

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2024.12.008

基于机器视觉的隧道裂缝检测方法研究

张振海^a, 季 坤^a, 党建武^{a,b}

(兰州交通大学 a. 自动化与电气工程学院; b. 甘肃省人工智能与图形图像处理工程研究中心, 兰州 730070)

摘要: 裂缝检测是结构安全性评估的重要途径, 基于阈值分割的传统裂缝检测方法在光照不均匀、背景噪声污染严重的隧道环境下具有分割精度低, 难以提取完整裂缝的缺点。针对该问题, 提出一种基于机器视觉的隧道裂缝检测方法。首先, 对采集到的隧道图像进行频域滤波与空域差分, 以增强图像纹理特征; 将经上述步骤分割后的图像通过设置面积参数 T_v 、饱和度参数 T_s 与特殊参数 T'_v 、 T'_s 提取背景噪声并删除, 避免误检现象发生, 使算法能够检测出完整的隧道裂缝图像; 最后, 结合本文应用场景的无突变性与发展规律性, 设计轻量化裂缝连接算法连接上述步骤中断裂的裂缝, 避免漏检现象的发生。实验结果表明, 所提方法能在复杂隧道环境中有效提取完整裂缝, 使隧道裂缝图像识别的精确率达到 94%, 召回率 98%, 尺寸精度 92%, 检测精度能够满足实际工程需求。

关键词: 隧道裂缝; 机器视觉; 成分分析; 图像分割

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)12-083-09

Crack detection method for tunnels based on machine vision

ZHANG Zhenhai^a, JI Kun^a, DANG Jianwu^{a,b}

(a. School of Automation and Electrical Engineering; b. Gansu Engineering Research Center for Artificial Intelligence and Graphics and Image Processing, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, P. R. China)

Abstract: Crack detection is crucial for assessing structural safety. Traditional image processing methods for crack detection in tunnels often suffer from high noise levels and low accuracy due to uneven lighting and severe noise pollution. To address these challenges, this study proposes a tunnel crack detection algorithm based on machine vision. First, tunnel images are filtered in the frequency domain and differentiated in the spatial domain to enhance texture features. Then, image segmentation is performed with area parameter T_v , saturation parameter T_s and special parameters T'_v and T'_s to remove background noise and reduce misdetections, facilitating complete crack detection. Finally, a lightweight crack-connection algorithm is designed to bridge discontinuities in crack images, based on the stability and development pattern of cracks in this application scenario. Experimental results show that the proposed method effectively extracts complete cracks, achieving an image recognition accuracy of 94%, and a recall rate of 98%, meeting the requirements of practical engineering applications.

Keywords: tunnel crack; machine vision; component analysis; image segmentation

收稿日期: 2021-03-12

基金项目: 甘肃省自然科学基金(18JR3RA124)。

Supported by Natural Science Foundation of Gansu Province(18JR3RA124).

作者简介: 张振海 (1983—), 男, 副教授, 主要从事交通信息控制、计算机视觉方向研究, (E-mail)0219394@stu.lzjtu.edu.cn。

裂缝是确保结构安全性、耐用性和可维修性的主要考虑因素。对于所有类型的结构(如混凝土结构、钢结构、木结构等),表面裂缝都是结构损坏和耐久性的关键指标,因此,检测结构裂缝、评估结构功能指标是结构健康监测的重要分支^[1]。隧道会因产生形变出现渗漏水、裂缝、表皮脱落等隐患,严重时威胁隧道整体结构的稳定性。隧道线路较长,为不影响线路的正常运营且保证检测质量,往往需要投入大量的人力、财力。目前基于人工巡检检测裂缝的方法具有主观性强、效率低、易漏检误检等缺点,无法满足快速增长的隧道里程对隧道维护的需求。

近年来,随着数字摄像技术与计算机科学的快速发展,基于图像处理的裂缝检测技术被广泛研究。目前分别为传统基于阈值分割的检测方式与基于机器学习的检测方式。范新南等^[2]采用基于头脑风暴算法的PCNN模型,通过图像自身特性自适应优化模型中主要的网络参数,使裂缝图像分割效果最佳;朱力强等^[3]将隧道裂缝图像分为背景部分、裂缝部分与噪声部分,使用SVM提取图像裂缝。图像滤波方面,张振海等^[4]提出一种高斯-快速中值滤波算法,有效去除混合噪声;顾桂梅等^[5]根据钢轨轨条特性,提出基于高斯-中值的钢轨表面滤波方法;阈值分割方面,常见的方式为自适应阈值分割与连通域分割^[6-7],此外,王耀东等^[8]提出将图像分块处理的方法,根据块间方差设置阈值,识别裂缝;Quan等^[9]提出了一种改进的基于灰度直方图的Otsu阈值裂纹检测方法,通过修改灰度直方图的概率加权因子,提高目标提取的准确性,避免峰值突出问题。在裂缝特征提取方面,贾东峰等^[10]提出基于点云影像的不同尺度空间下裂缝渗水区域识别与检测算法,通过定义尺度空间,实现不同尺度和形态裂缝的检测;王博等^[11]采用多方向拟合的区域生长方法联合HSV颜色空间阈值进行路面区域分割,提取包含完整裂缝信息的单通道路面。Fernandes等^[12]提出基于裂缝图像的8个特征有效描述裂纹,这些特征在用于裂纹分类时被证明具有高度的表达能力和鲁棒性。Murakami等^[13]提出一种使用激光的高分辨率远程检测系统,对裂缝进行高分辨率三维成像。

