

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2014.07.004

路面裂缝图像自动识别算法综述

彭 博^{1,2}, 蒋阳升^{1,3,4}, 韩世凡¹, 罗楠欣¹

(1. 西南交通大学交通运输与物流学院, 四川 成都 610031; 2. College of Civil and Environmental Engineering, Oklahoma State University, OK 74078-5013, USA; 3. 综合运输四川省重点实验室, 四川 成都 610031; 4. 综合交通运输智能化国家地方联合工程实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 路面裂缝自动检测对于路面养护管理、路面性能评价与预测、路面材料和结构设计具有重要的实用价值, 但快速、准确、全面且稳定地识别路面裂缝一直是个难题。为此, 对路面裂缝自动检测研究现状进行综述, 包括以图像增强和去噪为目的的预处理方法, 基于阈值分割、边缘检测和种子生长的空间域识别算法, 以小波变换为代表的频域识别算法, 基于有监督学习的识别算法及其他裂缝识别方法; 指出既有裂缝识别算法存在易受光照和油污等因素的影响、裂缝识别图像连续性差和识别速度和精度较低等不足。最后, 提出综合考虑边界和区域特征消除纹理和噪声干扰、基于局部和全局信息设计优化识别算法和基于三维图像进行裂缝识别等研究展望, 为裂缝自动识别算法的改进提供参考。

关键词: 道路工程; 自动识别算法; 图像处理; 路面裂缝; 图像分割; 边缘检测; 裂缝种子; 有监督学习

中图分类号: U416.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2014)07-0019-07

A Review of Automatic Pavement Crack Image Recognition Algorithms

PENG Bo^{1,2}, JIANG Yang-sheng^{1,3,4}, HAN Shi-fan¹, LUO Nan-xin¹

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China; 2. College of Civil and Environmental Engineering, Oklahoma State University, OK 74078-5013, USA; 3. Key Laboratory of Integrated Transport of Sichuan Province, Chengdu Sichuan 610031, China; 4. National and Local Joint Engineering Laboratory of Integrated and Intelligent Transport, Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: Automatic pavement crack detection is of great practical value for pavement maintenance and management, pavement performance evaluation and prediction, and materials and structure design. However, it remains a difficulty to recognize pavement crack rapidly, precisely, completely and robustly. Thus, the researches on automatic pavement crack detection is reviewed, including the pre-processing methods aiming at image enhancement and denoising, the space-domain recognition algorithms based on thresholding, edge detection and seeds growing, the frequency-domain recognition algorithms such as wavelet transformation, the recognition algorithms based on supervised learning and others. The shortcomings of these crack recognition algorithms are pointed out as follows: (1) lighting and oils tend to impact algorithm performance; (2) crack recognition images have poor continuity; (3) processing speed and recognition precision are not satisfying. At last, several research prospects are proposed as references for improvement of pavement recognition algorithms, including: (1) remove influences of texture and noises by combining boundary and area features; (2) design optimization recognition algorithm based on local and global information; (3) recognize pavement crack based on 3D images.

收稿日期: 2013-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108391); 中央高校基本科研业务费专项资金科技创新项目(A0920502051208-99)

作者简介: 彭博(1986-), 男, 四川南充人, 博士研究生. (pengbo351@126.com)

Key words: road engineering; automatic recognition algorithm; image processing; pavement crack; image segmentation; edge detection; cracking seed; supervised learning

