

基于颜色校正和加权融合的水下图像增强^{*}

丁洁¹ 陆安江¹ 彭熙舜¹ 李庞跃² 张浩炀² 郑欣妍²

(1. 贵州大学大数据与信息工程学院 贵阳 550025; 2. 西安工业大学光电工程学院 西安 710021)

摘要:为解决水下图像由光照不均匀等原因引起的颜色偏差、对比度低、细节不清晰等问题,提出了一种基于颜色校正和加权融合的水下图像增强方法。首先,对补偿了红色通道的原始图像采用白平衡算法进行颜色校正,解决图像失真问题。并将颜色校正后的图像从 RGB 空间转换到 Lab 空间,然后采用对比度限制自适应直方图均衡比(CLAHE)算法处理的 L 亮度通道来增强图像的对比度和亮度。最后,将颜色校正后的图像和增强对比度后的图像进行加权融合增强图像细节的清晰度。实验结果证明,采用所提算法处理不同水下场景图像效果显著,4 个图像质量评价指标信息熵、峰值信噪比(PSNR)、水下图像质量评价度量(UIQM)和水下彩色图像质量评级(UCIQE)值与其他算法相比均有明显提升。并且与原始图像相比,所提算法处理后的图像的信息熵至少提升了 5.6%,UIQM 值提高了 1.48 倍以上,UCIQE 值提高了 7.5%。

关键词:图像增强;颜色校正;CLAHE;图像融合

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

Underwater image enhancement based on color correction and weighted fusion

Ding Jie¹ Lu Anjiang¹ Peng Xishun¹ Li Pangyue² Zhang Haoyang² Zheng Xinyan²

(1School of Big Data and Information Engineering, Guiyang University, Guiyang 550025, China;

2. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: To solve the problems of color deviation, low contrast, and unclear details of underwater images caused by uneven illumination, this paper proposes an underwater image enhancement method based on color correction and weighted fusion. Firstly, the original image with red channel compensation is corrected by the white balance algorithm to solve the image distortion problem. Then the color-corrected image was converted from RGB space to Lab space, and the L brightness channel was processed by the CLAHE algorithm to enhance the contrast and brightness of the image. Finally, the image after color correction and the image after contrast enhancement is weighted and fused to enhance the clarity of image details. The experimental results show that the algorithm proposed in this paper is effective in processing images of different underwater scenes, and the values of information entropy, PSNR, UIQM, and UCIQE of the four image quality evaluation indexes are improved compared with other algorithms. Compared with the original image, the information entropy of the image processed by this algorithm is increased by at least 5.6%, the UIQM value is increased by more than 1.48 times, and the UCIQE value is increased by 7.5%.

Keywords: image enhancement; correction of color; CLAHE; image fusion

0 引言

海洋中蕴藏着丰富的资源,借助水下采集的图像了解海洋环境中的各类资源信息成为海洋勘探和开发的主要手段。由于水下环境的复杂性,获取的水下图像通常呈现

颜色偏差、细节模糊、对比度低等问题。这是因为光在水中传播过程中伴随有光吸收和散射现象,致使我们看到的大多数拍摄的水下图像都是蓝绿色调^[1-2]。因此,利用图像处理技术提升水下拍摄图像质量是亟待解决的问题。

目前,针对水下图像的处理手段主要分为两类,水下

收稿日期:2022-12-08

^{*} 基金项目:贵大人基合(2016)15 号、贵州省自然科学基金项目资助

图像复原方法和水下图像增强方法。水下图像复原方法主要基于 McGlamery^[3]提出的水下光学成像物理模型,依据参数信息反推出水下真实场景。其中最为经典的图像复原方法是 He 等^[4]提出的暗通道先验理论(DCP),受该理论启发,许多学者将该理论算法进行改进应用到水下图像处理中。Peng 等^[5]提出了一种将图像模糊先验理论与光吸收相结合的方法,准确估计场景深度复原图像清晰度,但复原后的图像易失真。Berman 等^[6]将水下图像复原问题简化为单一图像去雾问题,考虑了不同水体和场景的结构对光衰减的影响,改善了水下图像颜色失真问题,但需要的参数多,运算量大。

