

文章编号:1671-2579(2013)06-0042-09

## 路面裂缝图像识别算法研究进展

彭博<sup>1,2,3</sup>, 蒋阳升<sup>1,2</sup>(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 综合运输四川省重点实验室;  
3. Oklahoma State University)

**摘要:** 该文介绍了路面裂缝图像识别的三个主要环节, 图像增强、图像分割和裂缝分类。对空域、频域增强算法, 基于区域、边界和边缘的图像分割算法, 以及有监督和无监督的裂缝分类识别算法的研究发展进行了综述, 探讨了现有裂缝图像识别算法存在的问题, 并从软硬件结合的角度提出了路面裂缝自动识别的发展前景。

**关键词:** 路面养护; 图像增强; 图像分割; 裂缝分类

中国公路交通正处于高速发展时期, 在新建、改扩建公路特别是高等级公路的同时, 路面养护管理的重要性和紧迫性也日渐凸显出来。目前国内高等级公路状况的主要检测手段是人工检测和半自动检测, 这两种方法效率较低、劳动强度大、耗时多、误差高, 难以保障调研安全性, 且获取的数据欠缺准确性与全面性, 不能对路面状况进行科学合理的评价和管理。因此, 开发和设计高效、快速、准确的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, 特别是利用摄影或摄像技术开发路面破损信息采集系统, 如已投入使用的日本 Komatsu 系统(沿行车方向采集一个车道宽的图像, 分辨率  $2\,048 \times 2\,048$ )、美国 PCES 系统(1 024 像素/8 英尺)、瑞典 PAVUE 系统(图像分辨率约为 2 000 像素/车道)、美国伊利诺伊州的自动路面检测系统(采集一个车道宽的图像, 分辨率  $512 \times 480$ )、美国的 DHDV (沿行车方向连续采集约 4 m 宽的路面图像, 分辨率  $3\,704 \times 2\,048$ )和中国的 CiCs 路面检测车(沿行车方向连续采集约 2.6 m 宽的路面图像, 分辨率  $3\,056 \times 2\,048$ )。目前, 许多先进的路面检测系统均能采集精度达 1 mm 的路面图像, 基于此, 运用图像识别等技术提取破损信息已经成为该领域研究热点, 特别是裂缝图像自动识别与分类。

路面裂缝图像自动识别与分类受到了国内外学者的重视, 但在没有人为干预的情况下, 仍然难得到满意

的结果。为了在计算时间、准确率和稳定性等方面保持总体较优的效果, 传统的图像处理方法和许多新方法都得到了广泛的应用尝试, 如模糊逻辑、神经网络、小波变换、数学形态学等。通常情况下, 路面图像识别技术包括图像增强与去噪、图像分割、破损特征描述与分类等环节, 该文从这几个方面对路面裂缝图像的自动识别进行综述。

## 1 图像增强

路面状况比较复杂, 通常受到杂物、砂石、轮胎痕迹、油污、植物建筑阴影的影响, 有必要去除这些因素。有学者把图像增强和去噪划为两个不同的领域, 也有学者认为去除噪声的工作即为图像增强, 由于从总体上都是为了改善图像的视觉效果、剔除噪声、消除背景光照不均匀, 该文将它们统称为图像增强。图像增强技术可以分为空间域方法和频域方法, 空间域方法针对图像平面自身  $f(x, y)$  的像素进行操作, 即  $f(x, y) \rightarrow F(x, y)$  的过程; 后者经过傅里叶变换、小波变换等将图像转换到频域空间进行处理, 然后再变回空间域, 即  $f(x, y) \rightarrow f_0(x, y) \rightarrow F(x, y)$  的过程。

## 1.1 空域增强方法

空域增强方法主要有以下 4 类: 1) 基于整幅图像灰度信息的增强方法; 2) 滤波方法; 3) 孤立噪点去除算法; 4) 消除背景光照不均匀的算法。此外, 还有一

收稿日期: 2013-05-25

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金科技创新项目(编号: A0920502051208-99); 国家自然科学基金资助项目(编号: 51108391); 综合运输四川省重点实验室开放基金项目(编号: B01C0801)

作者简介: 彭博, 男, 博士研究生. E-mail: pengbo351@126.com

些不适于归为这4类的其他方法。

#### 1.1.1 基于整幅图像灰度信息的增强方法

主要是直方图均衡化和差影法。直方图均衡化是一种计算量小、方便快捷的去噪方法,但它突出裂缝的同时,也加强了背景。文献[7]利用差影法,将路面破损图像像素灰度值与一副标准的无破损的路面图像像素灰度值相减,从而增强路面破损图像中的目标,但无破损的路面图像较难界定,图像相减后也会有许多随机噪声。

