

基于增强色调特征的涵洞裂缝缺陷分割算法

徐灵丽, 朱晓坡, 侯一兴, 李敏, 张学武*

河海大学物联网工程学院, 江苏 常州 213022

摘要 针对水下涵洞降质图像存在裂缝被非均匀悬浮颗粒遮挡的问题,提出了一种基于增强色调特征的涵洞裂缝缺陷分割算法。该算法增强对色彩高敏感的色调特征,并以此为基础对图像进行粗分割。针对涵洞壁凹陷等干扰图像分割结果的问题,在空域上对粗分割结果进行约束,以连通区域为局部单元,对其进行区域特征约束以滤除干扰,完成分割。实验结果表明,该算法能有效地分割被干扰的裂缝缺陷。

关键词 图像处理; 色调特征; 水下图像; 图像分割

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.081016

Culvert Crack Defect Segmentation Algorithm Based on Enhanced Hue Features

Xu Lingli, Zhu Xiaopo, Hou Yixing, Li Min, Zhang Xuewu*

College of Internet of Things Engineering, Hohai University, Changzhou, Jiangsu 213022, China

Abstract Non-uniform suspended particles block the cracks of the underwater culverts. Therefore, we propose a culvert crack defect segmentation algorithm based on enhanced hue features in this study. The color-sensitive hue features can be enhanced using the proposed algorithm; this forms the basis for performing rough image segmentation. The rough segmentation result is considered in the spatial domain to avoid the interference of the culvert wall depression in the image segmentation results. The connected region is used as the local unit, and the region feature is used to filter the interference and complete the segmentation. The experimental results prove that the cracked defects can be effectively segmented using the proposed algorithm.

Key words image processing; hue features; underwater image; image segmentation

OCIS codes 100.3008; 100.2960; 100.2980

1 引言

水下涵洞等结构物缺陷检测是机器视觉领域中备受关注的研究方向,具有十分重要的理论意义和实际应用价值^[1]。水下图像分割是缺陷检测的前提,发挥着至关重要的作用。复杂的水下环境及恶劣的光照条件使得获取的水下图像出现严重的质量退化^[2],即水对光的选择性吸收、水体及悬浮颗粒的散射和涵洞中水流携带泥沙的遮挡导致水下图像对比度低、纹理模糊并伴有很大的噪声,极大地影响了对水下目标的分割。

近年来,已有一些学者提出了关于水下目标分

割的方法。文献[3]通过调整灰度化权值得到对比度较高的灰度图像,再利用阈值分割,得到分割结果。文献[4]提出一种基于增量特征和局部奇异性的水下图像分割方法,通过反映像素点与其邻域变化情况的增量特征和反映像素点灰度变化规律的局部奇异性特征,结合 K 均值聚类法,获得分割图像。针对水下图像对比度低、偏色等问题,文献[5]在 C-V 模型的基础上对权值函数进行改进,建立了自适应的水下彩色图像分割模型。

上述方法虽然在一定程度上可实现水下目标的分割,但都未考虑水体中非均匀悬浮颗粒对目标有部分遮挡的情况。在真实的物理环境中,由于涵洞

收稿日期: 2019-07-25; 修回日期: 2019-08-25; 录用日期: 2019-09-16

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0407101,2016YFC0401606)、国家自然科学基金(61671202,61701169,61273170)

* E-mail: lab_112@126.com

长期运营,涵洞壁侵蚀度较高,洞内水体浑浊,同时水流的裹挟作用使得悬浮颗粒出现分布不均匀的情况,浓厚处对裂缝准确分割造成干扰。

针对这种情况,本文提出了一种基于增强色调特征的涵洞缺陷分割算法,将增强后提取的色调特征作为分割的基础,在空域上加以连通域面积和像素均值特征的约束,获得分割结果。该算法克服了水中悬浮颗粒干扰裂缝分割的问题,分割准确度高,稳定性好。

