

基于颜色恒常性和多尺度小波的水下光学图像增强

王晓琦^{1,2}, 赵宣植^{1,2*}, 刘增力^{1,2}

¹昆明理工大学信息与自动化学院, 云南 昆明 650500;

²昆明理工大学云南省人工智能重点实验室, 云南 昆明 650500

摘要 针对水下光学图像出现的颜色衰减、表面模糊和光照不均匀等现象,提出了一种基于颜色恒常性和多尺度小波的水下光学图像增强算法。首先,采取灰度世界假设补偿衰减通道,利用颜色恒常性自适应调整图像全局亮度和对比度以有效校正色偏;其次,结合多尺度小波分解特性,采取基于形态学开运算改进的暗通道透射率移除低频雾霾现象,使用软阈值降低高频噪声;然后,利用二维伽马函数自适应校正不均匀光照,使用锐化提高边缘细节;最后,定义融合输入图像即伽马校正图像和锐化图像的权重图,并通过多尺度融合获得增强图像。实验结果表明,所提算法可有效平衡水下光学图像的颜色和亮度,显著提高图像清晰度和细节信息;同时应用测试显示,该算法在特征匹配、弱光条件和边缘检测方面的表现出色。

关键词 海洋光学; 水下光学图像; 图像增强; 颜色恒常性; 多尺度小波

中图分类号 TP391

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1601002

Underwater Optical Image Enhancement Based on Color Constancy and Multiscale Wavelet

Wang Xiaoqi^{1,2}, Zhao Xuanzhi^{1,2*}, Liu Zengli^{1,2}

¹Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan, China;

²Yunnan Key Laboratory of Artificial Intelligence, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan, China

Abstract Aiming at the phenomenon of color attenuation, surface blur, and uneven illumination in underwater optical images, we proposed an underwater optical image enhancement algorithm based on color constancy and multiscale wavelet. First, we adopt the gray world assumption to compensate the attenuation channel and use the color constancy to adaptively adjust the global brightness and contrast of the image to effectively correct the color shift. Second, combined with the characteristics of multiscale wavelet decomposition, we adopt morphological open operation to improve the dark channel transmittance to remove the low-frequency haze phenomenon, and the soft threshold reduces the high-frequency noise. Then, a two-dimensional gamma function is used to adaptively correct the uneven illumination, and sharpening is used to improve the edge detail. Finally, the weight map of the fused input image is defined: gamma correction and sharpening images, and the enhanced image is obtained by multiscale fusion. The experimental results show that the proposed algorithm can effectively balance the chromaticity and brightness of underwater optical images and significantly improve image clarity and detail information. Additionally, application tests show that the algorithm performs well in feature matching, low-light conditions, and edge detection.

Key words ocean optics; underwater optical image; image enhancement; color constancy; multiscale wavelet transform

1 引言

海洋是人类探索和研究的最前沿领域之一,海洋

探索离不开先进的水下探测技术,水下光学图像是人类了解海洋的重要方式^[1]。目前水下探测技术已成功应用于水底石油勘测、水下环境监测和探索海洋生物

收稿日期: 2021-06-28; 修回日期: 2021-06-29; 录用日期: 2021-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(61271007)

通信作者: *1649077559@qq.com

等领域,但在复杂的水下光学环境中,光线的吸收散射、水体悬浮颗粒和人造光源等因素的影响会造成水下图像发生严重的退化,导致其出现色彩失真、可视性低和光照不均匀等问题。基于水下成像的具体特征,提高水下成像质量和改善光照因素造成的影响与颜色失真是水下光学图像处理的研究热点。

近年来,研究人员发现大气成像与水下成像有类似之处,都存在亮度过低^[2]、表面模糊^[3]和光照不均匀^[4]等问题。在大气成像环境中,He等^[5]提出的暗通道先验理论能有效改善大气图像清晰度,因此许多研究人员将其应用到水下光学图像中。Drews等^[6]根据暗通道先验理论结合水下环境特点提出了一种能同时恢复介质传输和场景深度的水下暗通道先验理论。Peng等^[7]提出了一种根据场景深度和环境光线差异估计大气光和透射率的方法,该方法可以根据图像形成模型通过自适应颜色校正来恢复水下图像。此外,小波分析和融合等传统图像增强方法也在水下光学图像处理方面得到了应用。Pan等^[8]利用卷积神经网络及混合小波和方向滤波器组对水下图像进行融合计算。Ancuti等^[9]提出了一种融合算法,该算法利用水下白平衡和伽马校正对退化图像进行多尺度融合,改善了图像外观和全局对比度。李景明等^[10]提出了一种基于拉普拉斯算子先验项的快速变分复原算法。上述算法虽然在一定程度上改善了图像质量,但是仅针对水下图像出现的个别问题进行了校正,并未考虑复杂的水下光学环境出现的多种现象带来的综合影响,同时实际应用范围也有限。

为有效消除颜色衰减、表面模糊和光照不均匀等综合影响,本文提出了一种基于颜色恒常性和多尺度小波的水下光学图像增强算法。首先补偿色偏,并结合人类视觉系统特性,利用基于Retinex算法的全局适应和局部适应对图像进行颜色恒常性处理,使图像具有更加鲜明的色彩表现和对比度;其次从提高可视性方面考虑,利用多尺度小波进行分解,对低频雾霾现象采取形态学开运算改进暗通道值,使用软阈值移除高频噪声从而使图像的清晰度获得显著提高;然后通过二维伽马函数自适应补偿亮度过高和过低区域,锐化并增强边缘信息的同时减少散射影响;最后,通过多尺度融合算法将权重不同的二维伽马图像和锐化图像进行组合获取增强图像。实验结果表明,与现有算法相比,所提算法可以有效消除水下光学图像的色彩失真问题,同时可以显著提高图像的清晰度和对比度,改善照度不均匀的现象,并且该算法在不同应用中表现良好。

2 所提算法原理

首先,通过灰度世界假设补偿衰减通道,利用基于Retinex算法的颜色恒常性自适应地对退化图像进行颜色校正和亮度恢复;其次,通过多尺度小波框架处理散射效应以提高图像清晰度;然后,对于去除模糊表面的图像分别使用二维伽马校正算法和锐化算法,得到非均匀光照均衡图像和对比度增强图像;最后,利用多尺度融合算法对二维伽马校正和锐化两个图像进行处理,从而获取增强图像。图1为所提算法流程图。

