识别系统仍然为预先自动识别结合手工标注的模式,完全自动的路面识别算法,特别是针对细微裂缝、被尘土填充的裂缝以及退化裂缝的自动识别仍然面临着巨大挑战。30 年来,自动识别算法虽然在广度和深度上均取得了长足进步,但现有算法还很难同时在识别准确性、通用性、实时性 3 个方面表现良好。

(2)路面破损图像识别算法逐渐从单一特征识别方法转向多特征识别方法。一些外部因素如环境

光照强度、路面材料类型、破损老化程度等会导致同一类型的路面破损目标在不同特征维度(灰度、边缘强度、形状)上表现出强度的差异性,从而导致采用单一特征很难实现破损目标的精确识别。多特征融合方法可以充分利用破损目标多个特征的互补性实现破损目标分割的精确识别和伪目标滤除,这类方法得到了越来越多学者的关注,并取得了良好效果。

(3)统一的路面图像数据库和算法库亟待建立。现有算法大部分基于各自建立的路面图像数据集。很难在统一条件下对现有各种算法进行客观的对比测试和性能评价,因此,亟待建立一个开放的、通用的大样本路面图像数据库,让所有研究者可以在同一平台下进行测试,这种做法在人脸识别、指纹识别、医学图像识别等领域已非常普遍。

(4)3D 激光技术方兴未艾。在环境的影响下,

3D 激光技术可以不受光照和阴影遮挡的影响,能够自动识别裂缝的三维轮廓,且 3D 激光技术相比于其他技术可以提高识别精度和识别速度,但硬件成本较高,针对细微裂缝和被填充的裂缝,效果不佳成为该技术发展的一个障碍。在未来,将二维图像处理与 3D 激光成像相结合进行路面破损检测必将是一种发展趋势。

(5)基于人工智能的深度学习技术将对路面破损图像识别技术产生重大影响。当前图像识别领域主流的深度学习工具是 DCNN 和具有卷积神经网络特征的区域(Regions with Convolution Neural Network Features, R-CNN)技术。相对于邻接层全连接的深度前馈网络,卷积神经网络更容易训练、更容易泛化,而 R-CNN 技术^[93]能够极大地提升物体检测(定位)精度,深度学习技术在人脸识别、语音识别、计算机视觉等领域取得了巨大成功。Google 公司开发的围棋机器人 Alpha Go 战胜了世界围棋冠军就是一个有力的佐证。深度学习技术在路面裂缝识别与分类试验中的应用效果良好。