2 基于增强色调特征的涵洞裂缝缺陷分割算法

由于水下涵洞图像依靠水下机器人搭载人造光源进行采集,获取的涵洞图像存在光照不均匀、对比度低、纹理模糊等问题。直接使用全局阈值进行图像分割,由于低光照区域的背景与裂缝缺陷具有较相似的灰度级,因此存在裂缝和背景粘连等问题。即使使用自适应局部阈值对图像进行分割,也会因为非均匀悬浮颗粒与背景的灰度级相似,存在分割不完整的问题。考虑到色调特征对颜色的高敏感性和缺陷与背景整体的颜色差异,选择色调特征作为分割算法的基础,完成粗分割。同时,由于缺陷与背景中凹陷的颜色较相似,故在空域上加以约束,完成分割。

2.1 色调特征增强与提取

色调特征一般从 RGB 图像中提取,提取公式为

$$\theta = \arccos \left[\frac{(R - B) + (G - B)}{2\sqrt{(R - B)^2 + (R - B)(G - B)}} \right], \quad (1)$$

$$H = \begin{cases} \theta, & G \geq B \\ 2\pi - \theta, & G < B \end{cases}, \quad (2)$$

式中: R 、 G 、 B 为 RGB 图像的三个通道; θ 为颜色在平面色调环中所处位置的角度; H 为提取的色调特征。由于色调之间的差异通过色调环上色调之间的最小角度反映,所以色调特征值范围应为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。由(1)式和(2)式可知,计算色调特征时,以蓝色通道作为计算的基础,通过计算其与红色通道和绿色通道的差值来获取偏转角。涵洞图像中泥沙大多呈灰白色,即在 RGB 三个通道的灰度值相差不大,通过通道作差,能有效地去除泥沙的干扰,保证了使用色调特征分割被非均匀泥沙干扰的裂缝缺陷的可行性。

由于水对光的选择性吸收,水下图像的 RGB 三通道都发生不同程度的衰减。为保证色调计算的准确性,减少水对光的吸收作用,不可避免地需要增加光照强度,而在完全黑暗的涵洞中增加光照强度,势必会使水下图像中存在严重的光照不均匀问题。

此外,由于涵洞中水体浑浊,水对光的散射问题变得更加严重,使整个图像呈现雾化效果,对比度较低。这些问题使得色调特征无法正常提取,因此在提取色调特征之前对图像进行增强,以保证色调特征的完整性和准确性。

色调特征增强与提取流程如图 1 所示。通过对对比度受限直方图均衡化(CLAHE)对水下图像进行对比度增强处理,强化细节信息;在保持纹理特征的同时使用引导滤波,去除图像噪声;采用改进的 Mask 匀光算法解决光照不均匀问题,便于提取色调特征;使用自适应权重图像融合增强色调特征。

