

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2517843

基于光照度适应与小波融合的水下图像增强^{*}

张贵平 何志琴

(贵州大学电气工程学院 贵阳 550025)

摘要: 水下成像由于光的被吸收和散射现象,导致水下图像往往存在细节丢失、颜色偏差和光照度损失、过曝等问题。针对上述问题,本文提出了一种基于光照度适应与小波融合的增强算法。利用优化对数变换提升图像整体亮度,并通过高斯核函数卷积运算生成适应背景光照度的增强图像,再与水下图像通过小波多尺度融合以增强水下图像的低照度区域,同时压制过曝区域。其次,通过计算颜色通道的均值,以调整融合后图像的对比度和色彩饱和度。最后,通过小波迭代融合其 Gamma 矫正和锐化后的图像得到最终水下增强图像。实验结果表明,本文算法能够有效增强图像细节、恢复图像色差;图像的 IE、UCIQE 和 UIQM 的均值较原始图像分别提高了 7.5%、36.6% 和 199.8%。

关键词: 水下图像增强;光照度适应;高斯核函数卷积运算;高斯滤波;小波迭代融合

中图分类号: TN919.82;TP391.41 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Underwater image enhancement algorithm based on illumination perception adaptation and image wavelet iterative fusion

Zhang Guiping He Zhiqin

(Electrical Engineering College, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Due to the phenomenon of light absorption and scattering, underwater imaging often has problems such as detail loss, color deviation, illuminance loss, and overexposure. To solve these problems, an enhancement algorithm based on illumination adaptation and wavelet fusion is proposed in this paper. The overall brightness of the image is improved by using the optimized logarithm transformation, and the enhanced image adapted to the background illuminance is generated by the convolution operation of Gaussian kernel function, and then the underwater image is enhanced by wavelet multi-scale fusion to enhance the low illuminance area of the underwater image and suppress the overexposed area. Secondly, by calculating the mean of the color channels, the contrast and color saturation of the fused image are adjusted. Finally, the images after Gamma correction and sharpening are fused by wavelet iteration to obtain the final underwater enhanced image. Experimental results show that the proposed algorithm can effectively enhance image detail and restore image color difference. The mean values of IE, UCIQE and UIQM of the image are improved by 7.5%, 36.6% and 199.8%, respectively, compared with the original image.

Keywords: underwater image enhancement; illuminance adaptation; Gaussian kernel convolution operation; Gaussian filter; wavelet iterative fusion

0 引言

水下图像作为获取水下信息直观、有效的方式;对于科研探索、考古工程、海洋监测等多个领域都具有极其重要的应用价值。但水下环境成像的复杂性和特殊性往往导致图像质量不足、颜色失真、对比度降低,给后续的图像分析和应用带来了极大的挑战。

研究人员对水下图像提出了多种增强方法,但水下图

像增强技术大致可分为 3 类:第一类方法是基于物理模型的方法,将水下图像增强视为图像退化的逆问题。首先建立一个水下图像退化物理模型,然后根据提出的先验假设估计环境光模型等参数来反演水下图像的退化过程,最后,输出处理得到的高质量水下图像。如 Xu 等^[1]提出结合深度颜色相关性和暗通道先验方法,利用深度颜色相关性优化暗通道先验方法估计背景光,并通过多尺度去雾和去噪技术提升图像质量。杜道平等^[2]提出一种改进暗通道的水

收稿日期:2025-01-07

* 基金项目:贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2023]一般 096,黔科合支撑[2024]一般 007)资助

下图像复原方法,平衡衰减比率,减少水下图像产生的伪影和偏色问题。第二类是基于深度学习的方法,这些方法主要基于深度学习的反向散射估计模型和直接传输估计模型等能力,来修护图像由于不同区域出现各种光学效应而导致的光线散射以及成像模糊的问题。如 Liu 等^[3]提出通过结合弱监督和强监督学习的双阶段生成 GAN 框架,以恢复图像的颜色、亮度和细节,提升水下图像的视觉效果。王树林等^[4]提出采用双通道结构,提出了一种结合水下成像模型与深度学习的新型网络,通过优化网络结构和损失函数,显著改善了水下图像质量。第三类是基于非物理模型的方法,该类方法主要是基于图像金字塔融合和多任务融合等算法,将不同图像取各自特征进行融合得到增强细节和对比度的水下图像。如 Ancuti 等^[5]提出一种基于图像金字塔多尺度融合颜色补偿图像和白平衡图像的算法;同时定义两幅融合图像及其相关的权重图,强化水下图像的边缘和颜色对比度。胡振宇等^[6]提出通过颜色平衡方法校正图像颜色;对颜色校正后的图像和对比度增强后的图像进行多尺度融合得到去除色偏、提高图像清晰度和对比度的图像。

目前,国内外研究学者在水下图像处理方面做了较多的深入研究,但较少考虑到在对水下图像增强处理前,先对水下图像的光照度进行修护预处理,为此,本文提出一种基

于光照度适应与图像小波融合的水下图像增强算法。通过高斯核函数卷积运算与小波多尺度变换融合算法对水下图像进行增强暗部像素的像素值,同时压制过曝的预处理。再通过计算颜色通道的均值,以调整融合后图像的对比度和色彩饱和度。最后,通过小波迭代融合得到最终水下增强图像。

1 算法原理

由于水体对光的吸收和散射作用,导致水下成像光照不均、细节丢失。图 1 所示为本文算法流程,本文首先提出一种光照度感知适应和小波多尺度变换融合算法作为图像预处理步骤,小波多尺度变换融合算法能精确的捕捉到图像关键的局部特征,将经过高斯核函数卷积运算输出的灰度图像与原图进行多尺度分解,通过引导滤波和高斯滤波提取高频和低频信息,结合视觉权重图来联合决策信息保留,然后通过基础层和细节层融合,进一步增强图像低照度区域的像素值,同时压制过曝区域,对图像光照度进行预处理。再分别算出预处理后图像每个通道的平均值,通过亮度衰减图与直方图拉伸、原图构建等式关系校正图像的颜色空间。最后用图像小波迭代融合算法对 Gamma 校正和锐化处理后的图像的细节层进行迭代分解和多尺度融合得到增强的水下图像。

