

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107371

# 改进 MASK 匀光与 K-means 聚类 结合的桥梁裂缝提取\*

唐伟 余波 赵嘉彬 张家园  
(西安科技大学 机械工程学院 西安 710054)

**摘要:** 针对采集到的桥梁裂缝图像存在污渍、阴影、光照不均等现象,导致后期裂缝特征提取困难的问题,提出一种结合 MASK 匀光和 K-means 聚类算法的裂缝提取方法。该方法首先对 MASK 匀光算法进行改进,提高算法自适应能力,采用对比度拉伸增强图像反差,然后根据裂缝与背景像素灰度值的差异,利用 K-means 聚类算法进行图像分割,最后结合形态学方法和连通域检测实现裂缝的桥接和去噪。实验结果表明,相比于其他方法,该方法能够有效降低图像亮度不均干扰对裂缝提取结果的影响,裂缝提取准确率达到 95%,保证后期裂缝尺寸测量和桥梁病害程度评估的准确性。

**关键词:** 桥梁裂缝;亮度不均;MASK 匀光算法;K-means 聚类算法;形态学

**中图分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

## Improved bridge crack extraction combining MASK dodging and K-means clustering

Tang Wei Yu Bo Zhao Jiabin Zhang Jiayuan

(College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** A crack extraction method combining improved MASK dodging and K-means clustering algorithms is proposed to address the problem of stains, shadows and uneven illumination in the captured bridge crack images, which makes it difficult to extract crack features at a later stage. The method firstly improves the MASK dodging algorithm, improves the adaptive capability of the algorithm, uses contrast stretching to enhance the image contrast, then uses the K-means clustering algorithm to segment the image according to the difference between the grey value of cracks and background pixels, and finally combines morphological methods and connected domain detection to bridge and denoise the cracks. The experimental results show that, compared with other methods, this method can effectively reduce the influence of image brightness uneven interference on the crack extraction results, and the crack extraction accuracy reaches 95%, ensuring the accuracy of later crack size measurement and bridge damage degree assessment.

**Keywords:** bridge crack; uneven brightness; MASK dodging algorithm; K-mean clustering algorithm; morphology

### 0 引言

桥梁裂缝会影响桥梁结构的稳定性,对交通安全产生负面影响,因此准确高效地检测出裂缝在桥梁安全评估与养护中起关键作用。目前国内外桥梁裂缝检测主要依靠人工,效率低费用高。为了解决现有检测方法存在的问题,研究者开始采用图像处理方法对裂缝图像进行检测研究。

图像处理方法提取裂缝主要分为阈值算法<sup>[1-2]</sup>、边缘检测算法<sup>[3-4]</sup>、区域算法<sup>[5-6]</sup>等。阈值算法通过选择灰度阈值

分割图像将裂缝提取出来。基于边缘检测的方法如 Canny、Sobel 算子等通过求取梯度值判断裂缝边缘。基于区域的检测算法如种子生长算法,会考虑图像整体特性,提取结果相对较好。上述方法针对裂缝图像较为理想化,若图像存在光照不均、阴影、噪声等干扰,裂缝提取准确性会大大降低。

针对采集的图像背景环境复杂的问题,李清泉等<sup>[7]</sup>结合电子像印机原理,提出了一种图像匀光算法;瞿中等<sup>[8]</sup>提出改进遗传规划的裂缝提取算法,用于解决复杂环境裂缝

收稿日期:2021-07-23

\* 基金项目:国家自然科学基金(52175145)项目资助

提取困难问题;魏海斌等<sup>[9]</sup>采用直方图均衡化对裂缝图像进行处理增强图像反差,提高裂缝检测能力;张栋冰<sup>[10]</sup>采用 Retinex 进行图像匀光处理,采用边缘检测并用最小生成树策略来进行裂缝检测;Zou 等<sup>[11]</sup>提出了测地线阴影去除算法,能够有效去除图像中含有的阴影而不破坏裂缝特征;高尚兵等<sup>[12]</sup>采用 Gamma 灰度矫正对图像亮度不均现象进行处理。上述方法一定程度上解决亮度不均对裂缝识别的影响,但具有较高的计算复杂度,且自适应能力较低。