0 引言

我国公路交通正处于高速发展时期,随着人们对行车安全性、舒适性和经济性要求的不断提高,路面养护的重要性和紧迫性日渐凸显出来。由于国内外公路状况的主要检测手段是人工检测和半自动检测,效率低、工作强度大、准确性和全面性差,开发设计路面破损自动检测系统具有重要的意义。对此,国内外研究人员进行了深入的研究,研发了许多路面破损检测系统,如中国的 CiCs 路面检测车,美国的 IARIS 和 DHDV,瑞典的 CREHOS,瑞士的 PAVUE,加拿大的 GIE 和 ARAN,日本的 Komatsu,英国的 HARRIS 和法国的 SIRANO 等。这些系统应用线扫描或面扫描摄像机采集路面图像,见图 1,精度高达 1 mm/像素,如中国 CiCs 检测车(分辨率约为 3 056 像素/2.6 m)和美国 DHDV(分辨率约为 3 704 像素/4 m)。除此之外,还有基于激光扫描^[1]和 TDI(Time Delay Integration)线扫描技术的路面破损检测设备,但由于前者成本高、定位精度和分辨率低,后者对聚焦性能和车辆振动敏感、容易造成图像模糊,这 2 类系统仍有待改进。

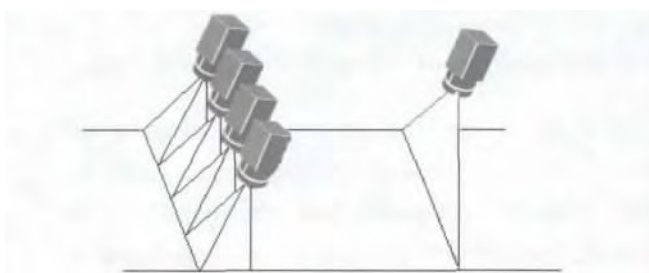


图 1 面扫描和线扫描

Fig. 1 Area and line scanning

在采集技术和设备更新换代的同时,国内外许多学者开始设计基于图像处理的裂缝自动识别算法,从空间域到频域、从考虑局部信息到全局优化、从无监督方法到有监督方法,并应用了数学形态学、模糊逻辑、小波变换及神经网络等方法,以求快速、自动、准确和稳定地检测裂缝。但由于路面状况的复杂多变和二维图像信息的局限性,在没有人为干预的情况下,仍难获得满意的结果。本文对空间域识别、频域识别和有监督识别 3 大类算法展开综述,提出研究展望。

1 图像预处理

受杂物、油污、阴影及照明等因素的影响,路面图像质量降低、裂缝识别难度增加,如图 2 所示。因此,需要削弱或消除这些干扰,对图像进行预处理。图像预处理的方法较多,根据侧重点的不同,可大致分为 2 类:(1)图像去噪,主要是基于邻域处理的滤波方法;(2)图像增强,消除光照不均匀和阴影。

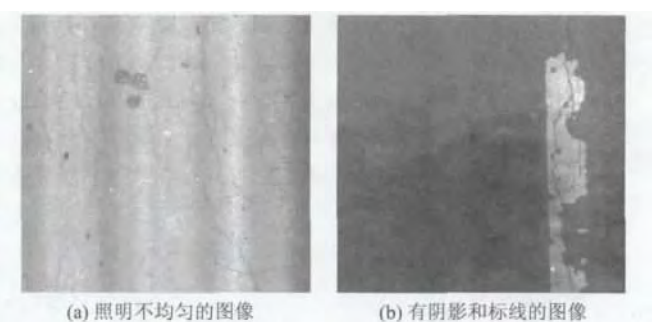


图 2 路面图像

Fig. 2 Pavement images

1.1 图像去噪

图像滤波可以在空间域和频域展开,前者直接对构成图像的像素进行操作,称为空域滤波方法;后者对图像的变换值(如傅里叶变换、小波变换)进行处理,然后再转换到空间域,即频域滤波方法。

空域滤波是使用较为广泛的预处理方法,主要有均值滤波、中值滤波、维纳滤波及形态学滤波。均值滤波器^[2]是典型的线性滤波方法,用 8 邻域模板像素的均值代替中心像素值,在去噪的同时破坏了图像细节、使图像变得模糊。对此,基于非线性处理的中值滤波表现较好,具有降噪效果明显、在灰度变化较小的情况下平滑效果好和降低图像模糊程度等优点^[3]。这 2 种方法简单易行、应用广泛,但有共同的缺陷:不能有效滤除叠加在路面图像中的多种噪声,于是,学者们不断改进,提出了基于结构元素的中值滤波^[4]、加权邻域滤波^[5]、自适应中值滤波^[5]、递归中值滤波及组和中值滤波^[6]等。尽管如此,均值和中值类滤波方法仍无法消除路面纹理的影响,于是,文献[7]提出了二维自适应维纳滤波方法,对背景纹理变化较大的情况滤波效果较好,可以更好地保存图像的边缘和低频细节信息。空域滤波的另一大类是形态学滤波^[8],其基本操作