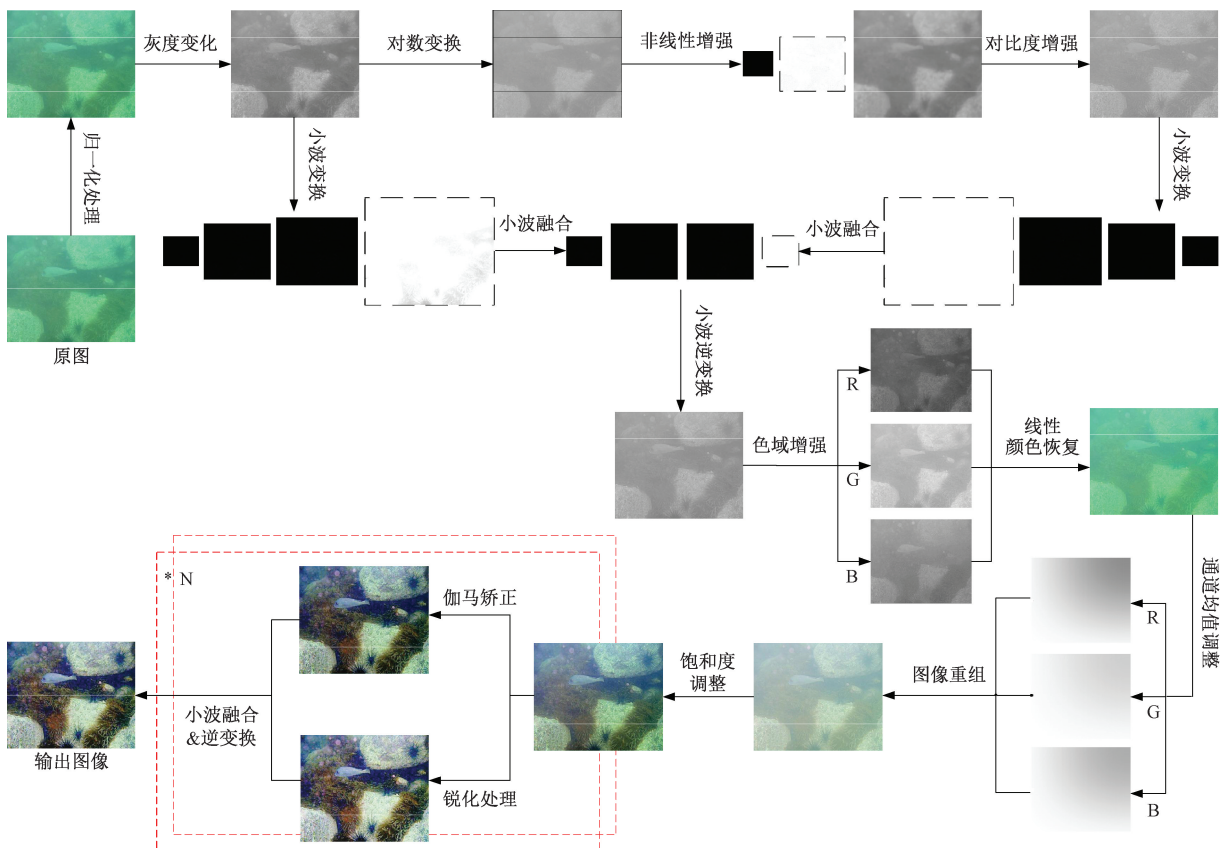


图 1 算法流程图

Fig. 1 Algorithm flow chart

1.1 非线性对数变换

水下图像通常由于光照不足而显得模糊和暗淡。文献[7]提出了一种基于非局部欧几里德距离的自适应综合邻域相关方法用于彩色图像的非线性增强,受其启发,本文将水下图像看作是一张的光照不均图像作预处理。但文献[7]所提算法用于水下图像处理会产生不可逆的红色伪影,同时无差别增强了图像的蓝色通道和绿色通道,不利于后续图像的处理,因此本文做出改进:

首先,对给定的对水下灰度图像进行非线性灰度级变换,以增强其视觉效果。通过对数变换与线性调整的结合,提高图像中低对比度区域的对比度和亮度,从而改善图像的整体质量。图像优化对数变换公式如下:

$$I_1(i, j) = \frac{\psi \times \log(1 + I_0(i, j)) + \varphi \times (1 - I_0(i, j))}{2} \quad (1)$$

式中: $I_0(i, j)$ 是水下原始图像灰度图, ψ 与 φ 是可调试的常数,用以调整亮度和对比度,根据水下具体环境不同,一般取 $2.0 \leq \psi \leq 2.5, 0 \leq \varphi \leq 1$ 。 $I_1(i, j)$ 是非线性灰度级变换后的输出图像。其次,对灰度图像 $I_0(i, j)$ 进行不同尺度的高斯核函数卷积运算,高斯滤波器的标准差取 5,得到模糊图像。卷积公式如下:

$$I_2(i, j) = I_0(i, j) \times G(i, j) \quad (2)$$

式中: $G(i, j)$ 是高斯卷积核,高斯卷积核公式如下:

$$G(i, j) = K \times e^{\left(\frac{-(i^2+j^2)}{\sigma^2}\right)} \quad (3)$$

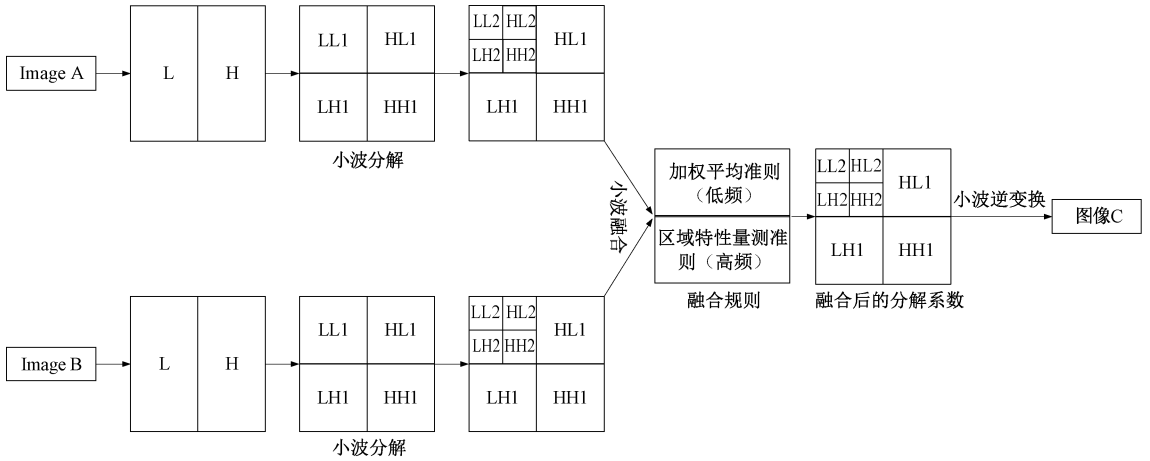


图 2 小波融合算法流程图

Fig. 2 Flow chart of wavelet fusion algorithm

其中, L、H 分别表示小波变换的不同频率,即低频和高频,低频表示图像主体结构、特征,高频表示图像局部特征和奇异特征,1、2 表示小波分解层级。对于每一次细节层分解,将图像分解为 LL(低频图像)、HL(水平细节)、LH(垂直细节)以及 HH(对角细节)。本文采用二维小波分解,其公式表示为:

式中: C 是高斯环绕空间常数。尺度 K 与 C 关系为:

$$1 = \iint K \times e^{\left(\frac{-(i^2+j^2)}{c^2}\right)} di dj \quad (4)$$

最后,将灰度图像与中心像素图像作对比度增强[7],公式表示为:

$$I_3(i, j) = \frac{I_2(i, j)}{I_0(i, j)} \quad (5)$$

$$I_4(i, j) = \alpha \times I_1(i, j)^{I_3(i, j)} + \beta \times I_0(i, j) \quad (6)$$

式中: α 与 β 是可调试的常数。根据水下不同环境存在差异,一般取 $0 \leq \alpha \leq 1$ 与 $0 \leq \beta \leq 1$ 。通过式(5)计算滤波后的图像与原图像的比值,来反映出滤波过程中对图像不同区域的影响程度,以此判断哪些区域需要加强。后通过式(6)将增强信息应用到经过预处理过的图像中,生成初始增强图像。

1.2 小波多尺度变换

将式(6)输出的增强灰度图 $I_4(i, j)$ 与初始灰度图 $I_0(i, j)$ 通过小波多尺度变换融合得到适应图像整体光照度的预处理图像。小波变换融合能精确的捕捉到 $I_4(i, j)$ 与 $I_0(i, j)$ 图像的位置和频率信息以及图像关键的局部特征,对输入图像进行多尺度分解并计算视觉权重;采用基于区域特性量测的选择及加权算子去构造融合图像对应的小波系数[8]融合基础层和细节层。通过多层次的信息融合提高图像的视觉质量和细节表现。小波变换算法流程如图 2 所示。

$$\begin{cases} I_{(k+1)}^a(i, j) = \mathbf{H}I_k(i, j)\mathbf{H}' \\ I_{(k+1)}^h(i, j) = \mathbf{G}I_k(i, j)\mathbf{H}' \\ I_{(k+1)}^v(i, j) = \mathbf{H}I_k(i, j)\mathbf{G}' \\ I_{(k+1)}^d(i, j) = \mathbf{G}I_k(i, j)\mathbf{G}' \end{cases} \quad (7)$$

式中: k 表示分解层数; $I_k(i, j)$ 表示各频带分解图像,当 $k = 0$ 时, $I_0(i, j)$ 代表原图像; a, h, v, d 分别代表低频分量、水平分量、垂直分量和对角分量; \mathbf{H}' 和 \mathbf{G}' 分别表示尺

度系数的滤波器系数矩阵 \mathbf{H} 的共轭转置矩阵以及小波系数的滤波器系数矩阵 \mathbf{G} 的共轭转置矩阵^[9]。

图像重构公式表示为:

$$I_5(i, j) = \mathbf{H}'I^a\mathbf{H} + \mathbf{G}'I^b\mathbf{H} + \mathbf{H}'I^c\mathbf{G} + \mathbf{G}'I^d\mathbf{G} \quad (8)$$

式中: $I^a = I_k^a(i, j)$, $I^b = I_k^b(i, j)$, $I^c = I_k^c(i, j)$, $I^d = I_k^d(i, j)$ 在融合过程中, 近似分量采用加权平均的融合规则, 细节分量融合决策基于区域特性量测的融合规则。本

文在小波基的选择对比了基于 Haar 小波、Coiflet 小波、Daubechies 小波、Symlet 小波、Biorthogonal 小波的 5 种小波基。图 3 表示 5 种不同小波基的融合效果对比。如图 3 所示, Haar 小波基在测试图像中的表现良好, 而 Coiflet 小波基表现较差, Haar 小波能较好的保存图像细节, 同时在对图像进行小波迭代融合时不易出现图像过锐化或导致图像光照不足的问题。

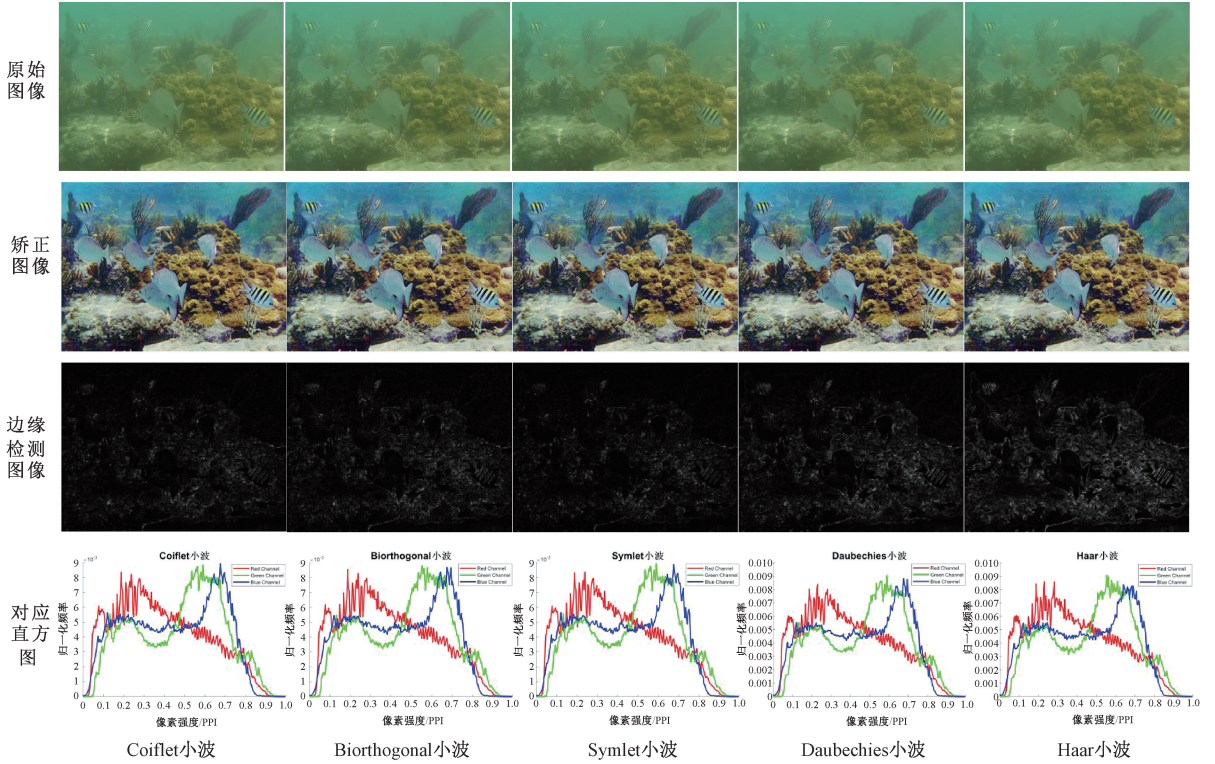


图 3 不同小波基融合对比

Fig. 3 Fusion comparison of different wavelet bases

1.3 颜色恢复

水下图像往往因为各种原因导致色彩失真, 本文在完成光照度修护后对水下图像的色彩进行矫正。对于水下图像颜色恢复的办法, 近年来基于色彩补偿和白平衡^[5]以及基于统计的颜色校正^[10]等方法已经证明了水下图像颜色校正的必要性和有效性。但这些方法会不可避免的导致水下矫正图像产生红色伪影。基于衰减图引导的转移策略^[11]结合了分段颜色校正^[12]和颜色通道补偿方法^[13]的优点, 其补偿的数学表达如下:

将小波融合得到的照度矫正图像 $I_5(i, j)$ 对像素强度最大的通道进行矫正, 其公式表达定义为:

$$I_5^l(i, j) = \max\{I_5^r(i, j), I_5^g(i, j), I_5^b(i, j)\} \quad (9)$$

式中: l, r, g, b 分别表示亮度、红色、绿色、蓝色通道, 小标 5 为输出图像序列。通过式(9)算出了照度矫正图像像素最大的通道, 并定义该通道为水下照度修护图像的亮度参考通道。随后, 通过行列二维求和计算 l, r, g, b 四个颜色通道的平均像素强度:

$$\begin{cases} \bar{I}_5^l(i, j) = \frac{1}{H \times W} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W I_5^l(i, j) \\ \bar{I}_5^r(i, j) = \frac{1}{H \times W} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W I_5^r(i, j) \\ \bar{I}_5^g(i, j) = \frac{1}{H \times W} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W I_5^g(i, j) \\ \bar{I}_5^b(i, j) = \frac{1}{H \times W} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W I_5^b(i, j) \end{cases} \quad (10)$$

式中: W 和 H 分别是 l, r, g, b 通道的高度和宽度。通过颜色补偿公式对 R、G、B 三个通道分别进行补偿并更新输出, 文献^[11]对 R、G、B 通道的补偿容易出现紫色伪影, 本文对其做轻量化处理, 实验结果表明这可以改善这种情况, 表示为:

$$\begin{cases} I_6^r(i, j) = I_5^r(i, j) + (\bar{I}_5^l \times \tau) \times I_5^l(i, j) \\ I_6^g(i, j) = I_5^g(i, j) + (\bar{I}_5^l \times \zeta) \times I_5^l(i, j) \\ I_6^b(i, j) = I_5^b(i, j) + (\bar{I}_5^l \times \nu) \times I_5^l(i, j) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $I_6^r(i, j)$ 、 $I_6^g(i, j)$ 、 $I_6^b(i, j)$ 分别是补偿后的红、绿和蓝色通道, τ, ζ, ν 为可调试常数, 一般情况下轻量化参数小于等于 1。 $\bar{I}_5^r = (\bar{I}_5^l(i, j) - \bar{I}_5^b(i, j))$ 、 $\bar{I}_5^g = (\bar{I}_5^l(i, j) - \bar{I}_5^b(i, j))$ 、 $\bar{I}_5^b = \bar{I}_5^l(i, j) - \bar{I}_5^g(i, j)$ 。对 R、G、B 补偿后的每个通道进行线性拉伸并定义最大衰减图以及图像恢复。

$$\begin{cases} I_7^r(i, j) = I_6^{\min}(i, j) + I_6^r \times \frac{I_6^{\max}(i, j) - I_6^{\min}(i, j)}{I_r^{\max}(i, j) - I_r^{\min}(i, j)} \\ I_7^g(i, j) = I_6^{\min}(i, j) + I_6^g \times \frac{I_6^{\max}(i, j) - I_6^{\min}(i, j)}{I_g^{\max}(i, j) - I_g^{\min}(i, j)} \\ I_7^b(i, j) = I_6^{\min}(i, j) + I_6^b \times \frac{I_6^{\max}(i, j) - I_6^{\min}(i, j)}{I_b^{\max}(i, j) - I_b^{\min}(i, j)} \end{cases} \quad (12)$$

$$I_8(i, j) = \max\{1 - I_7^r(i, j), 1 - I_7^g(i, j), 1 - I_7^b(i, j)\} \quad (13)$$

$$\begin{cases} I_9^r(i, j) = I_8(i, j) \times I_7^r(i, j) + \bar{I}_8 \times I_5^r(i, j) \\ I_9^g(i, j) = I_8(i, j) \times I_7^g(i, j) + \bar{I}_8 \times I_5^g(i, j) \\ I_9^b(i, j) = I_8(i, j) \times I_7^b(i, j) + \bar{I}_8 \times I_5^b(i, j) \end{cases} \quad (14)$$

式中: $I_6^{\max}(i, j)$ 、 $I_6^{\min}(i, j)$ 是颜色补偿后水下图像每个颜色通道对应的最大和最小拉伸范围。 $I_7^r(i, j)$ 、 $I_7^g(i, j)$ 、 $I_7^b(i, j)$ 分别代表红色通道和绿色通道以及蓝色通道结果线性拉伸后的结果, $I_6^r = I_6^r(i, j) - I_r^{\min}(i, j)$ 、 $I_6^g = (I_6^g(i, j) - I_g^{\min}(i, j))$ 、 $I_6^b = I_6^b(i, j) - I_b^{\min}(i, j)$ 。 $I_r^{\max}(i, j)$ 、 $I_r^{\min}(i, j)$ 、 $I_g^{\max}(i, j)$ 、 $I_g^{\min}(i, j)$ 、 $I_b^{\max}(i, j)$ 、 $I_b^{\min}(i, j)$ 是指 R、G、B 三个通道分别输入像素的最大值和最小值; $I_8(i, j)$ 为输出的最大衰减图, λ 为常数^[5]; $\bar{I}_8 = 1 - I_8(i, j)$ 。

1.4 Gamma 矫正

人眼对于外界环境亮度的感知近似于幂函数变化。本文采用图像 Gamma 矫正调整图像对比度和亮度, 矫正图像本身的非线性响应, 从而改善图像的视觉质量。它使用一个幂函数来调整图像的灰度级分布, 使得修正的水下图像更加符合人的视觉效果。Gamma 矫正的公式表示为:

$$I_{10}(i, j) = c \times (I_9(i, j) + \omega)^\gamma \quad (15)$$

式中: c 为常数, γ 为 Gamma 值, ω 为偏移量。通过 γ 改变的值 ($0.6 \leq \gamma \leq 1.2$), 可以对图像的对比度和亮度进行调整。

1.5 对比度增强

传统直方图均衡算法在一定程度上改善了水下图像的光照和对比度, 但同时也容易出现过曝和细节过度增强的现象。本文采用非锐化掩蔽的对比度增强算法防止在对比度处理时出现过曝光或者过暗的现象^[5]。其表达式定义为:

$$I_{11}(i, j) = \frac{(I_9(i, j) + N\{I_9(i, j) - G \times I_9(i, j)\})}{2} \quad (16)$$