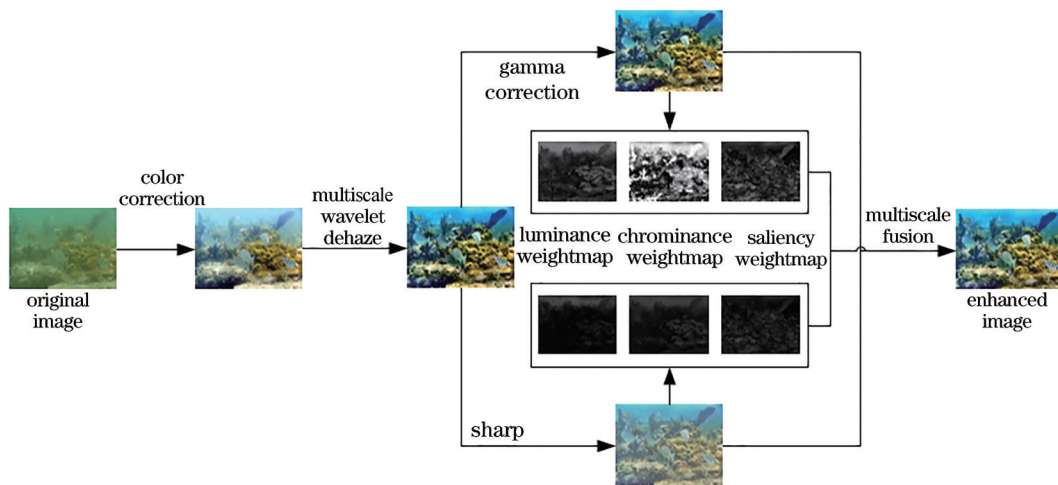


图1 所提算法流程

Fig. 1 Flow chart of proposed algorithm

2.1 色彩校正

由于水下光线衰减速度不同,退化的水下光学图像会出现颜色失真现象,其中因红色光线最先衰减,造成图像的蓝、绿通道分量和红通道分量极度不平衡的情况。因此,通过补偿红色通道衰减信息可保证R、G、B三个通道分量一致^[9],红通道衰减分量补偿公式为

$$I_r(x) = I_r(x) + \alpha(\bar{I}_g - \bar{I}_r)[1 - I_r(x)]I_g(x), \quad (1)$$

式中: x 为水下光学原始退化图像 I 的像素位置; $I_r(x)$ 为补偿后的红色通道分量; $I_r(x)$ 为图像 I 的原始红色通道分量; \bar{I}_r 为 $I_r(x)$ 的平均值; $I_g(x)$ 为图像 I 的原始绿色通道分量; \bar{I}_g 为 $I_g(x)$ 的平均值;常数参数 $\alpha = 1$ 。

通过灰度世界假设修正补偿后的红蓝绿三通道的灰度增益,实现校正因光线衰减图像出现的色彩失真的目的。不同于文献[9],本实验组通过基于Retinex

算法的颜色恒常性理论,改进因颜色校正出现的图像亮度与对比度不平衡问题,采取基于该理论的全局适应和局部适应自适应地增强退化的水下光学图像全局亮度和对比度,使之更符合人类视觉系统。

根据韦伯-费希纳定律,人类视觉系统将亮度感知的近似对数函数表示为全局自适应亮度^[11],其表达式为

$$L_g(x, y) = \frac{\log[L_w(x, y)/\bar{L}_w + 1]}{\log(L_{w\max}/\bar{L}_w + 1)}, \quad (2)$$

$$\bar{L}_w = \exp\left\{\frac{1}{N} \sum_{x,y} \log[\delta + L_w(x, y)]\right\}, \quad (3)$$

式中: $L_w(x, y)$ 是场景亮度值; $L_{w\max}$ 表示场景亮度值的最大亮度值; \bar{L}_w 是对数平均亮度; N 是图像的像素总数; δ 是避免图像因黑色像素导致奇异性的值。

随着式(3)中 \bar{L}_w 逐渐增加,其形状变为线性函数,对比高对数平均亮度的场景,低对数平均亮度的场景值更大,因此水下光学图像的亮度得到了自适应增强。输出图像的亮度随着像素值的增大而减小,导致图像出现不自然的光晕伪影等现象,可通过边缘保持滤波器^[12]解决该问题。

在基于Retinex算法的颜色恒常性理论中,通过在局部适应过程中引入对比度增强因子和自适应非线性偏移进一步增强对比度。对比度增强因子 $\alpha(x, y)$ 可表示为

$$\alpha(x, y) = 1 + \eta \frac{L_g(x, y)}{L_{g\max}}, \quad (4)$$

式中: η 表示对比度控制参数; $L_{g\max}$ 是全局自适应输出的最大亮度值。

自适应非线性偏移 β 的表达式为

$$\beta = \lambda \bar{L}_g, \quad (5)$$

式中: λ 是非线性控制参数; \bar{L}_g 是全局自适应输出的对数平均亮度。

局部自适应亮度 $L_{out}(x, y)$ 的表达式为

$$L_{out}(x, y) = \alpha(x, y) \log\left[\frac{L_g(x, y)}{H_g(x, y)} + \beta\right], \quad (6)$$

式中: $H_g(x, y)$ 是 $L_g(x, y)$ 用引导滤波器后的输出。全局自适应亮度控制像素的对比度增强因子大小,对比度增强因子随着像素的增加而增加。因此,通过考虑全局压缩的场景亮度值,局部自适应输出后的图像具有比以前更自然的外观。实验结果表明, $\eta=36, \lambda=10$ 时可提供适当的整体对比度。

式(2)是梯度逐渐减小的非线性函数,全局自适应亮度通过式(6)中对数起点的变化控制非线性强度,而全局自适应输出的低对数平均亮度使得对数函数需从大梯度开始,因此对数曲线比高对数平均亮度的情况更大增加了总亮度值。局部自适应处理后的亮度值从0到1重新调整,实现了改善水下光学图像亮度的目的。图2

