

文章编号: 1004-2954(2014)10-0093-04

隧道检测裂缝的图像处理研究

王 睿, 漆泰岳, 朱 鑫, 李 涛

(西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 成都 610031)

摘 要: 裂缝是隧道衬砌最常见的病害之一。基于近几年快速发展的工程检测系统与图像处理算法的研究, 提出基于 CCD 相机的衬砌裂缝检测系统来采集裂缝图像。通过比较均值滤波、中值滤波、维纳滤波、自适应中值滤波和加权邻域滤波比较, 选择自适应中值滤波进行图像增强。结合直方图阈值分割法、Otsu 最大类间方差阈值和局部阈值分割法, 对增强后图像进行二值化处理比较, Otsu 法较好地保留了裂缝的边缘信息, 证明了该算法的有效性, 为后续裂缝信息的提取奠定了基础。

关键词: 隧道裂缝; 裂缝图像; 自适应中值滤波; Otsu 最大类间方差; 二值化

中图分类号: U45 **文献标识码:** A **DOI:** 10.13238/j.issn.1004-2954.2014.10.022

Study on Tunnel Crack Detection Based on Image Processing

Wang Rui, Qi Taiyue, Zhu Xin, Li Tao

(MOE Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Cracks are one of the most common defects of the tunnel engineering. With rapid development of detection systems and image processing algorithms in recent years, a rapid lining inspection system based on CCD is proposed for image acquisition. By comparing the mean filter, median filter, Wiener filter, adaptive median filter and the algorithm of neighborhood weighted averaging, the author selects adaptive median filter for image enhancement. In combination with histogram threshold method, maximum between-cluster variance (Otsu) and local threshold segmentation to binarize and compare the enhanced images, the Otsu method better preserves the information about the edge of cracks, demonstrates the effectiveness of the algorithm, and lays a foundation for the extraction of further information about cracks.

Key words: tunnel crack; Crack image; Adaptive median filter; Maximum between-cluster variance; Inarization

收稿日期: 2014-01-15; 修回日期: 2014-02-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278423); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(SWJTU11ZT33)

作者简介: 王 睿(1988—), 女, 博士研究生, E-mail: wrui_app1988@163.com。

衬砌裂缝是最常见的隧道病害, 是衬砌结构破坏或失稳坍塌的重要原因^[1]。目前对隧道裂缝的检测主要采用裂缝观测仪, 人工判读和记录, 该方法费时、费力, 主观性较强, 不利于隧道结构安全的客观安全评

- [6] 易鑫, 白雪飞. 浅谈综合地质勘察在长大隧道勘察中的应用[J]. 铁道勘察, 2011(4): 75-78.
- [7] 许再良, 赵建峰, 王子武, 等. 太行山特长隧道综合勘察技术的应用与效果[J]. 铁道工程学报, 2007(10): 53-57.
- [8] 黄勇. 综合勘察技术在木寨山岭特长隧道中的应用[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2009(6): 1011-1015.
- [9] 中华人民共和国铁道部. 铁建设[2008]105号 铁路隧道超前地质预报技术指南[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
- [10] 谭信荣, 陈寿根, 马辉. 隧道综合超前地质预报技术在岩溶地区的

- 应用[J]. 铁道标准设计, 2012(2): 84-87.
- [11] 李桂林, 张立国, 靳天堂, 等. 超前地质预测预报在云雾山隧道中的应用[J]. 铁道标准设计, 2007(S2): 65-68.
- [12] 雷春英, 尚亿军, 李晓虎, 等. 综合超前地质预报技术在马桑哨隧道中的应用研究[J]. 工程地质学报, 2012(6): 1007-1012.
- [13] 薛斌, 韩小敏. 宜万铁路岩溶隧道地质综合超前预报技术[J]. 铁道标准设计, 2010(8): 72-77.
- [14] 胡世权. 综合地质超前预报在策马隧道斜井探测中的应用[J]. 铁道建筑, 2012(3): 39-41.