上述算法均在各自的研究领域取得较好进展,但隧道裂缝图像不同于传统路面图像,隧道内采集的裂缝图像存在光照不均、背景情况复杂问题。采用上述算法处理图像会在阈值分割后存在噪声与裂缝连接的情况,严重影响裂缝识别准确率。针对以上问题,本文提出能在复杂环境下完整识别裂缝的图像处理算法。算法首先采用基于频域滤波与空域差分的纹理增强算法对裂缝图像预处理并进行阈值分割;接下来针对分割后图像中的噪声点特性设计去噪方法,提取完整隧道裂缝;最后,计算提取裂缝的相应几何参数。将本算法应用在实际隧道裂缝数据中,通过对比计算数据与实际数据,证明提出方法对隧道裂缝检测的有效性,可应用在实际工程测量中。

1 裂缝图像处理算法

隧道裂缝图像相较于常见道路图像包含大量的噪声。不均匀的光线、混凝土的颗粒、过小的目标区域、墙面脱落后的阴影等都会使传统算法分割结果大打折扣,常规的预处理方法难以获得满意的处理效果。传统图像处理流程如图1所示,目前很多研究只是将预处理作为一种图像处理的必要流程,和后续操作步骤结合度不够。因此,本研究将易于图像分割作为预处理的目标,在充分考虑图像阈值分割过程的基础上,设计与分割方法相匹配的预处理方法。结合参考文献中提出的裂缝检测算法,提出一种隧道裂缝检测算法—采用频域滤波与空域差分增强裂缝部分与背景部分对比度并结合图像特征提取隧道裂缝。

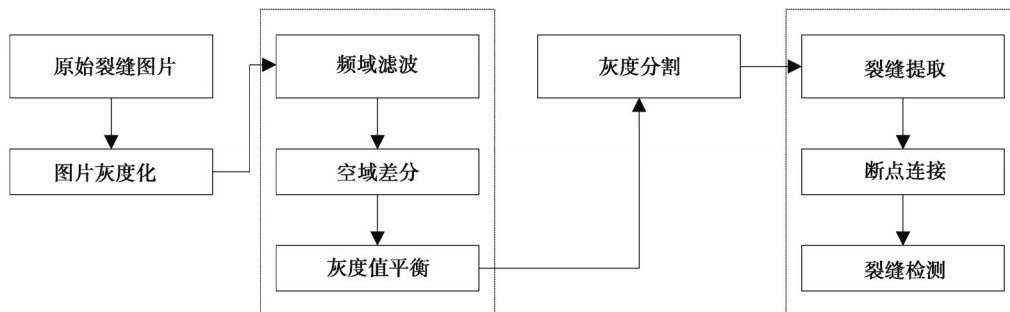


图1 传统图像处理流程

Fig. 1 Traditional image processing

2 裂缝图像预处理

2.1 预处理方法设计

在使用传统分割方法时^[14],为清晰区分裂缝图像前景部分与背景部分,预处理的目标为将单峰或近似单峰的裂缝图像处理得到双峰图像,达到更好的分割效果。笔者将频域滤波与差值运算相结合,选择高通滤波器对图像进行滤波,提取图像中灰度值变化大的部分,具体处理步骤如图 2 所示。

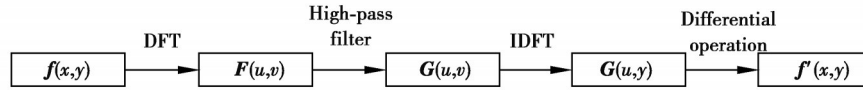


Fig. 2 Processing flow of pre-processing algorithm

1) 读取裂缝图像 $f(x, y)$, 式(1)经傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)至频域得到图像 $F(u, v)$ 。