#### 1.1.2 滤波方法

空域滤波是使用较为广泛的图像增强方法,传统滤除噪声的方法主要是均值滤波、中值滤波,另一大类是基于数学形态学的形态学滤波。

##### (1) 传统滤波方法

文献[8—9]采用加权的邻域平均算法对图像进行噪声滤除,文献[10—12]采用中值滤波对图像进行平滑,有效地去除了裂缝图像的噪声。中值滤波是一种非线性的信号处理方法,与邻域均值滤波相比,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边界部分的模糊程度等优点,这两种算法虽然在某些领域内处理效果很好,但是不能有效地滤除叠加在路面灰度图像中的多种噪声。于是,有学者提出了改进的滤波方法,文献[13]提出了基于4种结构元素的中值滤波算法增强路面灰度图像;文献[14]提出了一种改进的中值滤波算法;文献[15]针对不同区域提出加权邻域滤波和自适应加权中值滤波算法;文献[16]提出了递归中值滤波、自适应中值滤波;文献[17]通过组合中值滤波去除孤立噪声点。理论上,由于维纳滤波对于背景纹理变化较大的情况滤波效果较好,超过均值滤波和中值滤波的处理效果,文献[19]提出了二维自适应维纳滤波方法进行路面裂缝图像增强,根据像素局部邻域的统计特性的估计进行滤波,可以更好地保存图像的边缘和低频细节信息。

##### (2) 形态学滤波

形态学滤波的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、底帽变换。文献[17]利用图像形态学算子演算消除噪音、提取裂缝;文献[21]使用不断增大的结构元素对图像进行交替开闭滤波,平滑图像并去除噪音。在路面图像识别领域,形态学滤波更多地用于边缘检测。

#### 1.1.3 孤立噪声点去除算法

前述各种方法处理之后,图像都不可避免地存在

孤立噪声点,文献[22—23]采用长线段与原图进行操作和判断黑色像素所占比例的方法去除图像孤立噪声点;文献[24]提出一种基于主动生长的断裂裂缝块的连接方法,根据噪声成孤立圆状、裂缝呈线性的特征去除虚假噪声信息;文献[25]提出利用Sobel边缘检测算法,设定路面噪声区域的周长小于20像素,从而去除孤立噪声。

#### 1.1.4 消除背景光照不均匀的增强算法

为了消除背景光照不均匀及阴影的影响,文献[17]提出了基于形态成分分析的路面图像阴影分离算法;文献[26]提出了一种基于模糊理论的图像增强方法,用来消除背景光照不均匀;文献[27—28]提出一种灰度快速校正方法消除背景灰度变化信号的影响;文献[29]提出了基于亮度高程划分的阴影消除算法,实现对阴影区域及半影区的准确界定;文献[30]提出了一种能校正非均匀路面背景的图像增强算法;文献[31]利用模糊技术增强路面破损图像,去除由于亮度不一致所引起的路面图像噪声。

#### 1.1.5 其他空域增强算法

Yan Maode等提出了一种基于自适应模糊的局部区域图像增强算法;文献[33—34]根据路面图像灰度信息的先验知识提出了一种路面破损图像增强的方法,效果较好,但其计算处理时间较长;文献[35]提出了基于引导滤波器的路面裂缝增强算法,能有效地去除噪声,提高裂缝与背景的对比度,有着很好的时效性。

#### 1.2 频域增强方法

##### 1.2.1 高低通滤波方法

低通滤波将高频率的灰度变化平滑掉,去除高频随机噪声,但常常产生模糊效应。在路面裂缝检测中,为了增强对比度、检测出裂缝区域,常用高通滤波方法。文献[6]指出经过拉氏算子运算后模糊的部分得到了锐化,特别是模糊的边缘得到了增强,但图像显示清楚的地方经滤波后可能会失真;文献[36]将图像分为高频和低频部分分别处理,高频部分用双层网络结构减弱噪声,对于图像低频部分,将模糊理论引入到边缘检测中,能够检测出弱边;文献[37]提出了大尺寸窗口高斯滤波器。高通滤波方法保留了图像灰度变化剧烈的区域,因此,也通常作为边缘检测方法。

##### 1.2.2 基于小波变换的增强方法

近年来,基于小波变换的图像增强方法也得到了关注。小波技术主要采用将空间域或时间域上的图像数据转换到小波域上,成为多层次的小波系数,对图像

信号的处理就变成对小波系数的处理,再对处理后的小波系数进行逆变换,得到所需的目标图像,在图像处理应用中显示了较好的优越性。文献[1]采用平稳小波阈值去噪方法对实际采集的路面病害图像进行了去噪处理,利用侧抑制原理对去噪后的图像进行了图像增强,图像的质量得到了明显的改善;文献[2]采用了小波阈值去噪的方法,对路面破损图像进行了去噪处理,很好地抑制了噪声。

### 1.3 小结

空域增强和频域增强都是为了降低噪声、增强图像质量,尽可能真实明显地保留裂缝信息,从这个意义上说,许多图像增强方法也能称为裂缝检测方法,如形态学滤波、Sobel 检测算子、拉氏算子、小波分析方法。由于路面图像的复杂性,这些增强算法均不能完全剔除噪声,需要进一步提取裂缝信息。

## 2 图像分割

图像分割是把图像中的目标分为许多感兴趣的区域,从而与各种物体目标相对应,常见的图像分割的手段有边缘检测、微分算子、直方图变换、区域生长、形态学处理等。图像分割通常采用 3 种不同的原理来实现:区域方法、边界方法和边缘方法。利用区域的方法,把各像素划归至各个物体所属的区域中;在边界方法中,只需确定区域间的边界;在边缘方法中,则先确定边缘像素并把它们连结在一起以构成所需的边界。通常所讨论的图像分割的方法都是基于这 3 种原理。