估^[2]。近些年,国内外对裂缝检测的研究方向主要基于图像处理的检测系统的研究^[3-9]。在此,提出一种对基于 CCD 相机采集的衬砌裂缝图像进行分析处理的方法。

对于裂缝图像而言,边缘是裂缝最基本的特征,是后续裂缝信息有效提取以及裂缝健康评估的前提^[10]。由于环境和设备的影响,所采集的裂缝病害图像噪声比较严重,因此需认真分析图像的滤波算法以及图像分割,较好地保留裂缝的边缘信息,为裂缝几何特征以及几何参数的提取奠定了良好的基础。

1 隧道衬砌裂缝检测系统的适应性分析和系统组成

1.1 检测系统的适应性分析

高速铁路隧道检测必须结合高速铁路隧道自身特点选择合适的方法,需满足以下条件:(1)检测系统需能完成大面积衬砌检测,以得到整个隧道衬砌状况的完整可靠数据;(2)高速铁路隧道长度较长,且“开天窗”时间较短,因此要求系统在满足检测精度的条件下具有较高的检测速度^[11];(3)高速铁路隧道内环境恶劣,要求检测工作能够在恶劣环境下完成检测工作且保持稳定;(4)对于隧道衬砌检测尽可能采用无损、无接触且对操作人员无危险的检测方法;(5)检测方法应能够读取量化衬砌病害情况数据,数据信息可以利用相关软件和硬件做进一步处理和分析。

1.2 系统组成

检测系统由四大部分组成:采集系统、定位系统、照明系统以及控制系统,如图 1 所示。

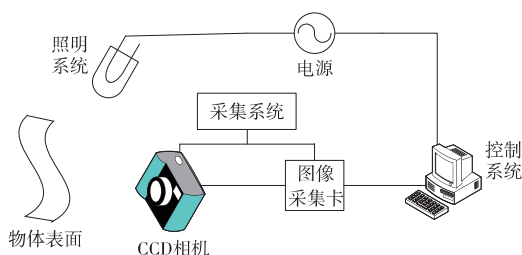


图 1 检测系统组成

工作原理:在 LED 光源提供合适均匀照明条件下,以 CCD 相机为核心部件的图像采集系统对隧道断面进行连续的信息采集,通过图像采集卡进行 A/D 信号转换,即将光信号转变为电信号,再次将电信号转变为计算机可以识别的数字图像信息,然后再经过图像处理系统,提取出衬砌裂缝信息。

2 裂缝图像增强处理

在图像采集过程中,由于输入输出设备以及周围

环境影响,图像存在很多噪声,如图像采集时光照不均匀、隧道衬砌表面的颗粒产生的噪声以及由于电磁波的干扰图像在传输过程中产生的脉冲噪声等。

针对以上特点需提出相应算法来满足图像处理的要求,为后续裂缝有效信息的提取做好准备。

2.1 裂缝图像滤波算法

图像增强分为两类:空域法(In spatial Domain)和频域法(In FrequencyDomain)^[10],其中空域法较多地应用于裂缝识别

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) \quad (1)$$

其中 $f(x, y)$ 表示原始图像; $g(x, y)$ 为处理后图像; $h(x, y)$ 为空间运算函数。

虽然图像检测系统在公路和桥梁方面已经得到广泛应用,但是在图像增强方面并没有统一的算法。文献[13]采用了中值滤波法来增强图像;文献[14]采用了维纳(Wiener)滤波作为裂缝图像去噪增强的方法;文献[15]将加权平均算法和中值滤波算法两种方法结合起来使用,文献[16-17]采用了加权的邻域平均法来平滑图像。几种算法如表 1 所示。