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})}, \quad (1)$$

FFT 变换是根据傅里叶变换的可分性、对称性与周期性简化离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT), 极大提升变换的运算效率。

2) 对频域图像 $F(u, v)$ 进行高通滤波, 滤波器选择使振铃效应降到最低的高斯滤波器, 得到滤波后图像 $G(u, v)$, 计算过程为

$$G(u, v) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{u^2+v^2}{2\sigma^2}} F(u, v), \quad (2)$$

其中: σ 代表高斯滤波的标准差, 标准差越大滤波器的边缘变化越快, 滤波后图像更易出现“振铃效应”; x 与 y 分别代表滤波核的长度与宽度。

3) 滤波后将频域图像 $G(u, v)$ 转换回时域, 将经过处理后的图像设为 $g(x, y)$, 在高通滤波器对图像滤波后, 高频部分(包含裂缝与噪声)分布在高灰度值区域, 背景分布在低灰度值区域。

$$g(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} G(u, v) e^{j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})}. \quad (3)$$

4) 设预处理后的图像为 $I(x, y)$, $I(x, y)$ 与原灰度图 $f(x, y)$ 、滤波后图像 $g(x, y)$ 三者间的关系为

$$I(x, y) = f(x, y) - g(x, y) + \text{offset}, \quad (4)$$

式中, offset 称为灰度偏移量, 通常取值为 1/2 的图像平均灰度值。

2.2 预处理成分分析

图像组成如表 1 所示, 结合图像灰度值可知处理前的灰度图 $f(x, y)$ 由 2 部分组成, 即低灰度部分 $f_c(x, y)$ 与高灰度部分 $f_b(x, y)$ 。对于复杂隧道图像, 由于 Otsu 阈值分割总会造成过分割现象, 因此, $f_b(x, y)$ 能够代表没有杂质的裂缝背景部分, $f_c(x, y)$ 可继续分为 4 个部分 $f_l(x, y)$, $f_p(x, y)$, $f_g(x, y)$ 与 $f_{rc}(x, y)$, 分别代表了低灰度部分的线状噪声、点状噪声、块状噪声与真实裂缝部分。 $f(x, y)$ 经高通滤波后的图像 $g(x, y)$ 由 2 部分组成, 即低频的低灰度部分 $g_l(x, y)$ 与高频的高灰度部分 $g_h(x, y)$ 。将这几部分代入式(4), 得到低灰度值的点状噪声 $I_p(x, y)$ 、线状噪声 $I_l(x, y)$ 、真实裂缝部分 $I_{rc}(x, y)$; 高灰度的真实背景部分 $I_b(x, y)$, 块状噪声 $I_g(x, y)$ 。

在经过上述步骤处理后, 对 $I(x, y)$ 中值滤波, 通过 Otsu 法找到最佳阈值 T 进行分割, 二值化图像为

$$k(x, y) = \begin{cases} 1, & I(x, y) \geq T, \\ 0, & I(x, y) < T. \end{cases} \quad (5)$$

通过上述分析可知, 该处理方式能有效分离裂缝与背景噪声, 很好去除块状噪声部分, 处理结果如图 3 所示。由图 3(d) 可见, 提出的预处理方法将单峰图像处理为双峰, 可以使传统 Otsu 分割算法更好地获取裂缝图像。由图 3(c) 分析可知, 在处理复杂图形时, 该方法对线状与点状噪声的处理效果不是很理想, 将在阈值分割后对这 2 类噪声进行特征提取与删除。

表 1 算法各阶段图像的组成成分

Table 1 Image composition of each stage of the algorithm

函数	低灰度部分	高灰度部分
$f(x,y)$	$f_c(x,y)$ $f_l(x,y), f_p(x,y), f_g(x,y), f_{rc}(x,y)$	$f_b(x,y)$
$g(x,y)$	$g_l(x,y)$	$g_h(x,y)$
$I(x,y)$	$I_p(x,y), I_L(x,y), I_{RC}(x,y)$	$I_B(x,y), I_G(x,y)$

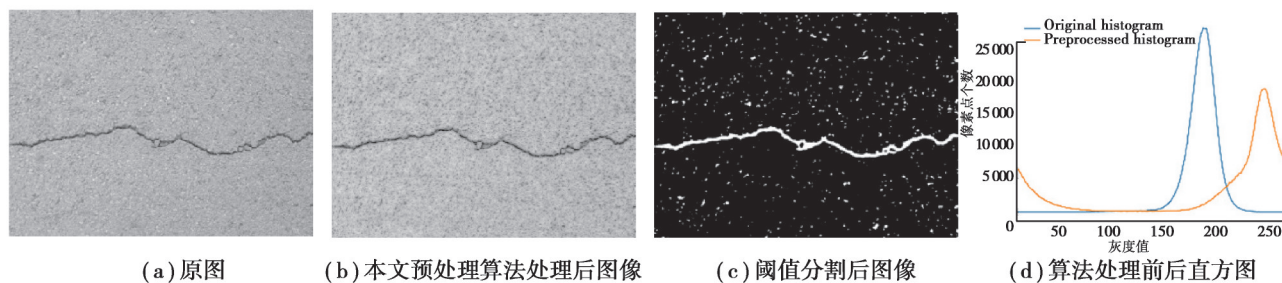


图 3 本文算法处理结果

Fig. 3 Processing results of the algorithm in this paper.