### 2.1 基于区域的图像分割技术

基于区域的图像分割技术主要是阈值分割法。根据阈值分割法应用的范围,有全局阈值法和局部阈值法;根据阈值分割技术,又有迭代阈值法、最大类间方差阈值法、最佳熵法等。不同的阈值分割方法各有千秋,总体上自适应阈值法针对复杂各异的路面图像具有更稳健的分割效果,但具体采取何种分割技术应视情况而定。

#### 2.1.1 基于应用范围的阈值法分类

全局阈值法是指在整幅图像范围内用一个阈值来进行二值化处理的方法。如果背景灰度值在整个图像中可视为恒定的,且所有的物体与背景几乎有相同的对比度,只要选择了正确的阈值,使用全局阈值会取得较好的分割结果。局部阈值法,如图 1 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),基本思想是:将图像分成  $M \times N$  个子块,然后对每个子图像  $A_{ij}$  计算一个阈值,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。

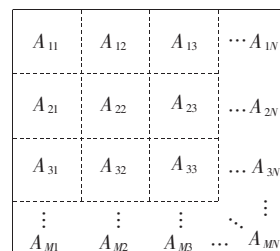


图 1 图像子块划分

#### 2.1.2 阈值分割技术

具体的阈值分割技术很多,其目的是确定阈值,如简单阈值法、迭代阈值法、最大类间方差阈值法(又称为大津法,OTSU)、回归阈值法等。

##### (1) 简单阈值法

简单阈值方法以直方图灰度分布双峰之间的谷值为阈值进行二值化处理,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。

##### (2) OTSU 法和迭代阈值法

阈值分割的目的是尽可能区分背景像素与目标像素,基于该思想,文献[8]、[10]应用 OTSU 图像分割算法对病害图像进行处理;文献[23]提出了灰度拉伸的 OTSU 法;文献[42]采用 OTSU 法对图像进行阈值分割,提取图像上的裂缝特征。文献[5]对迭代法阈值分割和 OTSU 分割进行了对比,结果表明,OTSU 选取出来的阈值较为理想,尤其是类间方差为单峰的图像产生很好的分割效果。由于 OTSU 对噪音和目标大小比较敏感,在一些情况下不一定是最佳的分割,但大多情况下,它的分割质量有一定的保障,是一种比较稳定的分割,适合于路面裂缝提取。

##### (3) 基于模糊数学的阈值分割法

近年来,许多阈值分割算法引入了模糊数学,以取得更好的分割效果,文献[1]研究表明,模糊 C-均值聚类阈值分割算法的处理效果和稳定性优于 OTSU 方法,但需要更多的计算时间,于是基于模糊 C-均值聚类阈值分割算法和 OTSU 法,提出了一种自适应阈值图像分割方法;Cheng Hongda 等提出了一种基于隶属度函数的路面破损模糊分割方法。

#### (4) 其他阈值分割技术

阈值选择方法还有很多,如回归阈值分割、最佳熵法、矩不变法、极小误差法、共生矩阵法、基于神经网络的阈值确定法等以及直方图相邻差值的图像分割方法,也引入了视觉特性、神经网络、模糊数学、遗传算法、小波变换及信息论等工具。

### 2.2 基于边界的图像分割技术

#### 2.2.1 经典的边缘检测算子

经典的边缘检测算子有 Sobel 算子、Prewitt 算子、Kirsch 算子、Roberts 算子等,这些算子算法简单,但对噪声比较敏感,常用的还有梯度算子、拉普拉斯算子和 Marr 算子。梯度算子、Sobel 算子基本思想简单,运行速度较快,只有水平和垂直两个方向的模板,不能对不规则裂缝的实际边缘方向进行有效的识别与检测;拉普拉斯和 Marr 算子首先对原始图像做了平滑,降低噪声的影响,并且算子无方向性,但是,由于对图像的平滑使得算子对边缘的定位不精确,处理后的边缘像素数目较多。文献[46]提出的 Canny 边缘检测方法是传统边缘检测算子中较好的算法,但常常检测出伪边缘。

#### 2.2.2 基于边缘检测算子的改进算法

由于前述检测算子不能获得满意的分割效果,许多学者进行了改进研究,并引入了数学形态学、分形理论等工具。文献[6]指出传统方法仅仅利用灰度变化的幅度作为局部边缘提取的主要亮度是存在问题的,提出采用相位编组法进行裂缝提取;文献[14]应用一种结合阈值选择的改进 Canny 算法对裂缝图像进行边缘检测处理,可以消除伪边缘;文献[17]结合多尺度几何分析方法、轮廓波变换、形态学和组合中值滤波,处理得到裂缝检测结果;文献[21]提出了一个新的基于多结构多尺度数学形态学路面裂缝自动识别算法,使用基于标记符的分水岭变换分割出裂缝对象;文献[35]将基于最近邻的均值漂移分割算法应用于路面裂缝图像,取得了良好的分割效果;文献[47]构造了 8 个方向的模板对图像进行 Sobel 边缘检测处理;文献[48—49]基于形态学提了裂缝识别算法;文献[13]利用形态学梯度算子、闭合算子进行边缘检测和裂缝空隙弥合,能够有效地检测出裂缝边缘,并保持边缘的平滑性;文献[50]提出了多方位结构元素形态学边缘检测算法;文献[8]、[51]通过构造 8 个方向模板的 Sobel 算子对沥青路面裂缝进行检测,很好地获得了裂缝特性;文献[2]、[52]、[53]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,裂缝边缘连续

