

基于图像增强与分水岭分割的隧道低对比度裂缝提取方法

周丽军

(山西省交通科学研究院山西省公路智能监测工程技术研究中心 太原 030000)

摘要 在实际的隧道裂缝检测中,存在细小、对比度低且有污渍点干扰的隧道裂缝,利用常规方法很容易漏检裂缝。为了解决此问题,提出一种基于图像增强与分水岭分割的裂缝提取算法,该算法有效利用背景信息补偿了污渍点,均衡了图像背景对比度。结合高低帽变换方法对图像进行增强,然后根据分水岭算法获取分水岭分割线;比较分割线所在位置的灰度值与其周边灰度值,并通过灰度值差异判断裂缝边缘,从而提取裂缝。实验结果表明,所提算法能够准确、有效地检测出完整的隧道裂缝,且对噪声具有鲁棒性。

关键词 裂缝检测,低对比度,高低帽变换,图像增强,分水岭

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A

Low-contrast Crack Extraction Method Based on Image Enhancement and Watershed Segmentation

ZHOU Li-jun

(Shanxi Engineering Research Center for Road Intelligent Monitoring, Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030000, China)

Abstract In the process of tunnel crack detection in actual scene, there exists small, low-contrast and stain-interfered cracks. It is difficult to extract those cracks by conventional methods. In order to solve this problem, a crack detection method based on image enhancement and watershed segmentation was proposed. In this method, the interfered stain is removed to balance the image background contrast. The image is further enhanced by top-hat and bottom-hat transformation. Then the segmentation lines are obtained by watershed algorithm. According to the gray-value difference between the gray-value of segmentation line and its surrounding gray-value, the crack edge can be extracted. Experimental results show that the proposed method is accurate and effective to detect tunnel cracks and it is also robust to noise.

Keywords Crack detection, Low-contrast, Top-hat/bottom-hat transformation, Image enhancement, Watershed

1 引言

裂缝是影响隧道内部安全的重要因素之一,随着时间的推移可能发生进一步形变,初期较小的裂缝会逐渐发展扩大,对隧道的运营安全造成严重影响,因此,定期检测隧道内的裂缝十分重要^[1-2]。很长一段时间国内的裂缝检测在很大程度上还依赖于人工,然而近几年陆续引进和研发了隧道检测车系统,基于数字图像处理的裂缝检测方法逐步克服了人工裂缝检测的主观性,成为现今常用的无损检测技术。

目前常用的基于图像处理的裂缝检测方法主要有基于灰度统计的方法、形态学方法^[3]、分形几何理论方法^[4]、边缘检测方法^[5]等。其中基于图像分割的边缘检测与识别方法应用广泛^[6-7],其对预处理后的灰度图像进行二值化处理,通过统计标记区域的面积分布,测量标记区域的属性。这种方法对裂缝与背景对比度高、背景灰度值相对均匀的情况是有效的,但实际隧道衬砌裂缝周围环境比较复杂,干扰较多,如光线明暗不均,墙上的凹凸不平的混凝土泥浆、剥落、拼接痕迹、污渍等都会对裂缝检测产生影响。尤其是在裂缝与背景对比度低、污渍点与背景对比度高的情况下,二值化处理方法会突出污渍而抑制裂缝,导致部分裂缝缺失。分水岭方法因能够实现边界封闭且完整、定位精度高等特点被引入图像分割领域^[8-11],并且分水岭算法对微弱边缘也具有良好的响应^[12],

因此可以用于对细小裂缝的检测,但是容易受噪声影响而产生过分割现象。

本文针对低对比度、有污渍点的隧道裂缝检测与识别问题,提出基于图像增强与分水岭分割线的裂缝提取算法。为了尽可能减少干扰噪声的影响,通过图像灰度值统计寻找污渍点,并利用背景信息补偿污渍点,再使用高低帽变换方法对图像进行增强;在此基础上根据分水岭算法获取分水岭分割线,比较分割线所在位置的灰度值与其周边灰度值,并通过灰度值差异判断裂缝边缘,从而提取裂缝。