3 裂缝图像特征提取

隧道裂缝情况复杂,在阈值分割后存在着大量背景噪声。通过对裂缝图像的成分分析可知,噪声主要包括点状与线状噪声。针对这 2 类噪声,提出基于连通域的噪声去除法,通过描述特点去除^[15]。首先,引入连通域的概念:连通域是指阈值分割后的二值图像灰度值相同且相连的点的集合,常见的有 4 连通与 8 连通 2 种计算方法(如图 4 所示)。为了使计算结果更精确,采用 8 连通算法^[16],以 P_5 为中心,向周围 8 个方向搜索,将相连且灰度值相等的点划分到 1 个集合,不同的集合即为二值化图像 $k(x,y)$ 的多个连通域,设图像中共有 $n = 1, 2, \dots, N$ 个连通域。

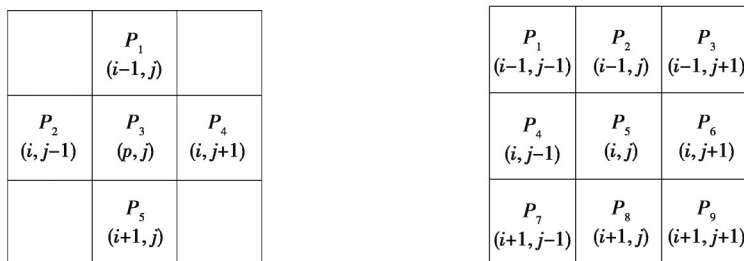


图 4 4 连通与 8 连通区域

Fig. 4 Four-connected and eight-connected regions

统计图像连通域后,根据上述对裂缝的成分分析,设置以下参数对裂缝区进行提取。

3.1 面积参数

噪声区域的面积远小于裂缝区域面积,因此,设每个连通域的面积 V_n ,所有面积小于 T_v 的区域被认为是噪声。

$$k(x,y) = \begin{cases} 0, & V_n \geq T_v, \\ 1, & V_n < T_v, \end{cases} \quad n = 1, 2, \dots, N. \quad (6)$$

3.2 饱和度参数

若前期高通滤波的滤波核选择较大时,点状噪声区域通常呈片状出现,而裂缝部分均为线状,找到连通域的最小外接矩形,用下式描述裂缝的饱和度。

$$CS_n = \frac{S_n}{S}, \quad (7)$$

其中: S 代表每个外接矩形的面积; S_n 代表像素区域的面积, CS_n 为每个连通域的饱和度,设置饱和度参数 T_s ,所有饱和度大于 T_s 的连通域被认为是噪声

$$k(x,y) = \begin{cases} 1, & CS_n \geq T_s, \\ 0, & CS_n < T_s, \end{cases} \quad n = 1, 2, \dots, N. \quad (8)$$

3.3 特殊参数

通过设置面积参数与饱和度参数提取裂缝后,仍存在一些特殊噪声。这类噪声并非单独的点状或线状,而是在复杂地形下形成的不规则噪声,既有点状特点,又包含线性特性。对这类噪声,结合前 2 项参数,设置特殊参数如下所示。

$$k(x,y) = \begin{cases} 1, & CS_n \geq T_s', V_n < T_v', \\ 0, & CS_n < T_s', V_n \geq T_v', \end{cases} \quad n = 1, 2, \dots, N. \quad (9)$$

设置新的面积参数与饱和度参数 T_s' 、 T_v' ,将同时满足这 2 个条件的连通域去除。处理结果如图 5 所示,与图 3(c)相比,可见裂缝图像中的噪声均被去除,裂缝被完整提取出来。



图 5 去除噪声后的结果

Fig. 5 The result after removing the noises

4 裂缝断点连接与尺寸计算

4.1 裂缝断点连接算法

上述算法在处理大部分裂缝图片时均能提取完整裂缝,但特殊情况下,如当裂缝缝隙中有杂物、或裂缝有部分较浅而导致无法识别时,阈值分割后的图像会产生“断点”现象,影响裂缝尺寸计算,如图 6(b)所示。