性较好;文献[54]提出了一种基于分数阶微分和图像形态学的路面裂缝检测算法。

#### 2.2.3 基于小波变换的边缘检测

许多边缘检测器如形态学算子、Roberts、Sobel、Prewitt 等,大都只针对空间尺度。小波分析作为继傅里叶分析之后又一有效的时频分析方法,在图像边缘检测中取得了许多成果。文献[60]基于小波变换提出了裂缝检测和分割算法,可以实时检测;文献[61]应用基于“à trous”算法的小波边缘检测方法对路面破损进行分割;文献[62]提出了基于复杂双树小波的图片恢复和去噪方法。近来,基于小波的多尺度边缘检测发展起来。由于小波变换不能较好地处理二维信号里的线性奇异特征,作为拓展,脊波变换和曲波变换获得了更好的增强效果。文献[67]对小波变换、脊波变换和曲波变换三种多分辨率分析方法进行对比分析,结果表明:曲波变换对于坑槽检测效果最好,而脊波变换对于裂缝检测效果最好。

### 2.3 基于边缘的图像分割技术

基于区域和边界的图像分割方法没有考虑裂缝像素的连续性,而基于边缘的图像分割通过一定的计算(图 2),搜寻到合理的像素(图 2 中  $a$  或  $b$ )实现裂缝像素或裂缝子块的生长、连接,通常具有较有效的分割效果,但算法复杂性也较高。

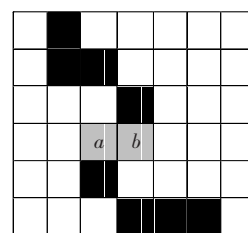


图 2 基于边缘检测的图像分割

文献[24]针对沥青路面裂缝分割成二值图像后,存在虚假信息 and 边缘断点的问题,提出一种基于主动生长的断裂裂缝块的连接方法,较好地实现了断裂裂缝块的连接,有利于后续的图像测量、评估等处理;提出了基于模糊逻辑的裂缝检测算法,并实现了裂缝像素的连接性检测;文献[68]基于连通域之间的相关特性,将细小且不连续裂缝的各个片段连接形成完整裂缝,进而基于连通域长度特性,实现了复杂裂缝与路面纹理噪声的区分;文献[69]利用追踪围线提取裂缝边缘,介绍了基于像素追踪边缘和基于边追踪的裂缝提取办法;文献[70]应用形态学方法检测裂缝,并进行连接性检测;文献[71]提出了基于种子和最低成本的裂



缝生长算法,以检测路面裂缝;文献[72]基于种子和种子连接算法,对裂缝边缘进行检测。

## 2.4 其他图像分割算法

还有一些不适于列入区域方法、边界方法和边缘方法的图像分割方法,如文献[73]采用马尔可夫随机提取裂缝;文献[74]将二维平面图像映射到三维空间曲面,通过分析三维曲面中“山谷”的曲率特征,采用基于微分几何的空间检测算子准确提取曲面中的“山谷”,并映射到二维图像平面中作为裂缝点,成功检测到绝大部分裂缝信息。此外,一些团队致力于路面三维图像识别系统的开发研究,虽然目前几乎没有基于三维图像的图像分割和裂缝识别算法,但它很可能开辟图像分割算法的新领域。

## 2.5 小结

文献[75]系统地评价了 6 种常用的路面破损图像分割算法,统计学阈值分割、Canny 边缘检测、多尺度小波方法、裂缝种子检测方法、迭代修剪算法和基于动态优化的分割方法,这些方法涵盖了基于区域、边界和边缘的分割方法。结果表明,在分割效果上,基于动态优化的分割方法最好,统计学阈值分割效果最差,其余方法居中;在计算时间上,动态优化分割和多尺度小波方法居首,其余 4 种方法均具有实时处理的可行性。动态优化分割方法考虑了大量像素的连接性信息并进行优化,降低了噪声对分割结果的影响,具有广阔的前景。由于路面裂缝图像可能存在油污、杂物、阴影,拍摄过程系统失真、图像传输过程中的噪声污染等,即便经过图像增强处理也不能完全消除噪声,图像分割算法在检测效果、实时性和一致性等方面也不能达到满意的结果,需要继续研发高效稳健的算法。

# 3 特征描述与分类

路面裂缝具有一定的特征,如图 3 所示,通过提取这些特征,采用适当的分类算法,以实现裂缝分类,继而计算损坏程度及破损率等。

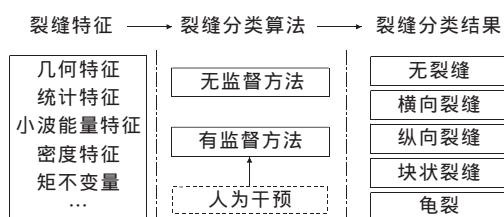


图 3 裂缝特征与分类

## 3.1 裂缝特征描述

裂缝首先具有一定的几何特征,即点状特征、线状特征和面状特征。点状特征有离散曲率奇异点个数及分布等;线状特征有区域长宽比、最小外接矩形长宽比、裂缝边缘平均曲率等特征;面状特征有长度、宽度、面积、区域面积与最小外接矩形的面积比等特征。还有学者提出了统计特征、小波能量特征、密度特征、矩不变量等表征裂缝属性,进而进行裂缝分类,其中,基于密度特征和矩不变量特征进行裂缝分类具有较好的效果。

