

基于图像分割和色适应变换白平衡的水下图像增强

张云涛¹, 刘惠萍^{1*}, 黄益铭², 于佳¹¹中国海洋大学信息科学与工程学院物理与光电工程学院, 山东 青岛 266100;²浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027

摘要 由于光在水下传播时受到吸收、散射、衰减的影响, 在水下场景中采集的图像退化明显, 存在对比度低、蓝绿色偏严重等现象。基于此, 提出一种基于图像分割和色适应变换白平衡的水下图像增强算法。将色适应变换引入水下颜色校正, 将基于图像三通道反转去雾的低照度增强方法应用于水下图像增强, 并提出基于图像分割的白平衡策略, 同时将所提算法与经典算法进行比较。实验结果表明, 所提算法处理后图像的 underwater color image quality evaluation metric (UCIQE) 指标平均值为 0.5839, underwater image quality measures (UIQM) 指标平均值为 1.3689, 中性色角度误差平均值为 5.0972, 均优于两种经典算法。所提算法在颜色校正效果和清晰度提升上具有一定的优越性。

关键词 图像处理; 图像增强; 白平衡; 暗通道先验; 色适应

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221820

Underwater Image Enhancement Based on Image Segmentation and Color Adaptation Transformation for White Balance

Zhang Yuntao¹, Liu Huiping^{1*}, Huang Yiming², Yu Jia¹¹College of Physics and Optoelectronic Engineering, Faculty of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China;²College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China

Abstract Owing to the effects of absorption, scattering, and attenuation during underwater light propagation, images acquired from an underwater scene degenerate significantly, i. e., they exhibit low contrast and undesirable blue-green bias. Therefore, an underwater image enhancement algorithm based on image segmentation and color adaptation transformation for white balance is proposed. The color adaptation transformation is introduced for underwater color correction, and a low illumination enhancement method based on three-channel inversion defogging is applied to improve underwater images. Further, a white balance strategy based on image segmentation is proposed, and the proposed algorithm is compared with classical algorithms. Experimental results show that the average values of the underwater color image quality evaluation metric (UCIQE), underwater image quality measures (UIQM), and neutral color angle error of the image processed by the proposed algorithm are 0.5839, 1.3689, and 5.0972 respectively, which are higher than those of two classical algorithms. The proposed algorithm presents certain advantages in terms of color correction and sharpness improvement.

Key words image processing; image enhancement; white balance; dark channel a priori; color adaptation

1 引言

随着人类对海洋资源的开发与利用逐步加深, 水下可见光图像由于拥有丰富的信息和较高的分辨率, 在水下考古、资源勘探等水下作业中发挥着重要的作用。由于水体环境的特殊性, 水对光有严重的吸收和

散射效应, 且具有波长选择性^[1], 因此水下图像通常存在严重的蓝绿色偏并且有画面模糊、可视距离低等问题。

对水下图像进行颜色校正和图像增强等操作, 可以降低水体吸收散射和衰减的影响, 实现水下场景图像接近空气中的显示效果。水下图像的颜色校正通常

收稿日期: 2022-06-13; 修回日期: 2022-07-11; 录用日期: 2022-08-20; 网络首发日期: 2022-08-29

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61705210)

通信作者: liuhuiping@ouc.edu.cn

采用白平衡算法,通过补偿水下图像的红通道^[2],提升白平衡算法在处理水下图像时的表现。同时结合差异通道增益与改进多尺度 Retinex 算法也可有效地改善水下图像的质量。利用颜色恒常性和多尺度小波的水下光学图像增强算法可有效地平衡水下光学图像的色度和亮度,显著提高图像清晰度和细节信息。常用的水下图像增强算法有直方图均衡化(HE)、限制对比度直方图均衡化(CLAHE)^[3]等。图像复原方法考虑水下成像的辐射传输过程,由于大气与水体相似的图像衰减特性,这些算法大多由大气去雾算法改进而来。利用图像 G、B 通道进行水下暗通道先验^[4]的去雾效果优于 R、G、B 三通道这一结论来自文献^[5-6],根据水体类型预设水体衰减系数比并将雾线先验算法(HL)应用于水下图像能获得极高的透射率估计精度^[7]。近年来,深度学习方法也逐步应用于水下图像增强领域。