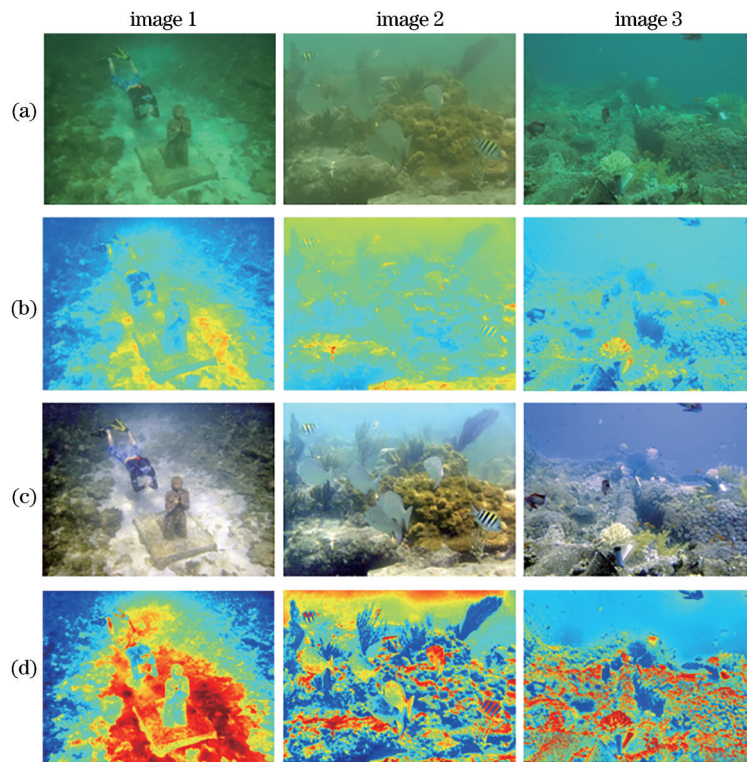


图2 颜色校正结果。(a)原图;(b)原图的伪色彩图;(c)颜色校正图像;(d)颜色校正的伪色彩图
Fig. 2 Color correction results. (a) original images; (b) pseudo color images of original images; (c) color correction images; (d) pseudo color images based on color correction

为颜色校正效果图,从图中可以看出,所提颜色校正算法能有效恢复色偏,同时提高图像全局亮度和对比度,图像更加自然。

2.2 多尺度小波去雾

水体环境中的悬浮颗粒等杂质使水下光线产生吸收和散射效应,进而导致水下光学图像表面出现模糊不清的现象。该现象与大气含雾图像类似,因此大量研究者将 He 等根据大气散射模型提出的暗通道先验理论应用到水下光学图像。该模型可表示为

$$I(x) = J(x) \exp[-\beta d(x)] + A_c \{1 - \exp[-\beta d(x)]\}, \quad (7)$$

式中: $I(x)$ 为退化的水下光学图像; $J(x)$ 为去除散射效应的清晰图像; A_c 为背景光, $c \in \{r, g, b\}$, 为图像红、绿、蓝三通道; β 为衰减系数; $d(x)$ 为景深。

暗通道先验理论可描述为

$$J_{\text{dark}}(x) = [I(x) - A_c] / \max[t(x), \sigma] + A_c, \quad (8)$$

$$t(x) = 1 - \min_{y \in \Omega_x} \left[\min_c \frac{I_c(y)}{A_c} \right], \quad (9)$$

式中: $J_{\text{dark}}(x)$ 为恢复的清晰图像; σ 是用于限制传输的下限, 典型值为 0.1; $t(x)$ 为利用最小滤波器进行约束的透射率; Ω_x 是以 x 为中心的局部区域; $y \in \Omega_x$ 中的像素值。

虽然暗通道先验理论在处理水下光学图像方面取得了较好的效果,但是水对光的选择性吸收和背景光过强的问题,使得该理论获取的暗通道值偏小,估计的透射率偏大^[13],最终的增强效果偏暗。同时当水下光学图像的背景光过强时,暗通道先验理论无法完全去除水下光学图像的模糊表面。

基于 Meng 等^[14]提出的给定图像场景辐射固有边界理论对式(8)进行改进,可有效改善因水下光学图像背景光过强无法完全去除模糊表面的情况,即

$$0 \leq J_{\text{dark}}^*(x) \leq 1. \quad (10)$$

由式(10)可得

$$0 \leq t_b(x) \leq t(x) \leq 1, \quad (11)$$

$$t_b(x) = \min \left\{ 1 - \min_c \left[\frac{I_c(x)}{A_c}, \frac{\tilde{I}_c(x)}{\tilde{A}_c} \right], 1 \right\}, \quad (12)$$

式中: $t_b(x)$ 是 $t(x)$ 的下界; $\tilde{I}(x) = 1 - I(x)$; $\tilde{A}_c = 1 - A_c$ 。

多尺度小波的分解特性使得水下光学图像被分解为高频和低频两部分。研究表明,雾霾通常分布在低频频谱中,而噪声多存在于高频频谱中。而形态学理论的开操作能有效移除低频信息中的雾霾现象,更合理地勾勒准确的场景传输,从而实现水下光学图像的清晰化。选取暗通道中前 0.1% 的最亮像素值的平均值作为估计背景光,利用形态学开运算^[15]改进估计透射图,其透射率为

$$\tilde{t}(x) = 1 - \text{open}_{B, y \in \Omega_x} \left\{ \min_c \left[\frac{I(y)}{A_c}, \frac{\tilde{I}(y)}{\tilde{A}_c} \right] \right\}, \quad (13)$$

$$\text{open}_B [I(x)] = \max \left\{ \min [I(x - s, y - y) - B(s, t)] + B(s, t) \right\}, \quad (14)$$

式中: $\tilde{t}(x)$ 为精确透射函数; $I(x)$ 为色彩校正图像; $I(x, y)$ 表示图像的横纵坐标; $B(s, t)$ 为形态学开运算的正方形结构元素,大小为 $s \times t$, 与 Ω_x 大小相同。

对于高频频谱的噪声可用软阈值消除,软阈值的表达式为

$$S_{\tau}(x) = \text{sign}(x) \cdot (|x| - \tau), \quad (15)$$

式中: τ 是阈值,通常用第一级分解的中值估计; $\text{sign}(\cdot)$ 为软阈值操作所用符号函数。

因为低频带和高频带是通过小波分解获得的,所以不同部分的系数是密切相关的。利用估计的透射值可保持系数关系,同时增强高频部分的纹理细节。

实验结果表明, sym4 小波相比其他小波具有双正交性、紧支撑性和近对称性等特点,在去雾实验中表现良好。不同分解水平对比图如图 3 所示,从图中可以看出:低频信息随着分解层数的增加而减少,导致最终无法有效去除雾霾,当分解水平为 4 时,图像边缘细节处已经出现严重伪影。因此为平衡分解水平和去雾性能,本实验的小波分解水平设定为 2。