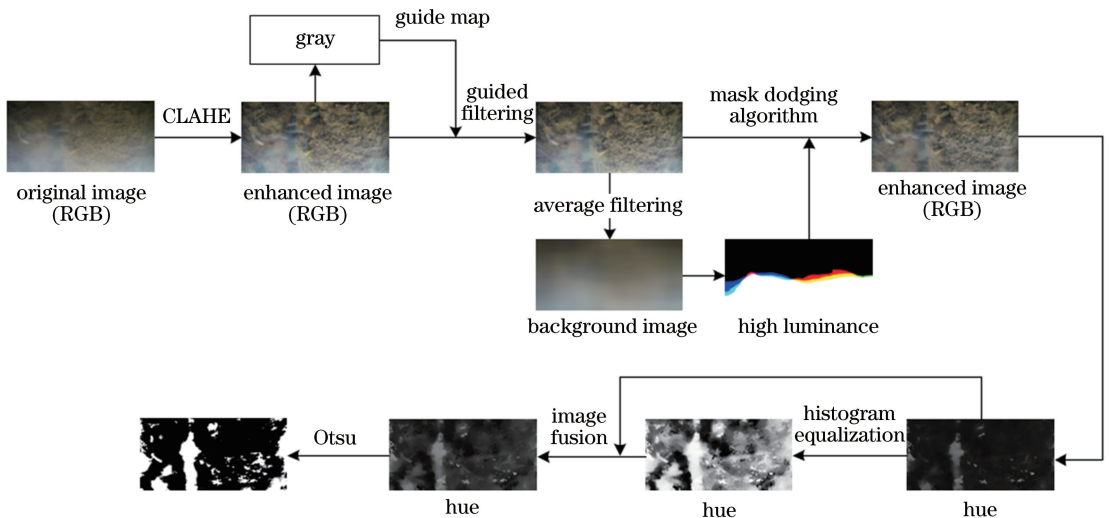


图 1 色调特征增强与提取流程图

Fig. 1 Flow chart of hue feature enhancement and extraction

2.1.1 图像细节增强及去噪

考虑到水下涵洞图像对比度低、细节模糊的现象,一方面,若直接进行滤波操作,即使使用引导滤波这种能较好保持边缘的滤波方式,也会造成一定的信息损失;另一方面,图像噪声并不明显,滤波效果有限,图像增强后噪声也同样会有所增强,后续依然需要去噪,所以调整去噪和增强的顺序,先增强再去噪,最大程度地保留细节信息。

针对自适应直方图均衡化(AHE)^[6]在增强局部区域细节时,对图像中相似区域过度放大噪声的问题,Pizer等^[7]提出了CLAHE算法。其主要思想是通过阈值限制局部直方图的高度来抑制噪声和对比度过度增强,从而增强图像细节,故选择CLAHE算法增强图像细节,而不过度放大噪声。

同时,受文献[8]的启发,使用引导滤波对图像进行去噪处理。由于引导滤波具有局部线性平滑保持边缘的滤波特性^[9],可在保持整体特征的基础上去除噪声,保证图像信息的完整性,很适合对水下纹理模糊的图像进行去噪处理。

与传统引导滤波不同的是,实验中并未使用未去噪图像自身作为引导图,而使用其灰度图像作为各个通道的引导图进行滤波处理。这是由于经过增强的水下图像,在细节得到增强的同时,噪声也随之增强。如果使用噪声严重的通道自身作为引导图进行滤波,难以达到去噪的效果。灰度图是通过三个通道加权求和获得,削弱了单个通道内的噪声,保留了较好的纹理特征,故选择使用灰度图作为引导图。

图2展示噪声较为严重的蓝色通道引导滤波前后的结果对比及使用不同引导图的引导滤波结果对比。图2(a)、2(c)和2(e)中分别标注两个方块,便于比较图像的局部区域;图2(b)、2(d)和2(f)分别为图2(a)、2(c)和2(e)中标注的局部放大图像。通过比较可以发现,使用蓝色通道自身作为引导图在引导滤波前后几乎看不到差别[图2(c)与图2(d)],而使用灰度图作为引导图在引导滤波后,蓝色通道的纹理特征保存较完整,噪声也得到有效的抑制[图2(e)与图2(f)]。

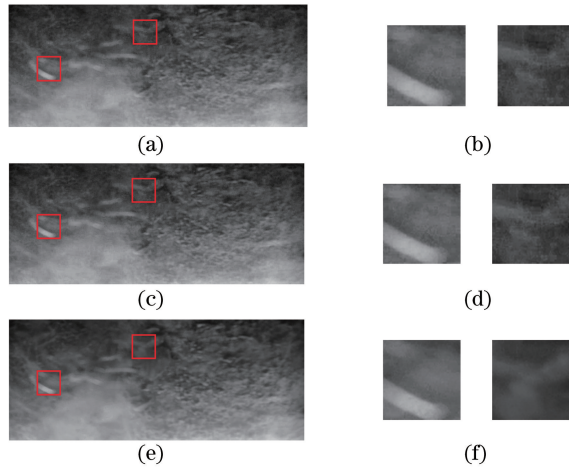


图2 引导滤波效果对比。(a)未滤波的蓝色通道;(b)图(a)的局部放大;(c)传统引导滤波效果;(d)图(c)的局部放大;(e)本文的引导滤波效果;(f)图(e)的局部放大

Fig. 2 Comparison of guided filtering effect. (a) Unfiltered blue channel; (b) partial enlargement of (a); (c) traditional guided filtering effect; (d) partial enlargement of (c); (e) proposed guided filtering effect; (f) partial enlargement of (e)