上述方法极大提高了水下图像质量,但仍存在一些不足,如颜色校正效果仍与大气中的白平衡效果有差距,算法的时间复杂度高。本文针对现有水下图像颜色校正与图像增强算法存在的不足,提出一种新的水下图像增强方法。将色适应变换引入水下白平衡校正,利用图像反转去雾实现图像暗部细节增强,利用场景距离信息划分图像,分别进行白平衡处理,并通过改变上述操作的顺序,优化最终的水下图像增强与颜色校正效果。

2 基本原理

2.1 水下成像模型

光经水汽界面进入水体后,会受到海水的吸收和散射,且随深度增加各种辐照度与辐亮度近似呈指数衰减,根据光在水下传输的特性,水下成像模型可描述为

$$I(x) = J(x)\beta_\lambda^p t_\lambda(x) + [1 - t_\lambda(x)]B, \quad (1)$$

$$\lambda \in \{\text{red, green, blue}\},$$

式中: $J(x)$ 为物体表面的色度与光源强度的乘积; β 为水体吸收系数; D 为场景在水下的深度; t 为场景中每个像素位置的透过率; B 为无穷远处对应的散射光强度。

2.2 暗通道先验算法

2009年,He等^[4]提出暗通道先验理论,即在无雾图像中局部区域总存在一些像素,这些像素中至少有一个颜色通道的亮度值非常低。在有雾条件下,由于散射光分量的存在,画面中的暗通道灰度值不再趋近于零,通过暗通道的值可以求得有雾图像的透过率。在大气中的光学成像模型通常为

$$I(x) = J(x)t_\lambda(x) + [1 - t_\lambda(x)]B, \quad (2)$$

$$\lambda \in \{\text{red, green, blue}\}.$$

根据暗通道先验理论可得到透射率的计算公式:

$$t(x) = 1 - \min_{y \in \Omega(x)} \left[\min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{I^c(y)}{A^c} \right]. \quad (3)$$

计算完初步的透射率图后,通常对其进行导向滤波处理,以提升透射率图的精细度。由于数字图像的位深有限,透射率值过小会导致图像失真,因此通常将透射率的最小值 t_0 限制在 $[0.1, 0.5]$ 。成功估计出透射率和大气光强便可得到最终的图像复原公式:

$$J(x) = \frac{I(x) - A^c}{\max[t(x), t_0]} + A^c. \quad (4)$$

2.3 水下白平衡算法

现实中物体的颜色由物体本身的光谱反射、透射特性与光源的光谱特征共同决定,该特性可由朗伯特反射模型表示, x 像素位置的光强^[8]可以表示为

$$f(x) = \int_0^\infty e(\lambda)s(x, \lambda)c(\lambda)d\lambda, \quad (5)$$

式中: $e(\lambda)$ 为光源光谱功率分布; $s(x, \lambda)$ 代表物体在 x 位置处对波长 λ 的光的反射率; $c(\lambda)$ 为相机传感器的光谱响应函数。白平衡算法通过“将白色的物体还原成白色”实现人眼颜色恒常性的模拟。正确估计出环境光 e ,使用对角模型将图像校准到D₆₅标准白光下。

$$f' = Df = \begin{bmatrix} \frac{e_R'}{e_R} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{e_G'}{e_G} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{e_B'}{e_B} \end{bmatrix} f, \quad (6)$$

式中: D 为对角矩阵,由 e 和 e' 共同决定,白平衡算法估计的光照 $e = (e_R, e_B, e_G)^T$,标准白光 $e' = (e_R', e_B', e_G')^T$ 。

3 基于图像分割和色适应变换的白平衡水下图像增强算法

所提算法流程如图1所示。首先对原图像进行暗部细节增强,并输入Haze-Line算法,得到暗部细节增强水下图像以及距离估计图;随后对暗部细节增强后的图像进行基于Gray-World和色适应变换的白平衡操作;再将该图像在HSV色彩空间中进行饱和度增强操作;最终将饱和度增强后的图像与先前得到的距离估计图一同输入基于场景距离划分的白平衡算法,得到输出图像。