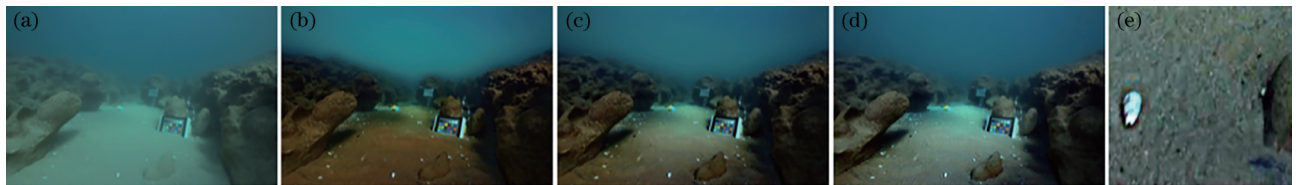


图 3 不同小波分解水平对比图。(a)原图;(b)水平 0;(c)水平 2;(d)水平 4;(e)水平 4 细节处

Fig. 3 Comparison of different wavelet decomposition levels. (a) Original image; (b) level 0; (c) level 2; (d) level 4; (e) details of level 4

对分解后的低频和高频进行小波重构可得到清晰的无雾图像,去雾效果对比图如图 4 所示。从图中可以看出,利用多尺度小波去雾的图像在实现水下图像

清晰化方面效果显著,对比暗通道先验理论能有效提高远距离图像质量,同时保留更多的纹理细节并减少噪声影响。

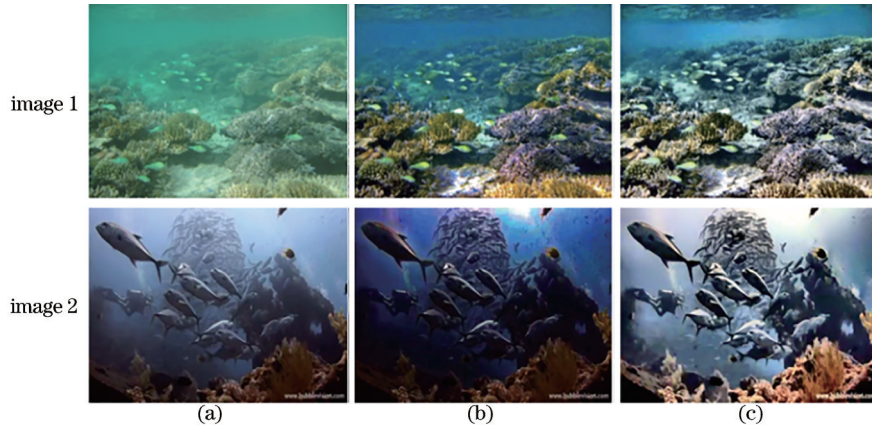


图 4 水下光学图像清晰化效果对比图。(a)原图;(b)暗通道先验去雾;(c)多尺度小波去雾

Fig. 4 Comparison of underwater optical image clarity effect. (a) Original image; (b) dark channel prior dehaze; (c) multiscale wavelet dehaze

2.3 二维伽马校正和锐化

在拍摄场景深度较大的水下光学图像时,昏暗的成像环境需要人造光源作为辅助光源进行拍摄,导致的光照不均匀等现象为后续研究带来了影响。许多研究者将传统的图像二值化算法作为解决光照不均匀问题的常见算法,但该算法未考虑水下光线的影响,会对图像进行过度补偿。

基于水下光学的特点,本实验组构造一种二维伽马函数^[4]。该函数基于多尺度高斯函数的特性,通过调整光照较强或较暗处的亮度值实现对不均匀光照图像的自适应校正。二维伽马函数的表达式为

$$\begin{cases} G(x,y) = 255 \left[\frac{I(x,y)}{255} \right]^\gamma \\ \gamma = \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{m-L(x,y)}{m}} \end{cases}, \quad (16)$$

式中: $G(x,y)$ 为二维伽马校正图像的亮度值; $I(x,y)$ 为多尺度小波清晰化后的图像; $L(x,y)$ 为局部自适应提取的光照分量; γ 为提高亮度的指数值; m 为光照分量的亮度平均值。

伽马校正结果对比如图 5 所示,从图中校正前后的光照分量提取图可以看出,校正后图像暗部信息得到了明显改善。同时从直方图可以看出,校正后图像的像素值在 0~255 之间的分布更加均匀,原图像在 50~100 处的亮度值经过校正后明显下降,而 150~200 附近的亮度值明显增加。因此,二维伽马校正不仅改善了退化图像过亮区域亮度过高的现象,而且亮度过低区域的亮度也得到了增强,有效改善了光照分量分布不均匀的情况。

针对退化的水下光学图像存在边缘细节淡化的问题,本实验组采取锐化处理来解决,效果如图 6 所示。

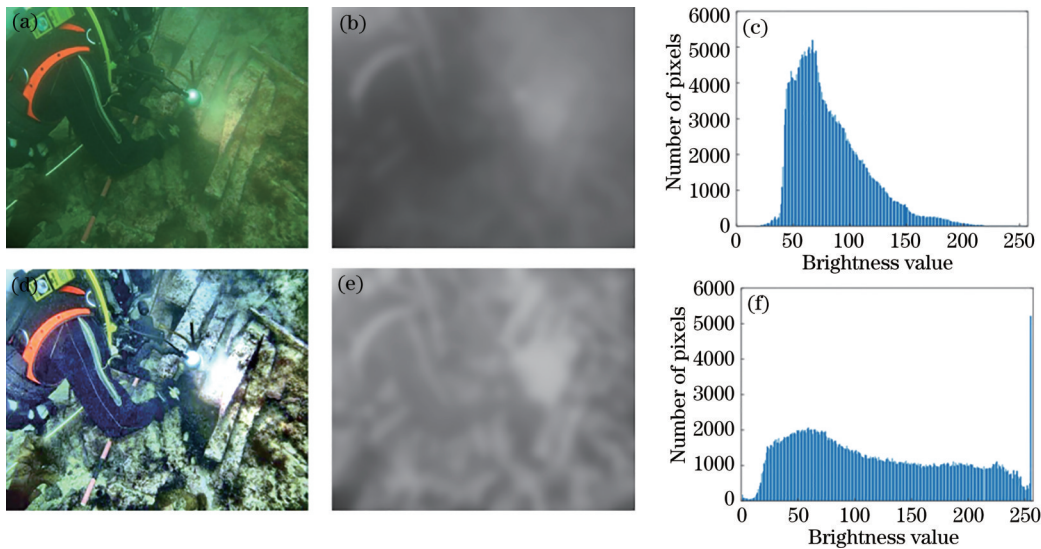


图 5 二维伽马校正对比图。(a)原始图像;(b)原始图像光照分量图;(c)校正前直方图;(d)二维伽马校正图;(e)二维伽马校正图像光照分量图;(f)校正后直方图