水下图像增强方法则不需要考虑水下光学成像物理模型,直接通过图像处理方法调整图像的像素值改善图像质量。Ma 等^[7]提出了一种基于对比度限制自适应直方图均衡化(CLAHE)算法,增强了图像的对比度,但色偏现象仍然存在。Ancuti 等^[8]提出了一种基于白平衡算法对水下图像进行颜色补偿,通过伽马变换来提升图像对比度,但算法较为复杂,图像背景区域增强不明显。Fu 等^[9]创新性的提出了一种最佳对比度模型和颜色校正两种方法有效的减少了图像伪影,改善颜色失真和对比度低的问题,但图像整体提升不明显。范新南等^[10]提出了一种结合多尺度 Retinex 算法和图像融合的水下图像增强方法,使图像色彩更丰富,提升了图像主观视觉效果,但对比度有待提升。

越来越多的研究人员将图像处理技术关注于基于深度学习的方法,Li 等^[11]利用大气图像和水下图像生成对抗神经网络,采用无监督学习方式合成水下图像,校正了图像的色偏现象。Zhang 等^[12]提出了一种改进的利用生成对抗网络的方法,用最小二乘法代替交叉熵损失函数,纠正了图像色偏问题。周露珊等^[13]提出了一种轻量级的

密集残差卷积神经网络的方法应用于水下图像增强,促进各通道的信息交互能力,提高了水下图像的质量。但由于水下环境复杂以及缺乏各种水下环境训练参考图像,导致模型的泛化能力不强,运用深度学习处理水下图像的方法仍需改进和提升。

现有的方法在改善图像质量方面都取得了一定进展,但现有的算法仍然存在一些局限性,对于多重降质的图像处理效果不佳,难以做到颜色、对比度和细节的综合性提升,增强图像背景区域常常被忽略。为解决上述问题,本文提出了一种基于颜色校正和加权融合算法,利用白平衡算法,恢复图像的颜色,改善水下图像的色偏问题。利用 CLAHE 算法,改善图像局部对比度和边缘细节。计算 4 种权重参数,使用金字塔算法分解权重图和输入图像,进行多尺度融合,综合提升了图像颜色、细节,改善对比度,并且增强不同的水下场景和图像背景区域均有较好的效果。

1 本文算法

针对水下拍摄的图像与真实场景之间存在的颜色偏差、对比度低、细节模糊以及亮度不均匀等问题,本文提出了一种改进的颜色校正和加权融合的水下图像增强算法,首先用白平衡算法对补偿了红色通道后的水下图像进行初步的颜色校正,得到输入图像 1(input1),将输入图像 1 从 RGB(red, green, blue)空间转化到 Lab 空间,再使用 CLAHE 算法处理转化后的图像 L 通道得到输入图像 2(input2),提高图像对比度和亮度;接着,对两个不同的输入图像分别进行拉普拉斯对比度权重、显著性对比度权重、局部对比度权重和曝光权重计算,并进行权重归一化分别获得归一化权重图 W_1 和 W_2 ;最后,将输入图像和归一化权重图进行拉普拉斯金字塔和高斯金字塔融合得到最终的增强图像。算法流程如图 1 所示。