## 3.2 裂缝分类算法

近年来,神经网络、模糊理论、遗传算法和支持向量机等在裂缝分类算法中得到了大量应用。常用的路面破损分类器有贝叶斯分类器、线性分类器和非线性分类器,又分为无监督和有监督方法,前者主要基于规则判断,后者包括一系列基于人工神经网络的方法。

### 3.2.1 无监督方法

无监督方法基于规则判断得到分类结果。支持向量机使用数学方法和优化技术,寻找到一个超平面区分类别,在裂缝分类中发挥了重要作用;文献[83]对于训练样本数很少的 5 种裂缝,建立了相应的支撑向量机分类器算法;文献[84]选择支持向量机作为分类器,通过试验选择径向基核函数,区分横向裂缝、纵向裂缝、龟状裂缝、块状裂缝、无裂缝 5 种路面破损类型;文献[85]以小波能量作为描述图像的特征,并用具有不同核函数的支持向量机进行学习和分类,取得了很好的分类效果;文献[71]提出了基于支持向量机的路面破损分类方法。此外,文献[10]、[35]使用阈值判断法来辨别网状裂缝和线形裂缝,然后根据投影法将横向裂缝与纵向裂缝分类;文献[41]基于决策树提出了裂缝分类方法;文献[86]研究了 3 种基于投影特征和 Hough 特征的分类器;遗传算法、多层感知器和自组织映射;文献[87]应用判别分析、k-NN 和离散选择模型提取路面裂缝特征;文献[88]提出了基于 Beamlet 变换的裂缝分类方法;文献[89]应用最小间距分类器进行分类;文献[90]应用方向滤波器对裂缝分类。

### 3.2.2 有监督方法

在路面破损识别研究中,大多采用有监督学习方法设计分类器,用标准路面破损样本进行训练学习得到优化分类器参数。由于裂缝破损模式不固定,破损程度也很难用统一的解析式描述,基于人工神经网络的非线性分类算法成为裂缝自动识别的热点。文献[1]、[39]、[77]、[91]、[92]应用 BP 神经网络进行裂

缝分类;文献[2]提取了裂缝特征向量并设计了径向基概率神经网络对路面裂缝进行分类处理;文献[22]设计径向基函数神经网络的分类器实现对裂缝的准确分类;文献[93]设计了基于全局优化算法的路面破损前馈神经网络分类器;文献[94]提出了两阶段的线性神经网络分类方法,比贝叶斯分类器和 $k$ -NN分类器更优;文献[95]设计了模糊神经网络分类器;文献[96]设计了基于图像的神经网络、基于直方图的神经网络和基于概率的神经网络方法对路面裂缝进行分类;文献[97]考虑到线状和区域破损的密度分布信息,设计了基于密度的神经网络方法。

### 3.3 小结

人工神经网络等智能方法是实现路面裂缝自动识别有前途的手段之一,但它需要人为干预,且需要大量样本进行训练,计算量较大。总体上,有监督方法的优势在于识别准确率较高,而无监督方法的优势为易于自动化和计算量小,因此有必要进一步研发在准确率、全自动化和实时处理等方面均具有出色表现的算法。

## 4 存在的问题与研究展望

目前,尽管路面裂缝自动检测的研究取得了许多进展,但依然存在以下几方面问题:

(1) 裂缝图像处理大多基于灰度信息,灰度受光线、角度、阴影等影响严重,虽然很多系统采用了独特的光照系统,还设计了基于高精激光摄像的图像采集系统,旨在光照均匀,但不可避免地存在光线、角度带来的不良影响,而现有图像增强方法很难完全消除这些噪声。

(2) 图像分割算法依旧很容易受到路面清洁程度、裂缝宽度不均等的影响,许多分割算法在路面图像比较相似的情况下表现良好,否则,就需要人为地调整算法参数,以获取较好的效果。

(3) 既有路面破损自动检测系统多为现场采集路面图像、离线处理路面图像,图像数据处理工作量极大。许多计算时间短、能达到实时处理要求的图像分割算法精度不高,而一些稳健而有效的分割算法因复杂度高、计算时间长,不能够进行实时的计算处理。

(4) 裂缝自动识别的一些算法精度不高、步骤繁杂,存在着精度和速度的矛盾。国内外广泛应用神经网络存在着局部极值、过度收敛、泛化能力差的先天不足,对训练样本依赖严重,计算时间也较长。

路面图像复杂多样,图像处理工作量巨大,虽然出

现了许多图像增强、图像分割和裂缝分类算法,但裂缝的全自动、高速高效而准确的识别仍是一个挑战,路面裂缝图像识别研究将朝着软硬件系统严密配合的方向发展。

(1) 硬件方面。应用分辨率更高、采集速度更快、图像质量更好、成本更低的数字图像采集设备,使用高性能并行计算机处理和存储路面破损数据,一方面改善图像质量,另一方面提高图像处理速度。

(2) 软件方面。对图像增强、图像分割和裂缝识别算法进行更深入的研究,如高速有效的平滑消噪增强算法,自适应的结合空域频域的优化分割算法,鲁棒性好的特征提取以及全局寻优的裂缝分类算法。裂缝识别的各个步骤既相对独立又紧密联系,可对各种图像增强算法、分割算法和分类算法进行多种组合研究,以达到整体效果和计算速度的最优。同时,随着路面高精三维图像采集技术的不断发展,基于三维图像的裂缝检测识别算法也具有较大的前景。