2.1.2 非均匀光照校正增强色调特征

针对光照不均匀的情况,采用Mask匀光法^[10]对增强后图像进行光照校正,且基于增强后图像的特性和算法自适应性,对其进行以下改动:1)出于计算资源的考虑,使用均值滤波获取背景图像;2)图像经CLAHE增强后,图像中较暗区域有了一定的缓解,而高亮区域依然影响色调特征的提取,故实验只对高亮区域进行光照修正,具体的方法如下。

经CLAHE增强后的图像 W 作均值滤波获取

背景图像 A ^[11]。将 A 的均值作为阈值 T ,获取高亮区域 L ,可用公式表示为

$$T^c = \frac{1}{M \times N} \sum_{i \in A^c} A_i^c, \quad \forall c \in \{R, G, B\}, \quad (3)$$

$$L_i^c = \begin{cases} 0, & A_i^c \leq T^c \\ A_i^c - T^c, & A_i^c > T^c \end{cases}, \quad (4)$$

式中: M 和 N 为 A 的高和宽; A_i^c 和 L_i^c 为 A 和 L 中各通道对应的像素 i 的像素值。则非均匀光照校正后的图像 I 为

$$I_i^c = W_i^c - L_i^c, \quad i \in W. \quad (5)$$

2.1.3 自适应权重图像融合增强色调特征

由于水体的散射及对光的选择性吸收,水下图像的色调特征图普遍偏暗,特征图对比度低,特征不明确。直接使用直方图均衡化(HE)拉伸对比度,会出现过度拉伸的情况,导致一些边缘丢失,影响特征的正确提取,实验使用像素级融合技术结合 HE 处理后的图像对色调图像进行像素补偿^[12]。考虑到算法复杂度和处理时间,选择像素加权平均法(WA)作为融合方法,可用公式表示为

$$H_{\text{fuse}} = \omega_1 H' + \omega_2 H, \quad (6)$$

式中: H_{fuse} 为融合后的色调特征图; H' 为 HE 处理后的色调特征图; H 为提取的色调特征图; ω_1 和 ω_2 为加权系数,且满足 $\omega_1 + \omega_2 = 1$ 的条件。权值的选取比较关键, ω_1 选取过大会导致对比度增强过度,丢失边缘信息; ω_1 选取过小则无法有效地增强色调图像的对比度,不利于后续分割操作。为了算法的

鲁棒性,使用自适应权重像素加权平均法。权重计算方式为

$$m_H = \frac{1}{M \times N} \sum_{i \in H} H_i, \quad (7)$$

$$m_{H'} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i \in H'} H'_i, \quad (8)$$

$$\omega_1 = \frac{m_H}{m_H + m_{H'}}, \quad \omega_2 = \frac{m_{H'}}{m_H + m_{H'}}, \quad (9)$$

式中: m_H 为 H 的均值; $m_{H'}$ 为 H' 的均值。将计算得到的 ω_1 和 ω_2 代入(6)式,得到融合结果。

2.2 目标区域获取方法

根据提取的色调特征,利用自适应 Otsu 法^[13]进行初步粗分割,分割结果如图 3 所示。涵洞在长年运营后,洞壁不仅产生裂缝,还因为水流的冲击和腐蚀变得凹凸不平。而这些凹陷与裂缝在色调特征上存在极大的相似性,所以需要其他约束条件来获取裂缝区域。

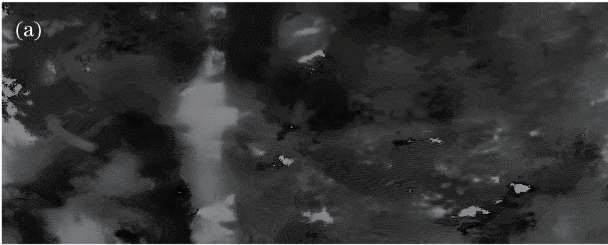


图 3 粗分割结果。(a)增强后的色调特征图;(b)粗分割结果图

Fig. 3 Rough segmentation results. (a) Enhanced hue feature map; (b) rough segmentation result