3.1 暗部细节增强

2011年,Dong等^[9]根据低照度图像反转后有雾图像存在许多相似特征这一现象,提出一种高效的低光照图像处理方法。该方法首先对图像R、G、B通道的灰度值进行反转:

$$R^c(x) = 255 - I^c(x), \quad (7)$$

式中: I 为输入图像在像素 x 处的灰度值; R 为反转图

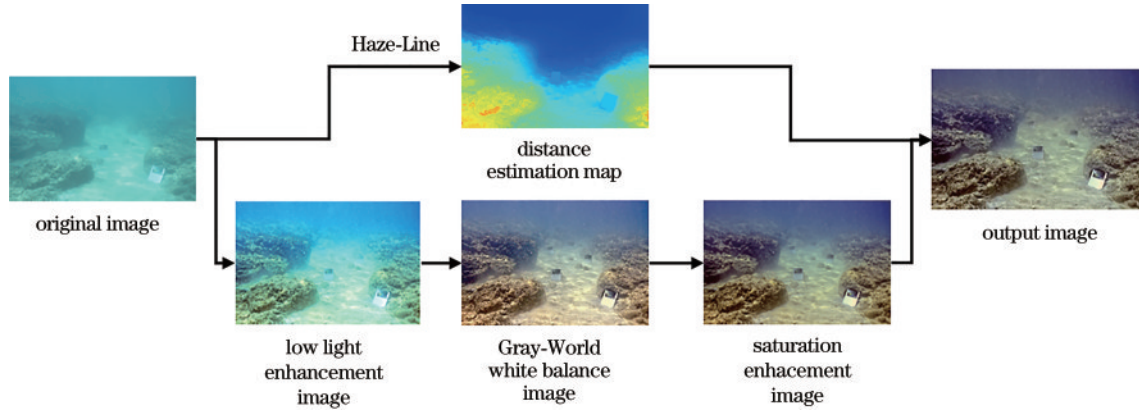


图 1 所提算法流程图

Fig. 1 Flow chart of proposed algorithm

像在像素 x 处的灰度值。随后对其进行暗通道先验去雾,将 $R^c(x)$ 代入式(3)、(4)中求出去雾后的 $J^c(x)$ 。

最终再次将图像反转:

$$E^c(x) = 255 - J^c(x), \quad (8)$$

式中: $E^c(x)$ 为最终的增强图像。暗部细节增强后的图像如图 2 所示。可以看出,输出图像相比原图像,在

礁石阴影部分拥有更丰富的细节,即经过图像三通道反转增强处理后的图像,暗部细节有了明显的提升。对比原图像,输出图像在整幅图像范围内拥有更高的对比度和锐度,可视距离得到了提升,但仍存在严重的偏色,且偏色程度随场景距离不同。暗部细节增强操作能有效提高图像暗部亮度并增强图像整体细节。

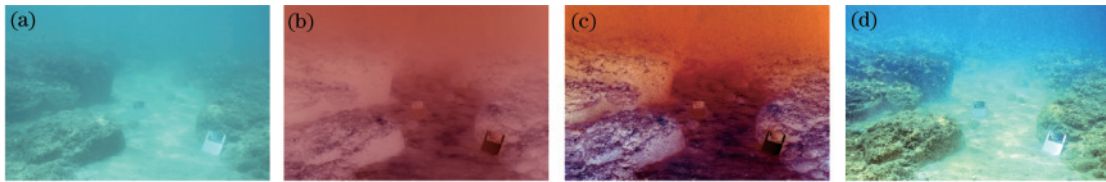


图 2 低照度图像处理。(a)原图像^[7]; (b)负片图像; (c)去雾后的负片图像; (d)增强结果

Fig. 2 Low illumination image processing. (a) Original image^[7]; (b) negative image; (c) negative image after defogging; (d) enhancement result

3.2 色适应变换

色适应变换的目的是求出当前光照下的一个颜色在另一个光照条件下的对应色,对水下图像进行基于色适应变换的白平衡操作即将水下光照条件下的图像变换到标准白光光照条件下的图像。色适应变换以沃恩·克里斯的色适应模型为依据分两步进行:首先将颜色的三刺激值转换成人眼三种视锥细胞的刺激量,然后根据光照条件变化时三种锥细胞响应的条件情况预测出该颜色的对应色。从三刺激值 XYZ 到锥响应 LMS 的变换公式为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{\text{vonkries}} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \\ \mathbf{M}_{\text{vonkries}} = \begin{bmatrix} 0.4002 & 0.7076 & -0.0808 \\ -0.2263 & 1.1653 & 0.0457 \\ 0 & 0 & 0.9182 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