(6)基于人工智能的深度学习技术将对现有的路面破损自动识别技术的研究产生颠覆性冲击,将有望彻底解决路面破损图像的全自动识别问题。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 交通运输部.《2017 年全国收费公路统计公报》解读[N]. 中国交通报,2018-08-24(2).
Ministry of Transport. Interpretation of "2017 National Toll Road Statistical Bulletin" [N]. China Communications News, 2018-08-24(2). (in Chinese)
- [2] WANG K W. Highway data collection and information management[C]//TRB. Proceedings of the 3rd International Conference on Road and Airfield Pavement Technology. Washington DC: TRB, 1998: 1144-1152.
- [3] WANG K C P. Designs and implementations of automated systems for pavement surface distress survey[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2000, 6(1): 24-32.
- [4] CAFISO S, DI GRAZIANO A, BATTIATO S. Evaluation of pavement surface distress using digital image collection and analysis[C]//Yildiz Technical University. Seventh International Congress on Advances in Civil Engineering. Istanbul: Yildiz Technical University, 2006: 11-13.
- [5] 马 建,赵祥模,贺拴海,等.路面检测技术综述[J]. 交通运输工程学报,2017,17(5):121-137.
MA Jian, ZHAO Xiang-mo, HE Shuan-hai, et al. Review of pavement detection technology[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(5): 121-137. (in Chinese)
- [6] WANG K C P, GONG W G. Real-time automated survey system of pavement cracking in parallel environment [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2014, 11(3): 154-164.
- [7] HUANG Ya-xiong, XU Bu-gao. Automatic inspection of pavement cracking distress[J]. Journal of Electronic Imaging, 2006, 15(1): 185-188.
- [8] CHENG H D, MIYOJIM M. Automatic pavement distress detection system[J]. Information Sciences, 1998, 108(1-4): 219-240.
- [9] 噉二勇.国内路面自动检测系统研究历程及展望[J].中国高新技术企业,2009(19):195-196.
CHUO Er-yong. Research progress and prospect of domestic pavement automatic testing system [J]. Chinese Hi-Tech Enterprises, 2009(19): 195-196. (in Chinese)
- [10] 王建锋.激光路面三维检测专用车技术与理论研究[D].西安:长安大学,2010.
WANG Jian-feng. Research on vehicle technology on road three-dimension measurement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese)
- [11] 王 刚.路面病害光学无损检测技术[D].南京:南京理工大学,2007.
WANG Gang. The optical nondestructive examination for pavement distress—algorithm research based on super wavelet and multifractal theorem[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [12] 王荣本,王 超,初秀民.路面破损图像识别研究进展[J].吉林大学学报(工学版),2002,32(4):91-97.
WANG Rong-ben, WANG Chao, CHU Xiu-min. Developments of research on road pavement surface distress image recognition[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2002, 32(4): 91-97. (in Chinese)
- [13] CHENG H D, CHEN J R, GLAZIER C, et al. Novel approach to pavement cracking detection based on fuzzy set theory[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 1999, 13(4): 270-280.
- [14] 高建贞,任明武,杨静宇.一种快速实用的灰度校正算法[J].中国图象图形学报,2002,7(6):548-552.
GAO Jian-zhen, REN Ming-wu, YANG Jing-yu. A practical and fast method for non-uniform illumination correction[J]. Journal of Image and Graphics, 2002, 7(6): 548-552. (in Chinese)
- [15] XU Zhi-gang, CHE Yan-li, MIN Hai-gen, et al. Initial classification algorithm for pavement distress images using features fusion of texture and shape[C]//TRB. Transportation Research Board 95th Annual Meeting. Washington DC: TRB, 2016: 1-17.
- [16] ZHANG Da-qi, QU Shi-ru, HE Li, et al. Automatic ridgelet image enhancement algorithm for road crack image based on fuzzy entropy and fuzzy divergence[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(11): 1216-1225.
- [17] ZUO Yong-xia, WANG Guo-qiang, ZUO Chun-cheng. Wavelet packet denoising for pavement surface cracks detection[C]//IEEE. 2008 International Conference on Computational