在粗分割的基础上,先采用 Suzuki 等^[14]提出的算法对分割结果提取图像各区域块的轮廓,获取各区域块的点集,再利用空域区域特征作为约束条件筛选图像各区域块,获取裂缝缺陷所在区域。经反复观察,选用连通域面积和连通域像素均值作为区域特征。具体步骤如下。

1) 提取增强后的色调特征图进行自适应 Otsu 二值化,完成粗分割。

2) 在粗分割的结果图像上提取区域块的轮廓,将图像划分成不同的候选区域。设候选区域的点集为 Ω_i ,则所有候选区域 $\Omega = \{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_n\}$ 。

3) 在经非均匀光照校正后的图像上,获得集合 Ω 对应应在 RGB 图像上的区域集合 Ω' ,则 $\Omega' = \{\Omega'_1, \Omega'_2, \dots, \Omega'_n\}$ 。

4) 分别计算集合 Ω' 中每个区域的面积 S_i 和均值 M_i 。

5) 分别对集合 Ω' 中每个区域打分 s_i 。由于均值 M_i 的取值范围为 $0 \sim 255$,而面积 S_i 的值往往上

万,为了保持均值和面积相近的影响力,所以对面积 S_i 进行开方处理,增大均值的影响。 s_i 计算公式为

$$s_i = \frac{M_i}{\sqrt{S_i}}, \quad i \in [1, n]. \quad (10)$$

6) 选择分数最低的区域作为所选择的裂缝区域,完成分割。

综上所述,提出的涵洞裂缝缺陷分割算法分为两步:一是通过图像增强、滤波和融合等方法来增强色调特征,以保证色调提取的准确性和完整性,并在此基础上实现对水下图像的粗分割;二是利用连通域面积和连通域像素均值这两个空域特征筛选粗分割结果,获得裂缝分割结果。

3 实验结果与对比分析

为了验证分割算法的有效性及其实用性,主要选取悬浮颗粒明显分布不均匀及有缺陷的水下涵洞图像作为实验图像,与阈值分割类算法和其他类分割算法作比较,并从定性和定量两方面评价算法的分

割效果。算法采用 Python 语言进行计算,实验配置参数如表 1 所示。

表 1 实验相关参数

Table 1 Experimental parameters

Type	Item	Value
Software	Operating system	Win 10
Hardware	CPU	Intel(R) Core(TM) i7-8700 CPU @ 3.20 GHz 3.19 GHz
	RAM	16 G
Experimental parameters	Guided filtering radius	20
	Mean filtering window size	1/4 of the image size
	Median filtering kernel size	5

3.1 主观视觉评价

定性评价以主观评价为主,主要根据缺陷在图像中的视觉效果进行分析讨论,观察各算法是否能分割出裂缝缺陷。

粗分割是本文裂缝缺陷分割的基础。只有良好的粗分割结果,才可准确分割裂缝缺陷,故先对粗分割结果进行实验比较,说明算法的分割有效性。

Otsu 法、最大熵分割及局部自适应阈值(AT)法是常见的基于阈值的分割算法,其中前两者为单阈值分割,后者为自适应阈值分割,分割效果如图 4 所示。

图 4(b)和 4(c)均是在图像进行 CLAHE 增强后,对灰度图像进行分割的结果,虽都受到光照不均匀的影响,但文献[15]中使用的 Otsu 法的分割效果

在涵洞图像中明显优于最大熵分割,这是因为涵洞图像中的干扰信息过多,导致熵值不能很好地区分前景和背景并作出分割。

而局部 AT 法虽然可通过图像的局部特征自适应地设定阈值,作出二值化处理,消除非均匀光照的影响,但依旧存在分割不准确的问题。如图 4(d)所示,局部 AT 法对于水中非均匀分布的悬浮颗粒很敏感,对于较浓的悬浮颗粒遮挡的缺陷无法完整分割,缺陷区域被分割得很破碎,与周围环境无法完全分隔开,即没有清晰的边缘轮廓。相比之下,所提算法能够通过色调特征粗分割清晰地分割出裂缝缺陷,较大程度上消除不均匀光照和不均匀悬浮颗粒分布对缺陷分割的影响,如图 4(e)所示。