2.2 不同滤波处理结果比较

原始图像如图 2(a) 所示,将同一裂缝图像通过不同滤波算法进行处理,其处理效果如图 2(e) ~ (f)。

邻域平均法和中值滤波法是两种最基本的滤波算法,算法的思想简单、清晰,处理结果分别为图 2(b) 和图 2(c) 所示,可以看出这两种方法滤除噪声的效果也比较明显,但是在突出裂缝的边缘特征上没有帮助;图 2(d) 是维纳滤波处理效果图,相比邻域平均法和中值滤波法,该算法的去噪效果并不理想;图 2(e) 为加权邻域算法处理后的图像,与邻域平均法处理效果图 2(b) 对比可以看出,该算法虽然同样模糊了裂缝边缘,却使得背景图像更加均匀化,且锐化了边缘裂缝,图像增强效果较好;图 2(f) 是自适应中值滤波后的结果,相比与中值滤波处理结果图 2(c),裂缝背景得到了更好的平滑,噪声滤除效果较好,相比于图 2(e),其裂缝边缘得到了很好的保存。因此选用自适应中值算法作为图像去噪增强的方法。

3 裂缝图像二值化

为了更好分析隧道衬砌裂缝,需将其从图像中分离提取出来。裂缝区域灰度值较低,背景区域灰度值较高,因此可以找到一个合适的阈值将裂缝与背景图像分离,称此过程为图像二值化。如式(2)所示^[18]

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & f(x, y) \geq T \\ 0 & f(x, y) < T \end{cases} \quad (2)$$

表 1 图像滤波方法

滤波方法	理论基础
邻域平均法	邻域中的每个像素是等价的 , $g(x,y) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M f(x_i,y_i)$
中值滤波法	将邻域内的像素中间值作为滤波后的像素值: $g(x,y) = \text{med}\{f(x_1,y_1), \cdots, f(x_M,y_M)\}$ 以最小均方误差作为最优标准 ,通过分析输入随机信号和噪声的自相关性 ,利用傅立叶变换得到原始信号的最优估计:
维纳滤波	$\mu = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M f(x_i,y_i) ; \sigma^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M f^2(x_i,y_i) - \mu^2$ $g(x,y) = \mu + \frac{\sigma^2 - v^2}{\sigma^2} [f(x,y) - \mu]$ <p>在一个邻域内 ,除了灰度的均值的有效性外 ,灰度的上偏差和下偏差能够反映该邻域的变化幅值度 ,提供邻域信息:</p>
加权邻域平均法	$g(x,y) = \begin{cases} m - \alpha * m_l; \alpha = 1 - (N_g/N_l)^\gamma; N_l > \max\{N_g, N_o\} \\ m + \alpha * m_g; \alpha = 1 - (N_l/N_g)^\gamma; N_g > \max\{N_l, N_o\} \\ m; \alpha = 0; \text{else} \end{cases}$ <p>自适应滤波器会根据一定的设定条件改变 ,即增加滤窗的大小同时当判断滤窗中心的像素是噪声时该值用中值代替 ,否则不改变其当前像素值:</p>
自适应中值滤波	Level A: 若 $f_{\min} < f_{\text{med}} < f_{\max}$,则转向 Level B; 否则增加窗口尺寸 若窗口尺寸 $\leq S_{\max}$,重复 Level A Level B: 若 $f_{\min} < f_{\text{med}} < f_{\max}$,则输出 $f(x,y)$; 否则输出 f_{med}

注: $f(x,y)$ 为原始图像中的像素值; $g(x,y)$ 为处理后图像的像素值; S 为事先设定的邻域 ,即将被处理的自图像; S_{\max} 表示允许的最大自适应滤波器窗口的大小; M 为邻域内所包含的像素总数; $m(x,y)$ 为邻域内的灰度均值; v^2 是图像中噪声的方差; f_{\min} 表示 S 中的最小亮度值; f_{med} 表示 S 中的最小亮度中值; f_{\max} 表示 S 中的最大亮度值; N_l 表示 S 中灰度值小于平均值 m 的像素数; N_g 表示 S 中灰度值大于平均值 m 的像素数; N_o 表示 S 中灰度值等平均值 m 的像素数; $m_g(x,y)$ 上偏差 ,灰度值大于邻域均值的各像素的灰度平均值与之差; $m_l(x,y)$ 下偏差 ,邻域均值与灰度小于的各像素的灰度平均值之差; α 为修正系数 ,其大小反映了 S 的边缘情况 ,取值范围为 0 到 1。