是膨胀和腐蚀,二者可以组合成许多复杂的形态学方法,包括开运算、闭运算、顶帽变换和底帽变换。在路面图像识别领域,形态学滤波大都与图像分割算法组合应用,以进行边缘检测。

频域滤波主要是高低通滤波和小波处理。低通滤波将高频的灰度变化平滑掉,去除高频随机噪声,易产生模糊效应。为了增强对比度,路面裂缝检测常用高通滤波方法,保留图像灰度变化剧烈的区域。与传统的高低通滤波相比,小波变换功能强大,在图像处理中显示了较好的优越性,能有效抑制噪声,多应用于边缘检测。

1.2 图像增强

一些增强算法直接对整幅图像进行处理,如直方图均衡化^[9]、差影法^[10]和基于先验知识的图像增强方法^[11],在去除噪声的同时降低了光线条的干扰。为了专门消除照明不均的影响,文献[12]采用图像正规化方法消除沿行车方向的不均匀背景;文献[13]利用模糊技术除去由亮度不一致所引起的路面图像噪声。针对植物、建筑物等造成的阴影,文献[6]提出了基于形态成份分析的路面图像阴影分离算法;文献[14]提出快速校正方法消除背景灰度变化的影响;文献[15]基于亮度高程划分提出了阴影消除算法,实现对阴影区域及半影区的准确界定。总之,图像增强主要通过消除背景不均匀及阴影的影响来突出裂缝目标。

1.3 小结

图像预处理的目的是降低噪声、改善图像质量,尽可能真实明显地保留裂缝信息,从这个意义上说,一些预处理方法也能称为裂缝识别算法,如形态学滤波和小波变换。因此,图像预处理与裂缝识别算法并不是孤立的2个部分,需要有机结合,前者完成初步的去噪和增强工作,而后者则进一步提取精确的裂缝图像。

2 空间域裂缝识别算法

1979年,OTSU提出基于灰度直方图的阈值分割算法,也就是OTSU分割^[16],将图像分为目标区域和背景区域,得到了广泛地应用^[3]。由于阈值分割以区域划分为出发点,而图像目标通常具有很强的边缘特征,因此人们又同时转向了边缘检测算法的研究,以1986年的Canny算法^[17]为代表。基于区域和边缘2种原理,图像分割算法积累了大量研究成果,并应用到了路面破损识别、机器视觉以及医学成像分析等众多领域。近几年来,路面裂缝检测

又出现了基于种子生长的图像识别算法^[1,18],因其高效、准确和易自动实时处理等优点受到许多先进检测系统的青睐。因此,空间域裂缝识别算法主要可分为3大类:阈值分割算法,边缘检测算法及基于种子生长的识别算法。

2.1 基于阈值分割的裂缝识别算法

根据阈值分割法应用的范围,有全局阈值法和局部阈值法。全局阈值法在整幅图像范围内用一个阈值来进行二值化处理,如果背景灰度均匀、图像对比度较高,只要选择了正确的阈值,就可取得较好的分割结果。局部阈值法,如图3所示,将图像划分为 $M \times N$ 个子块,在每个子块 A_{ij} 中找到最佳阈值,利用该阈值进行二值分割。与整幅图像采用一个固定的阈值相对应,还有动态阈值法(自适应阈值法)^[19],基本思想是:计算每个子图 A_{ij} 的阈值,通过这些阈值获得合理的阈值面,据此对图像进行二值化处理。