随后在 LMS 空间进行类似式(6)的对角变换,并将计算结果通过沃恩·克里斯逆变换到三刺激值 XYZ 空间:

$$\begin{bmatrix} X_{\text{output}} \\ Y_{\text{output}} \\ Z_{\text{output}} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{\text{vonkries}}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{L_2}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{M_2}{M_1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{S_2}{S_1} \end{bmatrix} \mathbf{M}_{\text{vonkries}} \begin{bmatrix} X_{\text{input}} \\ Y_{\text{input}} \\ Z_{\text{input}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

沃恩·克里斯变换可很好地进行对应色的预测,但对诸多视觉现象无法成功模拟。现代色适应研究集中在锐光谱锥响应,首先将锐响应模型的色适应变换替换为 Bradford 变换,又称 BFD 变换。从三刺激值到锐响应空间的变换公式为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{\text{BFD}} \begin{bmatrix} X/Y \\ Y/Y \\ Z/Y \end{bmatrix} \\ \mathbf{M}_{\text{BFD}} = \begin{bmatrix} 0.8951 & 0.2664 & -0.1614 \\ -0.7502 & 1.7135 & 0.0367 \\ 0.0389 & -0.0685 & 1.0296 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (11)$$

式(11)的 RGB 代表锐响应,替换沃恩·克里斯模型中的 LMS 锥响应。基于锐响应的 Bradford 变换在对应色预测上有更好的表现,如图 3 所示。

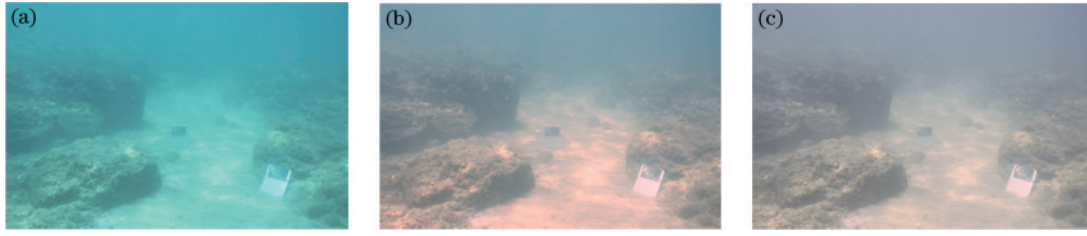


图 3 基于色适应变换的白平衡效果对比。(a)原图像;(b)线性增益调整后白平衡;(c)BFD变换白平衡效果

Fig. 3 Contrast of white balance effect based on color adaptation transformation. (a) Original image; (b) white balance after square linear gain adjustment; (c) white balance effect after BFD transformation

为了定量地比较 BFD 变换的优越性,将 SQUID 数据集中的 RGT_3008.NEF 图片作为参考,拾取图像中 5 个色板中的中性色块的颜色,将其与标准白光的角度误差作为颜色校正效果的衡量依据,角度误差为

两个输入 RGB 向量在 RGB 色彩空间中的夹角。表 1 为线性拉伸与 BFD 变换对比,可以看出,利用 BFD 变换后的白平衡不论是在总体的角度误差大小还是不同距离处角度误差的差别上均优于线性拉伸。

表 1 线性拉伸与 BFD 变换对比

Table 1 Comparison between linear stretching and BFD transformation

Image	Angular error average	Angular error variance
Original image	27.6406	2.1759
Gray-World with linear stretching	6.0451	9.1292
Gray-World with BFD transformation	2.4587	1.7430

3.3 场景距离补偿白平衡

现有水下图像清晰化算法在进行透射率估计时通常存在较大误差,无法保证画面中不同距离处都能有很好的色偏校正效果。据此,提出一种新的白平衡策略,即利用去雾算法中间过程生成的透射率图对水下场景进行距离划分,对各部分分别进行白平衡操作,如图 4 所示。