近年来,基于图像技术的路面裂缝识别技术有着很快的发展,国内在软硬件研制方面逐步缩小了与发达国家的差距,但仍需要引进新的测量理论、新技术,研发新一代路面破损自动识别系统,实时采集、处理和存储路面图像数据,最终将图像采集、识别、定位、查询、分析、传输、管理、决策支持整合为一体,集成路面图像识别智能管理系统。

### 参考文献:

- [1] 田恩杰. 高等级公路路面病害自动检测方法研究[D]. 吉林大学硕士学位论文, 2007.
- [2] 左永霞. 高速公路路面破损图像识别技术研究[D]. 吉林大学硕士学位论文, 2008.
- [3] 王荣本, 王起, 初秀氏. 路面破损图像识别研究进展[J]. 吉林大学学报:工学版, 2002(4).
- [4] Wang, K. C. P., Li, X. Y., and Elliott, R. P. An Information System with a Digital Highway Data Vehicle. 2nd International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, Auburn, Alabama, USA, July 29—August 1, 2001.
- [5] 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(8).
- [6] 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(2).
- [7] H. N. Koutsopoulos, A. B. Downey. Primitive-Based Classification of Pavement Cracking Images [J]. J. Transp. Eng., 1993(3):402—418.
- [8] 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(35).
- [9] 李晋惠, 楼伟, 姜寿山. 基于 CCD 的公路路面病害检测技术研究[J]. 西安工业学院学报, 2002(2).
- [10] 赵轲. 路面裂缝图像自动识别系统研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2009.
- [11] Siriphan J itprasithsiri. Development of a New Digital Pavement Image Processing Algorithm for Unified Crack Index Computation[D]. A Dissertation Submitted to the Faculty of the University of Utah, 1997.
- [12] Chambon, S.; Gourraud, C.; Moliard, J. — M.; Nicolle, P.. Road Crack Extraction with Adapted Filtering and Markov Model — Based Segmentation — Introduction and Validation. Proceedings of the International Conference on Computer Vision Theory and Applications, Angers, France, 17—21 May 2010.
- [13] 闫茂德, 伯绍波, 贺昱曜. 一种基于形态学的路面裂缝图像检测与分析方法[J]. 工程图学学报, 2008(2).
- [14] 何靓俊. 基于图像处理的沥青路面裂缝检测系统研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2008.
- [15] 朱其刚. 基于像素特征的路面裂缝图像自适应滤噪[J]. 山东师范大学学报:自然科学版, 2005(3).
- [16] 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(6).
- [17] 马常霞. 基于图像分析的路面裂缝检测的关键技术研究[D]. 南京理工大学博士学位论文, 2012.
- [18] 谢昌荣, 张郭晶. 路面裂缝检测图像处理算法的研究[J]. 中外公路, 2009(6).
- [19] 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(4).
- [20] 荣婧, 潘玉利. 基于图像的水泥刻槽路面裂缝识别方法[J]. 公路交通科技, 2012(3).
- [21] 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).
- [22] 李刚, 贺昱曜. 不均匀光照的路面裂缝检测和分类新方法[J]. 光子学报, 2010(8).
- [23] 褚燕利. 基于灰度图像及其纹理特性的裂缝特征提取[J]. 公路, 2010(7).
- [24] 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(12).
- [25] Li L, Chan P, Rao A, et al. Flexible Pavement Distress Evaluation Using Image Analysis[J]. J. Transp. Engng., ASCE, 1993, 119(3): 402—418.
- [26] 刘玉臣, 王国强, 林建荣. 基于模糊理论的路面裂缝图像增强方法[J]. 养护机械与施工技术, 2006(2).
- [27] 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(6).
- [28] 高建贞, 任明武, 唐振民, 等. 路面裂缝的自动检测与识别[J]. 计算机工程, 2003(2).
- [29] 邹勤. 低信噪比路面裂缝增强与提取方法研究[D]. 武汉大学博士学位论文, 2012.
- [30] H. D. Cheng, M. Miyojim. Automatic Pavement Distress Detection System[J]. Journal of Information Sciences, 1998;219—240.
- [31] Chou J C, O'Neil W A. Pavement Distress Evaluation Using Fuzzifying Logic and Moment Invariants. Transp. Res. Record, 1505, Transportation Research Board, Washington D. C., 1995;144—148.
- [32] Yan Maode, Bo Shaobo, Li Xue, et al. An Adaptive Fuzzy Image Enhancement Algorithm for Local Regions [C]. CCC2007, Zhangjiajie: IEEE, 2007: 308—311.
- [33] Cheng Hengda. Automated Real-Time Pavement Distress Detection Using Fuzzy Logic and Neural Network. SPIE Proceeding, 1994, 2946:140—151.
- [34] H. D. Cheng, Jim-Rong Chen. A Novel Fuzzy Logic Approach to Pavement Distress Detection. SPIE 2946: 97—108.
- [35] 李晓飞. 基于数字图像处理技术的路面裂缝检测算法研究[D]. 南京邮电大学硕士学位论文, 2012.
- [36] 贾超, 邹琪, 姚芳, 等. 基于神经网络与模糊算法图像边缘检测方法[J]. 计算机应用研究, 2008(11).
- [37] D Marr and E C Hildreth. Theory of Edge Detection. Proc. R Soc London B207, 1980;187—217.
- [38] 孙波成, 邱延峻, 梁世庆. 基于小波的路面裂缝识别研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2010(1).
- [39] 刘玉臣. 公路路面裂缝图像自动识别技术研究[D]. 吉林大学硕士学位论文, 2003.
- [40] 王茜蓓, 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(4).
- [41] Koutsopoulos, H. N., and El Sanhoury, I. M. Methods and Algorithms for Automated Analysis of Pavement Images. Transp. Res. Record 1311, 1991;103—111.
- [42] 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(2).
- [43] H. D. Cheng, Jim-Rong Chen, Chris Glazier, Y. G. Hu. Novel Approach to Pavement Cracking Detection Based on Fuzzy Set Theory[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 1999, 13(4):270—280.
- [44] Cheng, H. D., Shi, X. J., and Glazier, C.. Real-Time Image Thresholding Based on Sample Space Reduction and Interpolation Approach [J]. J. Comput. Civ. Eng., 2003, 17(4):264—272.
- [45] Li Qingquan, Liu Xianglong. Novel Approach to Pavement Image Segmentation Based on Neighboring Differ-