Fig. 5 2D gamma correction histogram contrast map. (a) Original image; (b) illumination component map of original image; (c) histogram before correction; (d) 2D gamma correction map; (e) illumination component map of 2D gamma correction image; (f) histogram after correction;

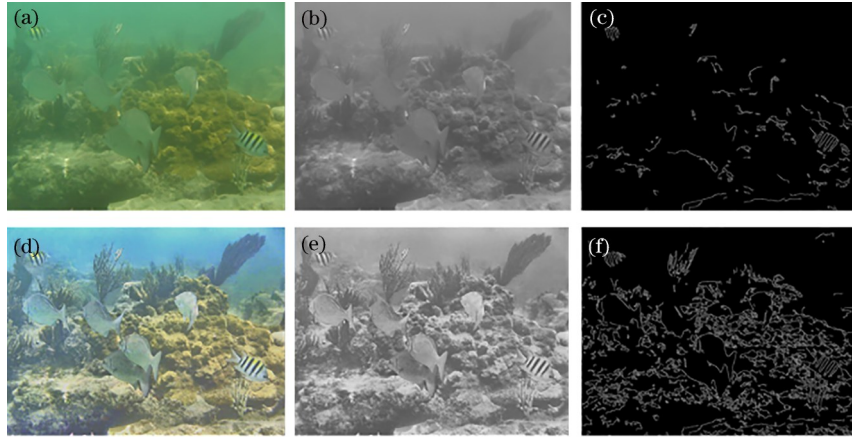


图 6 锐化效果对比图。(a)原始图像;(b)原始图像灰度图;(c)原始图像边缘细节图;(d)锐化图像;(e)锐化图像灰度图;(f)锐化图像边缘细节图

Fig. 6 Comparison of sharpen. (a) Original image; (b) gray scale image of original image; (c) edge detail of original image; (d) sharpened image; (e) gray scale image of sharpened image; (f) edge detail of sharpened image

从图中可以看出,锐化技术能有效改善轮廓细节丢失问题,同时减少散射引起的退化。

2.4 多尺度融合

为避免在传统图像融合算法过程中,因噪声干扰出现的晕圈伪影现象,采取多尺度融合策略解决该问题。将二维伽马校正和锐化处理后的图像作为多尺度融合的两个输入,同时求取两个输入的亮度、色彩和显著性权重图。

亮度权重图^[16]对于可视范围较高处的区域利用较大像素值进行分配,而其他区域用较小像素值进行分配,从而最小化色彩和对比度,达到平衡二者关系的目的,其表达式为

$$W_1 = \exp \left[-\frac{(L_k - 0.5)^2}{2 \times 0.25^2} \right], \quad (17)$$

式中: k 为第 k 张求权重的图像; W_1 为亮度权重图; L_k 为输入图像灰度图。

色彩权重图^[17]利用输入图像与输出图像在色彩方面的不同比率进行调整,从而实现控制图像饱和度增益的目的,其表达式为

$$W_c = L_k [1 + \cos(\alpha H_k + \phi) S_k], \quad (18)$$

式中: W_c 为色彩权重图; H_k 为输入图像的色调; S_k 为输入图像的饱和度。

显著性权重图^[9]通过计算相邻区域的显著度,从而使融合图像的饱和度更加均匀,其表达式为

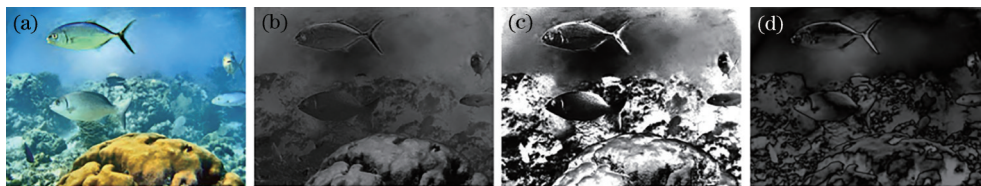


图 7 二维伽马权重图。(a)二维伽马校正图;(b)亮度权重图;(c)色彩权重图;(d)显著度权重图

Fig. 7 2D gamma weightmap. (a) 2D gamma correction result; (b) luminance weightmap; (c) chromatic weightmap; (d) saliency weightmap

$$W_s = \sqrt{\frac{1}{3} \left[(R_k - L_k)^2 + (G_k - L_k)^2 + (B_k - L_k)^2 \right]}, \quad (19)$$

式中: W_s 为显著性权重图; R_k 、 G_k 和 B_k 分别为融合输入图像的R、G、B三通道图像。

对于每一个输入 k ,首先通过对三个权重图求和得到聚合加权图 W_k ,其次通过将每个图中每个像素的权重除以所有图中相同像素的权重之和,最后在每个像素的基础上对聚合加权图进行归一化处理,得到归一化权重 \bar{W}_k ,其表达式为

$$\bar{W}_k(x) = \frac{W_k(x) + \delta}{\sum_{k=1}^K W_k(x) + K \cdot \delta}, \quad (20)$$