针对现有方法的不足,本文在遥感影像中常用的 MASK 匀光算法基础上进行改进,用于解决图像背景环境复杂的问题,采用对比度拉伸提高裂缝与非裂缝背景的差异性后,结合 K-means 聚类方法对裂缝图像进行聚类分析,最后融合形态学和连通域检测消除伪裂缝及连接裂缝断裂点,最终获得较为理想的裂缝提取结果。

## 1 桥梁裂缝的主要特征

由于桥梁底部光线较暗采集图像时受采集照射灯光和拍摄环境条件的影响,图像普遍存在各种干扰如污渍、阴影、光照不均等问题,如图 1 所示,这些干扰问题可以统称为图像亮度不均,这些干扰导致裂缝图像明暗不一。进而影响裂缝图像的进一步处理,因此消除裂缝图像亮度不均获得高质量的图像,具有很高的研究价值。

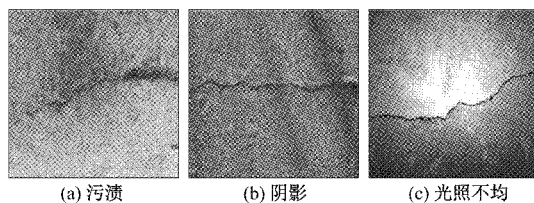


图 1 桥梁裂缝特征

理想裂缝图像中,裂缝区域比非裂缝区域亮度低,但实际裂缝图像中存在的干扰和裂缝特征都属于暗色像素,加之裂缝形状狭长,导致裂缝识别难度较大。从频率域考虑,边缘、细节以及噪声等属于高频信息;亮度变化缓慢的信息属于低频信息。这一特点为去除图像亮度不均的干扰提供了可能。

## 2 裂缝检测的实现过程

裂缝检测流程如图 2 所示。首先对图像进行预处理,消除图像中亮度不均的干扰;对预处理后的图像进行分割,将图像分割为裂缝区域和非裂缝区域;最后结合形态学和连通域检测方法进行去噪和裂缝修复,通过上述方法输出裂缝提取结果。

### 2.1 图像预处理

以图 3(a)为例,该图像主要特征为中间较亮四周较暗,其灰度直方图如图 3(b)所示,图中裂缝区域与非裂缝区域灰度值连接紧密,不利于后期裂缝特征提取,因此首先需要解决亮度不均问题。

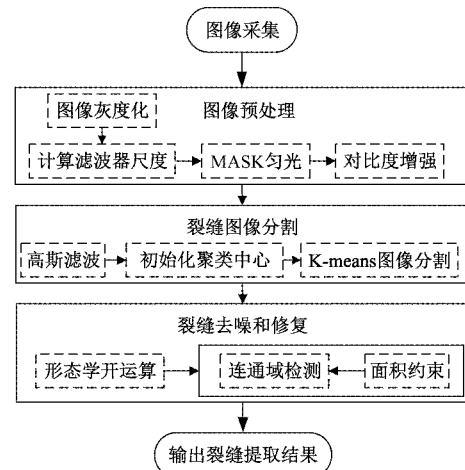


图 2 裂缝提取流程

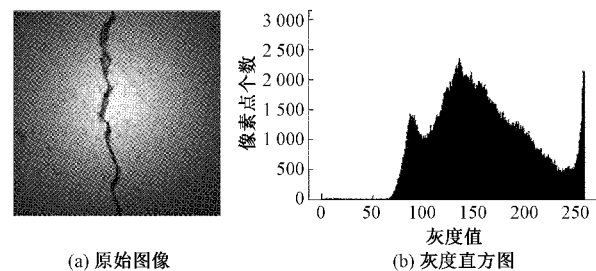


图 3 原始图像及其灰度直方图

### 1) MASK 匀光原理

MASK 匀光算法是基于传统光学相片晒印技术而提出的<sup>[13]</sup>。MASK 匀光可以采用加性噪声模型来表示,即亮度不均原始图像视为亮度均匀的图像和噪声影像(背景影像)叠加而成,如式(1)所示。

$$I'(x, y) = I(x, y) + B(x, y) \quad (1)$$

式中:  $I'(x, y)$  表示原始图像,  $I(x, y)$  表示理想条件下亮度均匀的图像,即匀光处理后的图像,  $B(x, y)$  表示导致亮度不均的背景图像。