- ence Histogram Method[C]. CISP2008. Sanya: IEEE, 2008: 792—796.
- [46] Canny, J. A Computational Approach to Edge Detection. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., PAMI—8(6). 1986:679—698.
- [47] 李晋惠. 用图像处理的方法检测公路路面裂缝类病害[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2004(3).
- [48] Sun, B. —C., and Qiu, Y. —J.. Automatic Identification of Pavement Cracks Using Mathematic Morphology. Proc., Int. Conf. on Transportation Engineering 2007, ICTE 2007, ASCE, Reston, Va., 2007: 1 783—1 788.
- [49] Shah, S.. Automatic Cell Image Segmentation Using a Shape Classification Model. Proc., IAPR Conf. on Machine Vision Applications, International Association for Pattern Recognition, Tokyo, 2007.
- [50] 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(1).
- [51] 伯绍波, 闫茂德, 孙国军, 等. 沥青路面裂缝检测图像处理算法研究[J]. 微计算机信息, 2007(15).
- [52] 于向军, 马若丁, 刘岩, 等. 基于分形理论的路面裂缝图像分割研究[J]. 微计算机信息, 2008(6).
- [53] Wang, H., Zhu, N., and Wang, Q.. Segmentation of Pavement Cracks Using Differential Box—Counting Approach[J]. J. Harbin Inst. Technol., 2007, 39(1): 142—144.
- [54] 马常霞, 赵春霞, 狄峰, 等. 自然环境下路面裂缝的识别[J]. 工程图学学报, 2011(4).
- [55] Brown, T. J.. An Adaptive Strategy for Wavelet Based Image Enhancement. Proceedings IMVIP, 2000: 67—81.
- [56] Donoho, D. L., & Duncan, M. R.. Digital Curvelet Transform: Strategy, Implementation and Experiments. Proceeding of SPIE, 2000, 4056: 12—29.
- [57] Claudio, R. J., & Jacob, S.. Adaptive Image Denoising and Edge Enhancement in Scale—Space Using the Wavelet Transform[J]. Pattern Recognition Letters, 2003(24): 965—971.
- [58] Wang, G., Xiao, L., & He, A. Z.. Algorithm Research of Adaptive Fuzzy Image Enhancement in Ridgelet Transform Domain[J]. Acta Optica Sinica, 2007(27): 1 183—1 190.
- [59] Zhang, D., Qu, S., He, L., & Shi, S.. 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): 1 216—1 225.
- [60] Jian Zhou, Peisen S. Huang, Fu—Pen Chiang. Wavelet —Based Pavement Distress Detection and Evaluation [J]. Optical Engineering. 2006, 45(2).
- [61] Wang, K. C. P., Li, Q., and Gong, W.. Wavelet —Based Pavement Distress Image Edge Detection with ‘Trous’ Algorithm. Proc., TRB Meeting, Transportation Research Board, Washington, D. C., 2007.
- [62] De Rivaz, P., and Kingsbury, N.. Complex Wavelet Features for Fast Texture Image Retrieval. Proc., IEEE Int. Conf. on Image Processing, IEEE, New York, 1999: 109—113.
- [63] Cuhadar, A., Shalaby, K., and Tasdoken, S.. Automatic Segmentation of Pavement Condition Data Using Wavelet Transform. Proc., IEEE Canadian Conf. on Electrical and Computer Engineering, IEEE, New York, 2002(2): 1 009—1 014.
- [64] Zhou, J., Huang, P. S., and Chiang, F. —P.. Wavelet—Aided Pavement Distress Image Processing. Wavelets: Applications in Signal and Image Processing X, SPIE, Bellingham, Wash., 2003: 728—739.
- [65] Zhou, J., Huang, P. S., and Chiang, F. —P.. Wavelet—Based Pavement Distress Image Compression and Noise Reduction. Wavelets XI, SPIE, Bellingham, Wash, 2005.
- [66] Shan, T., Wang, S., Zhang, X. R., & Jiao, L. C.. Automatic Image Enhancement Driven by Evolution Based on Ridgelet Frame in The Presence of Noise. Proceedings of Applications of Evolutionary Computing, 2005, 3 449: 304—313.
- [67] Fereidoon Moghadas Nejad, Hamzeh Zakeri. A Comparison of Multi—Resolution Methods for Detection and Isolation of Pavement Distress[J]. Expert Systems with Applications, 2011(38): 2 857—2 872.
- [68] 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(2).
- [69] 凌勇, 汪国有. 高速公路裂缝边缘检测算法研究[J]. 计算机与数字工程, 2001(3).
- [70] Naoki Tanaka, Kenji Uernatsu. A Crack Detection Method in Road Surface Images Using Morphology. WA’98 IAPR Workshop on Machine Vision Applications, Makuhari, Chiba Japan, 1998: 17—19.
- [71] Miguel Gavilán, David Balcones, Oscar Marcos, David F. Llorca, Miguel A. Sotelo, Ignacio Parra, Manuel Ocaña, Pedro Aliseda, Pedro Yarza, Alejandro Amírola. Adaptive Road Crack Detection System by Pavement Classification[J]. Sensors, 2011(11): 9 628—9 657.



