

基于图像处理技术的水下结构物表面 缺陷检测统计方法

包龙生¹,赵春艳¹,于玲¹,赵同宇²

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 辽阳市政设施管理处,辽宁 辽阳 111000)

摘要 针对水下结构物在服役过程中产生的破损情况,提出一种能够定量检测水下结构物缺陷信息的方法。**方法** 利用暗通道算法进行图像的亮度提升,过滤多余的细节,增强重要的细节,再利用 Gabor 金字塔理论算法将经暗通道增强的图像进行进一步处理,得到突出细节的图像,最后利用得到的图像,进行表面缺陷面积统计。**结果** 图像中白色像素点为表面缺陷的位置,白色分为三种层次,纯白、接近纯白、较白,经统计后,分别占比为 2.97%、1.23%、2.38%,得出病害所占比为该检测面积的 6.59%。**结论** 经过实际操作验证,融合了暗通道与 Gabor 金字塔理论的图像处理可以达到较好地突出图像细节的目的,进而达到水下结构物表面缺陷检测的目的。

关键词 水下结构物;暗通道理论;Gabor 金字塔理论;定量检测缺陷信息

中图分类号 TU997 文献标志码 A

Statistical Method of Underwater Structure Surface Defect Detection Based on Image Processing Technology

BAO Longsheng¹, ZHAO Chunyan¹, YU Ling¹, ZHAO Tongyu²

(1. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Liaoyang Municipal Facilities Management Office, Liaoyang, China, 111000)

Abstract: Aiming at the damage situation of underwater structures when they are working, a method for quantitatively detecting the defect information of underwater structures is proposed. The method uses dark channel algorithm to enhance image brightness, filter out redundant details, and enhance important details. The Gabor pyramid algorithm is used to further process the enhanced dark channel image to obtain an image with prominent details. Finally, the obtained image is used for surface defect area statistics. The white pixels in the resulting image are the locations of surface defects. White is divided into three layers, pure white, close to pure white and relatively white. Statistics show that the percentages are 2.97%, 1.23% and 2.38% respectively. The conclusion is

收稿日期:2019-07-27

基金项目:“十三五”国家重点研发计划重点专项基金项目(2018YFC0809606);辽宁省重点研发计划指导计划基金项目(2018416028);沈阳市建委城乡系统科研项目(201804)

作者简介:包龙生(1971—),男,教授,博士,主要从事桥梁工程结构方面研究。

that the disease accounts for 6.59% of the tested area. After actual experimental operation, image processing combined with dark channel and Gabor pyramid theory can better highlight image details, so as to achieve the purpose of detecting surface defects of underwater structures.

Key words: underwater structure; dark channel theory; Gabor pyramid theory; detect defect information quantitatively

水下结构物在长期使用过程中,由于海浪及环境荷载的作用,大多数会存在不同程度冲刷、腐蚀等病害^[1-3]. 结构构件出现缺陷后截面应力增加、强度减小、承载能力降低,威胁结构的运行^[4-5]. 因此为保证水下结构物使用期间的安全与可靠性,定期对其进行检测显得尤为必要. 常用的水下检测方法有水下超声波探伤^[6]、水下磁粉探伤^[7]、电场特征检测法,上述方法多应用于水下金属结构物检测. 目前对非金属水下结构物的检测主要是水下成像技术,但是该方法一般对水质要求较高,且未对病害进行定量的分析^[8-9]. K. M. HE 等^[10]提出了暗通道优先法原则,通过事先估计大气透射率解决了雾气浓度难以估计的问题. 统计结果表明绝大部分户外照片利用该法则得到了很好的去雾效果,但该方法应用于水下图像时在处理效果上容易产生块状效应,影响图片处理效果.

M. L. Smitha 等^[11]提出基于对比度受限的直方图均衡化算法,该算法操作简单,但将该方法应用于水下图像时,获得的图片亮度、对比度低,处理效果不理想. G. F. MENG 等^[12]提出一种边界约束算法,该方法应用于陆上雾天图像有较好的处理效果,但该方法应用于场景中存在白色物体的水下时,其图像处理效果存在对比度低,亮度过饱和问题. B. Y. LI 等^[13]提出基于 CNN 的一体化去雾网络,在去雾过程中可以避免颜色的扭曲失真,但是将其应用于水下结构物表面缺陷检测时处理的效果图亮度太低.