式中: \bar{W}_k 为归一化权重图; K 为聚合加权图个数;正则化参数 $\delta = 1$ 。

将源输入 I_k 通过传统的多尺度融合算法分解为拉普拉斯金字塔 L_l ^[18],利用高斯金字塔 G_l 分解式(20)的 \bar{W}_k 。设置两个金字塔等级数目相同,通过上采样处理每个融合金字塔等级的拉普拉斯输入与高斯归一化权重,利用求和操作求得金字塔等级的最终融合图像,其表达式为

$$R_l = \sum_{k=1}^K G_l \{ \bar{W}_k \} L_l(I_k). \quad (21)$$

式中: R_l 代表最终增强图像; l 代表金字塔等级; k 表示融合输入图像的个数。二维伽马权重图和锐化权重图分别如图6、图7所示。

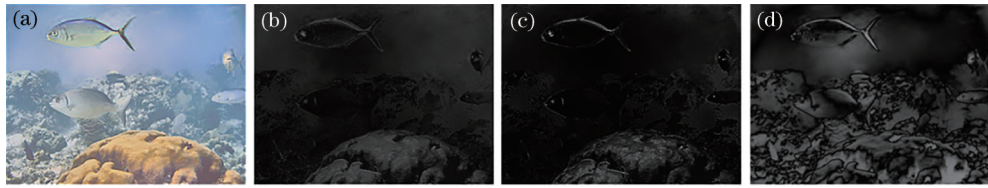


图 8 锐化权重图。(a)锐化结果图;(b)亮度权重图;(c)色彩权重图;(d)显著度权重图

Fig. 8 Sharpen weightmap. (a) Sharpen result; (b) luminance weightmap; (c) chromatic weightmap; (d) saliency weightmap

3 实验结果与分析

为验证所提算法的有效性,通过主观评价和客观评价对不同场景的水下光学图像进行对比分析。选取潜水员、鱼群、礁石、珊瑚、沉船等不同水下场景的图像进行主观评价,选取常见的水下光学图像质量评价指标进行客观评价。同时将基于水下暗通道先验的水下图像复原方法^[6]、基于景深和环境光的水下图像复原方法^[7]、基于卷积神经网络(CNN)和混合小波和方向滤波器组(HWD)的水下图像增强算法^[8]、基于白平衡版本多尺度融合的水下图像增强算法^[9]与所提算法进行

比较分析。通过应用测试的实验,验证所提算法对提升目标识别率、图像纹理细节的增强程度和弱光条件的性能。

3.1 主观评价

为展示所提算法在颜色校正和去散射效应方面的优越性,将水下光学原始退化图像、对比算法处理图像和所提算法增强图像进行了对比分析,结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出:文献[6]中的算法在一定程度上提高了图像的对比度,但该算法基于空气中的暗通道先验条件未考虑水下特性,导致颜色失真和散射效应

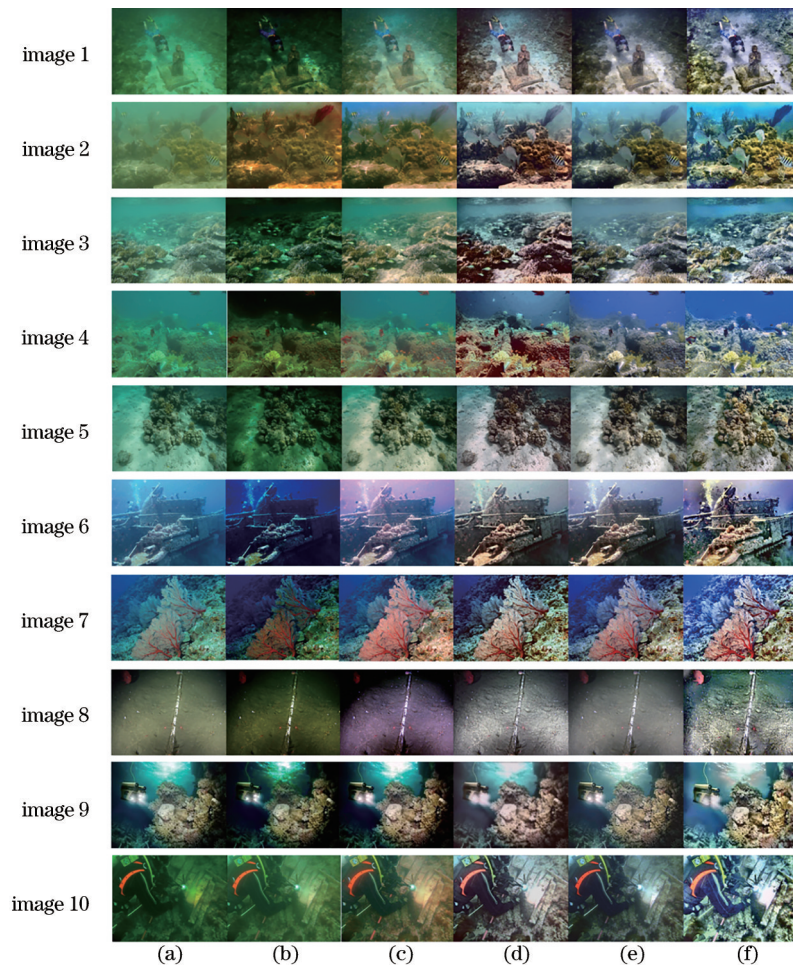


图 9 不同算法的水下光学图像增强结果。(a)原始图像;(b)文献[6]中的算法;(c)文献[7]中的算法;(d)文献[8]中的算法;(e)文献[9]中的算法;(f)所提算法

Fig. 9 Underwater optical image enhancement results based on different algorithms. (a) Original image; (b) algorithm in reference [6]; (c) algorithm in reference [7]; (d) algorithm in reference [8]; (e) algorithm in reference [9]; (f) proposed algorithm

并未解决;文献[7]中的算法在颜色校正方面有所提高,但整体依然偏向蓝绿通道,当散射效应和主动光照较强时,会引入色偏;文献[8]中的算法有效改善了图像的外观颜色和清晰度,但因未考虑衰减的红色通道,造成去除散射效应的图像整体偏红,产生严重的色彩失真,同时因过度补偿散射效应导致图像暗区域阴影加重,丢失了细节信息;文献[9]中的算法有效校正和提高了图像的色偏问题和清晰度,但多数图像去散射效果不佳,导致图像还存在模糊现象,同时色彩不鲜明整体偏灰白色;所提算法处理后的图像不仅能有效恢复图像原本的色彩像素值,而且有效去除了散射效应,使图像拥有更高的清晰度和细节信息,对光照过强和过暗区域处理结果较好。

3.2 客观评价

对所提算法和对比算法所得增强图像进行客观评价,从而进一步说明实验效果。采取 Underwater Color Image Quality Evaluation (UCIQE)^[19]、Underwater Image Quality Measure (UIQM)^[20]和 Average Gradient

(AG)^[21]作为衡量算法性能的指标,比较结果如表1所示,其中粗体表示最佳值。

UCIQE值反映水下图像在非均匀色差、模糊和对比度方面的表现情况,测评数值与图像质量成正比;UIQM值反映水下图像在色度、锐度和对比度方面的表现情况,图像的视觉效果越自然测评数值越高;AG值反映水下图像在清晰度方面的表现情况,随着测评数值越大,代表水下图像清晰程度越好。

