

基于差异通道增益及改进 Retinex 的水下图像增强

张彩珍, 康斌龙*, 李颖, 常元

兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070

摘要 为了提高水下图像的清晰度和可见度, 提出一种基于差异通道增益与改进多尺度 Retinex 算法相结合的算法以改善水下图像的质量。首先考虑到水介质对红光的强衰减性, 采用改进的灰度世界法单独对红色通道进行增益, 使其更接近均匀光照场景; 其次为了消除雾状模糊以及增强细节对比度, 采用改进的多尺度 Retinex 算法对差异通道增强后的图像进行处理, 通过使用 tanh 函数替换多尺度 Retinex 算法中的对数函数以减少数据的丢失, 确保信息的完整性; 最后采用自适应伽马技术调整图像的亮度分布。实验结果表明, 所提算法处理后的图像清晰, 颜色自然, 具有最佳的可视效果。

关键词 图像处理; 水下图像增强; 差异通道增益; 多尺度 Retinex 算法; tanh 函数

中图分类号 TP751.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1410004

Underwater Image Enhancement Based on Differential Channel Gain and Improved Retinex

Zhang Caizhen, Kang Binlong*, Li Ying, Chang Yuan

School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou JiaoTong University, Lanzhou, Gansu 730070, China

Abstract In order to improve the clarity and visibility of underwater images, an algorithm based on the combination of differential channel gain and improved multi-scale Retinex algorithm is proposed to improve the quality of underwater images. First, considering the strong attenuation of red light by the water medium, the improved gray-scale world method is used to gain the red channel separately to make it closer to the uniform lighting scene. Second, in order to eliminate foggy blur and enhance the contrast of details, the improved multi-scale Retinex algorithm processes the image after the difference channel is enhanced, and replaces the logarithmic function in the multi-scale Retinex algorithm with the tanh function to reduce the loss of data and ensure the integrity of the information. Finally, the adaptive gamma technology is used to adjust the brightness of the image distributed. Experimental results show that the image processed by the proposed algorithm is clear, natural in color, and has better visual effects.

Key words image processing; underwater image enhancement; differential channel gain; multi-scale Retinex algorithm; tanh function

OCIS codes 100.2000; 100.2980

1 引言

水下图像处理技术是水下探测技术的基础^[1], 其在很大程度上影响着水下机器人的发展。由于受

到水下拍摄环境的影响, 水下光学图像往往存在噪声干扰多、纹理特征模糊、对比度低以及颜色失真等诸多问题^[2], 这严重影响了水下成像的质量。因此, 增强水下图像的细节以及恢复完整的图像信息作为

收稿日期: 2020-10-10; 修回日期: 2020-10-21; 录用日期: 2020-11-12

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61905102)、甘肃省高等学校创新能力提升项目(2019A-035)

通信作者: * 570384183@qq.com

探测技术的关键步骤之一,具有广阔的应用前景和极为重要的科研意义。

随着计算机视觉技术的发展,国内外学者对水下图像处理技术进行了大量的研究,水下图像处理技术可分为基于图像复原、基于深度学习和基于图像增强三类。复原过程中建立了图像退化模型和复原模型,根据模型对图像进行“求逆”以达到改善图像质量的目的。但是复原算法往往需要先验信息来模拟关键参数,而且在不同环境中的适应性较差,如文献[3-5]中所提出的算法。利用深度学习方式来处理水下图像具有较高的前沿性,但是现有的训练集不够完备,与真实图像存在差异,而且模型的泛化能力较差,为此导致处理后的稳定性欠佳,如文献[6-7]中所提出的算法。由于图像增强算法能够最大化提高水下图像的对比度,突出细节信息,同时具有较强的泛化处理能力,已经成为水下图像处理技术的主体算法。石磊等^[8]提出了基于可控核双边滤波 Retinex 水下图像增强算法,通过引入改进的 Sigmoid 函数来改善图像亮度,并使用基于可控核双边滤波函数来替换传统高斯函数以估计图像的光照分量,减少处理后的图像存在边缘模糊等问题。邹立等^[9]提出了一种视觉显著性分割与 Retinex 算法相结合的水下图像增强方法,通过对背景区域的划分可以对不同背景区域进行 Retinex 增强,进而对图像进行融合以达到对图像的清晰化处理。邓翔宇等^[10]提出了一种基于主动光照的深海图像增强算法,通过估计背景光的方法来提高图像的对比度,在去除光源本身颜色增益的同时补偿光传播过程中的损失,实现图像颜色的校正。林森等^[11]提出了一种基于优势特征图像融合的水下光学图像增强方法,通过改进的暗通道先验算法来去除退化图像中的不均匀浑浊并均衡色彩,使用自适应伽马校正来拉伸图像动态范围以提高对比度,并采用同态滤波对图像进行去噪,最后采用多尺度融合算法处理图像来得到融合图像。田会娟等^[12]提出了基于 YCbCr 颜色空间的水下低照度增强方法,将颜色空间转换至 YCbCr 空间后提取 Y 分量并进行 Gamma 矫正,再利用多尺度 Retinex 算法对图像细节进行增强。Yang 等^[13]提出了一种背景光的估计方法并用来增强水下图像,通过深度学习算法来获得暗通道背景光中的红色通道信息,然后采用自适应颜色偏差矫正来估计出背景光,最后采用暗通道先验算法来实现水下图像的增强。