图像亮度不均匀是因为背景影像不均匀导致的<sup>[14]</sup>,因此想要获得亮度均匀的图像,首先需要得到背景影像  $B(x, y)$ , 背景影像  $B(x, y)$  通常采用频率域高斯低通滤波获得,高斯低通滤波函数如式(2)所示,然后将原始图像  $I'(x, y)$  与背景图像  $B(x, y)$  进行减运算便可获得光照均匀图像  $I(x, y)$ 。

$$H(u, v) = e^{-D^2(u, v)/2\sigma^2} \quad (2)$$

式中:  $D(u, v)$  是距频率矩形中心距离,  $\sigma$  为滤波器尺度。

### 2) MASK 匀光改进

由于每幅图像拍摄环境不同,亮度不均程度会存在差异,需要对滤波器尺度  $\sigma$  做出动态调整,以达到最佳匀光效果。图 4 分别为采用  $\sigma = 5$ ,  $\sigma = 10$ ,  $\sigma = 15$  得到的匀光后图像的对比图。图 4 中,随着  $\sigma$  的增大图像整体色彩更加均匀,但图像细节特征会丢失,因此通常情况下滤波器尺度

$\sigma$  应保持在 0~10 范围内。

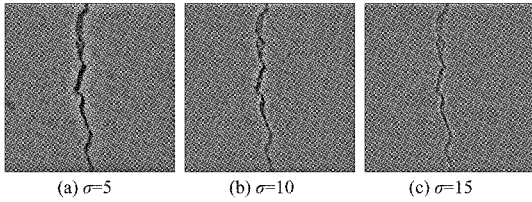


图 4 不同  $\sigma$  匀光效果对比

传统 MASK 匀光算法的尺度  $\sigma$  需要手动调节,自适应能力不强。文中对算法进行改进,具体步骤如下。

(1) 将整幅图像平均分割为  $4 \times 4$  共 16 个子块,分别计算每个子块的信噪比  $SNR_i$ ,如式(3)所示。

$$SNR_i = I_{mean_i} / I_{sd_i}, i = 1, 2, 3, \dots, 16 \quad (3)$$

式中:  $I_{mean_i}$  为子块图像灰度值均值,  $I_{sd_i}$  为子块图像灰度值标准差。

(2) 求取所有子块中信噪比最大值  $SNR_{max}$ 、最小值  $SNR_{min}$ ,以及所有子块信噪比的均值  $SNR_{mean}$ 。

(3) 通过计算  $SNR_{mean}$  与  $SNR_{max}$  的差值在子块图像信噪比最大变化范围取值中所占比重来确定  $\sigma$  的大小,计算方法如式(4)所示。

$$\sigma = \frac{SNR_{max} - SNR_{mean}}{SNR_{max} - SNR_{min}} (\sigma_{0max} - \sigma_{0min}) + \sigma_{0min} \quad (4)$$

式中:  $\sigma_{0max}$  和  $\sigma_{0min}$  为  $\sigma$  最大取值范围,根据上述实验分析,  $\sigma$  应设置在 0~10 范围内,即  $\sigma_{0min} = 0, \sigma_{0max} = 10$ 。

3) 对比度拉伸

匀光后的图像裂缝区域与非裂缝区域的灰度值反差会减小,采用对比度拉伸的方法来增强反差,其数学表达式如式(5)所示。

$$output(x, y) = \frac{255 \times (I(x, y) - v)}{255 - 2 \times v}$$

$$\text{if } output(x, y) > 255; output(x, y) = 255$$

$$\text{if } output(x, y) < 0; output(x, y) = 0 \quad (5)$$

式中:  $v$  为对比度拉伸参数。

图 5 分别为  $v = 30, v = 70, v = 110$  时对比度拉伸后的结果对比,随着  $v$  值增大裂缝与非裂缝背景特征差异越来越明显,但会造成细节丢失同时噪声会增多,通过实验分析,文中选择  $v = 70$ 。