为解决陆上去雾算法应用于水下图像时获取的图像存在对比度低问题,笔者采用基于融合暗通道与 Gabor 金字塔的图像处理技

术对采集的水下结构物图像进行分析处理,使病害位置颜色变成白色,完好部分颜色变成黑色,突出病害位置. 依据病害位置颜色的不同,进行缺陷信息的定量分析. 融合暗通道与 Gabor 金字塔的图像处理技术可为水下构筑物检测提供新思路,具有实际指导意义.

1 水下光传播及成像模型

文献[14]表明,太阳光在水下传播过程中,能量损失严重. 故一般情况下水下拍照需人工光源辅助. 即使有光源的辅助,在深水水下传输的过程中依旧存在能量被水吸收、发生反射和散射,使能量发生严重的衰减,进而造成采集的图像质量不高,图像中具有目标与背景对比度不高、图像细节纹理模糊、光照不足情况下目标边缘难以从背景中提取分离的特点,图像中存在大量噪声,存在受水下非均匀光视场影响而造成的图像的亮度不均匀等问题^[15].

经典的 Jaff-McGlamery 成像模型表明^[16-17],从光源发出的光线到达照相机后能量分为直接被反射的光(直流分量 I_d)、发生小角度反射的光(前散射分量 I_f)、干扰反射的光(后散射分量 I_b),总辐照强度为

$$I_r = I_d + I_f + I_b. \quad (1)$$

Jaff-McGlamery 成像模型是在假定光线从光源出发,以球状向外扩散并伴有能量衰减的基础上建立的,反射光可为入射和反射函数的乘积,文献[18]中对直流分量 I_d 、前散射分量 I_f 、后散射分量 I_b 进行了详细推导.

2 图像处理

笔者采用暗通道图像增强进行去雾处

理^[10],然后再用 Gabor 金字塔理论做进一步细节增强,获得具有细节突出的目标图像.处理原图来自文献[19],为水下结构裂隙图片.

2.1 暗通道图像增强

一幅图像中,大多存在不少于一个具有很低值的颜色通道,在此区域中存在一个相当小的数代表该区域的最小光强.对一输入图像 I ,有暗通道表达式:

$$I^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} (\min_{c \in \{r, g, b\}} I^c(y)). \quad (2)$$

式中: I^c 为彩色图像的每个通道; $\Omega(x)$ 为像素 x 为中心的小区域.

计算机视觉和计算机图形中雾图形成模型为

$$I(x) = K(x)p(x) + S(1 - p(x)). \quad (3)$$

式中: $I(x)$ 为现有待处理图像; $K(x)$ 为目标图像; S 为水下光成分, $S = A \times a$, a 为大气中光在水中的折减系数; $P(x)$ 为透射率.

对式(3)进行变形得:

$$\frac{I^{R/G/B}(x)}{S^{R/G/B}} = \frac{K^{R/G/B}(x)p(x)}{S^{R/G/B}} + 1 - p(x). \quad (4)$$

对式(4)两边取最小值, $P(x)$ 可定义为

$$\tilde{P}(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} (\min_{R/G/B} \frac{I^{R/G/B}(y)}{S^{R/G/B}}). \quad (5)$$

式中: ω 为去雾因子,可取 $[0, 1]$ 之间的数.考虑到要获取的是更加清晰的图像,去雾因子取 $\omega = 1$.

最终的恢复公式为

$$K(x) = \frac{I(x) - S}{\max(t_0, t(x))} + S. \quad (6)$$

笔者采用的原图为水下结构裂隙图.图1为因水质浑浊而导致水下堤坝裂缝图像弱化图像,可以看出裂隙边界存在因水质浑浊而导致的不清晰问题.图2为传统暗通道算法过程中去除最小 RGB 图像结果.图3为图像透射率分布图.图2与图3均为传统暗通道去雾过程中获得的图像.图4为传统暗通道算法处理效果图.



图1 未处理原图

Fig. 1 Original image



图2 原图去除最小 RGB 图像结果

Fig. 2 After the minimum RGB image is removed



图3 图像透射率分布图

Fig. 3 Transmittance distribution of the image



图4 传统暗通道算法处理效果

Fig. 4 Image processed by the traditional dark channel algorithm

从图4中可看到,传统暗通道算法处理的效果图中裂隙部分颜色加深,但背景部分颜色也随之变深,使对比度增强效果不明显.但相比于图1,裂隙部分与完好部分对比有小幅改善.