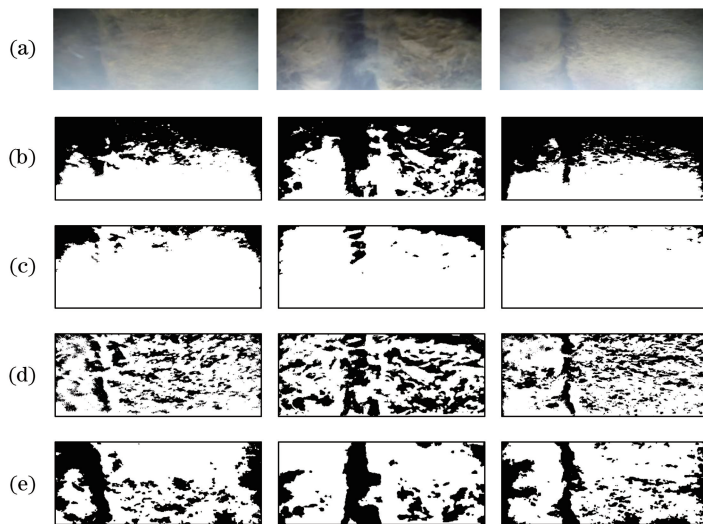


图 4 阈值法分割效果对比。(a)原图;(b)文献[15];(c)最大熵分割法;(d)局部 AT 法;(e)本文算法粗分割结果

Fig. 4 Comparison of threshold segmentation effect. (a) Original images; (b) in Ref. [15]; (c) maximum entropy segmentation; (d) local AT method; (e) our rough segmentation

除了阈值分割法,还有基于区域的分割方法和基于能量泛函的分割方法,以分水岭法和 C-V 主动轮廓法为例进行对比实验,分割效果如图 5 所示。

由图 5(b)可以看到,分水岭法受到光照不均匀的严重影响。由于光照的影响,分水岭算法在

选择“分水岭”时就定位出错,造成分割失败。文献[16]在 CLAHE 算法的基础上使用了 C-V 主动轮廓法对灰度图像进行分割,非均匀光照对于图像能量的计算依旧有影响,并不能排除非均匀悬浮颗粒对缺陷遮挡的影响,如图 5(c)所示。

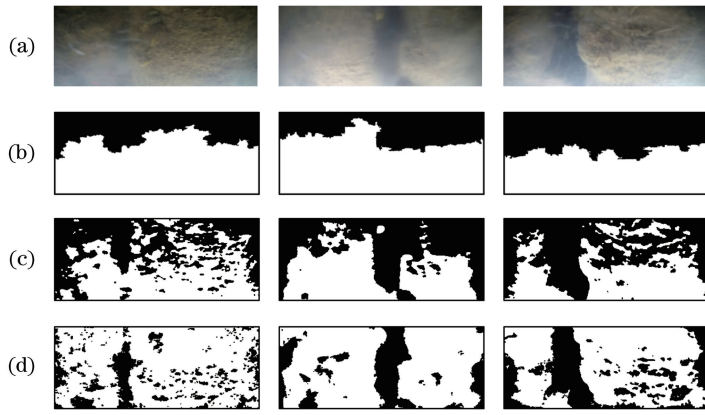


图5 分割效果对比。(a)原图;(b)分水岭分割算法;(c)文献[16];(d)本文算法粗分割结果

Fig. 5 Comparison of segmentation effect. (a) Original images; (b) watershed segmentation algorithm; (c) in Ref. [16]; (d) our rough segmentation

图6展示在图4(e)与图5(d)粗分割基础上,所提裂缝缺陷分割算法的分割结果。可以发现,由于所提算法使用增强后的色调特征作为分割基础,所以对颜色高敏感性的色调变量使算法对缺陷的边缘十分敏