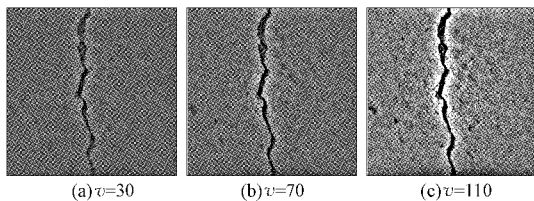


图 5 不同参数  $v$  结果对比

对图像进行预处理,选取  $\sigma_{0min} = 0, \sigma_{0max} = 10, v = 70$ ,计算得到  $\sigma = 4.96$ ,处理结果如图 6(a)所示,预处理后的图像整体亮度分布均匀,裂缝和非裂缝区域差异明显,

图 6(b)灰度直方图中,裂缝区域灰度值集中在 0 附近,非裂缝区域集中于灰度值 170 左右,两个区域之间有较大的间隙,为后期处理创造良好的条件。

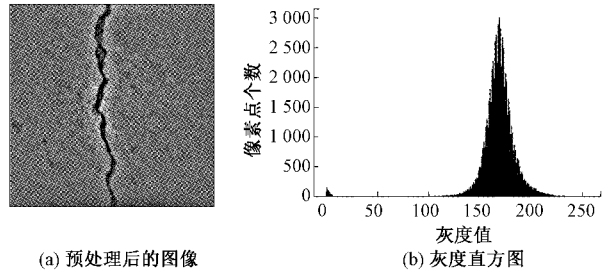


图 6 预处理后图像及其灰度直方图

## 2.2 裂缝图像分割

通过预处理图像中裂缝目标得以凸显,将裂缝特征的提取看作图像的二分类,根据该特点采用 K-means 聚类算法进行图像分割,K-means 聚类算法采用迭代思想,其目标是将样本数据划分为  $k$  个类别,通过随机初始化  $k$  个样本中心点,不断迭代优化聚类中心点,使  $k$  个类别尽可能保证类内差异最小类间差异最大<sup>[15]</sup>。

将二维图像通过 reshape() 函数展开成一维样本,设  $f(x)$  为图像一维样本数据点  $x$  对应的灰度值,  $m_j^i$  表示第  $i$  次聚类后第  $j$  类的聚类中心,  $C_j^i$  表示第  $i$  次聚类后划分到第  $j$  类的样本所在的区域,K-means 聚类的流程如下所示。

1) 初始化聚类中心  $m_1^0, m_2^0, \dots, m_k^0$ 。

2) 按照下列准则寻找距离  $f(x)$  最近的聚类中心  $m$ ,并将  $f(x)$  放入该聚类中心所在类中。

$$|f(x) - m| < |f(x) - m_j^i|$$

$$m \in \{m_j^i, j = 1, 2, 3, \dots, k\} \quad (6)$$

3) 按式(7)更新聚类中心  $m_j^i, f(x_j^i)$  为  $C_j^i$  区域中样本  $x_j^i$  的灰度值,  $n_j^i$  为第  $C_j^i$  中样本数量。

$$m_j^i = \frac{1}{n_j^i} \sum_{x_j^i \in C_j^i} f(x_j^i) \quad (7)$$

4) 计算式(8)准则函数  $J$ ,如果  $J$  收敛,或达到最大迭代次数  $N$  后结束迭代,否则转至步骤 2)。

$$J = \sum_{j=1}^k \sum_{x_j^i \in C_j^i} |f(x_j^i) - m_j^i|^2 \quad (8)$$

K-means 初始聚类中心点是随机产生的,加之离群点(噪声或异常值)的影响,聚类结果容易陷入局部最优解<sup>[16]</sup>。采用如下方式进行优化。

1) 采用高斯滤波对图像进行去噪,消除图像离群点的干扰,将滤波后的图像作为提取裂缝的初始图像。

2) 图像二分类时  $k = 2$ ,将滤波后图像灰度直方图中像素点数量最多的点对应的灰度值作为  $m_1^0$ ,然后计算其余样本数据  $f(x)$  与  $m_1^0$  距离最大的点作为  $m_2^0$ 。