从表1中可以明显看出:所提算法的UCIQE、UIQM和AG值高于其他算法,说明经所提算法处理后的图像,在增强的过程中有效解决颜色失真现象的同时保留了图像原有信息;在去除散射效应方面,所提算法能获得比其他算法对比度和清晰度更高的增强图像。

从主观评价和客观评价两个方面可以看出,在处理水下光学退化图像时,所提算法在色彩恢复能力、提高清晰度方面表现出色,并能保持更多的图像细节信息,图像质量更高。

表1 不同算法处理图像的评价指标对比

Table 1 Comparison of evaluation indexes of images processed by different algorithms

Image	Algorithm in reference [6]			Algorithm in reference [7]			Algorithm in reference [8]		
	UCIQE	UIQM	AG	UCIQE	UIQM	AG	UCIQE	UIQM	AG
1	0.522	2.982	1.772	0.517	2.895	2.423	0.573	4.554	3.862
2	0.565	4.828	2.886	0.486	3.725	2.971	0.632	4.536	4.695
3	0.536	6.001	5.443	0.573	3.685	6.345	0.635	4.540	8.447
4	0.554	4.019	3.316	0.549	2.161	3.758	0.667	4.186	7.400
5	0.507	2.936	3.921	0.560	3.128	4.664	0.565	4.880	5.334
6	0.554	4.089	3.846	0.576	4.212	4.867	0.569	4.649	5.445
7	0.585	3.662	4.455	0.656	4.465	6.241	0.630	5.169	7.871
8	0.513	3.171	3.218	0.517	3.927	4.901	0.519	3.877	5.173
9	0.635	3.624	7.608	0.673	3.705	8.878	0.605	5.253	7.838
10	0.511	2.314	3.005	0.582	4.679	4.793	0.564	5.082	6.518
Average	0.548	3.763	3.947	0.569	3.658	4.984	0.596	4.673	6.258

Image	Algorithm in reference [9]			Proposed Method		
	UCIQE	UIQM	AG	UCIQE	UIQM	AG
1	0.586	4.484	3.180	0.610	4.970	7.970
2	0.621	3.722	3.777	0.671	4.445	7.292
3	0.590	4.097	7.766	0.601	4.811	13.132
4	0.609	4.028	5.470	0.623	4.524	8.997
5	0.562	4.633	5.943	0.637	4.940	10.293
6	0.590	4.610	5.867	0.630	4.674	11.307
7	0.638	4.894	6.947	0.642	4.834	11.302
8	0.478	3.018	3.528	0.610	5.310	14.334
9	0.616	4.816	9.540	0.640	4.642	15.520
10	0.566	4.716	5.518	0.626	5.642	13.462
Average	0.586	4.302	5.754	0.630	4.879	11.361

3.3 应用测试

为了验证所提算法的应用效果,首先采取尺度不变特征(SIFT)^[22]测试特征匹配效果,结果如图10所

示;其次验证弱光条件下的性能,效果如图11所示;最后利用Canny算子对边缘检测效果进行测试,结果如图12所示。

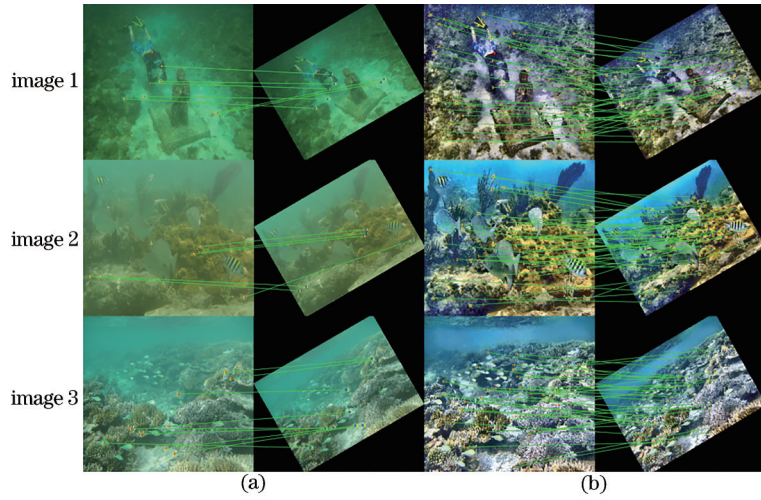


图 10 特征匹配结果。(a)原始图像匹配结果;(b)增强图像匹配结果

Fig. 10 Application test results. (a) Original image matching results; (b) enhanced image matching results



图 11 低照度图像评估结果

Fig. 11 Evaluation results of low illumination image

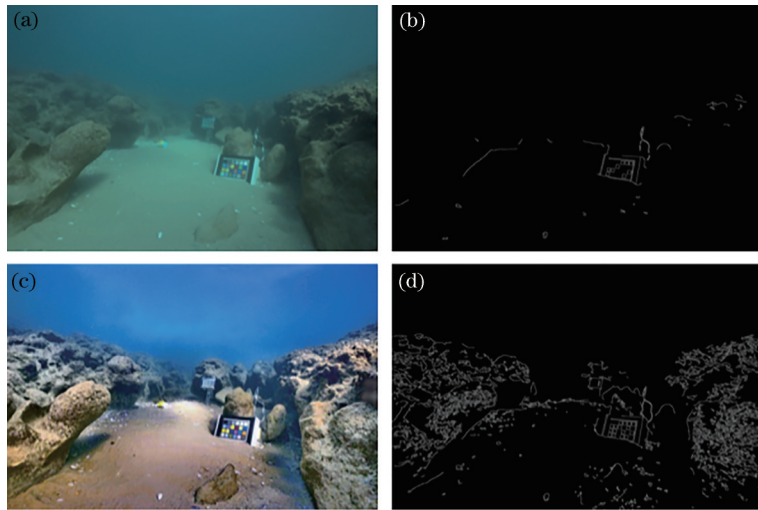


图 12 Canny 边缘检测对比结果。(a)原始图像;(b)原始图像 Canny 算子检测结果;(c)增强图像;(d)增强图像 Canny 算子检测结果

Fig. 12 Canny edge detection comparison results. (a) Original image; (b) Canny operator detection results of original image;