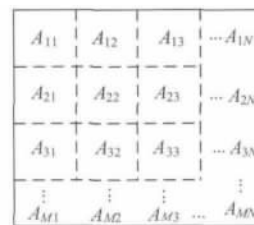


图3 路面图像子块

Fig.3 Pavement sub-images

无论是全局阈值法还是局部阈值法,其关键都是确定阈值,具体的方法很多。最简便易行的属简单阈值法,以直方图灰度分布双峰之间的谷值为阈值,对于单峰分布的直方图图像分割效果较差。迭代阈值法应用图像自身的特性自动计算最佳阈值,在对比度变化较大时分割效果较好,分割效果优于简单阈值分割方法,但仍主要针对具有双峰直方图特性的图像。OTSU分割算法纳入了优化思想,是最常用的分割算法之一。OTSU对噪音和目标大小比较敏感,不一定总是最佳的分割,但大多情况下分割质量较好、性能比较稳定,适合于路面裂缝提取^[3]。此外,阈值确定方法还有回归阈值分割、最佳熵法、矩不变法、基于神经网络的阈值确定法^[19]以及直方图相邻差值的图像分割方法等。

总体而言,局部阈值法和自适应阈值法更适应复杂各异的路面图像,但对噪声较为敏感;至于采取何种分割技术应视情况而定。由于路面图像常受光线条件的影响,这成为了阈值分割几乎不可逾越的障碍,因此,阈值分割法一般只适用于背景灰度

一致、光照均匀和对比度较高的图像处理。

2.2 基于边缘检测的裂缝识别算法

裂缝具有较强的边缘特征,即灰度有明显的阶跃现象,而背景灰度则变化缓慢、梯度较小,如图4所示,因此可以通过边缘检测来识别裂缝。基于该思想,人们设计了许多边缘检测算子,如 Sobel、Prewitt、Kirsch、Roberts、梯度算子、拉普拉斯算子、Marr^[2]和 Canny 算子^[17]等,简单易行、速度快,但由于模板尺寸和方向的限制,对噪声都比较敏感。于是,许多学者展开了改进研究:文献[2]提出了8方向 Sobel 边缘检测,文献[4]设计了可消除伪边缘的改进型 Canny 算法,文献[20]指出仅利用灰度变化的幅度检测边缘是存在问题的,提出了识别裂缝的相位编组法。除此之外,基于数学形态学处理,文献[8]提出了基于多结构多尺度数学形态学路面裂缝自动识别算法;文献[21]提出了多方位结构元素形态学边缘检测算法。引入分形理论,文献[22]提出了基于分形特征的图像分割方法,处理得到的裂缝边缘图像清晰,连续性较好。

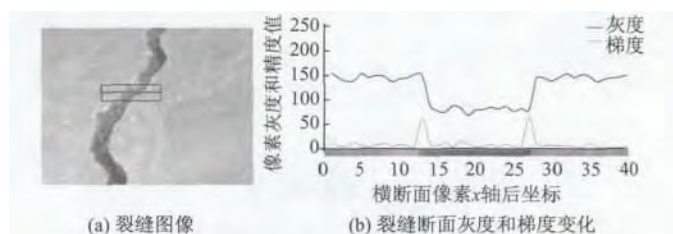


图4 路面裂缝边缘特征

Fig. 4 Edge features of pavement crack

上述算法大都基于局部灰度和梯度信息识别裂缝边缘,而文献[23]指出,边缘识别可以考虑纹理、区域灰度相似性、边界显著性和连续性等7个特征,因此,仅依靠灰度和梯度识别边缘具有一定的局限性。于是,文献[24]结合灰度信息、色彩、梯度和纹理特征来检测边缘;文献[25]综合考虑区域和边界信息以检测边缘。

为了保证边缘的连续性,文献[26]结合距离和方向信息建立 DPF (Directional Potential Function) 模型描述2点之间的吸引力,从而进行边缘连接;文献[27]认为节点方向差异不超过 45° ,设计成本函数连接边界;文献[28]考虑间隔距离和曲率特征搜寻最优连接路径。这些算法考虑了较多的特征并进行了精细的连接处理,能很好地检测边缘,主要用于机器视觉和人工智能领域,对于路面裂缝检测具有重要的借鉴价值。