$$m_2^0 = \max\{f(x) - m_1^0\} \quad (9)$$

对图像一维样本点进行聚类,可得聚类效果如图 7 所

示,初始聚类中心为  $m_1^0 = 140, m_2^0 = 0$ , 图中上方黑色点为非裂缝数据点,下方灰色点为裂缝数据点。

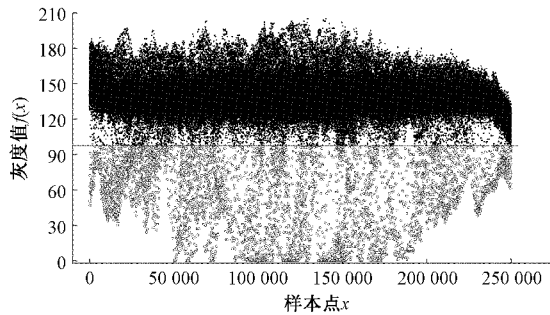


图 7 聚类点分布图

将一维样本数据通过 `reshape()` 函数转换为原始图像大小的二维数据,最终输出分割后的图像。采用自适应阈值分割和 Canny 边缘检测与本文聚类方法进行对比,结果如图 8 所示,图 8 中,本文分割裂缝图像噪声更少,裂缝细节特征保留更加完整。

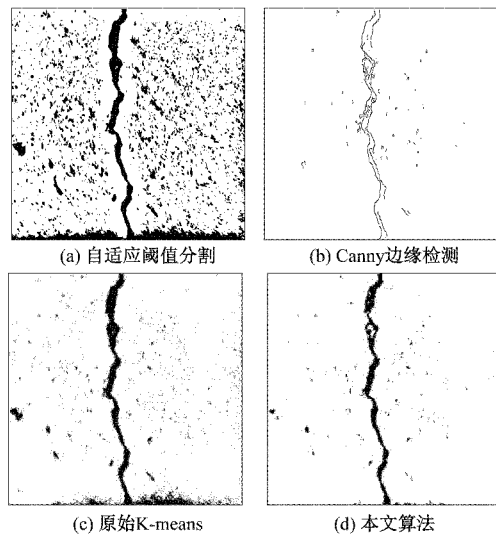


图 8 聚类结果对比

### 2.3 伪裂缝的消除及裂缝连接

由于裂缝区域连通域面积比非裂缝噪声点的面积大,可以采用连通域面积约束去除噪声点,对于裂缝特征过分割造成的断裂,采用形态学方法进行修复,具体过程如下。

1) 首先将 K-means 分割后的图像记作图像  $D$ , 将其反色处理后记作图像  $D_1$ 。

2) 采用形态学先膨胀后腐蚀开运算对图像  $D_1$  进行处理,处理后的图像记作  $D_2$ 。

3) 采用连通域检测剔除 8 连通域中面积小于阈值的杂质点,计算  $D_2$  中每个值全为 255 的 8 连通区域  $S_i$  中所有像素的数量,记为  $Q_i$ , 如果  $Q_i$  小于阈值  $T$ , 则把  $S_i$  区域所有像素点全赋值为 0, 处理后图像记为  $D_3$ 。

4) 将  $D_3$  图像反色后得到最终裂缝提取图像  $D_4$ 。

文中阈值  $T = 500$ , 处理后的结果如图 9(a) 所示,

图 9(b) 为人工提取的裂缝结果。

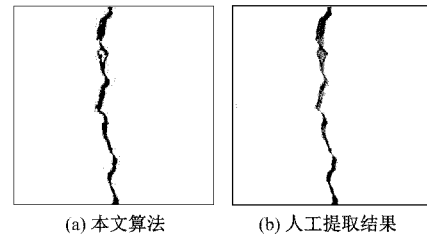


图 9 裂缝提取结果

## 3 试验结果及分析

裂缝图像大小为  $1024 \times 1024$ , RGB 三通道彩色图像, 试验环境为 pycharm, 开发语言为 Python, 试验图像共 140 张, 其中 120 张含有裂缝, 20 张不含裂缝。