图 4 第 1 行为两个输入,分别为原始图像(original image)和距离分布图(distance map),其中,距离分布图由画面中每个像素对应的实际场景位置到摄像机的距离组成,图 4 中的距离分布图由 SQUID 数据集提供,实际应用中由 Haze-line 算法进行估计。图 4 第 2 行为根据距离分布图建立的 3 个图像遮罩,白色区域数值为 1,黑色区域数值为 0,根据距离平均分割图像会导致 3 部分面积不均匀,因此在进行图像分割时,将 3 部分的距离区间大小设置为 1:2:4,得到面积近似一致的 3 个区域。设图像中所有像素点对应距离的最大值为 D_{Max} ,最小值为 D_{Min} 。令 $D_{Gap} = (D_{Max} - D_{Min})/6$,那么区域 1、2、3 对应的距离区间分别为 $[D_{Min}, D_{Min} + D_{Gap}]$ 、 $(D_{Min} + D_{Gap}, D_{Min} + 3D_{Gap}]$ 、 $(D_{Min} + 3D_{Gap}, D_{Max}]$ 。图 4 第 3 行为输入图像在 3 个遮罩区域处的光照估计结果,图 4 第 4 行为分别用第 3 行中估计出的 3 个光照对原图像进行基于 BFD 色适应模型的颜色变换后矫正到标准白光下的图像。分割后的每个图块经过白平衡处理后在各个距离处都有较好的颜色校正表现,在合成 3 幅图像过程中,为了解决相邻两图像区域的交界位置存在的颜色不连续现象,根据距离信息为 3 幅图像赋权重,最后叠

加,生成 1 张颜色过渡均匀的图像。对图 4 第 4 行从左至右的 3 幅图像赋予的融合权重分别为 W_1 、 W_2 、 W_3 ,图像中的一个像素对应的距离为 R ,那么在距离区间 $[D_{Min}, D_{Min} + D_{Gap}]$ 中: $W_3 = 0$,

$$W_1 = \begin{cases} 1, R < D_{Min} + \frac{D_{Gap}}{2} \\ 1 - \frac{R - D_{Min} - 0.5 \times D_{Gap}}{D_{Gap}}, R \geq D_{Min} + \frac{D_{Gap}}{2} \end{cases}, \quad (12)$$

$$W_2 = \begin{cases} 0, R < D_{Min} + \frac{D_{Gap}}{2} \\ \frac{R - D_{Min} - 0.5 \times D_{Gap}}{D_{Gap}}, R \geq D_{Min} + \frac{D_{Gap}}{2} \end{cases}. \quad (13)$$

在距离区间 $(D_{Min} + D_{Gap}, D_{Min} + 3D_{Gap}]$ 中:

$$W_1 = \begin{cases} 0.5 \times \frac{D_{Min} + 2 \times D_{Gap} - R}{D_{Gap}}, R < D_{Min} + 2 \times D_{Gap} \\ 0, R \geq D_{Min} + 2 \times D_{Gap} \end{cases}, \quad (14)$$

$$W_2 = 1 - 0.5 \times \frac{R - D_{Min} - 2 \times D_{Gap}}{D_{Gap}}, \quad (15)$$

$$W_3 = \begin{cases} 0, R < D_{Min} + 2 \times D_{Gap} \\ 0.5 \times \frac{R - D_{Min} - 2 \times D_{Gap}}{D_{Gap}}, R \geq D_{Min} + 2 \times D_{Gap} \end{cases}. \quad (16)$$