- [72] Yaxiong Huang, Bugao Xu. Automatic Inspection of Pavement Cracking Distress[J]. Journal of Electronic Imaging, 2006, 15(1).
- [73] Philippe Delanes and Dominique Barba. A Markov Random Field for Rectilinear Structure Extraction in Pavement Distress Image Analysis. Proceedings of the 1995 International Conference on Image Processing, 1995.
- [74] 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(5).
- [75] Yi-Chang Tsai; Vivek Kaul; and Russell M. Merse-reau. Critical Assessment of Pavement Distress Segmentation Methods[J]. Journal of Transportation Engineering, 2010, 11-19.
- [76] 李清泉, 刘向龙. 路面裂缝影像几何特征提取算法[J]. 中国科技论文在线, 2007(7).
- [77] 韩杰. 路面病害图像自动分类方法研究与分析[D]. 南京理工大学硕士学位论文, 2007.
- [78] 肖旺新, 严新平, 张雪. 基于混合密度因子的路面破损自动识别研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2005(2).
- [79] 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).
- [80] Qingquan Li, Qin Zou, Xiang long Liu. Pavement Crack Classification via Spatial Distribution Features [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2011, 20(2).
- [81] J. Chou, W. A. O'Neil, and H. D. Cheng. Pavement Distress Classification Using Neural Networks. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, October, 1994, 397-401.
- [82] C. J. Hsu, C. F. Chen, C. Lee, and S. M. Huang. Airport Pavement Distress Image Classification Using Moment Invariant Neural Network. Proceedings of the 22nd Asian Conference on Remote Sensing, Singapore, 2001.
- [83] 丁爱玲, 焦李成. 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(2).
- [84] 李国燕. 基于图像的路面破损识别[D]. 河北工业大学硕士学位论文, 2008.
- [85] 孙奥. 路面病害图像自动分类方法研究[D]. 南京理工大学硕士学位论文, 2008.
- [86] H. R. ababaah, D. Vrajitoru, and J. Wolfer. Asphalt Pavement Crack Classification: a Comparison of GA, MLP, and SOM. Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO '05), Washington, D. C., USA, 2005.
- [87] H. N. Koutsopoulos, V. I. Kapotis, and A. B. Downey. Improved Methods for Classification of Pavement Distress Images[J]. Transportation Research Part C, 1994, 2(1):19-33.
- [88] L. Ying and E. Salari. Beamlet Transform - Based Technique for Pavement Crack Detection and Classification[J]. Computer - Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2010, 25(8):572-580.
- [89] Maser, K. R. . Computational Techniques for Automating Visual Inspection. Working Paper, Department of Civil Engineering, MIT, Cambridge, Mass, 1987.
- [90] M. H. Mohajeri, P. J. Manning. ARIATM: An Operating System of Pavement Distress Diagnosis by Image Processing. Transportation Research Record 1311, 1991:120-130.
- [91] 初秀民, 王荣本, 储江伟, 等. 沥青路面破损图像分割方法研究[J]. 中国公路学报, 2003(3).
- [92] 施树明, 初秀民, 王荣本. 沥青路面破损图像测量方法研究[J]. 公路交通科技, 2004(7).
- [93] 初秀民, 王荣本, 储江伟, 等. 基于不变矩特征的沥青路面破损图像识别[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2003(1).
- [94] M. S. Kaseko, Z. P. Lo, and S. G. Ritchie. Comparison of Traditional and Neural Classifiers for Pavement - Crack Detection[J]. Journal of Transportation Engineering, 1994(4).
- [95] S. K. Sinha and F. Karray. Classification of Underground Pipe Scanned Images Using Feature Extraction and Neuro - Fuzzy Algorithm. IEEE Transactions on Neural Networks, 2002, 13(2):393-401.
- [96] B. J. Lee and H. D. Lee. Position - Invariant Neural Network for Digital Pavement Crack Analysis[J]. Computer - Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2004, 19(2):105-118.
- [97] W. X. Xiao, X. P. Yan, and X. Zhang. Pavement Distress Image Automatic Classification Based on Density - Based Neural Network. Proceedings of the 1st International Conference on Rough Sets and Knowledge Technology (RSKT' 2006), Chongqing, China, 2006:685-692.