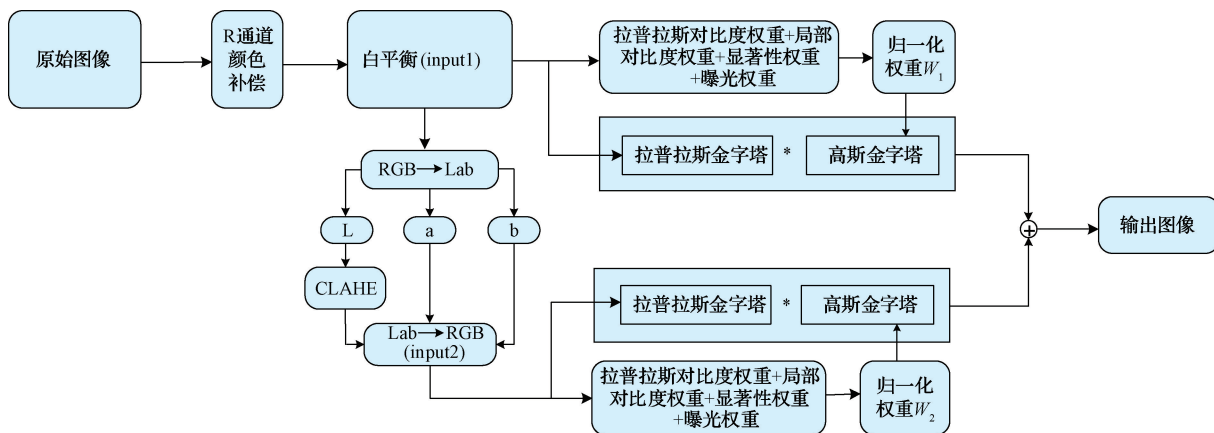


图1 算法流程

1.1 颜色校正

由于不同颜色的光的波长长短不尽相同,导致不同颜色的光在水中的衰减程度也存在差异,造成了拍摄的图像

与真实的水下场景出现颜色偏差的情况。从光在水中的传播特性可知,红光的波长比蓝光和绿光更长,所以红色光最先被吸收,大多数水下图像主要以蓝调和绿调为主,

这种颜色的偏差若不通过技术手段处理难以消除。白平衡算法^[14]是常用于颜色校正的方法,包括灰度世界、灰度阴影和最大 RGB。其中,灰色世界算法对于合理失真的水下场景实现了良好的视觉效果,也是去除蓝色色调的最好方法,但使用该方法容易造成图像存在严重的红色伪影,这是由于图像红色通道的值非常小,而灰色世界算法假设每个颜色通道均指相等,导致计算的红色通道的权值过大,会出现对红色通道进行过度补偿。因此,本算法会先对图像进行红色通道补偿再使用灰度世界白平衡算法处理图像。

对水下图像 I 中的每个像素位置 (x) 进行红色通道 I_{rc} 补偿,定义如下:

$$I_{rc}(x) = I_r(x) + \alpha \cdot (\bar{I}_g - \bar{I}_r) \cdot (1 - I_r(x)) \cdot I_g(x) \quad (1)$$

式中: I_r 和 I_g 分别表示图像 I 的红色通道和绿色通道; $\bar{I}_r$ 和 $\bar{I}_g$ 分别为红色通道和绿色通道的平均值; α 表示一个常数参数,已有研究实践证实,取 $\alpha=1$ 时适用于各种光照条件。

1.2 CLAHE 算法

颜色校正解决了水下图像的失真问题,为了减少图像噪声并提高图像对比度,解决图像边缘细节损失的问题,本文引入了 CLAHE 算法^[15]对颜色校正后的图像进行处理。CLAHE 算法是直方图均衡化(HE)的改进算法,采用 AHE 算法处理后的图像局部对比度过强,易出现噪声的放大引起图像失真;而 CLAHE 算法通过限制累积分布

函数的斜率可以避免图像的过分增强,该算法首先根据图像自适应条件确定该图像的受限值,然后对像素直方图中大于该受限值的部分进行裁剪,并将被裁剪的部分均匀分布到整个灰度空间上,由于灰度空间再分配后会使部分像素超过受限值,需要经过多次反复的平均分配过程,直到很少出现像素值超出受限值为止。既保证了直方图面积不会改变又限制了直方图的变化幅度,达到减小图像噪声,减弱图像局部对比度过强的目的。CLAHE 算法原理如图 2 所示。

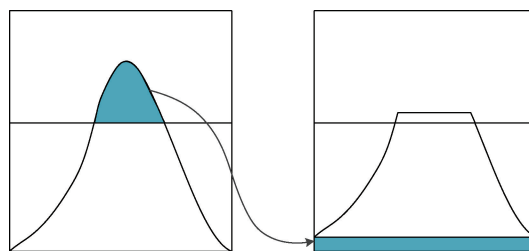


图 2 CLAHE 算法原理

因此,本文采用 CLAHE 算法处理颜色校正后的图像,首先将图像从 RGB 空间转换到 Lab 空间,“L”分量表示亮度,“a”和“b”分量表示色度,为解决水下图像光照不均匀导致的对比度低、亮度低的问题,对 L 通道采用 CLAHE 算法进行处理。原始图像及其颜色通道的直方图与经过 CLAHE 算法处理后的图像及其 R、G、B 通道对比结果分别如图 3 和 4 所示。对比图 3 和 4 可知,CLAHE 算法处理后的图像增强了对比度和清晰度,减