感。如图6图像3和6的两张图所示,算法将裂缝缺陷边缘的凹陷也一并分割出来,计算裂缝宽度时,会有一定误差。但该算法在一定程度上排除不均匀悬浮颗粒对缺陷的遮挡,达到较好的分割效果。

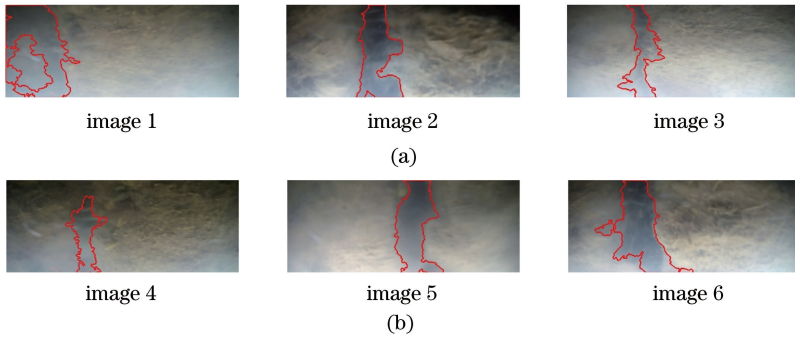


图6 本文分割算法结果。(a)基于图4(e)的分割结果;(b)基于图5(d)的分割结果

Fig. 6 Segmentation results of proposed method. (a) Segmentation results based on figure 4(e); (b) segmentation results based on figure 5(d)

3.2 客观评价

为了进一步说明实验效果,对实验图像进行客观评价,采用人工对待检测图像分割的裂缝目标作为真实值,灵敏度(S_e)、特异性(S_p)和准确度(A_c)三个统计参数^[17-18]来量化算法分割目标的结果与真实值的差异。

灵敏度和特异性早期用在医疗统计数据报告中,近年来其统计思想被用作图像分割算法评价的金指标,并在此基础上提出了准确度指标,计算表达式分别为

$$S_e = \frac{T_P}{T_P + F_N}, \quad (11)$$

$$S_p = \frac{T_N}{T_N + F_P}, \quad (12)$$

$$A_c = \frac{T_P + T_N}{T_P + T_N + F_P + F_N}, \quad (13)$$

式中: T_P 为算法分割得到的目标与目标真实值相交区域的像素数; T_N 为算法分割得到的背景与背景真实值相交区域的像素数; F_P 为算法分割得到的目标与背景真实值相交区域的像素数; F_N 为算法分割得到的背景与目标真实值相交区域的像素数。

在主观评价中表现良好的文献[16]的算法、局部自适应阈值分割算法和所提算法对图6(a)图像1~3进行定性指标计算对比,计算结果如表2所示。通过对比可以看到所提算法对涵洞裂缝缺陷分割的准确率较其他两种算法高,且比较稳定。AT算法和文献[16]算法均不能去除悬浮颗粒的干扰,所以分割效果并不稳定,这取决于图像受干扰程度。此外,AT算法虽不受光照条件的影响,但对局部的灰度变化十分敏感,所以有时分割灵敏度较低,而文献[16]算法由于没有去除非均匀光照的影响,所以

表2 图像分割性能定性指标

Table 2 Image segmentation performance qualitative index

Image	Method	$S_e/\%$	$S_p/\%$	$A_c/\%$
1	Ref. [16]	70.726	95.600	91.467
	AT	10.486	99.911	85.052
	Proposed method	82.050	96.623	94.217
2	Ref. [16]	76.905	97.926	94.403
	AT	44.181	99.730	90.421
	Proposed method	73.221	99.848	95.418
3	Ref. [16]	85.245	51.726	53.597
	AT	54.322	99.420	96.902
	Proposed method	94.202	97.708	97.514

有时分割特异性低,这取决于图像的光照质量。

4 结 论

针对水下涵洞缺陷被非均匀分布的悬浮颗粒遮挡,干扰缺陷分割的问题,提出了一种基于增强色调特征的缺陷分割算法。根据水下降质图像的特点,选用接近人体视觉观察方式的色调特征作为分割的基础,通过针对性的增强方法拉伸对比度后,完成图像粗分割。针对图像背景中凹陷的干扰问题,提出基于空域的裂缝目标区域获取方法,利用连通域面积和像素均值作为约束,完成分割。实验结果表明,所提算法能有效地解决水中悬浮颗粒对缺陷检测的干扰问题,分割的准确性和稳定性较好。