### 3.1 定性分析

分别采用直方图均衡化、Retinex 增强和 Gamma 灰度矫正来解决亮度不均的问题。采用上述图像预处理方法与本文方法进行对比试验, 结果如图 10 所示, 对预处理后的图像后续采用本文方法提取裂缝, 结果如图 11 所示。

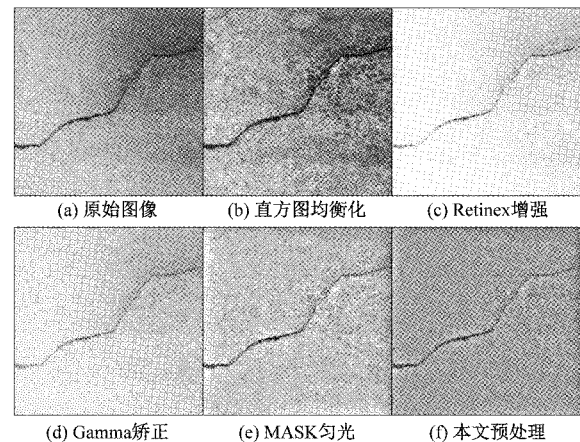


图 10 预处理试验结果对比

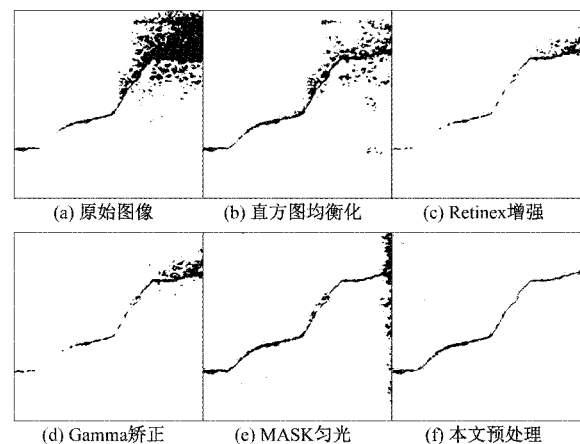


图 11 裂缝提取结果对比

图中采用直方图均衡化处理图像对比度增强,提取的裂缝虽完整但存在大块噪点难以去除,采用 Retinex 增强和 Gamma 矫正虽然图像整体亮度趋于均衡,但图像亮度偏亮导致裂缝提取不完整,采用传统 MASK 匀光通过调节参数可以达到较好的匀光效果,但是裂缝和背景的差异性不够明显,导致提取准确度降低,最后采用本文算法对图像进行预处理,处理后图像整体亮度均匀,得到的裂缝较为完整。

为了体现本文算法在复杂环境中裂缝特征提取的优势,从数据集中抽取 4 种图像采用本文方法进行裂缝提取试验,其裂缝提取过程和结果如图 12 所示。表 1 为实验中的参数。