2.3 基于种子生长的裂缝识别算法

路面裂缝一般具有3个特征,像素较暗、横截面灰度呈现亮-暗-亮的倒立马鞍状和方向性强,见图4(b),因此,裂缝是具有一定宽度的带状区域,边缘检测算法获取的实际上是这个区域的边界,这导致了边缘检测的2个缺陷:(1)无法识别边界内部梯度变化不大的裂缝像素;(2)裂缝检测结果体现为封闭或不封闭的边界,这客观上增加了裂缝连接处理和特征计算(如宽度、面积)的难度。鉴于边缘检测结果并不是真实的裂缝区域,近几年来,基于种子生长的裂缝识别算法应运而生,获得了很好的检测效果。该算法主要有2个步骤:(1)裂缝种子识别,如图5所示,种子一般取为正方形子块,如 8×8 子块、 9×9 子块,具体大小应根据实际情况确定;(2)生长连接,将图5中#所示的被判定为非裂缝的种子连接起来,以获得真实连续的裂缝图像。

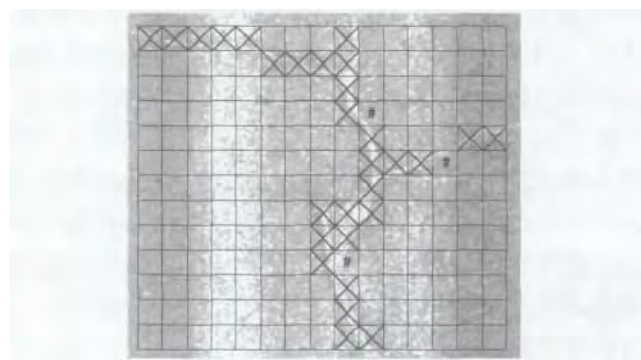


图5 基于种子的裂缝识别

Fig. 5 Seed-based crack recognition

2.3.1 裂缝种子识别

根据裂缝像素暗淡、连续且有明显的方向性^[18]而背景像素灰度大体均匀这一事实,文献[1]提出了对称性检测方法;文献[18]提出了各向异性测度识别方法;文献[29]根据相邻子块的对比度判断是否为裂缝种子。这些方法立足于裂缝的主要特征,能有效地识别裂缝种子,有利于后续的连接处理。

2.3.2 裂缝种子连接

基于裂缝的灰度、方向及区域特征,人们提出了许多裂缝连接方法:文献[29]根据方向信息连接 8×8 裂缝种子;文献[30]提出主动生长的断裂裂缝块连接方法,文献[31]设计方向编码算法(D-Coding algorithm)连接断续裂缝。此外,文献[1]在矩形邻域内应用回溯追踪法寻找最低成本的连接路径;文献[32]根据灰度距离图像在圆形邻

域内应用回溯追踪法寻找局部最优连接路径;文献[33]应用渗透模型对裂缝种子进行生长。

考虑到计算成本,既有裂缝连接算法大都应用局部的灰度、梯度、方向或区域信息,而在机器视觉等相关领域,学者们提出了综合考虑方向、区域及边界等多因素的连接算法^[25]、全局寻优连接算法^[26-28],为裂缝种子连接算法的改进提供了重要参考。

2.4 其他算法

还有一些不适于列入前述3类方法的裂缝识别算法,如文献[34]采用马尔可夫随机场提取裂缝;文献[35]将二维平面图像映射到三维空间曲面,基于微分几何检测算子提取山谷并映射到二维图像平面中作为裂缝点;文献[36]的全局动态优化裂缝识别算法。另外,一些团队致力于路面三维图像识别系统的开发,相应的裂缝识别算法研究工作也正在开展之中。