式中: N 为直方图拉伸算子, G 为高斯滤波器。

2 实验结果与分析

为验证本文算法性能, 本文使用了水下图像增强基准数据集 (underwater image enhancement benchmark, UIEB)^[14] 和真实世界水下图像数据集 (real-world underwater image enhancement, RUIE)^[15] 进行对比试验。通过与水下暗通道先验算法 (underwater dark channel prior, UDCP)^[16]、水下全变分算法 (underwater total variation, UTV)^[17]、基于局部对比度与多尺度融合的低光水下图像增强算法 (low-light underwater image enhancer, L2UWE)^[18]、基于暗通道先验推广的图像恢复算法 (generalization of the dark channel prior for single image restoration, GDCP)^[19]、基于图像模糊度与光吸收的水下图像恢复算法 (image blurriness and light absorption, LBLA)^[20]、加权小波视觉感知融合算法 (weighted wavelet visual perception fusion, WWPF)^[11] 进行对比实验, 采用色彩准确性评价与定性评价以及客观评价的方法, 对实验结果进行分析。

2.1 色彩恢复评价

为了验证颜色恢复能力进行色卡颜色恢复实验。将本文所提方法与上述 6 种方法进行水下色卡恢复测试, 测试结果如图 4 所示。实验结果表明, 本文算法具有较好的色彩恢复效果。从图 4 输出结果可以看出, UDCP 算法、UTV 算法、GDCP 算法得到的水下增强图像整体颜色加深, 背景色偏重。LBLA 算法存在色偏, 引入了不可逆的红色伪影。L2UWE 算法整体过锐化, 对 R 通道处理过重, 导致红色颜色失真。WWPF 算法图像整体颜色偏灰色, 且同样存在红色颜色失真现象, 且第 1 组的粉色无法准确恢复, 第 2 组蓝色色块恢复成了紫色。对比之下, 本文算法修护了水下图像的清晰度和亮度, 增强后图像的颜色接近于标准色卡, 且改善了不同颜色块的对比度。

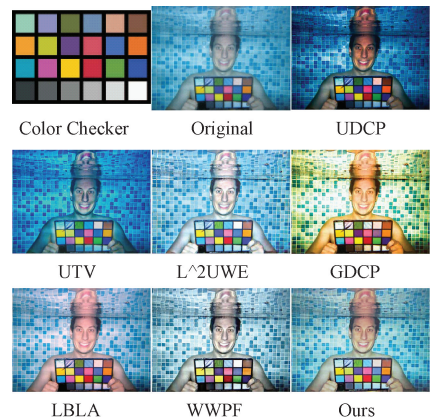


图 4 色彩恢复实验

Fig. 4 Color restoration experiment

2.2 定性评价

水下原始图像成像模糊, 存在较严重的色偏现象。将

本文方法与WWPF等6种方法进行对比,从RUIE水下图像数据集和UIEB水下图像数据集中选择不同场景的水下图像进行实验。其中,从RUIE水下图像数据集中抽选Imag1、Imag2、Imag3用于验证在照度相对均匀、水质条件较好的情况下,本文算法与其他对比算法的处理能力;从UIEB水下图像数据集中抽选Imag4、Imag5、Imag6、Imag7、Imag8、Imag9;其中,Imag4、Imag5、Imag6用于验证在照度不均、背景色偏绿色、水质逐渐恶劣、背景色逐步加深的情况下,本文算法与其他对比算法的处理能力;Imag7、Imag8、Imag9用于验证在照度不均、背景色偏蓝色、水质逐渐恶劣、背景色逐步加深的情况下,本文算法与其他对比算法的处理能力。

实验结果如图5所示。UDCP与UTV算法提升对比度的同时严重加深了背景色;L²UWE与GDCP算法普遍提升的图像的亮度,出现过曝、色偏等现象;LBLA算法不仅对图像的处理不够彻底,而且弱化了水下图像的对比度。WWPF算法整体清晰度不高,色彩弱化,虽然较好的增强了水下图像,但处理后的水下图像偏灰、偏暗,且未能有效校正图像色偏;颜色失真,导致低照度区域细节丢失。相比之下,本文所提算法抑制了水下图像局部亮度过曝,强化了图像暗部细节,处理后的水下图像亮度均匀;同时在矫正色彩失真,对比度与暗部细节强化等方面均得到较大的提升,图像处理更加贴近参考图像,显著提升图像质量。