参 考 文 献

- [1] Chen X. Research on surface defect detecting techniques and system integration for underwater structures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
陈勋. 水下结构表面缺陷检测技术及系统集成研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [2] Guo J C, Li Z Y, Guo C L, et al. Research progress of underwater image enhancement and restoration methods[J]. Journal of Image and Graphics, 2017, 22(3): 273-287.
郭继昌, 李重仪, 郭春乐, 等. 水下图像增强和复原方法研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2017, 22(3): 273-287.
- [3] Zhang M J, Li X, Wang Y J. Underwater color image segmentation based on weight adjustment for color-to-gray [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(5): 707-713.
张铭钧, 李焯, 王玉甲. 基于灰度化权值调整的水下彩色图像分割[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(5): 707-713.

- [4] Peng F Y, Yang G L, Li X T. Underwater image segmentation using local regularity and increment feature [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2008, 36(2): 82-84.
彭复员, 杨国良, 李旭涛. 基于增量特征和局部奇异性的水下图像分割法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(2): 82-84.
- [5] Li S L, Huang M X. Research of underwater image segmentation algorithm based on the improved geometric active contour models [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2019, 40(3): 671-675.
李社蕾, 黄梦醒. 改进几何活动轮廓模型的水下图像分割算法研究[J]. 小型微型计算机系统, 2019, 40(3): 671-675.
- [6] Tom V T, Wolfe G J. Adaptive histogram equalization and its applications [J]. Proceedings of SPIE, 1983, 539: 204-209.
- [7] Pizer S M, Amburn E P, Austin J D, et al. Adaptive histogram equalization and its variations [J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1987, 39(3): 355-368.
- [8] Cui Q N, Tian X P, Wu C M. Improved algorithm of haze removal based on guided filtering and dark channel prior[J]. Computer Science, 2018, 45(5): 285-290.
崔倩男, 田小平, 吴成茂. 基于引导滤波改进的暗原色去雾算法[J]. 计算机科学, 2018, 45(5): 285-290.
- [9] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [10] Li S, Wang H, Wang L Y, et al. Adaptive dodging method based on variational mask for remote sensing images[J]. Journal of Remote Sensing, 2018, 22(3): 450-457.

- 李烁, 王慧, 王利勇, 等. 遥感影像变分 Mask 自适应匀光算法[J]. 遥感学报, 2018, 22(3): 450-457.
- [11] Wang G R, Fan X N, Shi P F, et al. Underwater dam crack image enhancement algorithm based on rough set[J]. Computer and Modernization, 2015(9): 35-41.
- 汪耕任, 范新南, 史朋飞, 等. 基于粗糙集理论的水下大坝裂缝图像增强算法[J]. 计算机与现代化, 2015(9): 35-41.
- [12] Zhang C, Yang Y. Single image dehazing algorithm based on fusion and Gaussian weighted dark channel[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(1): 0110002.
- 张晨, 杨燕. 基于融合与高斯加权暗通道的单幅图像去雾算法[J]. 光子学报, 2019, 48(1): 0110002.
- [13] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [14] Suzuki S, Be K. Topological structural analysis of digitized binary images by border following [J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1985, 30(1): 32-46.
- [15] Kumar Rai R, Gour P N, Singh B. Underwater image segmentation using CLAHE enhancement and thresholding[J]. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2012, 2(1): 118-123.
- [16] Qiao X. Sea cucumber identification in real-time based on underwater machine vision technique[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.
- 乔曦. 基于水下机器视觉的海参实时识别研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [17] Tamura H, Shunji M, Yamawaki T. Textural features corresponding to visual perception[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1978, 8(6): 460-473.
- [18] Teimouri N, Omid M, Mollazade K, et al. A novel artificial neural networks assisted segmentation algorithm for discriminating almond nut and shell from background and shadow [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 105: 34-43.