传统裂缝连接算法有 Hough 变换法、最小路径法等,这类算法计算开销庞大,面对处理复杂图片的端点连接。文中算法的面向对象具有无突变性与发展规律性 2 大特性,且在文中经过预处理与特征提取后的裂缝已有较好结果,过大的计算开销会影响算法的运行速度。充分考虑裂缝特性与算法速度的基础上,提出以下轻量化的裂缝连接算法。

1) 将去噪后的图片骨架化,如图 6(c)所示。使用 3×3 8 连通滤波器遍历图像裂缝部分每 1 个像素点的 8 邻域,将 8 邻域内只有 1 个裂缝点的像素点标记为端点。

2) 计算每个端点与其他所有端点的欧式距离,连接与其欧氏距离最小的端点。

3) 断点部分在裂缝图像中占比极小,可通过 2 端点间确定直线相连。首先,判断 2 端点间横纵坐标差值 ΔX 与 ΔY ,若 $\Delta X > \Delta Y$,以 x 轴为主轴;若 $\Delta X \leq \Delta Y$,则以 y 轴为主轴,连接方式如图 7 所示,最终,连接结果如图 6(d)所示。

4) 连接后的骨架断点裂缝需要恢复宽度,其宽度部分应适应裂缝整体结构。将骨架 2 边端点各向 2 边搜索 2 个点,计算 4 个点在原图中的平均宽度,作为连接断点部分的宽度,处理后的图片如图 8 所示。