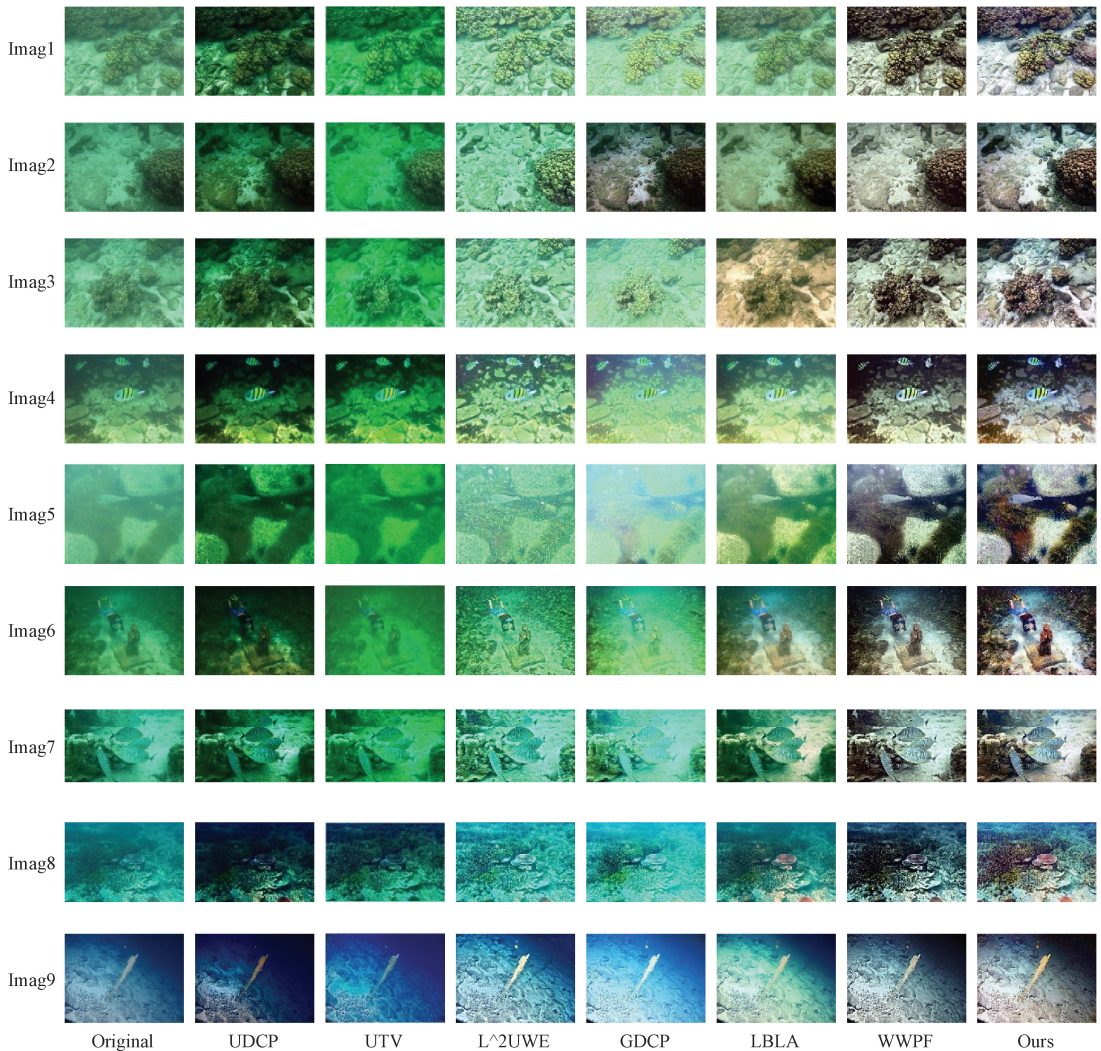


图5 各算法增强结果对比

Fig. 5 Comparison of enhancement results of various algorithms

2.3 定量评价

定量评价采用水下图像质量测量(underwater image quality metric, UIQM)^[21]、水下彩色图像质量评价指标(underwater color image quality evaluation, UCIQE)^[22]以

及信息熵(information entropy, IE)^[6]进行评价。

表1所示为UIQM实验结果,表中加粗数据值为最优值。如表1所示,本文算法大多数UIQE测试值最优;虽在Img2中,WWPF方法的UIQE值相较之下较高,但其增强

水下图像的色调改善不明显,整体图像偏灰、偏暗。对比之下,本文算法增强后的水下图像有效矫正色偏,图像色彩饱和度和对比度以及细节恢复较好。相较于其他对比

算法,本文算法处理后的水下图像较原始图像的 UIQM 的均值较原始图像提高了 199.8%,效果更佳。

表 1 水下图像质量评价 (UIQM)
Table 1 Underwater image quality assessment (UIQM)

Image	Original	UDCP	UTV	L2UWE	GDCP	LBLA	WWPF	Ours
Imag1	2.147	3.254	1.661	3.243	2.959	2.930	4.508	4.767
Imag2	1.479	2.913	1.547	2.510	4.299	2.858	4.392	4.337
Imag3	1.552	2.764	1.144	0.710	1.831	4.736	4.560	4.893
Imag4	1.237	2.328	0.716	2.644	1.627	1.876	4.384	4.423
Imag5	1.048	1.762	-0.531	2.198	1.654	2.564	4.530	4.985
Imag6	1.701	3.249	1.083	2.298	0.870	3.354	4.666	4.925
Imag7	1.828	2.674	0.291	1.759	1.085	2.954	4.312	4.455
Imag8	0.648	4.099	2.439	0.710	-0.505	2.404	3.575	4.273
Imag9	2.251	2.099	3.294	3.240	1.799	2.352	4.107	4.577
均值	1.543	2.794	1.294	2.146	1.735	2.892	4.337	4.626

表 2 所示为 UCIQE 实验结果,表中加粗数据值为最优值。如表 2 所示,相较之下,所提方法在 Imag1 的 UCIQE 值较低,但通过观测可以看出 Imag1 中 WWPF 方法引入了原图不存在的色偏,导致处理后的图像失真。因此,结合

主观、客观角度分析,本文方法能有效还原水下图像的真实色彩、细节,消除模糊效应。相较于其他对比算法,本文算法处理后的水下图像较原始图像的 UCIQE 的均值较原始图像提高了 36.6%。

表 2 水下色彩图像质量评价 (UCIQE)
Table 2 Underwater color image quality evaluation (UCIQE)

Image	Original	UDCP	UTV	L2UWE	GDCP	LBLA	WWPF	Ours
Imag1	0.400	0.541	0.503	0.450	0.440	0.431	0.583	0.582
Imag2	0.452	0.512	0.512	0.487	0.559	0.523	0.560	0.584
Imag3	0.394	0.521	0.481	0.479	0.414	0.510	0.571	0.575
Imag4	0.486	0.616	0.584	0.499	0.499	0.534	0.589	0.604
Imag5	0.356	0.517	0.428	0.383	0.386	0.475	0.590	0.599
Imag6	0.436	0.521	0.377	0.479	0.482	0.551	0.613	0.623
Imag7	0.484	0.553	0.541	0.505	0.490	0.543	0.586	0.600
Imag8	0.437	0.537	0.582	0.479	0.492	0.550	0.616	0.620
Imag9	0.489	0.547	0.585	0.550	0.510	0.562	0.581	0.586
均值	0.437	0.541	0.510	0.479	0.475	0.520	0.588	0.597

为了进一步的验证本文算法的有效性,引入信息熵来评估处理后图像的复杂度、纹理特征和图像质量。图像的信息熵越大,图像的复杂度就越高,纹理特征越明显,图像质量越高。表 3 所示为各算法处理后图像的信息熵值对比,表中加粗数据值为最优值。如表 3 所示,本文算法除 Imag5 和 Imag9 外,对多数图像的处理得到的信息熵值较优,本文算法处理后的水下图像较原始图像 IE 的均值较原始图像提高了 7.5%,优于对比的其他算法。

图 6 所示为对照 UIEB 水下图像数据集的参考图像,以 Imag5 为例将本文算法与 WWPF 算法做进一步的细节

对比。如图 6 所示,通过通道空间图像与通道等值线性图像可以看出,原图信息丢失严重,边缘细节模糊,WWPF 算法一定程度上较好的恢复了图像信息,但整体图像高光区域未得到有效抑制,色彩饱和度较低,所能提取信息较少;相较于 WWPF 算法,本文算法增强后的水下图像能恢复更多的细节信息,适应图像整体光照度,较好调整图像的对比度和色彩饱和度,更加接近参考图像。