在距离区间 $(D_{Min} + 3D_{Gap}, D_{Max}]$ 中: $W_1 = 0$,

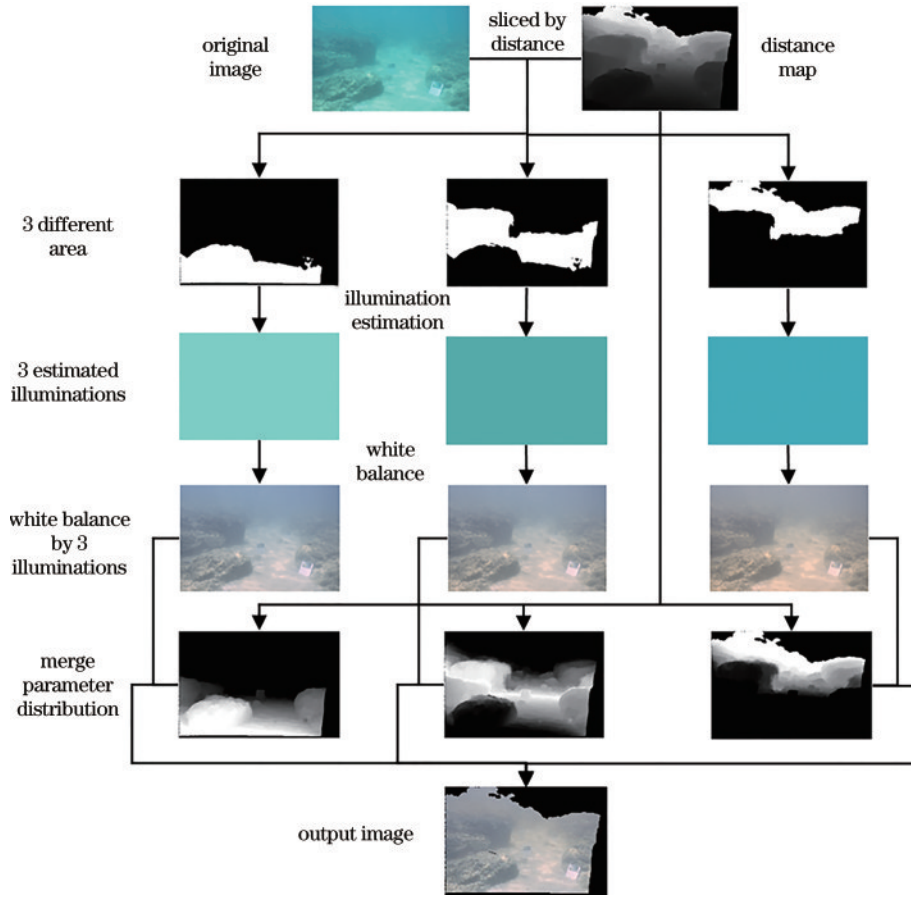


图 4 场景距离划分白平衡流程图

Fig. 4 Flow chart of color adaptation and white balance effect

$$W_2 = \begin{cases} 0.5 \times \frac{D_{\text{Min}} + D_{\text{Max}} + 3 \times D_{\text{Gap}} - 2 \times R}{D_{\text{Min}} - D_{\text{Max}} - 3 \times D_{\text{Gap}}}, & R < \frac{D_{\text{Min}} + D_{\text{Max}} - 3 \times D_{\text{Gap}}}{2} \\ 0, & R \geq \frac{D_{\text{Min}} + D_{\text{Max}} - 3 \times D_{\text{Gap}}}{2} \end{cases}, \quad (17)$$

$$W_3 = \begin{cases} 0.5 + 0.5 \times \frac{2 \times R - 2 \times D_{\text{Min}} - 6 \times D_{\text{Gap}}}{D_{\text{Min}} - D_{\text{Max}} - 3 \times D_{\text{Gap}}}, & R < \frac{D_{\text{Min}} + D_{\text{Max}} - 3 \times D_{\text{Gap}}}{2} \\ 1, & R \geq \frac{D_{\text{Min}} + D_{\text{Max}} - 3 \times D_{\text{Gap}}}{2} \end{cases}. \quad (18)$$

该策略保证了3个区域颜色过渡平滑,并且对于每一距离处,3权重之和为1。图4第5行即为3幅图像的融合权重,图4第6行为最终的输出图像。输出图像有时仍存在整幅图像不同距离处程度一致的色偏,因此需要进行第2次白平衡操作,表2为不同白平衡组合的

表 2 不同白平衡算法组合的角度误差

Table 1 Angular error of different combinations of white balance algorithms

Image	Angular error average	Angular error variance
Original image	3.0312	5.7248
Single Gray-World	2.7588	8.1877
Single SOG	4.6235	4.9296
Single GE	9.3960	1.7924
SOG with Gray-World	3.2381	3.9409
GE with Gray-World	4.0569	1.7149

角度误差,其中,SOG代表Shade of Gray算法、GE代表Gray Edge算法,本实验选择GE with Gray-World的组合。

4 结果与分析

4.1 主观评价对比

为评估算法的颜色误差,采用立体定量水下图像数据集(SQUID)^[7]中的无色板图像及有色板图像中色板均匀分布的部分作为验证结果的数据集。主观评价结果如图5所示,通过比较所提算法与UDCP及Haze-Line算法的色板位置的颜色,可以看出,所提算法最接近中性色,有更好的颜色校正效果。通过观察图像的清晰度,可以看出,所提算法有更好的可视距离且阴影部分细节有明显的提升。