2 污渍点补偿的图像增强算法

图像增强实际是增强图中各部分的反差,而裂缝与背景对比度低、污渍点与背景对比度高,使得常规的图像增强算法湮没了裂缝信息。本文在使用图像增强之前,先去除对比度高的污渍点,即将污渍点位置用背景灰度值进行补偿。算法具体步骤如下:

1) 计算原始图像 $I(i, j) (i=1, 2, \dots, M, j=1, 2, \dots, N)$ 的灰度值,令灰度值大于阈值的灰度值为 0,认为其是污渍点,否则为 1,即:

$$I(i_0, j_0) = \begin{cases} 0, & I(i_0, j_0) \geq \delta \\ 1, & I(i_0, j_0) < \delta \end{cases} \quad (1)$$

本文受山西省自然科学基金项目(2015021126),山西省交通运输厅科研项目(2017-1-25)资助。

周丽军(1984—),女,博士,工程师,主要研究方向为路桥隧道检测, E-mail: zhoulj2012@hotmail.com。

其中, 阈值 $\delta = \frac{1}{N} \sum_{j \neq j_0} I(i_0, j) + \frac{1}{M} \sum_{i \neq i_0} I(i, j_0)$ 。

2) 对原始图像中找到的污渍点位置利用背景灰度值进行补偿, 即:

$$(W, R) = \{(i, j) | I(i, j) = 0, i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N\} \quad (2)$$

其中, (W, R) 为污渍点的集合, 对污渍点赋予背景灰度值:

$$I(W, R) = \frac{1}{MN - K} \sum_{i \in W, j \in R} I(i, j) \quad (3)$$

其中, K 为污渍点的个数。

3) 对污渍点进行背景补偿后的图像整体上对比度较低, 为了获取清晰的裂缝图像, 需要增强裂缝与背景的对比度。对补偿后的图像分别进行高帽变换与低帽变换, 即:

$$I_{\text{tophat}}(i, j) = I_c(i, j) - [I_c(i, j) \circ g(i, j)] \quad (4)$$

$$I_{\text{bottomhat}}(i, j) = [I_c(i, j) \cdot g(i, j)] - I_c(i, j) \quad (5)$$

其中, $I_c(i, j)$ 表示污渍点补偿后的图像, $g(i, j)$ 为结构元素, $[I_c(i, j) \circ g(i, j)]$ 表示对 $I_c(i, j)$ 进行开运算, $[I_c(i, j) \cdot g(i, j)]$ 表示对 $I_c(i, j)$ 进行闭运算。

高帽变换体现了图像中的灰度峰值, 低帽变换体现了图像中的灰度谷值, 利用高帽变换图像与补偿图像相加再与低帽变换图像作差, 可以得到最大对比度的图像, 从而获得增强图像 I_h 。

3 分水岭分割算法

本文的分水岭分割算法直接采用文献[8]的算法, 即设 $M_1, M_2, \dots, M_R$ 是待处理图像 $I_h(i, j)$ 的局部最小值坐标集合, 令 $C(M_i)$ 表示与局部最小值 M_i 相联系的汇水盆地内点的集合。在平面 $I_h(i, j) = n$ 下方的点的集合可以表示为 $T[n] = \{(s, t) | I_h(i, j) < n\}$, 第 n 阶段汇水盆地 i 中点的集合为 $C_n(M_i) = C(M_i) \cap T[n]$, 则可以得到第 n 阶段汇水盆地被水淹没部分的集合 $C[n] = \bigcup_{i=1}^R C_n(M_i)$, 于是所有汇水盆地的集合可以表示为 $C[\max + 1] = \bigcup_{i=1}^R C(M_i)$, 利用递归算法由 $C[n-1]$ 求 $C[n]$ 。

令 Q 表示 $T[n]$ 中连通分量的集合, 对每一个连通分量 $q \in Q[n]$, 有以下 3 种情况:

- 1) $q \cap C[n-1]$ 为空集;
- 2) $q \cap C[n-1]$ 包含 $C[n-1]$ 中的一个连通分量;
- 3) $q \cap C[n-1]$ 包含 $C[n-1]$ 中的多个连通分量。

对于新的最小值, 若符合情况 1), 则将 q 并入 $C[n-1]$ 构成 $C[n]$; q 位于某些局部最小值构成的汇水盆地时, 若符合情况 2), 则将 q 并入 $C[n-1]$ 构成 $C[n]$; 当遇到分离全部或部分汇水盆地时, 若符合情况 3), 则在 q 建立水坝。最后得到的水坝边界就是分水岭的分割线。

4 裂缝提取算法

去除污渍点后的图像减少了干扰噪声, 并且由上一步得到的分水岭分割线包含了图像中的裂缝信息, 从图像上来看, 裂缝与背景存在灰度值上的差异, 因此可以结合分割线与增强图像中的灰度值差异进行裂缝提取, 算法如下。

增强图像中分割线上的灰度值与邻近灰度值相比较, 在增强图像中以分割线上的点为中心取 3×3 的窗口 $D_{3 \times 3}$, 比较窗口中每个像素的灰度值 $I_h(D_{3 \times 3})$ 与第 q_u 条分割线所在图像的像素灰度值, 若灰度值差异大于阈值 σ , 则认为分割线

所在像素灰度值与周围灰度值有明显差异, 取窗口相应元素值为 1; 否则认为没有明显差异, 取窗口相应元素值为 0。沿分割线移动窗口, 直至所有分割线计算完成, 如图 1 所示。

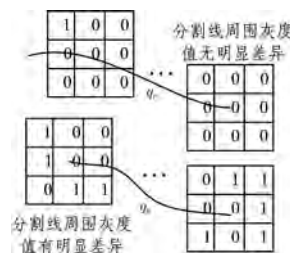


图 1 灰度值比较示意图

阈值 σ 的计算如下:

$$\sigma = \text{mean}(I_h) + \max\{I_h(q_1, q_2, \dots, q_u)\} - \min\{I_h(q_1, q_2, \dots, q_u)\} \quad (6)$$

即阈值取所有分割线所在像素灰度值的最大值、最小值的差值与图像平均灰度值的和。

遍历所有分割线的灰度值比较结果, 窗口元素 1 表明了裂缝与背景的边界, 由此可根据边界及分割线与边界之间的元素提取出裂缝。

5 裂缝检测结果及分析

本文对 100 张隧道裂缝图像进行检测, 裂缝周边存在污渍点, 且与周边背景的对比度较低。将本文方法与二值化最小连通域裂缝提取方法及人工绘制法进行比较, 任选 25 张图片, 依据文献[3]的精确率与召回率来评估本文方法。用 r, h 分别表示本文方法与二值化最小连通域方法的精确率, 用 s 表示召回率, 即:

$$r = \frac{P_r}{P_{\text{total}}} \times 100\%, h = \frac{P_h}{P_s} \times 100\%, s = \frac{P_r}{P_s} \times 100\%$$

其中, P_r 表示检测到的裂缝像素点中真正属于裂缝的像素点的个数; P_{total} 表示用本文算法检测到的裂缝所包含的像素点总数; P_h 表示二值化最小连通域方法检测到的像素点中真正属于裂缝的像素点的个数; P_s 表示测绘人员绘制的裂缝所包含的像素点总数。因篇幅有限, 取 3 组图像进行分析。