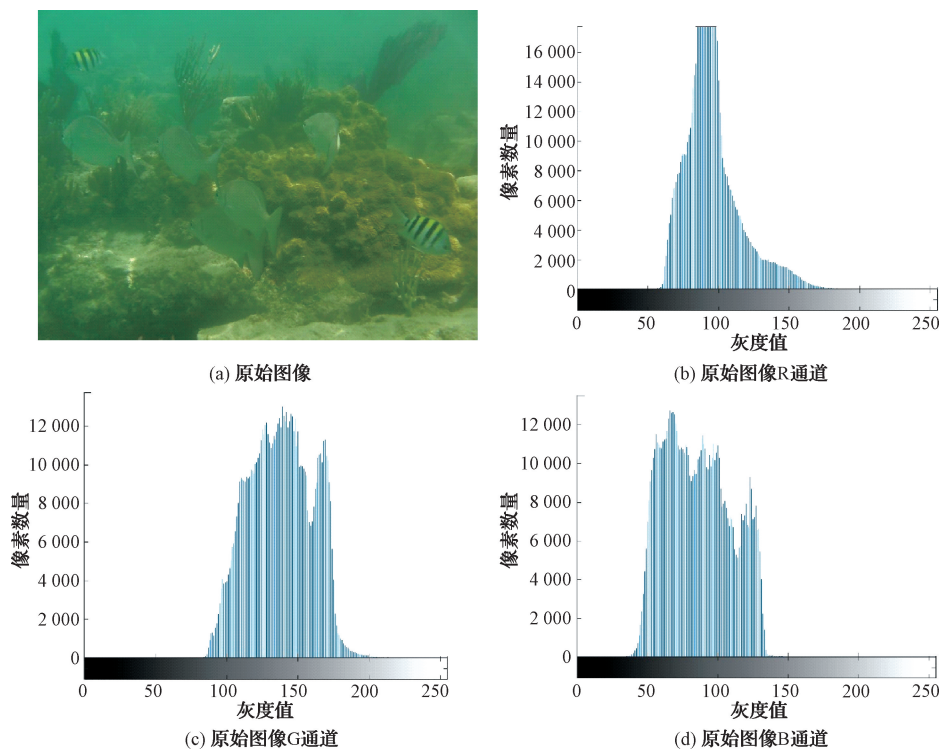


图 3 原始图像及其 RGB 通道直方图

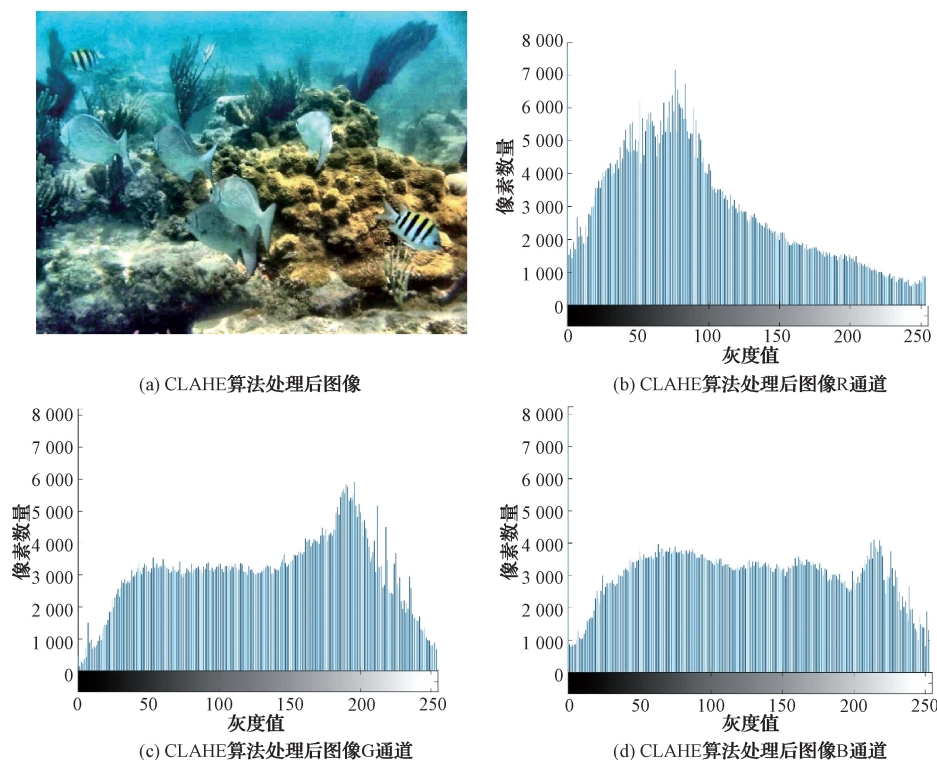


图4 CLAHE 算法处理后图像及其 RGB 通道直方图

少了图像的噪声,图像 R、G、B 通道的直方图灰度值变得更均匀。

1.3 权重计算

为进一步提升水下图像增强效果及细节信息,本文将选取颜色校正后图像和经过颜色校正及 CLAHE 算法两步处理的图像作为融合的输入图像。在图像融合之前,先提取两个处理后的图像的 R、G、B 单通道值,分别计算拉普拉斯对比度 W_{Lap} 、局部对比度 W_{Lc} 、显著性 W_s 和曝光权重 W_E 这 4 种权重^[16-17]。