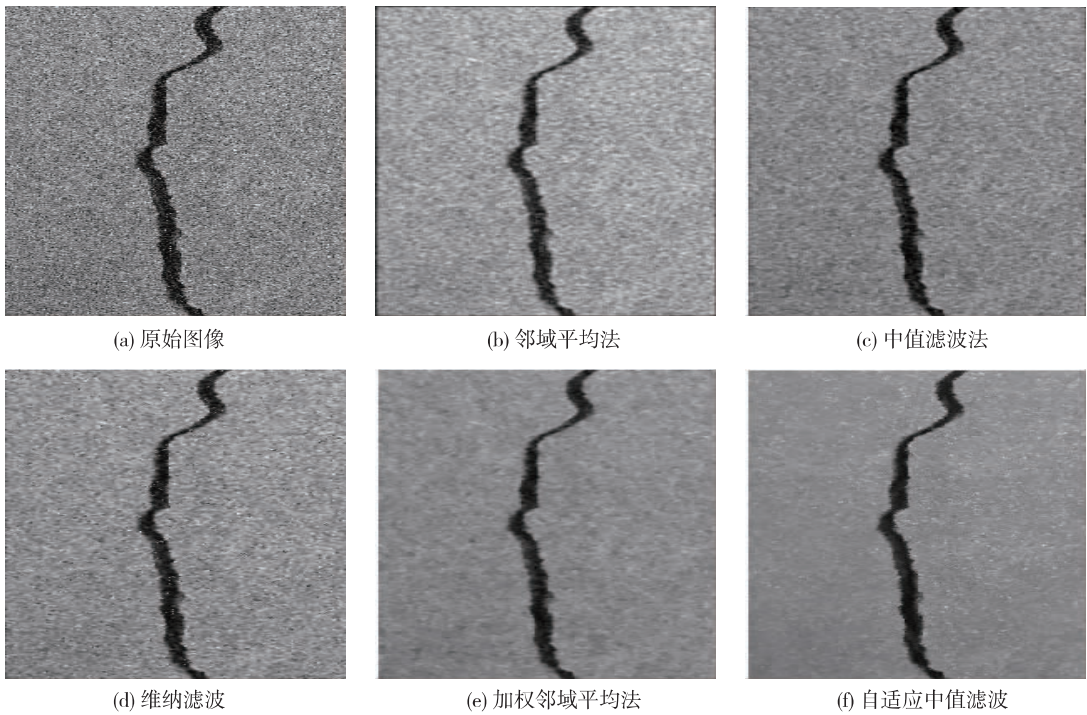


图 2 不同滤波算法的处理结果

3. 1 直方图阈值分割法

直方图阈值分割法是由 Prewitt 提出的一种目视检查阈值法 ,如图 3 所示的直方图有两个不同的模式 ,可较容易地选取阈值 T 按照式进行图像分割 ,但该方法不适合于直方图中峰值差别很大或双峰间的谷比较

宽广而平坦的图像以及单峰直方图情况^[14]。

3. 2 Otsu 最大类间方差法

Otsu 最大类间方差法原理^[18,19]: 假设某幅图像包含 N 个像素点 ,所有像素点的灰度值在区间 $[0, L-1]$ 内 ,其中每个灰度级 i 对应的像素点个数为 N_i ,则每个