3 频域裂缝识别算法

在路面裂缝识别领域,频域识别的主要工具是Wavelet变换,至今积累了许多成果^[37]。为了更有效地分析不同分辨率层级的破损图像特征,多尺度Wavelet边缘检测^[36]逐渐受到重视。由于Wavelet变换不能较好地处理二维信号里的线性奇异特征,文献[38]提出应用Ridgelet变换和Curvelet变换进行图像增强。最近几年,又出现了基于Contourlet变换^[39]和Beamlet变换^[40]的裂缝检测算法,取得了较好的成效。图6展示了频域裂缝识别的大体过程,这些变换各有优劣,需根据实际情况选用为频域信号处理工具。



图6 频域识别技术

Fig. 6 Frequency-domain recognition technique

4 基于有监督学习的裂缝识别算法

与前述空域和频域裂缝识别算法相比,有监督的识别方法包含大量的训练学习过程。由于计算量大,严重依赖于训练样本和硬件设备,有监督裂缝识别方法近年来才崭露头角:文献[41]用神经网络方法判断图像是否有裂缝;文献[42]将 25×20

子块的4个统计特征输入神经网络后计算其属于裂缝子块的可能性,然后对子块进行连接处理;文献[43]计算 96×96 和 12×12 子块的参数特征作为神经网络的输入,从而识别裂缝。总体而言,这些算法需要监督学习、计算成本高,虽然在准确率方面有所改善,但不利于海量路面图像的自动实时处理。

5 存在的问题与研究展望

近30年来,路面裂缝图像自动检测取得了许多进展,尽管如此,仍存在如下问题:(1)路面状况复杂多变,信息采集过程受照明和阴影等因素的干扰,图像增强与去噪方法很难消除这些影响;(2)诸多识别算法各有优劣,但均无法很好地改善裂缝断续情况;(3)路面裂缝自动识别算法存在着精度和速度上的矛盾。阈值分割速度快,但受光照影响严重;空间域边缘检测速度较快,而识别结果实际上是边界像素,并不是狭长带状的裂缝本身;基于种子生长的识别算多用于自动实时处理,但其以种子而不是像素为基本单元识别裂缝,降低了精度;基于多尺度小波变换、全局动态优化和有监督学习的识别算法通常能获得较好的识别结果,但计算成本较高,多用于离线处理。

总之,裂缝图像识别算法在准确性、实时性和一致性等方面未能达到满意的结果,需要进一步研发高效稳健的算法,如:空域-频域组合识别算法;基于多层种子的识别算法,在减少计算时间的同时保持裂缝真实的细节特征;综合考虑边界和区域特征消除纹理和噪声的干扰;基于局部和全局信息设计优化识别算法。此外,高精三维图像可以从根本上避开照明、阴影、油污及路面标线的影响,因此,基于三维图像的裂缝识别前景较好。

参考文献:

References:

- [1] GAVILÁN M, BALCONES D, MARCOS O, et al. Adaptive Road Crack Detection System by Pavement Classification [J]. Sensors, 2011, 11 (10): 9628-9657.
- [2] 李晋惠. 公路路面裂缝类病害图像处理算法研究 [J]. 计算机工程与应用, 2003, 39 (35): 212-213, 232. LI Jin-hui. Image Processing Algorithm for Detecting the Pavement Crack Diseases [J]. Computer Engineering and Applications, 2003, 39 (35): 212-213, 232.
- [3] 孙朝云, 褚燕利, 樊瑶, 等. 基于 VC++ 路面裂缝图像处理系统研究 [J]. 计算机应用与软件, 2009, 26 (8): 82-85.