2.4 泛化实验评价

为验证本文方法的适用性,进行泛化实验,实验结果如图 7 所示。无论是对光照度低得图像恢复处理,还是在

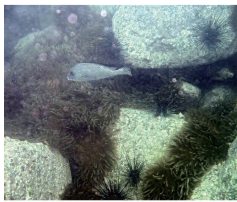
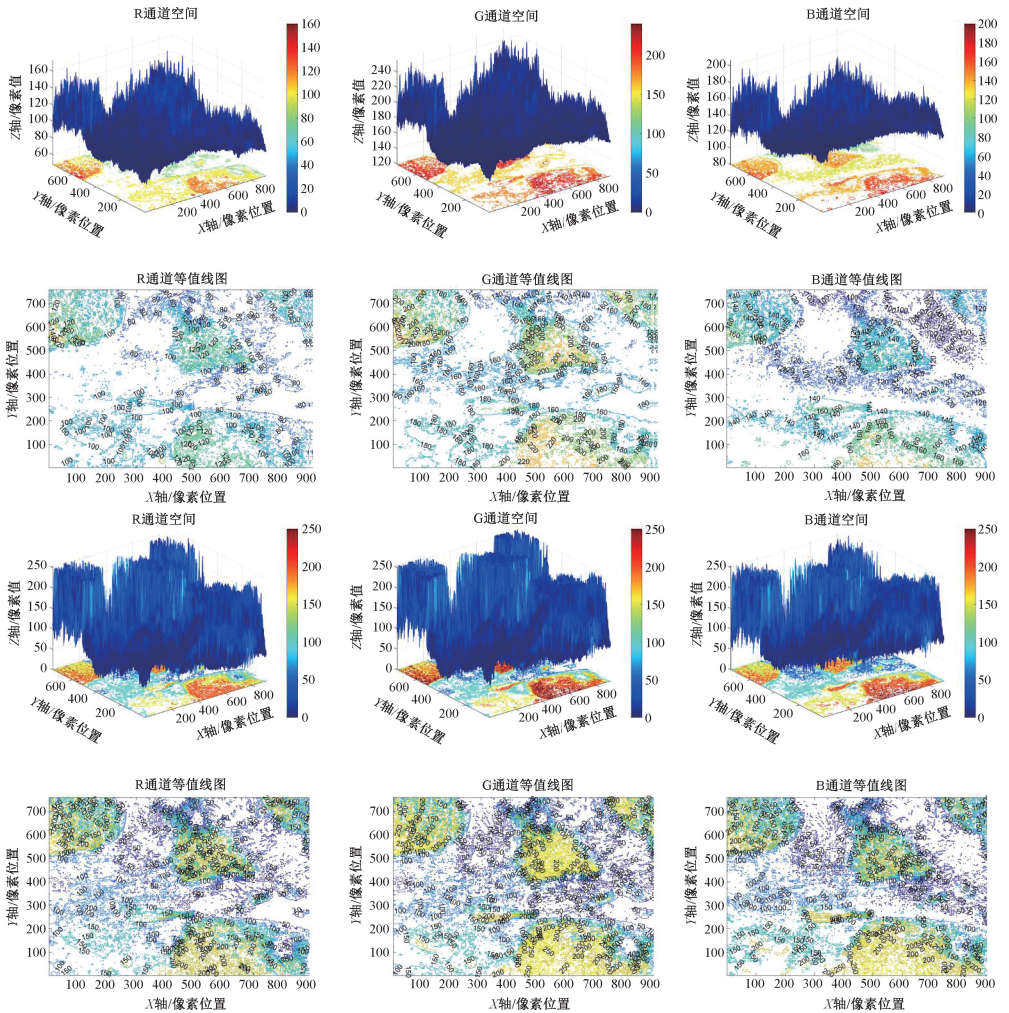
表3 信息熵(IE)

Table 3 Information Entropy (IE)

Image	Original	UDCP	UTV	L2UWE	GDCP	LBLA	WWPF	Ours
Imag1	7.192 8	-0.033 5	+0.480 0	+0.351 9	+0.153 1	+0.188 1	+0.717 6	+0.767 0
Imag2	7.391 9	-0.274 1	-0.058 0	+0.336 2	+0.128 5	+0.134 7	+0.471 8	+0.563 3
Imag3	7.284 7	-0.046 2	+0.367 3	+0.246 2	+0.057 5	+0.437 5	+0.654 0	+0.665 1
Imag4	7.293 8	-0.425 9	-0.102 4	+0.290 8	+0.083 0	+0.355 6	+0.543 6	+0.579 9
Imag5	7.172 1	-0.166 4	-0.164 4	+0.191 6	-0.042 6	+0.471 3	+0.741 8	+0.667 8
Imag6	7.377 4	-0.916 5	-0.677 6	+0.392 2	+0.399 1	+0.324 2	+0.470 0	+0.507 7
Imag7	7.792 5	-0.420 4	-0.409 7	+0.108 5	+0.022 9	+0.059 8	+0.172 6	+0.183 6
Imag8	7.180 9	-0.722 8	+0.073 1	+0.549 8	+0.468 0	+0.448 1	+0.436 5	+0.691 4
Imag9	7.546 1	-0.792 9	-0.254 4	+0.362 6	+0.155 1	+0.322 1	+0.071 3	+0.318 2
均值	7.359 1	-0.422 1	-0.082 9	+0.314 4	+0.158 3	+0.304 6	+0.475 5	+0.549 3