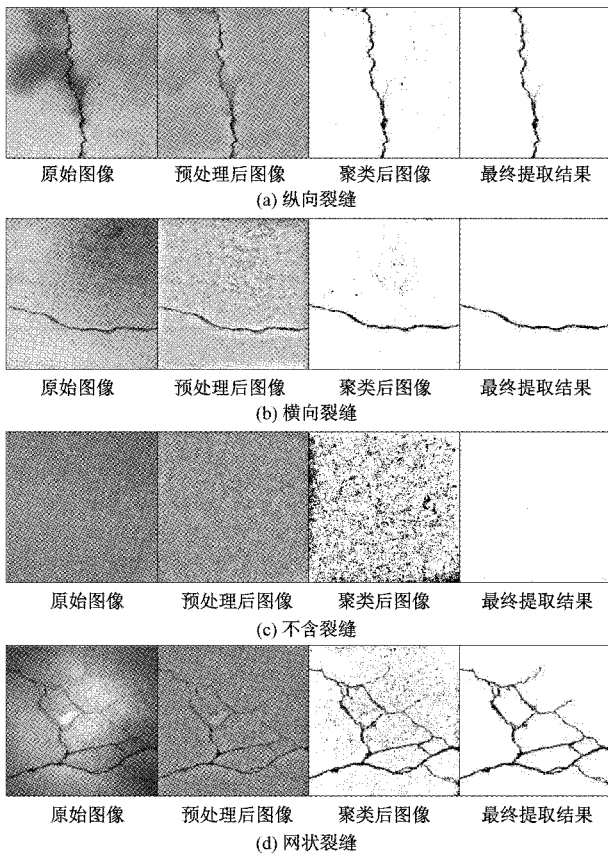


图 12 裂缝检测实验结果

表 1 试验参数

图像	尺度 $\sigma$	参数 $v$	聚类中心 $(m_1^0, m_2^0)$
(a)纵向裂缝	3.83	70	(177,31)
(b)横向裂缝	5.10	70	(223,12)
(c)不含裂缝	4.10	70	(167,92)
(d)网状裂缝	4.25	70	(172,0)

图 12 中(a)、(b)原始图像存在阴影和污渍,(c)中原始图像不包含裂缝,(d)中原始图像光照不均匀,通过预处理后,4 幅图像亮度不均有很大改善,裂缝特征突出,然后通

过 K-means 聚类来分割裂缝和非裂缝背景特征,分割后的图像仅存在少量的孤立的噪声点,采用形态学和连通域检测去除背景中的噪声并且连接了裂缝中断裂点,最终得到的裂缝特征提取结果较为理想。

### 3.2 定量分析

为了验证本文算法裂缝提取结果是否满足要求,首先人工提取得到真实裂缝记作图像 A,本文算法提取的裂缝结果记作图像 B,对图像 A 和 B 做或运算得到图像 C,分别计算图像 A、B 和 C 中像素值为 0 的像素个数  $m(A)$ 、 $m(B)$  和  $m(C)$ 。裂缝提取算法提取裂缝特征是否有效,采用裂缝特征重合度 CR 进行描述。

$$CR = \frac{m(C)}{m(A) + m(B) - m(C)} \quad (10)$$

if  $m(A) = m(B) = 0; CR = 1$

if  $m(A) = 0, m(B) \neq 0; CR = 0$

为保证裂缝提取的完整性,如果重合度 CR 的的值大于等于 80%,将其视为正确检测出裂缝,否则认为检测结果不符合要求。

为了评价本文算法的裂缝检测能力,利用准确度 Acc、真正率  $T_{PR}$ 、假正率  $F_{PR}$  3 个参数进行分析,其公式如下所示。

$$Acc = \frac{T_p + T_n}{T_p + F_n + T_n + F_p} \quad (11)$$

$$T_{PR} = \frac{T_p}{T_p + F_n} \quad (12)$$

$$F_{PR} = \frac{F_p}{F_p + T_n} \quad (13)$$

式中:  $T_p$  为含有裂缝且检测出裂缝满足要求 ( $CR \geq 80\%$ ) 的图像数量;  $T_n$  为图像不包含裂缝,同时也未检出裂缝 ( $m(A) = m(B) = 0$ ) 的图像数量;  $F_p$  为图像不包含裂缝,却检测出含有裂缝 ( $m(A) = 0, m(B) \neq 0$ ) 的图像数量;  $F_n$  为图像含有裂缝,却未检测出或检测检测结果不满足要求 ( $CR < 80\%$ ) 的图像数量。

本文对 140 张裂缝图像进行实验验证,首先对图像人工提取裂缝特征,作为真实裂缝提取结果,然后采用不同预处理方法进行预处理,然后后续采用本文方法提取裂缝,计算不同预处理方法的检测能力如表 2 所示。

表 2 不同方法检测能力对比

预处理方法	$T_p$	$T_n$	$F_p$	$F_n$	Acc/ %	$T_{PR}/$ %	$F_{PR}/$ %
直方图均衡化	103	16	4	17	85.00	85.8	20
Retinex 增强	98	14	6	22	80.00	81.7	30
Gamma 矫正	101	15	5	19	82.85	84.2	25
MASK 匀光	108	19	1	12	90.70	90.0	5
本文方法	115	18	2	5	95.00	95.8	10