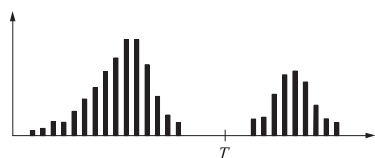


图3 通过目视分析一个双峰模式直方图来选择阈值

灰度级的像素点占整幅图像的概率为

$$p_i = \frac{N_i}{N} \quad i = 0, 1, 2, \dots, L-1, \quad \sum_{i=0}^{L-1} P_i = 1 \quad (3)$$

设置初始阈值 T 将图像中像素分为灰度不同的两个区域—— A_0 与 A_1 。由此,可以计算出整幅图像、区域 A_0 和区域 A_1 的灰度均值 μ_T, μ_0, μ_1

$$\mu_T = \sum_{i=0}^{L-1} iP_i, \quad \mu_0 = \sum_{i=0}^T iP_i/\bar{\omega}_0, \quad \mu_1 = \sum_{i=T+1}^{L-1} iP_i/\bar{\omega}_1 \quad (4)$$

其中 $\bar{\omega}_0, \bar{\omega}_1$ 为区域 A_0 和 A_1 中像素占整幅图像的概率

$$\bar{\omega}_0 = \sum_{i=0}^T P_i, \quad \bar{\omega}_1 = \sum_{i=T+1}^{L-1} P_i = 1 - \bar{\omega}_0 \quad (5)$$

由式上述公式可得

$$\mu_T = \bar{\omega}_0 \mu_0 + \bar{\omega}_1 \mu_1 \quad (6)$$

Otsu 法的类间方差定义为

$$\sigma_\omega^2 = \bar{\omega}_0 (\mu_0 - \mu_T)^2 + \bar{\omega}_1 (\mu_1 - \mu_T)^2 = \bar{\omega}_0 \bar{\omega}_1 (\mu_0 - \mu_1)^2 \quad (7)$$

Otsu 法选取阈值使得类间方差最大,并认为此阈值 T^* 即为图像分割的最佳阈值,如式(8)所示。

$$\sigma_\omega^2(T^*) = \max_{0 \leq T \leq L-1} \sigma_\omega^2(T) \quad (8)$$

3.3 局部阈值处理法

局部阈值处理法中阈值的选取与点的灰度值和局部邻域特征有关。该方法根据图像中不同区域特征,将图像分成若干个部分,在每个部分中分别寻找阈值对图像进行分割。其表达式如下

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & f(x, y) \geq T(x, y) \\ 0 & f(x, y) < T(x, y) \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$T(x, y) = f_0(x, y) + T_0 \quad (10)$$

$f_0(x, y)$ 是 f 的形态学开运算, T_0 是对 f_0 选取的局部邻域进行最大类间方差处理后得到的阈值。

3.4 不同图像分割结果

自适应中值滤波后得到的图像的直方图如图4所示。直方图倾向于“单峰”情况,若将其看作双峰情况,双峰间的谷底较宽,不符合直方图阈值分割法的适应准则,因此不适于采用该方法。

局部阈值法分割后的图像如图5(a)所示,纹理以及背景更加复杂,不能很好地凸显裂缝信息,不适宜

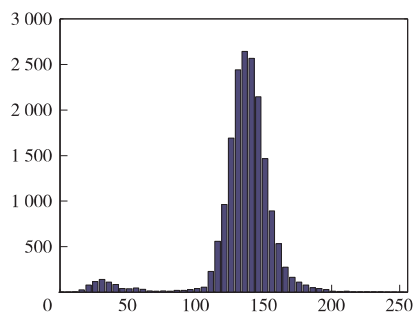
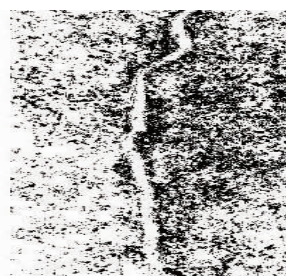
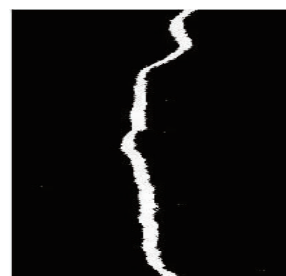