拉普拉斯对比度权重的作用是估算全局对比度,用拉普拉斯滤波器对输入图像每一个亮度通道进行滤波,通过对滤波结果取绝对值来获取全局对比度权重图,可以得到比未经过处理的图像更好的边缘和纹理细节信息。

局部对比度权重指的是图像像素点与其所在区域的平均像素值的关系,从局部对比度的值可观察到图像中颜色过亮和过暗的区域,进一步增强了图像的局部细节和对比度,先要将输入图像从 RGB 颜色空间转换到 Lab 颜色空间,计算局部对比度权重 W_{Lc} :

$$W_{Lc} = \|L^n - L_{lp}^n\| \quad (2)$$

式中: L 表示输入图像的亮度通道; n 表示输入图像的序列; L_{lp} 表示经过低通滤波处理后的亮度通道。

显著性权重的作用是通过增强输入图像明暗区域对比度来增强图像的全局对比度,突显区域中亮度值更高的部分,将输入图像从 RGB 空间转换到 Lab 空间后再计算

显著性权重 W_s :

$$W_s = (L_n - L_m^n)^2 + (A_n - A_m^n)^2 + (B_n - B_m^n)^2 \quad (3)$$

式中: L_m 表示 L 通道平均值; A_m 表示 A 通道平均值; B_m 表示 B 通道平均值。

曝光权重用于评估输入图像 L 通道的大小,曝光外观在像素的归一化值接近 0.5 时更高,曝光权重 W_E 是亮度平均值与 0.5 的高斯模型之间的距离,表达式如下:

$$W_E = \exp\left(-\frac{(L(x,y) - 0.5)^2}{2 \times \sigma^2}\right) \quad (4)$$

式中: σ 为标准差,本文取标准差为 0.25。

得到两个不同的输入图像的权重图后,将每个输入图像的 4 个权重图按如下方法进行归一化处理:对每个输入图像计算得到的拉普拉斯对比度 W_{Lap} 、局部对比度 W_{Lc} 、显著性 W_s 和曝光权重 W_E 进行线性叠加整合为权重 W_n 。然后对总权重进行归一化,归一化过程如下:

$$\begin{cases} W_n = W_{Lap}^n + W_{Lc}^n + W_s^n + W_E^n \\ \bar{W}_n = \frac{W_n}{\sum_{n=1}^N W_n} \end{cases} \quad (5)$$

式中:本文采用的是两个输入图像,故 $N=2$; W_n 表示和权重图; $\bar{W}_n$ 表示归一化后的权重图。

1.4 图像融合

本文打算采用加权融合算法^[18]对水下图像进行进一步增强处理,首先将颜色校正后的图像和对比度增强后的图像采用拉普拉斯金字塔分解,得到 l 个不

同层级的图像,同时使用高斯金字塔分别对颜色校正后的图像和对比度增强后的图像的归一化权重图进行相同层数的分解,然后采用式(6)进行融合,得到融合图像。

$$F_l = \sum_{n=1}^N G_l[\bar{W}_n(x,y)] \times L_l[I_n(x,y)] \quad (6)$$

式中: F_l 表示最后输出的融合图像; N 代表输入图像的数量,在本文中 $N=2$; G_l 表示高斯金字塔的第 l 层分解图像; L_l 表示拉普拉斯金字塔的第 l 层分解图像。

2 实验结果与分析

2.1 实验结果

本文算法在 Windows10 64 位操作系统, MATLAB R2021a 的运行环境下实现,对水下图像进行测试。为证明本文所提出的水下图像增强方法的有效性,本文选取了5幅不同水下环境图像进行实验验证,将本文算法与 DCP 算法、MSRCR 算法、文献[8-9]4种水下图像增强算法进行对比分析,实验结果如图5所示。