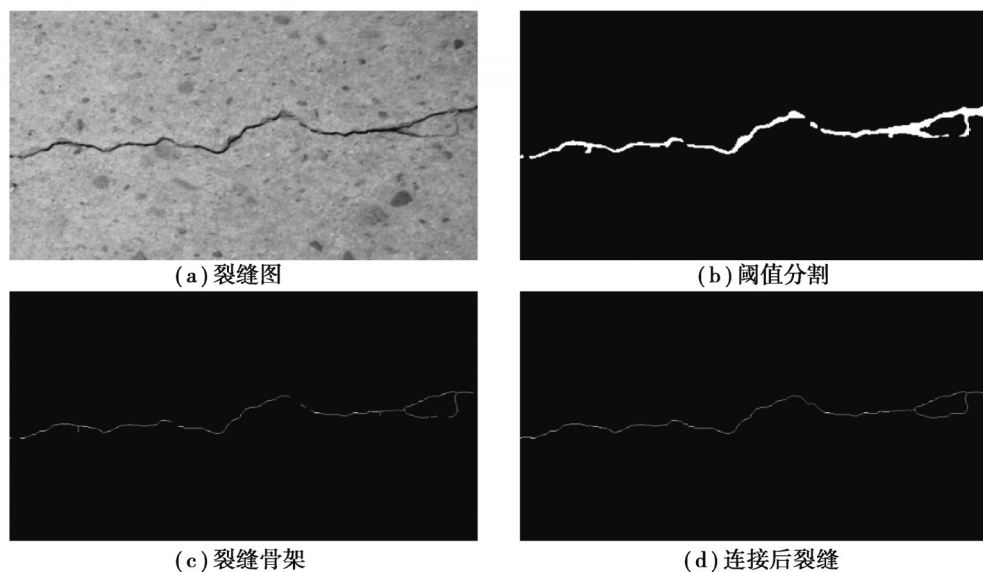


图6 断点连接实现效果

Fig6 Break point connections work

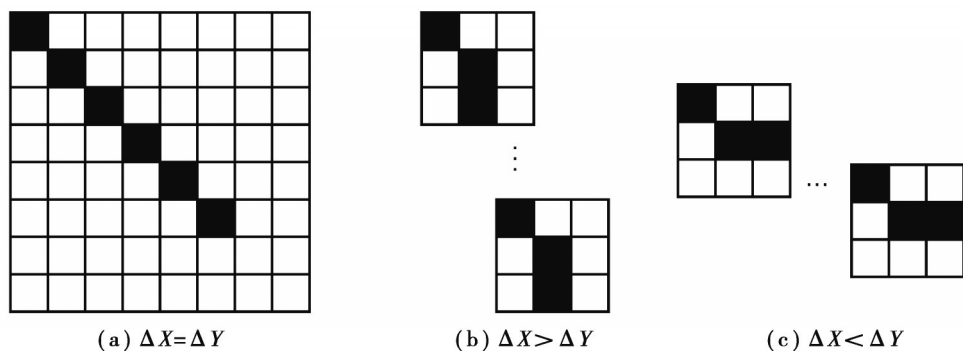


图7 连接方式判断图

Figure 7 Connection Judgment Diagram



图8 算法实现效果

Fig 8 Algorithm implementation effect

4.2 裂缝尺寸计算

计算断点处理后裂缝的长度与宽度,作为裂缝分类与评估的评价标准,在没有进行裂缝尺寸标定时,裂缝的形态学参数由像素点表示。

裂缝长度通过骨架计算,从第1个骨架点开始,按照8连通方向搜索所有点,当下1个骨架点在前1点 P_1, P_3, P_5, P_7 方向时,将该点记为 M 点,当下1个骨架点在 P_2, P_4, P_6, P_8 方向上时,将该点记为 N 点,统计 M 点与 N 点个数,最终结果如式(10), L 为裂缝的长度

$$L = N + \sqrt{M} \quad (10)$$

统计裂缝面积为图像裂缝部分总像素点 S ,裂缝宽度 W 通过裂缝面积与裂缝长度由式(11)计算得出

$$W=\frac{S}{L},$$

(11)

提取出裂缝的尺寸如表 2 所示。

表 2 裂缝区域计算结果

Table2 The results of the crack area calculation

pix

区域参数	面积 S	裂缝长度 L	平均宽度 W
连通域尺寸	25 292	1 254	20.17

在尺寸标定后,即可通过 W 值与 L 值计算出裂缝的真实长度与平均宽度,通过对裂缝形态学参数与裂缝评估办法的比较初步筛选出亟须修复的裂缝。

5 实验结果与分析

利用 i7-6700CPU 与 Python3.7.8 软件对所提出的裂缝处理算法与文中算法进行实现。为验证算法的有效性,收集了 200 张隧道裂缝图,像素尺寸为 1 024×768,涵盖横向裂缝、纵向裂缝与网状裂缝,隧道成分包含水泥与混凝土,对不同场景下的裂缝图像分割并去噪,结果如图 9 所示。本文算法在不同场景、不同裂缝下均有良好的裂缝识别效果。

传统 Otsu 阈值分割法与最大熵阈值分割法均为通过迭代分割阈值 T 的方式寻找最合适的分割阈值,这 2 种方法在处理灰度直方图呈双峰的图像时具有良好效果。但面向对象为灰度直方图呈单峰的裂缝图像,且图像前景与背景在图中所占比例不均匀,比例较高的高灰度背景部分会在分割时影响低灰度的裂缝前景部分,导致分割阈值往往偏大,造成过分割的现象。如图 9(c)、(d)中圈出部分所示,与裂缝部分相连的噪声部分被误检为裂缝,严重影响后期对裂缝的尺寸标定。

改进的 Otsu 算法将裂缝灰度值信息与裂缝的梯度信息结合,在阈值的迭代过程中引入 sobel 梯度算子,降低分割阈值 T 。该方法能够识别出裂缝的主题轮廓,但对较细的微灰度隧道裂缝图像,分割时裂缝部分有断点,去噪后算法会将部分裂缝误检为噪声去除,如图 9 中所示。