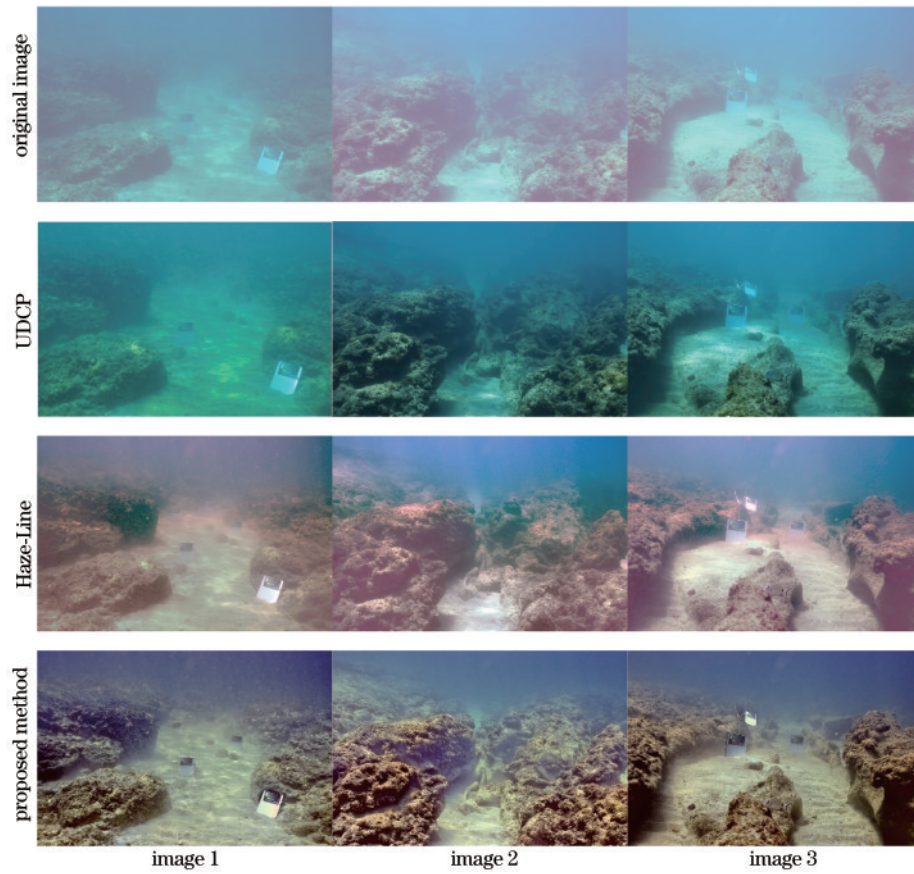


图 5 主观评价对比

Fig. 5 Comparison of subjective evaluation

4.2 客观评价对比

水下彩色图像质量评估指标 underwater color image quality evaluation metric^[10](UCIQE)是色度、饱和度和对比度的线性组合,数值越大代表图像质量越高,常用于量化水下工程和监测图像的不均匀颜色投射、模糊和低对比度。3种算法的 UCIQE 数值如表 3 所示。

从表 3 可以明显地看到,对于每一张图片,所提算

法的处理结果都有最好的表现。从平均结果来看,所提算法的 UCIQE 评价指标相比 UDCP 提升 25.54%,相比 Haze-Line 提升 12.59%。

underwater image quality measures (UIQM)^[11]是色彩测量指标(UICM)、清晰度测量指标(UISM)、对比度测量指标(UIConM)等 3 者的线性组合。其值越大,表示图像的颜色平衡、清晰度、对比度越佳。3 种算法的 UIQM 数值如表 4 所示。

表 3 UCIQE 评价指标

Table 3 UCIQE evaluation index

Image	UDCP	Haze-Line	Proposed algorithm
RGT_2993	0.4877	0.5344	0.592096179
RGT_2998	0.4252	0.5059	0.577622
RGT_3000	0.4220	0.4805	0.57214
RGT_3008	0.4314	0.4961	0.572212
RGT_3014	0.4344	0.4988	0.591271
RGT_3023	0.4993	0.5545	0.624392
RGT_3030	0.4622	0.5400	0.551507
RGT_3158	0.4523	0.5138	0.544262
RGT_3204	0.4760	0.5226	0.602165
RGT_3272	0.5318	0.5502	0.610868
RGT_3274	0.4941	0.5081	0.584179
Average	0.4651	0.5186	0.5839