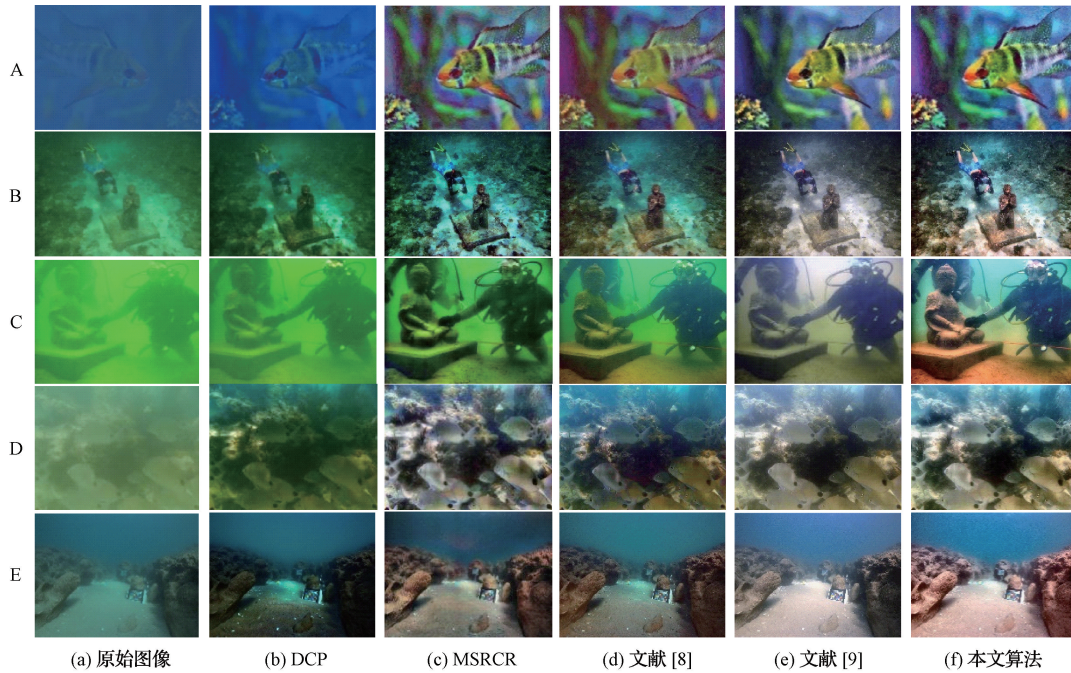


图5 原始图像和不同算法处理后的图像对比

2.2 算法对比

图像质量评价方法一般分为主观评价和客观评价两个方面,但不同的测评人员对图像的敏感程度不同,对同一幅图像的评价存在差异。因此,为了使算法对比结果更准确、更客观,本文将选取常用于评价水下图像质量指标^[19]对图像进行测评,分别是两个有参考评价指标信息熵、峰值信噪比(PSNR)和两个无参考评价指标水下图像质量评价度量(UIQM)和水下彩色图像质量评级(UCIQE)^[20]。

信息熵是度量图像包含多少信息量的指标,信息熵越高表示图像所包含的信息量越丰富,图像的质量也越好。定义如下:

$$E = - \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n p(x,y) \log(p(x,y)) \quad (7)$$

式中: m 、 n 表示图像的长和宽; $p(x,y)$ 表示图像每个像素点的灰度比例。

PSNR 指标用于衡量图像的失真程度,PSNR 值越大,说明图像失真越小,其表达式为:

$$PSNR = 10 \times \lg\left(\frac{M^2}{MSE}\right) \quad (8)$$

式中: M 为处理后的增强图像像素最大值; MSE 为原始图像和增强图像的均方误差。

UIQM 评价指标由水下图像的色彩度、清晰度和对比度3个度量部分组成,UIQM 值越大代表水下图像处理效果越好。其表达式为:

$$UIQM = c_1 \times UICM + c_2 \times UISM + c_3 \times UIConM \quad (9)$$

式中:UICM 为色度分量;UISM 为清晰度分量;UIConM 为对比度分量; c_1 、 c_2 和 c_3 分别为各分量的权重系数,通常在评价水下图像时倾向于以对比度作为重点,故 UIConM 会设置更大的权重值,本文 $c_1=0.0282$, $c_2=0.2953$, $c_3=3.5753$ 。

UCIQE 评价指标是由水下图像的色彩度、饱和度和对比度线性加权组合得到,用于对水下图像不均匀色偏、模糊程度和低对比度进行定量评估。其表达式为:

$$UCIQE = c_1 \times \sigma_c + c_2 \times con_l + c_3 \times \mu_s \quad (10)$$

式中: c_1 、 c_2 和 c_3 分别为各分量的权重系数; σ_c 表示色度的标准差; con_l 表示亮度的平均值; μ_s 表示饱和度的平均值。用信息熵、PSNR、UIQM 和 UCIQE 4 个指标评价图 5 中图像质量,结果分别如表 1~4 所示。