2.2 Gabor 金字塔算法

Gabor 金字塔选用高斯函数的短时距傅里叶变换^[20-21]. 其特征为 Gabor 变换后性质不变, 可利用该性质使 Gabor 变换处理后图像在时间轴和频率轴具有相互对称的特点, 同时提供时域和频域局部化的信息. 图 5 为高斯函数三维图像, 图 6 为傅里叶二维函数图像.

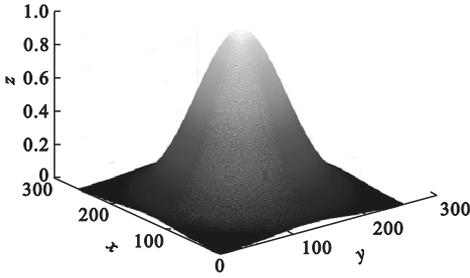


图 5 高斯函数三维图像

Fig. 5 The 3D image of Gaussian function

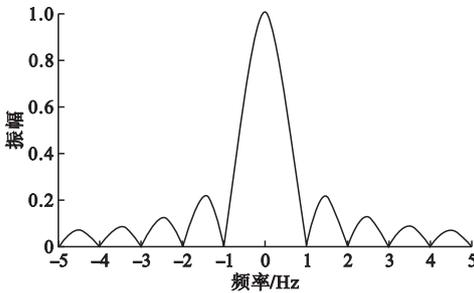


图 6 傅里叶二维函数图像

Fig. 6 The 2D image of Fourier function

将短时距 Fourier 变换的窗函数带入高斯函数, 得:

$$Gx(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\pi(\tau-t)^2} e^{-j2\pi f\tau} x(\tau) d\tau. \quad (7)$$

在式(7)中加入高斯窗函数的宽度变函数, 增加转换弹性, 则有:

$$Gx(t, f) = \sqrt[4]{\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\sigma\pi(\tau-t)^2} e^{-j2\pi f\tau} x(\tau) d\tau. \quad (8)$$

式中: σ 增大, 高斯窗函数变窄, 则时间轴分辨率增加, 频率轴的分辨率下降. 反之, σ 减小, 高斯窗函数变宽, 则时间轴的分辨率下降, 频率轴的分辨率增加.

采用暗通道增强后的效果图像(见图 4)作为 Gabor 金字塔处理的基础图像. 利用 Gabor 金字塔算法得到视觉显著模型的方向特征图.

建立具有 5 层的金字塔图像结构模型. 对每层图像进行减半运算来获取下一层模型的原始图像. 在获取各层图像结构模型后, 将每一层结构模型的图像分别采用滤波运算, 最终获取水平和垂直方向两张图像. 因此共获得 10 张处理效果图(见图 7(b)~(k)). 同时获得最终处理效果图(见图 7(1)). 可以看出, 在最终图像中深色部分是完好的区域, 而裂隙病害区域则颜色相对较浅.

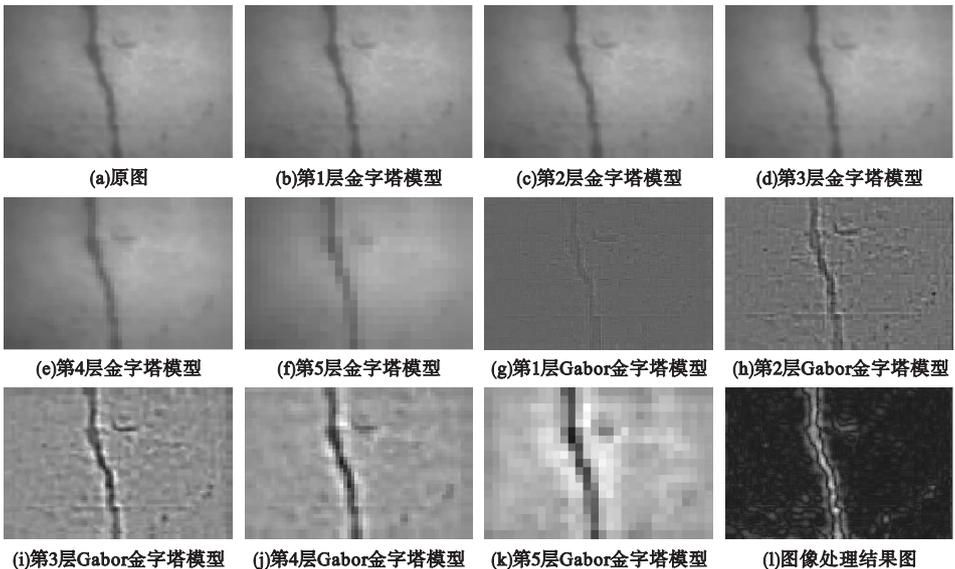


图 7 程序调试过程图

Fig. 7 The image of the debugging process

通过图7可以看出,最终获取的图像裂隙病害部位颜色较原图变白明显,其他完好部位颜色变成黑色.在视觉上,增加了裂隙部位与完好部分的对比度,使图像处理效果达到预期期望.