图4 输入图像的直方图

种类型的图像。Otsu 类间方差阈值分割法分割效果见图5(b),对裂缝图像能够很好地进行二值化,较好地保留了裂缝边缘,为图像进一步处理打下了良好的基础。因此,本文选用 Otsu 法对裂缝图像进行二值分割,而且该方法比较简单,图像处理速度较快,适合对大量图像进行实时处理。



(a) 局部阈值处理法



(b) Otsu最大类间方差法

图5 阈值图像分割

4 结语

(1) 裂缝是隧道常见的病害,结合高速铁路隧道自身特点提出了一种 CCD 相机的衬砌裂缝快速检测系统。

(2) 对采集的裂缝图像进行滤波处理,通过各种方法比较,应用自适应中值滤波得到了较好的效果。

(3) 为了更好地提取裂缝信息,将进行滤波后的图像结合使用 Otsu 最大类间方差法进行图像分割,处理后的裂缝边缘得到较好保护,为隧道裂缝几何特征以及几何参数的提取奠定了良好的基础。

参考文献:

- [1] 刘晓瑞,谢雄耀.基于图像处理的隧道表面裂缝快速检测技术研究[J].地下空间与工程学报,2009,5(S2):1624-1628.
- [2] 王平让,黄宏伟,薛亚东.基于图像局部网格特征的隧道裂缝自动识别[J].岩石力学与工程学报,2012(5):991-999.
- [3] Oh J, Lee A, Oh S M, et al. Design and Control of Bridge Inspection Robot System[J]. IEEE Computer Society: 3634-3639.
- [4] Lee J H, Lee J M, Kim H J, et al. Machine Vision System for Automatic Inspection of Bridges[J]. Congress on Image and Signal Processing: 363-366.

(下转第127页)

续表 5			
序号	SPD 短路失效情况	对四线制道岔控制电路造成的影响	安全隐患
4	SPD4	X4 对地绝缘不良 不会影响制道岔控制电路的正常工作	无安全隐患
5	SPD1、SPD2	道岔失表示 转辙机转换异常 可能会损坏电动机。	无安全隐患
6	SPD1、SPD3	道岔反位失表示	无安全隐患
7	SPD1、SPD4	道岔不能从定位转换到反位 道岔定位失表示。	无安全隐患
8	SPD2、SPD3	道岔定位失表示。	无安全隐患
9	SPD2、SPD4	道岔不能从反位转换到定位 道岔反位失表示。	无安全隐患
10	SPD3、SPD4	X3、X4 对地绝缘不良 不会影响制道岔控制电路的正常工作	无安全隐患
11	SPD1、SPD2、SPD3	道岔失表示 转辙机转换异常 可能会损坏电动机。	无安全隐患
12	SPD1、SPD2、SPD4	道岔失表示 道岔不能转换。	无安全隐患
13	SPD1、SPD3、SPD4	道岔失表示 且不能从定位转到反位。	无安全隐患
14	SPD2、SPD3、SPD4	道岔失表示 且不能从反位转到定位。	无安全隐患
15	SPD1、SPD2、SPD3、SPD4	道岔失表示 道岔不能转换。	无安全隐患

4 结论

经过全面分析 按照图 1 所示的方式在四线制道岔控制电路中增加浪涌保护器 且浪涌保护器采用 1 个氧化锌压敏电阻和 1 个陶瓷二极放电管串联组合而成 能有效提高既有道岔控制电路的雷电防护能力 而且不会新增安全隐患。该方案已于 2011 年在西安铁路局的汉阴站等多个车站得到使用 使用效果良好。

参考文献:

[1] 中华人民共和国铁道部. 铁运[2006]26 号 铁路信号设备雷电及电磁兼容综合防护实施指导意见 [S]. 北京: 中国铁道出版社 2006.