- Intelligence and Security. New York: IEEE, 2008: 481-484.
- [18] 唐磊,赵春霞,王鸿南,等.路面图像增强的多偏微分方程融合法[J].中国图象图形学报,2008,13(9):1661-1666.
TANG Lei, ZHAO Chun-xia, WANG Hong-nan, et al. Fusion of multiple basic PDE models for enhancing road surface images[J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(9): 1661-1666. (in Chinese)
- [19] 李清泉,胡庆武.基于图像自动匀光的路面裂缝图像分析方法[J].公路交通科技,2010,27(4):1-5.
LI Qing-quan, HU Qing-wu. A pavement crack image analysis approach based on automatic image dodging [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(4): 1-5. (in Chinese)
- [20] 王兴建,秦国锋,赵慧丽.基于多级去噪模型的路面裂缝检测方法[J].计算机应用,2010,30(6):1606-1609.
WANG Xing-jian, QIN Guo-feng, ZHAO Hui-li. Pavement crack detection method based on multilevel denoising model[J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(6): 1606-1609. (in Chinese)
- [21] KIRSCHKE K R, VELINSKY S A. Histogram-based approach for automated pavement-crack sensing [J]. Journal of Transportation Engineering, 1992, 118(5): 700-710.
- [22] 孙波成,邱延峻.路面裂缝图像处理算法研究[J].公路交通科技,2008,25(2):64-68.
SUN Bo-cheng, QIU Yan-jun. Pavement crack diseases recognition based on image processing algorithm[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(2): 64-68. (in Chinese)
- [23] OLIVEIRA H, CORREIA P L. Automatic road crack segmentation using entropy and image dynamic thresholding [C]// IEEE. Proceedings of the 17th European Signal Processing Conference. New York: IEEE, 2009: 622-626.
- [24] CHENG H D, SHI X J, GLAZIER C. Real-time image thresholding based on sample space reduction and interpolation approach[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2003, 17(4): 264-272.
- [25] 李刚,贺昱曜.多方位结构元素路面裂缝图像边缘检测算法[J].计算机工程与应用,2010,46(1):224-226.
LI Gang, HE Yu-yao. Edge detection for road crack image with multidirection morphological structuring elements[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(1): 224-226. (in Chinese)
- [26] 张娟,沙爱民,孙朝云,等.基于相位编组法的路面裂缝自动识别[J].中国公路学报,2008,21(2):39-42.
ZHANG Juan, SHA Ai-min, SUN Zhao-yun, et al. Pavement crack automatic recognition based on phase-grouping method[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(2): 39-42. (in Chinese)
- [27] HUANG Ya-xiong, XU Bu-gao. Automatic inspection of pavement cracking distress[J]. Journal of Electronic Imaging, 2006, 15(1): 13-17.
- [28] SORNCHAREAN S, PHIPHOMBONGKOL S. Crack detection on asphalt surface image using enhanced grid cell analysis[C]//IEEE. Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Electronic Design, Test and Applications. New York: IEEE, 2008: 49-54.
- [29] MAODE Y, SHAOBO B, KUN X, et al. Pavement crack detection and analysis for high-grade highway[C]//IEEE. Proceedings of the 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments. New York: IEEE, 2007: 548-552.
- [30] 唐磊,赵春霞,王鸿南,等.基于图像三维地形模型的路面裂缝自动检测[J].计算机工程,2008,34(5):20-21.
TANG Lei, ZHAO Chun-xia, WANG Hong-nan, et al. Automated pavement crack detection based on image 3D terrain model[J]. Computer Engineering, 2008, 34(5): 20-21. (in Chinese)
- [31] 李莉,孙立军,陈长.适于路面破损图像处理的边缘检测方法[J].同济大学学报(自然科学版),2011,39(5):688-692.
LI Li, SUN Li-jun, CHEN Zhang. An edge detection method designed for pavement distress images[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(5): 688-692. (in Chinese)
- [32] ZHANG A, LI Q, WANG K C P, et al. Matched filtering algorithm for pavement cracking detection [J]. Transportation Research Record, 2013(2367): 30-42.
- [33] SUBIRATS P, FABRE O, DUMOULIN J, et al. A combined wavelet-based image processing method for emergent crack detection on pavement surface images [C]// IEEE. Proceedings of the 12th European Signal Processing. New York: IEEE, 2004: 257-260.
- [34] WANG K C P, LI Q, GONG W G. Wavelet-based pavement distress image edge detection with a trous algorithm [J]. Transportation Research Record, 2008(2024): 73-81.
- [35] 吕岩,曲仕茹.基于 Beamlet 变换的路面裂缝图像匀光算法[J].交通运输系统工程与信息,2011,11(5):123-128.
LYU Yan, QU Shi-ru. A pavement crack image dodging algorithm based on beamlet transform[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(5): 123-128. (in Chinese)
- [36] 卢紫微,吴成东,陈东岳,等.基于分区域多尺度分析的路面裂缝检测算法[J].东北大学学报(自然科学版),2014,35(5):622-625.
LU Zi-wei, WU Cheng-dong, CHEN Dong-yue, et al. Pavement crack detection algorithm based on sub-region and multi-scale analysis [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2014, 35(5): 622-625. (in Chinese)
- [37] MA Chang-xi, ZHAO Chun-xia, HOU Ying-kun. Pavement distress detection based on nonsubsampling contourlet transform [C]//IEEE. 2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering. New York: IEEE, 2008: 28-31.
- [38] WANG Gang, XU Xiu-wei, XIAO Liang, et al. Algorithm based on the finite ridgeley transform for enhancing faint