2.3 不同算法下图片处理效果对比

对泥土干扰的裂隙图像采用 He 算法^[10]、直方图均衡化算法^[11]、边界约束算法^[12]、AOD-Net 算法^[13]和笔者提出的算法进行处理后的结果进行视觉效果展示,结果

如图8所示.从图8可以看出,He 算法处理的效果图、直方图均衡化算法处理的效果图和AOD-Net算法处理的效果图均存在亮度降低的问题,在裂隙部分与其他完好部分的对比上,没有明显增强效果.边界约束算法处理的效果图不仅对比度没有得到有效增强,还明显出现了“图片失真”的现象,使细节信息显示很差.相比之下,笔者算法所呈现出的效果图在裂隙部分与其他完好部分具有更高的对比度.

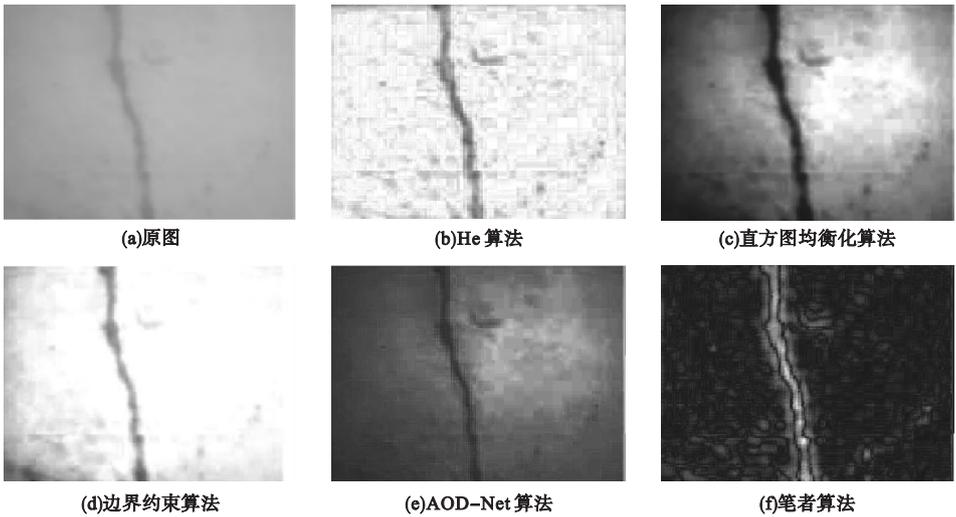


图8 不同算法处理效果对比图

Fig. 8 Images obtained using different algorithms

2.4 不同算法图像效果的客观评价

将笔者提出去雾技术的最终恢复结果与已有技术进行图像质量评价,选取平均梯度作为质量客观评价指标.图像中细节对比度以及图像的清晰度均可通过平均梯度值表现出来.一副图像的平均梯度值越大,说明其图像层次越丰富,变化越多,图像越清晰.

平均梯度计算式如下:

$$G = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sqrt{\frac{(\frac{\partial f}{\partial x})^2 + (\frac{\partial f}{\partial y})^2}{2}} \quad (9)$$

式中: $M \times N$ 表示图像的大小; $\frac{\partial f}{\partial x}$ 表示水平方向的梯度; $\frac{\partial f}{\partial y}$ 表示垂直方向的梯度.

裂缝图像的质量客观评价指标如图9所

示.从图中可以看出,笔者提出技术的平均梯度值在所有技术中最大,即图像层次丰富,图像清晰.表明笔者所提出的图像增强技术在清晰度方面有较好增强效果,符合人眼的视觉观察特性,可以满足图像增强预期效果.