[2] 丁峰. 牵引变电所雷击仿真分析 [J]. 铁道标准设计 2013(5): 115-118.

[3] 马博. 浅谈信号设备防雷的重要性科技创新与应用 [J]. 科技创新与应用 2013(6): 35.

[4] 中华人民共和国铁道部. TB/T2311 - 2008 铁路信号设备用浪涌保护器 [S]. 北京: 中国铁道出版社 2008.

[5] 胡玉烈. 铁路信号设备的防雷 [J]. 重庆工学院学报 2007 21(12): 165-168.

[6] 吴雄升. 铁路信号设备防雷技术探讨 [J]. 中国高新技术企业 2013(10): 61-63.

[7] 中华人民共和国铁道部. TB/T3074—2003 铁道信号设备雷电电磁脉冲防护技术条件 [S]. 北京: 中国铁道出版社 2003.

[8] 中华人民共和国铁道部. 铁运[2007]535 号 铁路信号设备雷电及电磁兼容综合防护举例设计说明 [S]. 北京: 中国铁道出版社 2007.

[9] 何文卿, 王大地. 6502 电气集中电路(修订本) [M]. 北京: 中国铁道出版社 1996.

[10] 孙鑫. 铁路信号 SPD 的选择与安装思考 [J]. 价值工程 2013(3): 184-185.

[11] 郭锡斌. 雷电对铁路信号设备的危险影响及其防护 [M]. 北京: 北京大学出版社 1991.

[12] CENELEC. BS EN 50129: 2003 Railway Applications: Safety Related Electronic Systems for Signalling [S]. British: European Committee for Electrotechnical Standardization 2003.

(上接第 96 页)

[5] Tung P C , Hwang Y R , Wu M C. The development of a mobile manipulator imaging system for bridge crack inspection [J]. Automation in construction 2002 11(6): 717-729.

[6] 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.

[7] 张维峰, 刘萌, 杨明慧. 基于数字图像处理的桥梁裂缝检测技术 [J]. 现代交通技术 2008 5(5): 34-36.

[8] 邹大鹏. 智能视频桥梁检测车工作臂避障系统的研究 [D]. 广州: 广东工业大学 2005.

[9] Pynn J , Wright A , Lodge R. Automatic identification of cracks in road surfaces [C]. Image Processing and Its Applications , 1999. Seventh International Conference on (Conf. Publ. No. 465) . IET , 1999 2: 671-675.

[10] 冷彪, 仇文革, 王刚, 等. 数字图像处理在隧道工程地质分析中的应用研究 [J]. 铁道标准设计 2013(11): 77-81.

[11] 王华夏, 漆泰岳, 王睿. 高速铁路隧道衬砌裂缝自动化检测硬件系

统研究 [J]. 铁道标准设计 2013(10): 97-102.

[12] 秦襄培. Matlab 图像处理与界面编程宝典 [M]. 北京: 电子工业出版社 2009.

[13] 肖旺新, 张雪, 黄卫, 等. 路面破损自动识别的一种新算法 [J]. 公路交通科技 2005 22(11): 75-78.

[14] 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): 112-115.

[15] 曾燕华. 基于计算机视觉的桥梁表面缺陷检测技术研究 [D]. 广州: 广东工业大学 2005.

[16] 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): 24-29.

[17] 杨帆, 周又玲. 基于轮廓特征的路面裂缝图像拼接 [J]. 中国科技信息 2005(22A): 88-89.

[18] Gonzalez R. C. 数字图像处理 MATLAB 版 [M]. 北京: 电子工业出版社 2012.

[19] Yang M D , Su T C. Segmenting ideal morphologies of sewer pipe defects on CCTV images for automated diagnosis [J]. Expert Systems with Applications 2009 36(2): 3562-3573.