- pavement cracks[J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(47): 017004-1-10.
- [39] 初秀民,王荣本. 基于神经网络的沥青路面破损图像识别研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2004, 28(3): 373-376.
CHU Xiu-min, WANG Rong-ben. Asphalt pavement surface distress image recognition based on neural network[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)*, 2004, 28(3): 373-376. (in Chinese)
- [40] 储江伟,初秀民,王荣本,等. 沥青路面破损图像特征提取方法研究[J]. *中国图象图形学报*, 2003, 8(10): 1211-1217.
CHU Jiang-wei, CHU Xiu-min, WANG Rong-ben, et al. Research on asphalt pavement surface distress image feature extraction method[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2003, 8(10): 1211-1217. (in Chinese)
- [41] OLIVEIRA H, CORREIA P L. Supervised strategies for cracks detection in images of road pavement flexible surfaces[C]//IEEE. *Proceedings of the 16th European Signal Processing Conference*. New York: IEEE, 2008: 1-5.
- [42] 胡 勇,赵春霞,郭志波. 基于多尺度布朗运动模型的路面破损检测[J]. *计算机工程与应用*, 2008, 44(3): 234-235.
HU Yong, ZHAO Chun-xia, GUO Zhi-bo. Road crack detection based on multi-scale brown motion model[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(3): 234-235. (in Chinese)
- [43] 王 华,朱 宁,王 祁. 公路路面分形纹理特征分析和分类[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2005, 37(6): 816-818.
WANG Hua, ZHU Ning, WANG Qi. Fractal features analysis and classification for texture of pavement surface[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005, 37(6): 816-818. (in Chinese)
- [44] 王 华,朱 宁,王 祁. 应用计盒维数方法的路面裂缝图像分割[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2007, 39(1): 142-144.
WANG Hua, ZHU Ning, WANG Qi. Segmentation of pavement cracks using differential box-counting approach[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007, 39(1): 142-144. (in Chinese)
- [45] 章秀华,洪汉玉,侯 佳,等. 路面破损图像实时检测方法研究[J]. *电子设计工程*, 2009, 17(6): 36-37.
ZHANG Xiu-hua, HONG Han-yu, HOU Jia, et al. Research on real-time detection method for pavement surface distress image[J]. *Electronic Design Engineering*, 2009, 17(6): 36-37. (in Chinese)
- [46] NGUYEN T S, BEGOT S, DUCULTY F, et al. Free-form anisotropy: a new method for crack detection on pavement surface images[C]//IEEE. *Proceedings of the 18th IEEE International Conference on*. New York: IEEE, 2011: 1069-1072.
- [47] 徐 威,唐振民,徐 丹,等. 融合多特征与格式塔理论的路面裂缝检测[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2015, 27(1): 147-156.
XU Wei, TANG Zhen-min, XU Dan, et al. Integrating multi-features fusion and gestalt principles for pavement crack detection [J]. *Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics*, 2015, 27(1): 147-156. (in Chinese)
- [48] 钱 彬,唐振民,沈肖波,等. 基于多特征流形学习和矩阵分解的路面裂缝检测[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(7): 1639-1646.
QIAN Bin, TANG Zhen-min, SHEN Xiao-bo, et al. Pavement crack detection based on multi-feature manifold learning and matrix factorization [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(7): 1639-1646. (in Chinese)
- [49] 徐志刚,赵祥模,宋焕生,等. 基于直方图估计和形状分析的沥青路面裂缝识别算法[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(10): 2260-2266.
XU Zhi-gang, ZHAO Xiang-mo, SONG Huan-sheng, et al. Asphalt pavement crack recognition algorithm based on histogram estimation and shape analysis[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(10): 2260-2266. (in Chinese)
- [50] 黄建平. 基于二维图像和深度信息的路面裂缝检测关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
HUANG Jian-ping. Research on the key technologies of pavement crack inspection based on 2D image and depth information[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [51] ALEKSEYCHUK O. Detection of crack-like indications in digital radiography by global optimisation of a probabilistic estimation function [D]. Dresden: Dresden University of Technology, 2006.
- [52] 李清泉,邹 勤,毛庆洲. 基于最小代价路径搜索的路面裂缝检测[J]. *中国公路学报*, 2010, 23(6): 28-33.
LI Qing-quan, ZOU Qin, MAO Qing-zhou. Pavement crack detection based on minimum cost path searching[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2010, 23(6): 28-33. (in Chinese)
- [53] ZHANG L, YANG F, ZHANG Y D, et al. Road crack detection using deep convolutional neural network[C]//IEEE. *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. New York: IEEE, 2016: 3708-3712.
- [54] 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.
- [55] TONG Zheng, GAO Jie, HAN Zhen-qiang, et al. Recognition of asphalt pavement crack length using deep convolutional neural networks[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2018, 19(9): 1334-1349.
- [56] TONG Zheng, GAO Jie, ZHANG Hai-tao. Recognition, location, measurement, and 3D reconstruction of concealed cracks using convolutional neural networks [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 146: 775-787.
- [57] TANAKA N, UEMATSU K. A crack detection method in road surface images using morphology[J]. *LAPR Workshop on Machine Vision Applications*, 1998, 98: 154-157.
- [58] 刘凡凡,徐国爱,肖 靖,等. 基于连通域相关及 Hough 变换的公路路面裂缝提取[J]. *北京邮电大学学报*, 2009, 32(2):