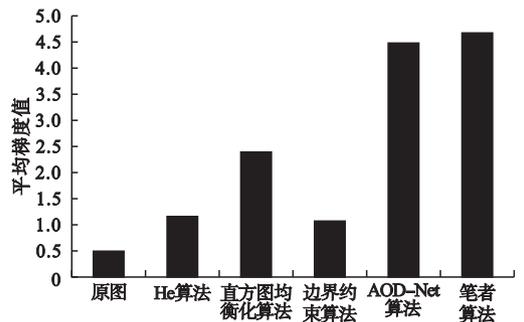


图9 平均梯度值对比图

Fig. 9 Comparison of average gradient values

3 缺陷面积统计

笔者对融合暗通道与 Gabor 金字塔算法处理的图像效果图进行病害的定量分析. 通过图 7(1) 可得, 最终处理效果图裂隙病害部位颜色为白色, 其他完好部位颜色为黑色, 可清晰地观察到水下结构物表面缺陷信息. 故统计图中白色像素占整幅图像的比率, 便可对病害进行定量分析.

3.1 像素尺寸的标定

通过尺寸标定, 获得每个像素点的尺寸, 进而在表面缺陷标识步骤可依据像素点进行运算得出实际尺寸.

标定时, 多选取水下结构物特征尺寸或者具有辨识度的位置进行, 如式(10):

$$B = \frac{L}{N}. \quad (10)$$

式中: L 为依据水下结构物的设计资料获取的结构尺寸; N 为对实际结构中相同设计尺寸位置进行拍照, 获取图像宽度的像素个数; B 为单像素点表示的实际尺寸.

因在实际操作中会有缩小、放大的变形操作, 故将式(10)进行优化得:

$$B = c \frac{L}{N}. \quad (11)$$

式中: c 为实际缩放比与缩放后照片的像素尺寸值之比.

最终图像反映的实际面积如式(12):

$$A = B \times N. \quad (12)$$

式中: A 为图像反应的实际面积; B 为单像素点表示的实际尺寸; N 为依据图纸选取实际结构中相同设计尺寸的不同位置进行拍照, 并对获得的图像求取均值得到宽度像素数.

3.2 缺陷面积统计结果

对融合暗通道与 Gabor 金字塔算法处理的图像(见图 7(1))进行裂隙病害的统计, 即统计图像中白色像素. 考虑到 RGB 图像中颜色值范围是 $[0, 255]$, 而人眼对微小的颜色差值变化不敏感. 故将裂隙病害部位的颜色

值分为纯白、接近纯白、较白、纯黑 4 类进行统计. 其中纯白像素值 2 342, 接近纯白像素值 971, 较白像素值 1 886, 纯黑像素值 73 577, 分别占比为 2.97%、1.23%、2.39%、93.41% (见图 10). 根据数据不难得出, 表面缺陷所占比为该检测面积的 6.59%. 表面缺陷面积为 $A \times 6.59\%$.

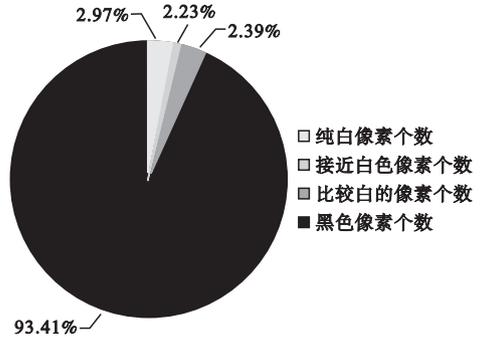


图 10 目标图像中各类像素点比率图

Fig. 10 The ratio of all kinds of pixels in the target image

4 结论

(1) 笔者提出的算法处理后图像具有较高细节突出特点, 可实现水下结构物表面病害定量检测的目的, 并且客观评价中也体现出一定优势, 可对图像去雾算法研究提供参考.

(2) 经验证, 本算法的图像处理效果满足要求, 但融合暗通道与 Gabor 金字塔的图像处理技术处理后的图像仍然存在干扰信息, 还需要在日后的研究中加以改进.