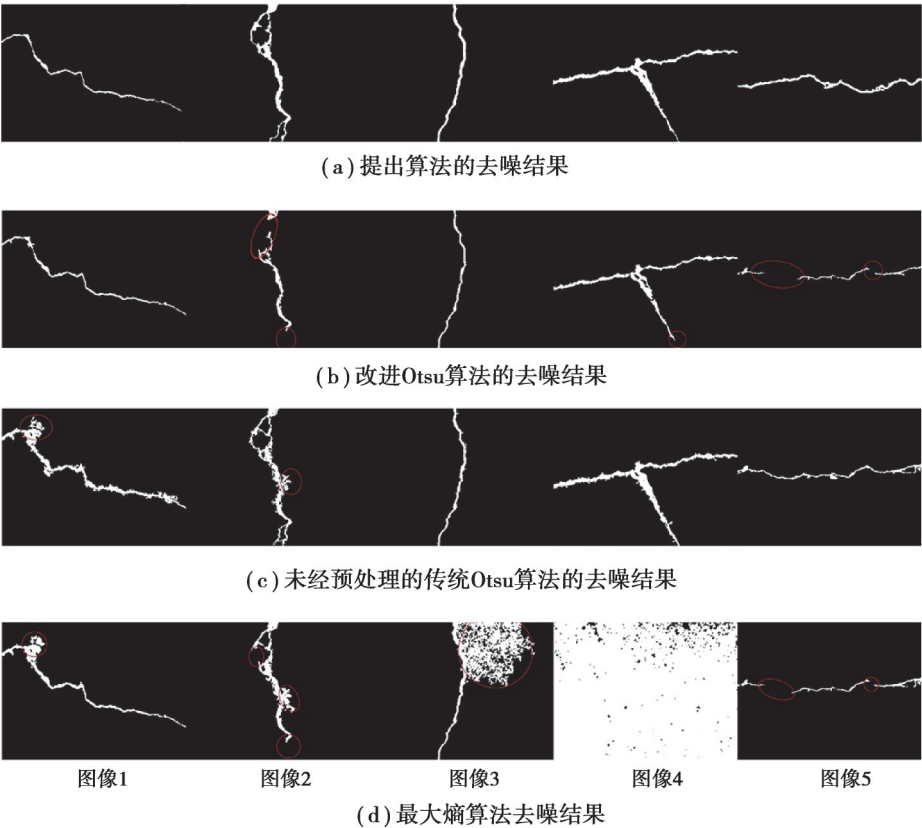


图 9 裂缝分割算法的结果比较

Fig. 9 Comparison of results of crack segmentation algorithms

统计不同算法分割去噪后的准确度(pr)与召回率(re),如下式所示, TP 代表正确检测出裂缝的概率; FP 代表未检测出裂缝的概率; FN 代表将噪声误检为裂缝的概率,与使用常规的裂纹检测方法相比,方法提供了更好的裂纹检测结果。图 10 显示 pr 度量结果平均从 80%~94%, re 度量结果平均从 70%~98%。实验证明,与传统的分割方法相比,本文方法在效果上优于其他方法。

$$pr = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (12)$$

$$re = \frac{TP}{TP + FN}. \quad (13)$$

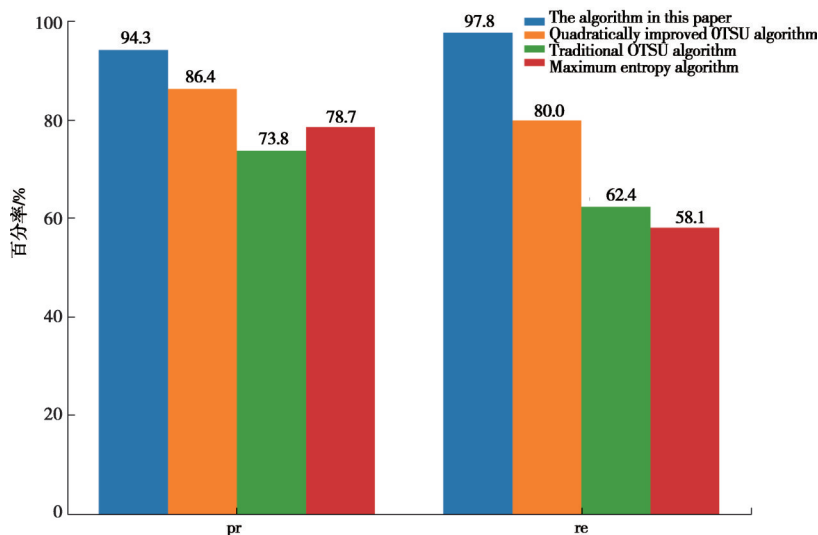


图 10 分割方法的准确率与召回率

Fig. 10 Accuracy and recall rates of segmentation methods

在标定条件下,以现有隧道中实际数据为例,使用文中设计方法对隧道裂缝进行检测,将表 2 所示连通域尺寸换算为实际尺寸,对比系统测量结果与实际结果,验证系统的有效性与精确性。如表 3 所示,对隧道裂缝的实验平均精准度达到 92.2%,最大误差率 12.91%,满足实际工程应用的要求。

表 3 不同算法识别精度比较

Table3 Different algorithms identify precision comparisons

%

算法	普通裂缝	隧道裂缝	隧道裂缝最大误差率
最大熵分割	70	60	68
二次改进的 Otsu	81	75	59
本文算法	92	92	13

6 结 语

1)本文针对隧道裂缝病害,提出基于机器视觉的隧道裂缝检测方法。首先,考虑到裂缝图像通常呈现的单峰问题,对图像进行成分分析,设计频域处理与空域差分的方法增强裂缝纹理,同时降低背景噪声在裂缝图像中的影响。处理后的图像灰度直方图由单峰变换为双峰,便于阈值分割,避免二值图像中的裂缝部分与噪声部分相连。

2)采用上述方法分割后的图像还留有部分点状噪声与线状噪声,通过对噪声成分连通域的分析,分别设置面积参数 T_v 、饱和度参数 T_s 与特殊参数 T'_v 、 T'_s 以删除噪声。

3)部分裂缝图像在采集时由于受到灯光、环境、杂物等干扰,在裂缝检测时会发生漏检现象。考虑到裂缝的无突变性与发展规律,设计轻量化裂缝连接算法对阈值分割后有断点的裂缝进行连接,保证所提取裂缝的完整性。