- 24-28.
- LIU Fan-fan, XU Guo-ai, XIAO Jing, et al. Cracking automatic extraction of pavement based on connected domain correlating and Hough transform[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009, 32(2): 24-28. (in Chinese)
- [59] DELAGNES P, BARBA D. A Markov random field for rectilinear structure extraction in pavement distress image analysis[C]//IEEE. Proceedings of International Conference on Image Processing. New York: IEEE, 1995: 446-449.
- [60] 张洪光,王 祁,魏 玮.基于人工种群的路面裂纹检测[J]. 南京理工大学学报,2005,29(4):389-393.
- ZHANG Hong-guang, WANG Qi, WEI Wei. Pavement distress detection based on artificial population[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2005, 29(4): 389-393. (in Chinese)
- [61] 李 刚.基于灰色系统理论的路面图像裂缝检测算法研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2010.
- LI Gang. Study on algorithms of pavement image crack detection based on the grey system theory [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [62] 吴成东,卢佰华,陈东岳,等.基于方向特征及引力模型的路面裂缝检测[J]. 东北大学学报(自然科学版),2012,33(4):469-472.
- WU Cheng-dong, LU Bai-hua, CHEN Dong-yue, et al. Pavement crack detection based on direction feature and gravitational model[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2012, 33(4): 469-472. (in Chinese)
- [63] 徐 威,唐振民,吕建勇.基于图像显著性的路面裂缝检测[J]. 中国图象图形学报,2013,18(1):69-77.
- XU Wei, TANG Zhen-min, LYU Jian-yong. Pavement crack detection based on image saliency[J]. Journal of Image and Graphics, 2013, 18(1): 69-77. (in Chinese)
- [64] 钱 彬,唐振民,徐 威.基于稀疏自编码的路面裂缝检测[J]. 北京理工大学学报,2015,35(8):800-804,809.
- QIAN Bin, TANG Zhen-min, XU Wei. Pavement crack detection based on sparsAutoEncoder[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(8): 800-804, 809. (in Chinese)
- [65] 王卫星,吴林春.基于分数阶积分谷底边界检测的路面裂缝提取[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2014,42(1):117-122.
- WANG Wei-xing, WU Lin-chun. Extraction of pavement cracks based on valley edge detection of fractional integral [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2014, 42(1): 117-122. (in Chinese)
- [66] 张德津,李清泉,陈 颖,等.基于空间聚集特征的沥青路面裂缝检测方法[J]. 自动化学报,2016,42(3):443-454.
- ZHANG De-jin, LI Qing-quan, CHEN Ying, et al. Asphalt pavement crack detection based on spatial clustering feature[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(3): 443-454. (in Chinese)
- [67] 宋宏勋,马 建,王建锋,等.基于双相机立体摄影测量的路面裂缝识别方法[J]. 中国公路学报,2015,28(10):18-25.
- SONG Hong-xun, MA Jian, WANG Jian-feng, et al. Identification of pavement crack based on dual camera stereo photogrammetry[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(10): 18-25. (in Chinese)
- [68] 李 伟,呼延菊,沙爱民,等.基于 3D 数据和双尺度聚类算法的路面裂缝检测[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2015, 43(8):99-105.
- LI Wei, HU Yan-ju, SHA Ai-min, et al. Pavement crack detection based on two-scale clustering algorithm and 3D data[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(8): 99-105. (in Chinese)
- [69] 钱 彬,唐振民,徐 威,等.子块鉴别分析的路面裂缝检测[J]. 中国图象图形学报,2015,20(12):1652-1663.
- QIAN Bin, TANG Zhen-min, XU Wei, et al. Pavement crack detection algorithm based on sub-patch discriminant analysis[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(12): 1652-1663. (in Chinese)
- [70] 马常霞,赵春霞,胡 勇,等.结合 NSCT 和图像形态学的路面裂缝检测[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2009,21(12): 1761-1767.
- MA Chang-xia, ZHAO Chun-xia, HU Yong, et al. Pavement cracks detection based on NSCT and morphology[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2009, 21(12): 1761-1767. (in Chinese)
- [71] KAUL V, YEZZI A, TSAI Y J. Detecting curves with unknown endpoints and arbitrary topology using minimal paths [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(10): 1952-1965.
- [72] LI Qing-quan, ZOU Qin, ZHANG Da-qiang, et al. FoSA: F* seed-growing approach for crack-line detection from pavement images[J]. Image and Vision Computing, 2011, 29(12): 861-872.
- [73] OLIVEIRA H, CORREIA P L. Automatic road crack detection and characterization [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(1): 155-168.
- [74] ZOU Qin, CAO Yu, LI Qing-quan, et al. Crack tree: automatic crack detection from pavement images[J]. Pattern Recognition Letters, 2012, 33(3): 227-238.
- [75] WU L L, MOKHTARIS, NAZEF A, et al. Improvement of crack-detection accuracy using a novel crack defragmentation technique in image-based road assessment [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2014, 30(1): 04014118-1-19.
- [76] CHUA K M, XU L. Simple procedure for identifying pavement distresses from video images [J]. Journal of Transportation Engineering, 1994, 120(3): 412-431.
- [77] ACOSTA J A, FIGUEROA J L, MULLEN R L. Algorithms for pavement distress classification by video image analysis[J]. Transportation Research Record, 1995(1505): 27-38.
- [78] CHENG H D, MIYOJIM M. Novel system for automatic pavement distress detection[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 1998, 12(3): 145-152.
- [79] CHENG H D, CHEN J R, GLAZIER C, et al. Novel approach to pavement distress detection based on fuzzy set theory[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 1999,