(c) enhanced image; (d) Canny operator detection results of enhanced image

从图 10 可以看出,退化图像特征匹配点个数分别为 7,6,9。经所提算法增强后,增强图像的特征匹配

点个数增加至 41,47,35。因此,所提算法能显著提升图像清晰度和图像纹理细节信息,表明所提算法在特

征点匹配和目标识别方面具有良好的表现。

从图 11 可以看出,弱光条件下的低照度图像具有较低的对比度和亮度,经过所提算法增强后,图像质量有了显著改善。因此,所提算法能有效提高低照度图像的清晰度和对比度,验证了所提算法在弱光条件下具有适用性。

从图 12 可以看出,原始图像通过 Canny 算子检测到的边缘轮廓信息较少,且纹理信息不连续。经过所提算法处理的图像能检测到较为完整的图像轮廓信息,从而提高边缘检测质量,更适合后期的图像分析。

4 结 论

复杂的水体环境导致水下光学图像存在严重色偏、模糊不清和光照不均等问题,针对上述问题,提出了一种基于颜色恒常性和多尺度小波的水下光学图像增强算法。该算法不需要过多先验信息,首先对原始水下光学图像进行补偿衰减通道后,通过灰度世界假设重新调整红蓝绿三通道分量,在颜色恒常性的基础上自适应提高图像全局亮度,利用基于 Retinex 算法的全局适应和局部适应更好地平衡色彩像素值与亮度;其次根据多尺度小波分解特性,在低频部分,根据形态学开运算改进的暗通道模型消除水下光线散射效应导致的雾霾现象,利用小波相关系数,通过软阈值自适应地增强高频部分的纹理细节;然后为调整图像过亮和过暗区域像素值不均匀情况,采取二维伽马函数自适应校正以得到更均匀的光照分布,利用锐化增加图像边缘纹理信息;最后通过组合二维伽马校正图像和锐化图像的权重,采取多尺度融合得到增强图像。实验结果表明,所提算法能有效改善水下图像外观颜色,平衡全局亮度与对比度,去除散射效应并凸显图像细节信息,同时解决光照不均匀现象。此外,所提算法对改善低照度图像具有鲁棒性,有利于关键点匹配和边缘检测等应用测试。

参 考 文 献

- [1] 李黎,王惠刚,刘星.基于改进暗原色先验和颜色校正的水下图像增强[J].光学学报,2017,37(12):1211003.
Li L, Wang H G, Liu X. Underwater image enhancement based on improved dark channel prior and color correction[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1211003.
- [2] Ahn H, Keum B, Kim D, et al. Adaptive local tone mapping based on retinex for high dynamic range images [C]//2013 IEEE International Conference on Consumer Electronics, January 11-14, 2013, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2013: 153-156.
- [3] 刘玉珍,迟凯晨,林森.基于背景光估计与透射率优化的水下图像复原[J].激光与光电子学进展,2020,57(14):141010.
Liu Y Z, Chi K C, Lin S. Underwater image restoration based on background light estimation and transmittance

optimization[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(14): 141010.

- [4] 刘志成,王殿伟,刘颖,等.基于二维伽马函数的光照不均匀图像自适应校正算法[J].北京理工大学学报,2016,36(2):191-196,214.
Liu Z C, Wang D W, Liu Y, et al. Adaptive adjustment algorithm for non-uniform illumination images based on 2D gamma function[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2016, 36(2): 191-196, 214.
- [5] 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): 2341-2353.
- [6] Drews P L J, Jr, Nascimento E R, Botelho S S C, et al. Underwater depth estimation and image restoration based on single images[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2016, 36(2): 24-35.
- [7] Peng Y T, Cosman P C. Underwater image restoration based on image blurriness and light absorption[J]. IEEE Transactions on Image Processing: a Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2017, 26(4): 1579-1594.
- [8] Pan P W, Yuan F, Cheng E, et al. Underwater image de-scattering and enhancing using dehazenet and HWD [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2018, 26(4): 531-540.
- [9] Ancuti C O, Ancuti C, de Vleeschouwer C, et al. Color balance and fusion for underwater image enhancement[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 27(1): 379-393.
- [10] 李景明,侯国家,潘振宽,等.基于拉普拉斯算子先验项的水下图像复原[J].激光与光电子学进展,2020,57(16):161026.
Li J M, Hou G J, Pan Z K, et al. Underwater image restoration based on a Laplace operator prior term[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(16): 161026.
- [11] Drago F, Myszkowski K, Annen T, et al. Adaptive logarithmic mapping for displaying high contrast scenes [J]. Computer Graphics Forum, 2003, 22(3): 419-426.
- [12] 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.
- [13] 王一斌,尹诗白,吕卓纹.自适应背景光估计与非局部先验的水下图像复原[J].光学精密工程,2019,27(2):499-510.
Wang Y B, Yin S B, Lü Z W. Underwater image restoration with adaptive background light estimation and non-local prior[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(2): 499-510.
- [14] Meng G F, Wang Y, Duan J Y, et al. Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization[C]//2013 IEEE International Conference on Computer Vision, December 1-8, 2013, Sydney, NSW, Australia. New York: IEEE Press, 2013: 617-624.
- [15] Liu X, Zhang H, Cheung Y M, et al. Efficient single image dehazing and denoising: an efficient multi-scale correlated wavelet approach[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2017, 162: 23-33.

- [16] Ancuti C O, Ancuti C, Bekaert P. Enhancing by saliency-guided decolorization[C]//CVPR 2011, June 20-25, 2011, Colorado Springs, CO, USA. New York: IEEE Press, 2011: 257-264.
- [17] Fu X Y, Fan Z W, Ling M, et al. Two-step approach for single underwater image enhancement[C]//2017 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), November 6-9, 2017, Xiamen, China. New York: IEEE Press, 2017: 789-794.
- [18] Burt P J, Adelson E H. The Laplacian pyramid as a compact image code[J]. Readings in Computer Vision, 1987, 31(4): 671-679.
- [19] Yang M, Sowmya A. An underwater color image quality evaluation metric[J]. IEEE Transactions on Image Processing: a Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2015, 24(12): 6062-6071.
- [20] Panetta K, Gao C, Agaian S. Human-visual-system-inspired underwater image quality measures[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2016, 41(3): 541-551.
- [21] He N, Wang J B, Zhang L L, et al. An improved fractional-order differentiation model for image denoising [J]. Signal Processing, 2015, 112: 180-188.
- [22] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.