4)通过将提出算法与其他算法进行实验比较,证明该算法可有效提取复杂环境下的完整裂缝,算法的裂缝识别准确率与召回率分别为 94%与 98%,识别精度达到了 92%。将该算法应用在实际工程测量中,通过数据证明算法满足实际工程应用要求。

参考文献

- [1] 周颖,刘彤.基于计算机视觉的混凝土裂缝识别[J].同济大学学报(自然科学版),2019,47(9):1277-1285.
Zhou Y, Liu T. Computer vision-based crack detection and measurement on concrete structure[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(9): 1277-1285.(in Chinese)
- [2] 范新南,汪杰,史朋飞,等.基于头脑风暴优化的PCNN路面裂缝分割算法[J].西南交通大学学报,2021,56(3):572-578.
Fan X N, Wang J, Shi P F, et al. Pavement crack segmentation algorithm based on pulse coupled neural network with brainstorming optimization[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(3): 572-578.(in Chinese)
- [3] 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.
Zhu L Q, Bai B, Wang Y D, et al. Subway tunnel crack identification algorithm based on feature analysis[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(5): 64-70.(in Chinese)
- [4] 张振海,尹晓珍,王阳萍,等.基于特征分析的图像式地铁隧道裂缝检测方法研究[J].铁道科学与工程学报,2019,16(11):2791-2800.
Zhang Z H, Yin X Z, Wang Y P, et al. Research on image-based crack detection method for subway tunnel based on feature analysis[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(11): 2791-2800.(in Chinese)
- [5] 顾桂梅,冉建民,周咏.基于高斯-中值的钢轨表面缺陷图像滤波研究[J].铁道科学与工程学报,2018,15(8):1943-1949.
Gu G M, Ran J M, Zhou Y. Image filtering of rail surface defects based on Gauss-Median[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(8): 1943-1949.(in Chinese)
- [6] Zakeri H, Nejad F M, Fahimifar A. Rahbin: a quadcopter unmanned aerial vehicle based on a systematic image processing approach toward an automated asphalt pavement inspection[J]. Automation in Construction, 2016, 72: 211-235.
- [7] Lu G F, Zhao Q C, Liao J G, et al. Pavement crack identification based on automatic threshold iterative method[C]//7th International Conference on Electronics and Information Engineering. Nanjing, China: SPIE, 2017: 103221.
- [8] 王耀东,朱力强,史红梅,等.基于局部图像纹理计算的隧道裂缝视觉检测技术[J].铁道学报,2018,40(2):82-90.
Wang Y D, Zhu L Q, Shi H M, et al. Vision detection of tunnel cracks based on local image texture calculation[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(2): 82-90.(in Chinese)
- [9] Quan Y W, Sun J, Zhang Y, et al. The method of the road surface crack detection by the improved otsu threshold[C]//2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Piscataway: IEEE, 2019: 1615-1620.
- [10] 贾东峰,张伟平,刘燕萍.多尺度空间下的隧道裂缝与渗水区域检测[J].同济大学学报(自然科学版),2019,47(12):1825-1830.
Jia D F, Zhang W P, Liu Y P. Tunnel crack and seepage detection in multi-scale space[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(12): 1825-1830.(in Chinese)
- [11] 王博,王霞,陈飞,等.航拍图像的路面裂缝识别[J].光学学报,2017,37(8):126-132.
Wang B, Wang X, Chen F, et al. Pavement crack recognition based on aerial image[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 126-132.(in Chinese)
- [12] Fernandes K, Ciobanu L. Pavement pathologies classification using graph-based features[C]//2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Piscataway: IEEE, 2014: 793-797.
- [13] Murakami T, Saito N, Komachi Y, et al. High spatial resolution LIDAR for detection of cracks on tunnel surfaces[C]//2018 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). Piscataway: IEEE, 2018: 1-2.
- [14] Guo W Y, Wang X F, Xia X Z. Two-dimensional Otsu's thresholding segmentation method based on grid box filter[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(18):5234-5240.
- [15] Fujita Y, Hamamoto Y. A robust automatic crack detection method from noisy concrete surfaces[J]. Machine Vision and Applications, 2011, 22(2): 245-254.
- [16] 于潇宇,郭玉波,陈刚,等.基于点目标连通域标记的实时特征提取及其分布式运算[J].光学学报,2015,35(2):104-114.
Yu X Y, Guo Y B, Chen G, et al. Real-time point feature extraction based on connected components labeling and distributed computing[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 104-114.(in Chinese)

(编辑 侯 湘)