表 2 中,采用 Gamma 矫正和 Retinex 增强检测性能较低,主要由于矫正后图像细节丢失严重,裂缝提取不完整,

直方图均衡化处理裂缝完整但存在较多伪裂缝,检测性能一般,传统 MASK 匀光性能较好,但效率较低,本文预处理方法检测准确率达到 95%,相比于其他图像预处理方法具有更好的环境适应能力和抗干扰能力。

#### 4 结 论

针对采集的桥梁裂缝图像存在亮度不均的干扰问题,提出结合改进 MASK 匀光算法和 K-means 聚类的裂缝检测方法,主要结论如下。

1) 本文匀光算法可以自适应调整参数以适应不同环境裂缝图像,能够有效去除图像亮度不均的干扰问题,克服现有方法人工调参效率低不准确的缺点,图像预处理后降低了裂缝提取难度,体现了算法的适用性和高效性。

2) 对 K-means 聚类方法进行优化,避免出现局部最优解,得到较为理想的聚类结果。采用形态学方法和连通域检测去除干扰噪声并连接断裂裂缝,最终裂缝提取结果较为准确。

#### 参考文献

- [1] WENG X, HUANG Y, WANG W. Segment-based pavement crack quantification [J]. Automation in construction, 2019, 105:102819. 1-102819. 16.
- [2] 马文涛,樊春玲.基于计算机视觉路面裂缝的识别与测量[J].电子测量技术,2020,43(19):85-88.
- [3] LUO Q, GE B, TIAN Q. A fast adaptive crack detection algorithm based on a double-edge extraction operator of FSM [J]. Construction and Building Materials, 2019, 204:244-254.
- [4] 赵芳,周旺辉,陈岳涛,等.改进的 Canny 算子在裂缝检测中的应用[J].电子测量技术,2018, 41(20): 107-111.
- [5] 王维,孟丽娜,闫兆进.基于区域生长和最外边缘追踪的路面损坏检测[J].中国民航大学学报,2016,34(6): 51-54.
- [6] 贺福强,平安,罗红,等.局部特征聚类联合区域增长的桥梁裂缝检测[J].科学技术与工程,2019,19(34): 272-277.
- [7] 李清泉,胡庆武.基于图像自动匀光的路面裂缝图像分析方法[J].公路交通科技,2010,27(4):1-5,27.
- [8] 瞿中,陈宇翔.改进遗传规划的混凝土路面裂缝检测算法[J].计算机工程与设计,2019,40(6):1660-1664.
- [9] 魏海斌,武少威,张启帆,等.基于图像处理的沥青路面裂缝识别算法研究[J].中外公路,2020,40(4):73-78.
- [10] 张栋冰.基于聚类-最小生成树的沥青路面裂缝检测方法研究[J].中山大学学报(自然科学版),2017,56(4): 68-74.
- [11] ZOU Q, CAO Y, LI Q, et al. Crack tree: Automatic crack detection from pavement images [J]. Pattern Recognition Letters, 2012,33(3):227-238.
- [12] 高尚兵,颜正,潘志庚,等.一种新的路面裂缝自动检测算法[J].系统仿真学报,2017, 29(9):2009-2015.
- [13] 李鹏程,王栋,朱积国.改进的自适应 Mask 匀光算法[J].遥感信息,2018(4):86-90.
- [14] 姚芳,万幼川,胡晗.基于 Mask 原理的改进匀光算法研究[J].遥感信息,2013,28(3):8-13.
- [15] 王德方,曾卫明,王倪传.基于改进 K-means 算法的不均匀光照下道路裂缝检测[J].计算机应用与软件, 2015,32(7):244-247,300.
- [16] 刘欢,阎镇.基于改进的 K-means 法的高分辨率遥感影像道路提取[J].计算机与现代化,2017,4(11):55-61.

#### 作者简介

唐伟,副教授,博士,主要研究方向为计算机辅助工程分析、图像处理、深度学习。

E-mail:q18991922535@163.com

余波(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为图像处理、深度学习。

E-mail:1368993696@qq.com

赵嘉彬,硕士研究生,主要研究方向为数字图像处理、深度学习。

E-mail:986343470@qq.com

张家园,硕士研究生,主要研究方向为计算机辅助工程分析。

E-mail:2322349611@qq.com