对图 2(a) 直接使用二值化最小连通域方法来提取裂缝图像中明显的污渍点, 由于污渍点与背景的对比度高于裂缝与背景的对比度, 因此二值化过程中突出了污渍点, 抑制了部分裂缝, 如图 2(b) 所示; 利用本文提出的污渍点补偿方法寻找图像中的污渍点, 并对原图中的污渍点位置进行补偿, 得到的补偿图像如图 2(d) 所示, 此时图像背景灰度值比较均匀; 然后进行高低帽变换, 获得增强图像, 如图 2(e) 所示; 在去除污渍点并增强图像的基础上, 利用二值化最小连通域方法提取出的裂缝如图 2(f) 所示, 此时已经消除了污渍点, 但利用二值化连通域的方法也会丢失裂缝中不明显的部分; 对增强图像进行分水岭分割, 分割图像如图 2(g) 所示; 分割线在增强图像中的显示如图 2(h) 所示; 比较分割线所在位置的像素灰度值与其周边灰度值, 根据裂缝提取算法得到的裂缝如图 2(i) 所示; 图 2(j) 为人工绘制的裂缝。比较图 2(i) 与图 2(b)、图 2(f) 可知, 本文提出的方法能够较完整地提取出裂缝, 并且不易受干扰噪声的影响, 其中本文方法提取裂缝与人工绘制裂缝的精确率分别为 93.35% 与 92.96%, 因此能较好地提取裂缝。

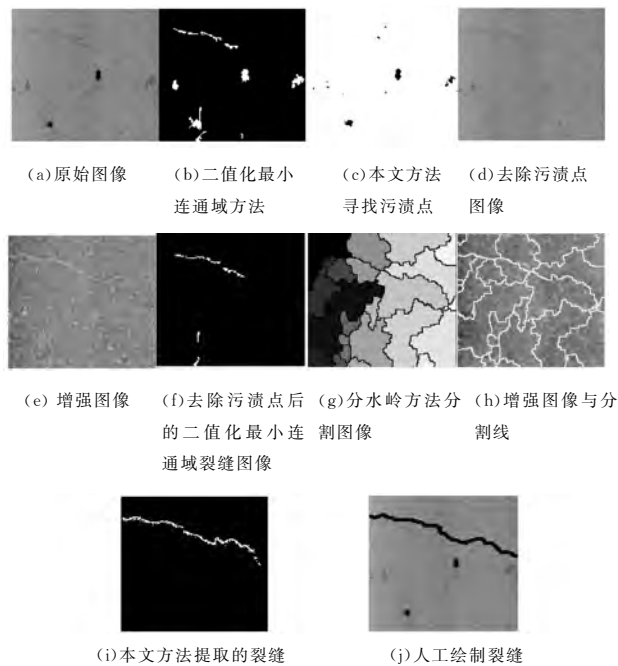


图 2 第一组隧道裂缝提取方法比较

对第二组裂缝与第三组裂缝进行同样的处理,结果如图 3 和图 4 所示。从图中可以看出,对污渍点进行补偿可以较好地均衡图像中的对比度,避免出现因污渍点导致的裂缝信息被抑制的现象。由于裂缝包含在分水岭分割线中,将分割线所在位置的灰度值与周边灰度值进行比较,根据两者的灰度值差异判断裂缝边缘。根据分割线提取的裂缝连续性较好,能够完整呈现裂缝中不明显的部分。

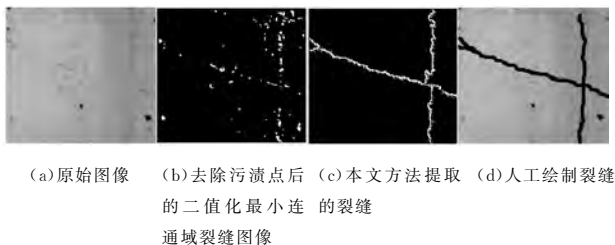


图 3 第二组隧道裂缝提取方法比较

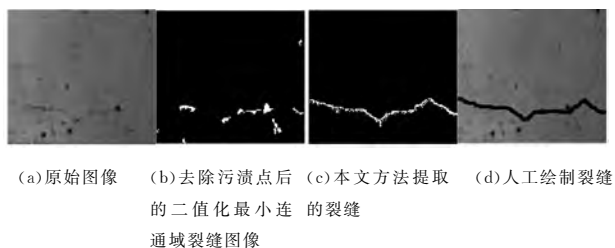


图 4 第三组隧道裂缝提取方法比较

表 1 列出了任意 25 幅隧道裂缝图像的检测量化分析,从表中可以看出,利用提出的算法能较好地检测到低对比度情况下的裂缝,尤其对裂缝中不明显部分的提取,其性能优于传统二值化最小连通域方法,在很多情况下也优于人工肉眼检测的方法。