Original



WWPF

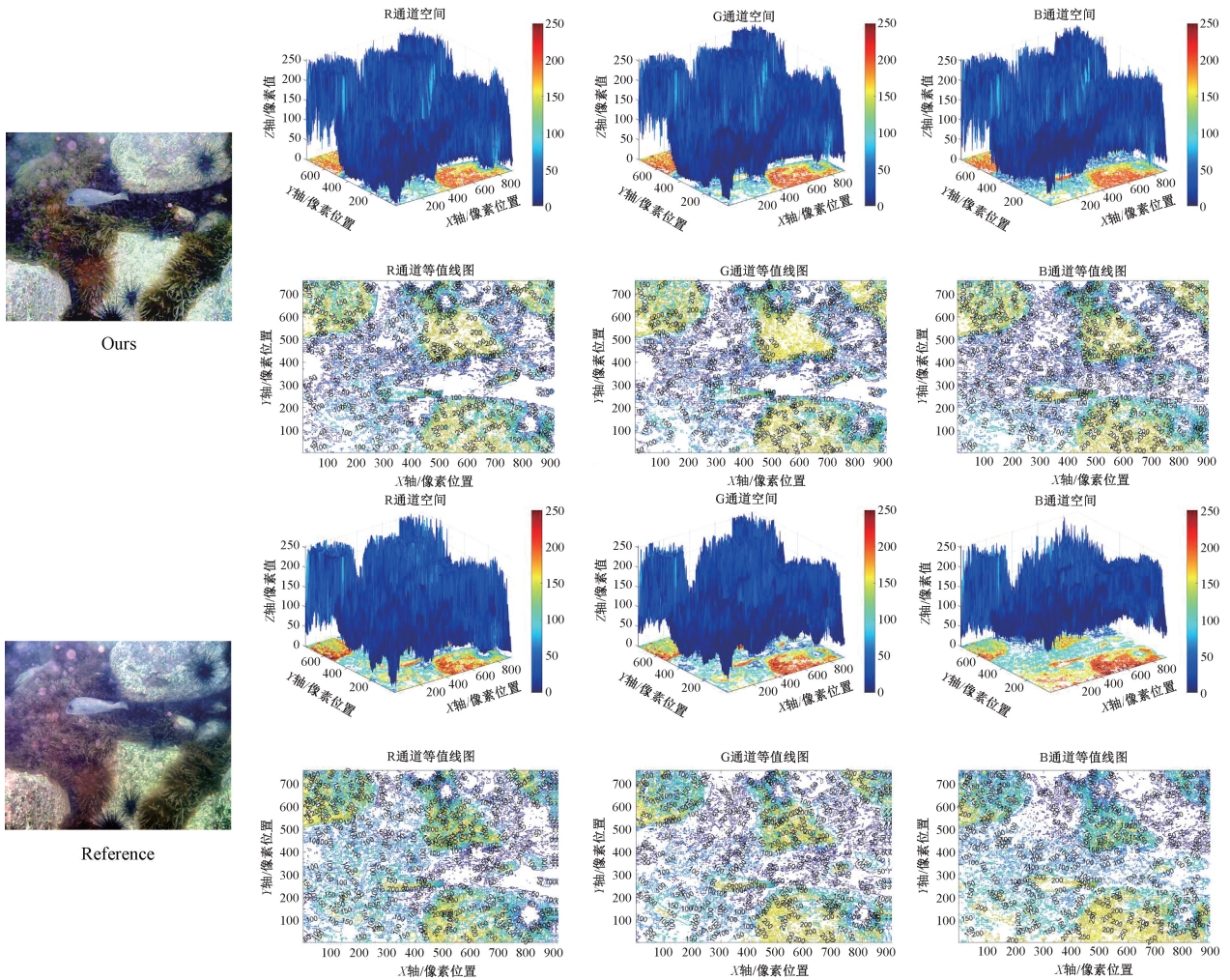


图 6 颜色通道空间内的图像像素变化曲面及其等值线图对比

Fig. 6 Comparison of image pixel change surface and its contour map in color channel space

图像去雾方面,本文所提方法均能够较好的还原图像,且不会出现过曝,处理后的增强图像能较好的适应图像原背景光照强度,且低照度区域清晰度也得到增强。

3 结 论

针对水下图像暗部细节丢失,色彩缺失等问题,本文所提算法实验结果表明,本文算法能够有效恢复水下图像细节、矫正色偏、提升清晰度,相比其他方法,本文所提方法在较好保存水下图像的丰富信息的同时,能较好的还原图像色彩、恢复图像的照度,压制过曝的情况。

参考文献

[1] XU H P, WANG M. Depth color correlation-guided dark channel prior for underwater image enhancement [J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2023, 15(4):1591-1604.

[2] 杜道平, 李响, 梁野, 等. 改进暗通道的水下图像复原算法[J]. 电子测量技术, 2024, 47(5): 142-149.

DU D P, LI X, LIANG Y, et al. Improved dark channel algorithm for underwater image restoration [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(5): 142-149.



图 7 泛化实验结果

Fig. 7 Generalization experiment results

- [3] LIU Q, ZHANG Q, LIU W, et al. WSDS-GAN: A weak-strong dual supervised learning method for underwater image enhancement[J]. *Pattern Recognition*, 2023, 143: 109774.
- [4] 王树林, 杨建民, 卢昌宇, 等. 一种基于双通道的水下图像增强卷积神经网络[J]. *海洋工程*, 2023, 41(6): 158-170.
WANG SH L, YANG J M, LU CH Y, et al. An enhanced convolutional neural network for underwater images based on dual channels [J]. *The Ocean Engineering*, 2023, 41(6): 158-170.
- [5] ANCUTI C O, ANCUTI C, DE V C, et al. Color balance and fusion for underwater image enhancement[J]. *IEEE Transactions on Image Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 2017, 27(1):379-393.
- [6] 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.
HU ZH Y, CHEN Q, ZHU D Q. Underwater image enhancement based on color balance and multi-scale fusion[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(17): 2133-2146.
- [7] LI T, VIJAYAN K A. Adaptive and integrated neighborhood-dependent approach for nonlinear enhancement of color images[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2005, 14(4): 043006.
- [8] 吴曙镔, 于万钧, 陈颖. 基于暗亮通道先验的小波融合图像去雾算法[J]. *光电与控制*, 2024, 31(6):24-30.
WU SH B, YU W J, CHEN Y. An image dehazing algorithm using wavelet fusion based on prior of dark and bright channels [J]. *Electronics Optics & Control*, 2024, 31(6):24-30.
- [9] 曾志宏, 张凌, 余少勇. 基于区域特征的长波红外偏振图像融合[J]. *激光杂志*, 2020, 41(12): 65-69.
ZENG ZH H, ZHANG L, YU SH Y. Long-wave infrared polarization image fusion based on region feature[J]. *Laser Journal*, 2020, 41(12): 65-69.
- [10] ZHUANG P X, WU J M, PORIKLI F, et al. Underwater image enhancement with Hyper-Laplacian reflectance priors. [J]. *IEEE Transactions on Image Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 2022, 31: 5442-5444.
- [11] ZHANG W D, ZHOU L, ZHUANG P X, et al. Underwater image enhancement via weighted wavelet visual perception fusion[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2024, 34(4):2469-2483.
- [12] ZHANG W D, JIN S L, ZHUANG P X, et al. Underwater image enhancement via piecewise color correction and dual prior optimized contrast enhancement [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2023, 30:229-233.
- [13] ZHANG W D, WANG Y D, LI C Y. Underwater image enhancement by attenuated color channel correction and detail preserved contrast enhancement[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2022, 47(3): 718-735.
- [14] LI CH Y, GUO CH L, REN W Q, et al. An Underwater image enhancement benchmark dataset and beyond [J]. *IEEE Transactions on Image Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 2019, 29:4376-4389.
- [15] LIU R SH, FAN X, ZHU M, et al. Real-world Underwater enhancement: Challenges, benchmarks, and solutions under natural light [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2020, 30(12):4861-4875.
- [16] 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.
- [17] GUOJIA H, JINGMING L, GUODONG W, et al. A novel dark channel prior guided variational framework for underwater image restoration[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2020, 66(C):102732-102732.
- [18] MARQUES T P, ALBU A B. L²UWE: A framework for the efficient enhancement of low-light underwater images using local contrast and multi-scale fusion[C]. 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2020: 2286-2295.
- [19] PENG Y T, CAO K M, COSMAN P C. Generalization of the dark channel prior for single image restoration[J]. *IEEE Transactions on Image Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 2018, 27(6):2856-2868.
- [20] 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.
- [21] PANETTA K, GAO CH, AGAIAN S. Human-visual-system-inspired underwater image quality measures[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2016, 41(3):541-551.
- [22] 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):6062-71.

作者简介

张贵平, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理。

E-mail: 87718413@qq.com

何志琴(通信作者), 教授, 研究生导师, 主要研究方向为计算机控制。

E-mail: zqhe@gzu.edu.cn