参考文献

- [1] 张学峰. 跨海大桥主墩基础损伤分析及检测评价技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
(ZHANG Xuefeng. Research on sea-crossing bridge main pier pile foundations damage analysis and detection evaluation technology [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.)
- [2] 万至达, 张学武, 盛金保, 等. 水下结构物表面缺陷的仿生双目视觉测量[J]. 水利水运工程学报, 2019(2): 71-78.
(WAN Zhida, ZHANG Xuwu, SHENG

- Jinbao, et al. Bionic binocular vision measurement of surface defects of underwater structures[J]. Hydro-science and engineering, 2019(2):71-78.)
- [3] 李伟,齐昌超,崔铭芳,等.水下结构物缺陷检测实验系统设计与测试[J].实验技术与管理,2019,36(12):36-39.
(LI Wei, QI Changchao, CUI Mingfang, et al. Design and test of underwater structure defect detection system[J]. Experimental technology and management, 2019, 36(12):36-39.)
- [4] 耿荣生,景鹏.绿色无损检测;NDT技术的未来发展之路[J].无损检测,2011(9):1-6.
(GENG Rongsheng, JING Peng. Green non-destructive testing: The future of NDT techniques[J]. Nondestructive testing, 2011(9):1-6.)
- [5] SUN Y H, KANG Y H, QIU C. A new NDT method based on permanent magnetic field perturbation[J]. NDT & E international, 2011, 44:1-7.
- [6] 张宇天,汪可盼,李世平,等.超声波在桥箱梁混凝土缺陷检测中的应用[J].湖北工业大学学报,2018,33(1):112-115,120.
(ZHANG Yutian, WANG Kepan, LI Shiping, et al. Ultrasonic testing technology in the application of concrete box girder bridge defect detection[J]. Journal of Hubei university of technology, 2018, 33(1):112-115, 120.)
- [7] BO L K, XIONG J Y, MA S Q. Sequential inversion of self-noise using adaptive particle filter in shallow water[J]. The journal of the acoustical society of america, 2018, 143(4):2487-2500.
- [8] JAFFE J S. Underwater optical imaging: the past, the present, and the prospects[J]. IEEE journal of oceanic engineering, 2015, 40(3):683-700.
- [9] 陆宝春,李建文,陈吉朋,等.荧光磁粉探伤自动缺陷识别方法研究[J].南京理工大学学报(自然科学版),2010,34(6):803-808.
(LU Baochun, LI Jianwen, CHEN Jipeng, et al. Automatic flaw recognition method of fluorescent magnetic detection[J]. Journal of Nanjing university of science and technology (nature science), 2010, 34(6):803-808.)
- [10] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2011, 33(12):1956-1963.
- [11] SMITHA M L, SHEKAR B H. Illumination invariant text recognition system based on contrast limit adaptive histogram equalization in videos images[C]. Proceedings of the third international symposium on women in computing and informatics, ACM, 2015.
- [12] MENG G F, WANG Y, DUAN J, et al. Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization[C]. IEEE international conference on computer vision. Sydney: IEEE, 2014.
- [13] LI B Y, PENG X L, WANG Z Y, et al. An all-in-one network for dehazing and beyond[J]. Journal of latex class files, 2015, 14(8):1-12.
- [14] 张辉.水的光学特性对水下光学成像质量影响的分析[J].电子测试,2013(20):261-262.
(ZHANG Hui. Analysis of optical properties of water on the influence of optical imaging quality under water[J]. Electronic test, 2013(20):261-262.)
- [15] 白继嵩.水下图像处理及目标分类关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.
(BAI Jisong. Research on key technology of underwater image processing and targets classification[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.)
- [16] 侯国家.水下图像增强与目标识别算法研究[D].青岛:中国海洋大学,2017.
(HOU Guojia. Research on underwater image enhancement and object recognition algorithms[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2017.)
- [17] CENTENO J A S, HAERTEL V. An adaptive image enhancement algorithm[J]. Pattern recognition, 2014, 30(7):1183-1189.
- [18] HE K M, SUN J, TANG X O. Guided image filtering[J]. IEEE transactions on pattern analysis & machine intelligence, 2013, 35(6):1397-1409.
- [19] 陈文静.水下堤坝裂缝图像检测方法的研究[D].郑州:华北水利水电大学,2019.
(CHEN Wenjing. Research on image detection method of underwater dam cracks[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2019.)
- [20] 赵宏威,王亦红.基于改进Gabor优化选择的布匹瑕疵检测方法[J].计算机工程与应用,2019,55(24):202-207.
(ZHAO Hongwei, WANG Yihong. Fabric defect detection method based on improved optimal gabor filter[J]. Computer engineering and applications, 2019, 55(24):202-207.)
- [21] SUN Li, CHEN Chen, SUN Qianqian. Experimental and finite element analyses on the corrosion of underground pipelines[J]. Science China, 2015, 58(6):1015-1020.

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)