表 1 裂缝检测量化分析表

(单位:%)

序号	r	h	s	序号	r	h	s
1	94.32	32.56	95.15	14	92.65	39.54	90.56
2	95.08	21.33	94.75	15	95.10	54.13	89.27
3	91.86	25.44	93.10	16	88.96	28.99	91.23
4	90.82	21.43	88.52	17	93.35	37.86	94.11
5	89.47	33.15	91.64	18	92.91	50.01	90.13
6	92.11	42.55	93.10	19	89.54	29.30	90.32
7	88.68	37.18	90.23	20	89.17	19.70	88.46
8	90.18	50.13	88.97	21	94.52	56.22	93.18
9	94.31	33.52	90.45	22	93.36	48.13	90.54
10	94.55	45.62	93.27	23	92.18	48.59	95.16
11	93.28	41.23	92.18	24	89.95	26.75	91.32
12	89.46	38.21	90.45	25	93.44	39.64	90.22
13	94.72	40.11	93.18	平均	92.16	37.65	91.58

结束语 本文针对低对比度有污渍点的隧道裂缝提出基于图像增强与分水岭分割线的裂缝提取算法,该算法有效利用背景信息补偿了污渍点,均衡了图像背景对比度;使用高低帽变换方法对图像进行增强,在此基础上根据分水岭算法获取分水岭分割线,比较分割线所在位置的灰度值与其周边灰度值,通过灰度值差异判断裂缝边缘,从而提取裂缝。实验结果表明,提出的算法能准确、有效地检测到完整的隧道裂缝,且对噪声具有鲁棒性。

参考文献

- [1] 仇玉良. 隧道检测监测技术及信息化智能管理系统[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013: 25-56.
- [2] 朱力强, 白彪, 王耀东, 等. 基于特征分析的地铁隧道裂缝识别算法[J]. 铁道学报, 2015, 37(5): 64-70.
- [3] 瞿中, 林丽丹, 郭阳. 形态学与区域延伸相结合的图像裂缝检测算法研究[J]. 计算机科学, 2014, 41(11): 297-300.
- [4] 杨松, 邵龙潭, 郭晓霞, 等. 基于骨架和分形的混凝土裂缝图像识别算法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(8): 1850-1855.
- [5] 王世芳, 车艳丽, 李楠, 等. 一种基于多尺度脊边缘的沥青路面裂缝检测算法[J]. 中国公路学报, 2017, 30(4): 32-41.
- [6] 李锋, 阙建霞. 基于 Sobel 算子的图像快速二维最大熵阈值分割算法[J]. 计算机科学, 2015, 42(6A): 209-210.
- [7] 赵志刚, 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.
- [8] 舒速, 杨明. 基于分水岭分割和稀疏表示的高光谱图像分类方法[J]. 计算机科学, 2016, 43(2): 89-93.
- [9] 张博, 何彬彬. 改进的分水岭变换算法在高分辨率遥感影像多尺度分割中的应用[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(1): 142-149.
- [10] TARABALKA Y, CHANUSSOT J, BENEDIKTSSON A. Segmentation and Classification of Hyperspectral Images using Watershed Transformation[J]. Pattern Recognition, 2010, 43(7): 2367-2379.
- [11] ACHARJYA P, GHOSHAL D. Watershed Segmentation based on Distance Transform and Edge Detection Techniques[J]. International Journal of Computer Applications, 2012, 52(13): 6-10.
- [12] 余烨, 李冰飞, 张小魏, 等. 面向 RGBD 图像的标记分水岭分割[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(2): 145-154.