表 1 图像的信息熵值

图像	原始值	DCP	MSRCR	文献[8]	文献[9]	本文算法
图 5A	5.656 4	7.087 4	7.476 9	7.308 9	7.112 7	7.784 3
图 5B	7.374 5	7.186 5	7.523 1	7.317 5	7.631 5	7.836 6
图 5C	7.255 6	7.156 3	7.283 6	7.562 1	7.591 2	7.877 9
图 5D	6.676 3	7.060 5	7.692 6	7.424 1	7.501 1	7.844 3
图 5E	7.202 7	6.978 3	7.337 2	7.151 9	7.718 0	7.910 6

表 2 图像的 PSNR 值

图像	DCP	MSRCR	文献[8]	文献[9]	本文算法
图 5A	12.988 3	13.456 8	13.158 9	12.568 1	13.553 9
图 5B	17.446 1	18.513 2	13.893 3	14.519 6	18.891 1
图 5C	14.658 5	14.295 2	10.260 2	10.094 3	14.669 6
图 5D	12.454 4	14.781 6	13.929 4	15.592 2	17.620 1
图 5E	16.302 7	17.915 5	12.014 2	13.419 8	20.239 8

表 3 图像的 UIQM 值

图像	原始值	DCP	MSRCR	文献[8]	文献[9]	本文算法
图 5A	1.075 9	3.432 6	5.202 3	4.160 7	4.420 7	5.567 0
图 5B	1.569 2	4.395 7	4.510 9	4.883 3	4.667 7	5.569 7
图 5C	-0.610 6	3.763 2	4.837 9	4.107 8	3.878 1	4.926 9
图 5D	1.627 6	4.679 9	4.958 7	4.401 6	4.061 1	5.351 1
图 5E	2.042 8	4.280 5	4.992 4	4.392 8	4.057 3	5.068 7

表 4 图像的 UCIQE 值

图像	原始值	DCP	MSRCR	文献[8]	文献[9]	本文算法
图 5A	0.474 6	0.550 0	0.493 3	0.491 1	0.515 3	0.553 1
图 5B	0.525 7	0.575 9	0.534 9	0.507 4	0.483 0	0.586 1
图 5C	0.545 2	0.526 0	0.551 5	0.523 3	0.489 6	0.586 0
图 5D	0.408 1	0.516 2	0.472 9	0.522 5	0.480 2	0.535 9
图 5E	0.495 7	0.550 5	0.475 2	0.499 2	0.484 1	0.534 7

2.3 实验分析

从图 5 可知,DCP 算法对于区分图像前景和背景效果不理想,也不能够解决图像出现的色彩偏差的问题;MSRCR 算法改善了图像色偏问题但图像的边缘细节较为模糊;文献[8]所提的算法提高了图像的对比度,图像的模糊程度也得到一定改善但依旧还存在色彩不平衡的问题;文献[9]的算法解决了图像边缘细节模糊、对比度低的问题但色偏问题没有得到很好的解决。而不同水下场景的原始图像在经过本文算法进行增强处理后图像失真、对比度低、亮度低、颜色偏差、细节模糊等问题均得到了改善,对比度、亮度得到了很大程度的提高,修正了图像色偏,解决了图像边缘细节模糊问题,特别是对于低质的水下图像颜色也得到了较好的校正。总之,从主观视觉评价

方面本文算法的效果更佳。

从表 1 可以看出,对比其他算法,不论在哪一种水下场景之下本文所提的算法信息熵值均是最高,说明经过本文算法处理后的图像所含图像信息最丰富,与原始图像相比信息熵最少提高了 5.6%。由表 2 可知,本文算法处理后的图像 PSNR 值相对较大,说明本文算法处理后的图像具有更好的保真程度。由表 3 可知,经过本文算法处理后的水下图像的 UIQM 值均优于其他算法处理的图像,说明本文算法处理后的图像在色度、清晰度和对比度 3 个方面的综合评价效果更好,UIQM 值相对于原始图像提高了 1.48 倍以上。由表 4 可知,除了图 5E 经本文算法处理后的 UCIQE 值低于 DCP 算法处理后的值,本文算法处理的其他图像的 UCIQE 值均高于其他算法处理后的值,说明

本文算法处理后的图像的色度、饱和度和对比度3个度量指标的整体效果更好,图像的UCIQE值相较于原始图像提高了7.5%以上。综上所述,本文算法相较于其他算法提升效果最明显,经过加权融合后的图像不仅能够提高图像对比度和亮度,还能够校正图像的色偏,使图像细节变得更加清晰。