- SUN Zhao-yun, CHU Yan-li, FAN Yao, et al. Pavement Crack Image Processing System Research Based on VC++ [J]. Computer Applications and Software, 2009, 26 (8): 82-85.
- [4] 何靛俊. 基于图像处理的沥青路面裂缝检测系统研究 [D]. 西安: 长安大学, 2008.
- HE Liang-jun. Study on the Detection System of Asphalt Pavement Crack Based on Image Processing [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [5] 朱其刚. 基于像素特征的路面裂缝图像自适应滤波 [J]. 山东师范大学学报: 自然科学版, 2005, 20 (3): 37-39.
- ZHU Qi-gang. An Adaptive Filtering Algorithm for Road Crack Image Based on Pixel Characteristics [J]. Journal of Shandong Normal University: Natural Science, 2005, 20 (3): 37-39.
- [6] 马常霞. 基于图像分析的路面裂缝检测的关键技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- MA Chang-xia. Research on the Key Technologies of Pavement Crack Detection Based on Image Analysis [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2011.
- [7] 张娟, 沙爱民, 孙朝云, 等. 路面裂缝自动识别的图像增强技术 [J]. 中外公路, 2009, 29 (4): 301-305.
- ZHANG Juan, SHA Ai-min, SUN Zhao-yun, et al. Image Enhancement Technique in Automatic Identification of Pavement Crack [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2009, 29 (4): 301-305.
- [8] 梁世庆, 孙波成, 邱延峻. 数学形态学路面裂缝识别算法研究 [J]. 路基工程, 2010 (1): 44-46.
- LIANG Shi-qing, SUN Bo-cheng, QIU Yan-jun. Algorithm Research for Pavement Crack Recognition Based on Mathematic Morphology [J]. Subgrade Engineering, 2010 (1): 44-46.
- [9] SY N T, AVILA M, BEGOT S, et al. Detection of Defects in Road Surface by a Vision System [C] // Proceedings of the 14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. Ajaccio: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2008: 847-851.
- [10] KOUTSOPOULOS H N, DOWNEY A B. Primitive-based Classification of Pavement Cracking Images [J]. Journal of Transportation Engineering, 1993, 119 (3): 402-418.
- [11] CHENG H D, CHEN J R. A Novel Fuzzy Logic Approach to Pavement Distress Detection [C] // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. Scottsdale: SPIE, 1996: 97-108.
- [12] KASEKO M S, RITCHIE S G. A Neural Network-based Methodology for Pavement Crack Detection and Classification [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 1993, 1 (4): 275-291.
- [13] CHOU J, O'NEIL W A, CHENG H. Pavement Distress Evaluation Using Fuzzifying Logic and Moment Invariants [J]. Transportation Research Record, 1995, 1505: 144-148.
- [14] 高建贞, 任明武, 杨静宇. 一种快速实用的灰度校正算法 [J]. 中国图像图形学报, 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.
- [15] 邹勤. 低信噪比路面裂缝增强与提取方法研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2012.
- ZOU Qin. Study on Enhancement and Extraction of Low-SNR Pavement Cracks [D]. Wuhan: Wuhan University, 2012.
- [16] OTSU N. A Threshold Selection Method from Gray-level Histograms [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1979, 9 (1): 62-66.
- [17] CANNY J. A Computational Approach to Edge Detection [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8 (6): 679-698.
- [18] NGUYEM T S, AVILA M, STEPHANE B. Automatic Detection and Classification of Defect on Road Pavement Using Anisotropy Measure [C] // The 17th European Signal Processing Conference. Glasgow: [s. n.], 2009: 617-621.
- [19] 王茜, 彭中, 刘莉. 一种基于自适应阈值的图像分割算法 [J]. 北京理工大学学报, 2003, 23 (4): 521-524.
- WANG Qian, PENG Zhong, LIU Li. An Adaptive Method of Image Segmentation [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2003, 23 (4): 521-524.
- [20] 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 Transport, 2008, 21 (2): 39-42.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] REN Xiao-feng, MALIK J. Learning a Classification Model for Segmentation [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Nice, France: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2003: 10 - 17.