表 4 UIQM 评价指标

Table 4 UIQM evaluation index

Image	UDCP	Haze-Line	Proposed algorithm
RGT_2993	0.781662	0.931361606	1.350293899
RGT_2998	0.74146	0.948686	1.392445
RGT_3000	0.727269	0.928774	1.437608
RGT_3008	0.750727	0.873135	1.415518
RGT_3014	0.781165	0.938547	1.424818
RGT_3023	1.023731	1.155612	1.460377
RGT_3030	0.656896	1.003931	1.185824
RGT_3158	0.887332	1.023299	1.304773
RGT_3204	0.683594	0.858191	1.300116
RGT_3272	0.958111	1.067851	1.387233
RGT_3274	0.920483	0.9927	1.398582
Average	0.810221	0.974735	1.368872

从表 4 可以看出,所提算法的 UIQM 评价指标相比 UDCP 提升 68.95%,相比 Haze-Line 提升 40.44%。

使用每张色板的中性色块的 RGB 值与标准中性

色的 RGB 值之间的角度误差作为颜色误差的衡量依据,结果如表 5 所示。图像对比度增强处理往往带来颜色偏差的增大,从表 5 可以看出,所提算法在提高图像对比度的同时实现了很好的中性色校正效果。

表 5 颜色角度误差评价
Table 5 Angular error evaluation

Image	UDCP		Haze-Line		Proposed algorithm	
	Angular error average	Angular error variance	Angular error average	Angular error variance	Angular error average	Angular error variance
RGT_2993	33.0469	18.09	4.7536	13.6447	3.6083	10.7422
RGT_2998	35.7348	0.1761	11.3210	1.4301	1.9159	0.2676
RGT_3000	33.6187	9.0474	5.2441	4.4737	3.7218	4.1903
RGT_3008	34.3735	1.4574	15.3404	19.6751	3.0301	2.5805
RGT_3014	34.5677	1.4927	3.1760	0.8820	9.6829	6.9542
RGT_3204	34.9504	2.0897	9.0438	6.9038	4.9360	12.2257
RGT_3272	35.8265	0.1086	9.2037	9.5380	8.4537	11.6362
RGT_3274	35.9019	0.1284	6.2272	0.9874	5.4288	8.0949
Average	34.7526	4.0738	8.0387	7.1919	5.0972	7.0865

5 结 论

针对水下图像处理经典方法的不足,提出一种新的水下图像增强方法。对于 Gray-World 白平衡算法应用于水下图像时出现的红色异常饱和的问题,引入 BFD 色适应变换,极大提升图像的视觉效果;针对颜色校正应用于整张图像无法保证不同距离处的颜色不一致的问题,提出根据距离分割图像分别进行白平衡的处理方法。对 11 张水下图像的处理结果显示,UCIQE 平均指标平均值达 1.7629。实验结果表明,所提方法对于低质量、低照度的水下图像能够较好地丰富图像信息,提升细节清晰度和饱和度,恢复图像真实的视觉效果。

参 考 文 献

- [1] 魏郭依哲,陈思遥,刘玉涛,等.水下图像增强和修复算法综述[J].计算机应用研究,2021,38(9):2561-2569,2589.
Wei G Y Z, Chen S Y, Liu Y T, et al. Survey of underwater image enhancement and restoration algorithms [J]. Application Research of Computers, 2021, 38(9): 2561-2569, 2589.
- [2] Ancuti C O, Ancuti C, de Vleeschouwer C, et al. Locally adaptive color correction for underwater image dehazing and matching[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, July 21-26, 2017, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 2017: 997-1005.
- [3] Zuiderveld K. Contrast limited adaptive histogram equalization[M]//Heckbert P S. Graphics gems. Amsterdam: Elsevier, 1994: 474-485.
- [4] He K M. Single image haze removal using dark channel prior[D]. Hong Kong: The Chinese University of Hong Kong, 2011.
- [5] Drews P, Jr, do Nascimento E, Moraes F, et al. Transmission estimation in underwater single images [C]//2013 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, December 2-8, 2013, Sydney, NSW, Australia. New York: IEEE Press, 2013: 825-830.
- [6] Drews P L J, 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] 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, 2021, 43(8): 2822-2837.
- [8] 王丛.自动图像白平衡技术的研究[D].北京:北京工业大学,2012.
Wang C. Automatic image white balance technique[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012.
- [9] Dong X, Wang G, Pang Y, et al. Fast efficient algorithm for enhancement of low lighting video[C]//2011 IEEE International Conference on Multimedia and Expo, July 11-15, 2011, Barcelona. New York: IEEE Press, 2011.
- [10] Yang M, Sowmya A. An underwater color image quality evaluation metric[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(12): 6062-6071.
- [11] 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.