3 结 论

本文针对水下图像在经过处理后出现色彩偏差、细节模糊和对比度低等问题进行研究,在白平衡理论的基础上,提出了一种结合CLAHE算法与加权融合的水下图像增强算法。由实验结果可知,从主观上看本文算法能够处理不同程度失真及色偏的图像,有效地校正了图像颜色偏差,提高图像的对比度和清晰度效果显著,局部细节也得到了进一步提升,并且背景区域也有较好的增强效果。从客观上看,本文算法在信息熵、PSNR、UIQM和UCIQE这4个图像质量评价指标方面均优于其他对比算法,特别是相较于原始图像,信息熵至少提高了5.6%,UIQM提高了1.48倍以上,UCIQE提高了7.5%以上。由此可见,本文所提算法在增强水下图像方面是有效可行的。但是本文算法为提升水下图像的整体效果和增强图像背景区域加入了融合过程,相较于其他算法该算法计算复杂,运算量大,需要更长的运行时间,并且只适用于单一图像增强处理,这限制了该算法的适用性。继续优化算法提升运行时间,将图像增强与识别方法结合,扩展算法的实用性是下一步研究的目标。

参 考 文 献

- [1] WANG Y, SONG W, FORTINO G, et al. An experimental-based review of image enhancement and image restoration methods for underwater imaging[J]. IEEE Access, 2019(7): 140233-140251.
- [2] 胡振宇,陈琦,朱大奇. 基于颜色平衡和多尺度融合的水下图像增强[J]. 光学精密工程, 2022, 30(17): 2133-2146.
- [3] MCGLAMERY B L. A computer model for underwater camera systems[C]. Proceedings of SPIE 0208, Ocean Optics VI. Monterey: SPIE, 1980.
- [4] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [5] PENG Y T, COSMAN P C. Underwater image restoration based on image blurriness and light absorption[J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2017, 26(4): 1579-1594.
- [6] BERMAN D, LEVY D, AVIDAN S, et al. Underwater single image color restoration using haze-lines and a new quantitative dataset[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2020, 43(8): 2822-2837.
- [7] MA J, FAN X, YANG S X, et al. Contrast limited adaptive histogram equalization-based fusion in YIQ and HSI color spaces for underwater image enhancement[J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2018, 32(7): 1854018.
- [8] ANCUTI C O, ANCUTI C, DE V C, et al. Color balance and fusion for underwater image enhancement[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 27(1): 379-393.
- [9] FU X, FAN Z, LING M, et al. Two-step approach for single underwater image enhancement[C]. IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, 2017: 789-794.
- [10] 范新南,鹿亮,史朋飞,等. 结合MSRCR与多尺度融合的水下图像增强算法[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(2): 6-10.
- [11] LI C, GUO C, REN W, et al. An underwater image enhancement benchmark dataset and beyond[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2019, 29: 4376-4389.
- [12] ZHANG T, LI Y, TAKAHASHI S. Underwater image enhancement using improved generative adversarial network[J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2021, 33(22): e5841.
- [13] 周露璐,赵磊,李恒,等. 基于轻量级密集残差网络的水下图像增强[J/OL]. 电子测量与仪器学报: 1-9 [2023-03-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2488.TN.20221215.1120.003.html>.
- [14] 奔粤阳,汤瑞,戴平安,等. 基于加权融合的水下视觉图像增强算法[J/OL]. 北京航空航天大学学报: 1-12 [2023-03-10]. DOI: 10.13700/j. bh. 1001-5965. 2022.0540.
- [15] 杨亚绒,李恒,赵磊,等. 改进的同态滤波与多尺度融合的水下图像增强[J]. 机械科学与技术, 2022, 41(8): 1231-1239.
- [16] 王智奇,李荣冰,刘建业,等. 基于同态滤波和直方图均衡化的图像增强算法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(24): 75-80.
- [17] 史韶杰,韩建宁,李大威,等. 基于多尺度曝光融合的医学CT图像增强方法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(6): 106-111.

- [18] 李华昆,李恒,赵磊,等.改进的伽马校正与多尺度融合的水下图像增强[J].光电子·激光,2022,33(7):700-708.
- [19] 严浙平,曲思瑜,邢文.水下图像增强方法研究综述[J].智能系统学报,2022,17(5):860-873.
- [20] 王柯俨,黄诗芮,李云松.水下光学图像重建方法研究进展[J].中国图象图形学报,2022,27(5):1337-1358.

作者简介

丁洁,硕士研究生,主要研究方向为信息与信号处理、图像处理等。

E-mail:657759739@qq.com

陆安江(通信作者),博士,副教授,主要研究方向为信息与信号处理、光机电等。

E-mail:39146565@qq.com