- [24] MARTIN D R, FOWLKES C C, MALIK J. Learning to Detect Natural Image Boundaries Using Local Brightness, Color, and Texture Cues [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26 (5): 530 - 549.
- [25] STAHL J S, WANG S. Edge Grouping Combining Boundary and Region Information [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16 (10): 2590 - 2606.
- [26] ZHU Q, PAYNE M, RIORDAN V. Edge Linking by a Directional Potential Function (DPF) [J]. Image and Vision Computing, 1996, 14 (1): 59 - 70.
- [27] FARAG A A, DELP E J. Edge Linking by Sequential Search [J]. Pattern Recognition, 1995, 28 (5): 611 - 633.
- [28] WANG Song, KUBOTA T, SISKIND J M, et al. Salient Closed Boundary Extraction with Ratio Contour [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27 (4): 546 - 561.
- [29] HUANG Ya-xiong, XU Bu-gao. Automatic Inspection of Pavement Cracking Distress [J]. Journal of Electronic Imaging, 2006, 15 (1): 13 - 17.
- [30] 朱平哲,黎蔚. 基于主动生长的断裂裂缝块的连接方法 [J]. 计算机应用, 2011, 31 (12): 3382 - 3384.
- ZHU Ping-zhe, LI Wei. Linking Algorithm of Discontinuity Crack Block Based on Autonomous Edge Growing [J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31 (12): 3382 - 3384.
- [31] LI Qing-quan, ZOU Qin, LIU Xiang-long. Pavement Crack Classification via Spatial Distribution Features [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2011, 2011: 649 - 675.
- [32] SUN C, VALLOTTON P. Priority-Based Path Growing for Linear Feature Detection [C] // Digital Image Computing Techniques and Applications, 9th Biennial Conference of the Australian Pattern Recognition Society. Glenelg: IEEE, 2007: 360 - 365.
- [33] YAMAGUCHI T, HASHIMOTO S. Automated Crack Detection for Concrete Surface Image Using Percolation Model and Edge Information [C] // IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics. Paris: IEEE, 2006: 3355 - 3360.
- [34] DELANES P, BARBA D. A Markov Random Field for Rectilinear Structure Extraction in Pavement Distress Image Analysis [C] // IEEE International Conference on Image Processing. Washington, D. C.: IEEE, 1995: 446 - 449.
- [35] 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, 38.
- 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, 38.
- [36] TSAI Y C, KAUL V, MERSEREAU R M. Critical Assessment of Pavement Distress Segmentation Methods [J]. Journal of Transportation Engineering, 2010, 136 (1): 11 - 19.
- [37] ZHOU Jian, HUANG Pei-sen, CHIANG F P. Wavelet-based Pavement Distress Classification [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2005, 1940: 89 - 98.
- [38] SHAN Tan, WANG Shuang, ZHANG Xiang-rong, et al. Automatic Image Enhancement Driven by Evolution Based on Ridgelet Frame in the Presence of Noise [C] // The 3rd European Conference on Applications of Evolutionary Computing. Lausanne: Springer Berlin Heidelberg, 2005: 304 - 313.
- [39] SHU Zhi-biao, GUO Yan-qing. Algorithm on Contourlet Domain in Detection of Road Cracks for Pavement Images [J]. Journal of Algorithms & Computational Technology, 2013, 7 (1): 15 - 26.
- [40] WEI N, ZHAO X, DOU X Y, et al. Beamlet Transform Based Pavement Image Crack Detection [C] // International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. Changsha: IEEE, 2010: 881 - 883.
- [41] BRAY J, VERMA B, LI X, et al. A Neural Network Based Technique for Automatic Classification of Road Cracks [C] // Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks. Vancouver: IEEE, 2006: 907 - 912.
- [42] XU Guo-ai, MA Jian-li, LIU Fan-fan, et al. Automatic Recognition of Pavement Surface Crack Based on BP Neural Network [C] // Proceedings of the 2008 International Conference on Computer and Electrical Engineering. Phuket: IEEE, 2008: 19 - 22.
- [43] SAAR T, TALVIK O. Automatic Asphalt Pavement Crack Detection and Classification Using Neural Networks [C] // Proceedings of the 12th Biennial Baltic Electronics Conference. Tallinn: IEEE, 2010: 345 - 348.