- 13(4): 270-280.
- [80] WANG K C P, TEE W Y, WATKINS Q, et al. Digital distress survey of airport pavement surface [C] // Federal Aviation Administration. Federal Aviation Administration Airport Technology Transfer Conference. Washington DC: Federal Aviation Administration, 2002: 69-82.
- [81] ZHOU J, HUANG P S, CHIANG F P. Wavelet-based pavement distress detection and evaluation[J]. Optical Engineering, 2006, 45(2): 409-411.
- [82] LEE B J, LEE H. Position-invariant neural network for digital pavement crack analysis[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2004, 19(2): 105-118.
- [83] 丁爱玲,焦季成.基于支撑向量机的路面破损识别[J].长安大学学报(自然科学版),2007,27(2):34-37.
DING Ai-ling, JIAO Li-cheng. Automation of recognizing pavement surface distress based on support vector machine[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2007, 27(2): 34-37. (in Chinese)
- [84] 肖旺新,张雪,黄卫.基于破损密度因子的路面破损识别新方法[J].交通运输工程与信息学报,2004,2(2):82-89.
XIAO Wang-xin, ZHANG Xue, HUANG Wei. A new method for distress automation recognition of pavement surface based on density factor and image processing [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2004, 2(2): 82-89. (in Chinese)
- [85] KASEKO M S, LO Z P, RITCHIE S G. Comparison of traditional and neural classifiers for pavement-crack detection[J]. Journal of Transportation Engineering, 1994, 120(4): 552-569.
- [86] NEJAD F M, ZAKERI H. An expert system based on wavelet transform and radon neural network for pavement distress classification[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(6): 7088-7101.
- [87] NEJAD F M, ZAKERI H. A comparison of multi-resolution methods for detection and isolation of pavement distress[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(3): 2857-2872.
- [88] NEJAD F M, ZAKERI H. An optimum feature extraction method based on wavelet-radon transform and dynamic neural network for pavement distress classification [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(8): 9442-9460.
- [89] 段 媛,李春书,闫 尧.基于支持向量机的路面图像分类方法[J].河北农业大学学报,2016,39(6):124-129.
DUAN Yuan, LI Chun-shu, YAN Yao. Terrain classification method based on the support vector machine[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2016, 39(6): 124-129. (in Chinese)
- [90] KOCH C, BRILAKIS I. Pothole detection in asphalt pavement images[J]. Advanced Engineering Informatics, 2011, 25(3): 507-515.
- [91] RADOPOULOU S C, JOG G M, BRILAKIS I. Patch distress detection in asphalt pavement images[C]//ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Vilnius: Vilnius Gediminas Technical University, 2013, 30: 1-9.
- [92] TSAI Y C, KAUL V, MERSEREAU R M. Critical assessment of pavement distress segmentation methods[J]. Journal of Transportation Engineering, 2014, 136(1): 11-19.
- [93] 沙爱民,董 峥,高 杰.基于卷积神经网络的路表病害识别与测量[J].中国公路学报,2018,31(1):1-10.
SHA Ai-min, TONG Zheng, GAO Jie. Recognition and measurement of pavement disasters based on convolutional neural networks[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(1): 1-10. (in Chinese)