为了提高水下图像的可视度和对比度,并克服传统算法所引起的失真和偏色等不良现象,本文提出一种基于差异通道增益和改进 Retinex 算法的水下图像增强算法。采用改进的灰度世界算法得到不同颜色通道的增益比,加大补偿水介质对红光的吸收部分,使图像红绿蓝的色彩比例修复为近似真实的比例;同时为了避免信息丢失,提出改进的多尺度 Retinex 算法,使用 tanh 函数代替对数函数;最后通过自适应伽马校正调节图像的亮度。实验结果表明,所提算法能够有效增强各种环境中的水下图像,而且恢复细节明显,处理结果自然,具有良好的可视性。

2 基本理论

2.1 水下成像模型

当光在水下传播时,受到微粒和杂质的散射作用以及水介质的吸收作用而产生强烈的衰减。散射是光线在传播过程中受到水介质的影响而产生的小角度偏转,散射分为前向散射和后向散射^[14],前向散射会造成图像细节模糊,后向散射会造成图像的对比度低。吸收是光在传播过程中的能量损耗,从而导致图像颜色产生偏差。Jaffe-McGlamery 水下成像模型的表达式为

$$\mathbf{E}_r^c(x, y) = \mathbf{E}_d^c(x, y) + \mathbf{E}_f^c(x, y) + \mathbf{E}_a^c(x, y),$$

$$c \in (R, G, B), \quad (1)$$

式中: (x, y) 为像素的横纵坐标; c 为图像的红、绿和蓝三个颜色通道; \mathbf{E}_r^c 为水下光学图像; \mathbf{E}_d^c 为直接衰减分量; \mathbf{E}_f^c 为前向散射分量; \mathbf{E}_a^c 为后向散射分量。水下光学成像模型示意图如图 1 所示。

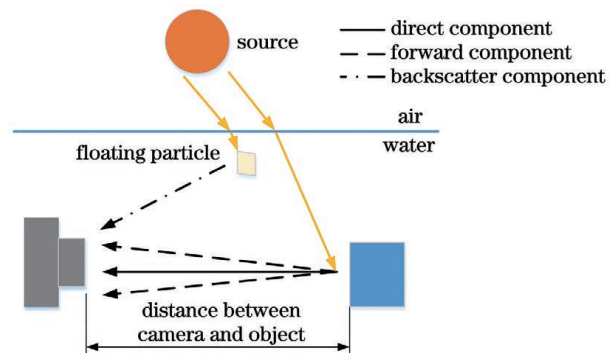


图 1 水下光学成像模型

Fig. 1 Underwater optical imaging model

2.2 Retinex 算法

Retinex 理论是建立在颜色恒常性的基础上,设定图像是由照射在物体上的光线和物体本身的颜色属性决定的,可以表示为入射光光照图像和物体

的反射图像相乘^[15],即

$$S(x, y) = L(x, y) \times R(x, y), \quad (2)$$

式中: S 为摄像机拍摄得到的图像; L 为入射光光照图像; R 为被观察物体的反射图像。该模型设定物体的颜色由物体对光线的反射能力决定,而与入射光线的强弱无关,即色感一致性。实验中增强的内容就是估计出光照图像 L ,从而分离出反射图像 R ,即物体真实的图像。在实际处理中,常常将图像转换到对数域,从而方便去除光照分量,即

$$\lg[R(x, y)] = \lg[S(x, y)] - \lg[S(x, y) * G(x, y)], \quad (3)$$

式中: $G(x, y)$ 为高斯低通滤波函数;* 为卷积符号。由于照度分量大多为图像信息中的低频部分,因此利用高斯低通滤波便可近似得到低频部分,即照度分量^[16],上述算法被称为单尺度 Retinex 算法(SSR)。多尺度 Retinex 算法(MSR)可以看作多个 SSR 算法的迭代结果^[17],数学表达式为

$$\lg[R(x, y)] = \sum_{o=1}^k \omega_o \left\{ \lg[S(x, y)] - \lg[S(x, y) * G(x, y)] \right\}, \quad (4)$$

式中: ω 为不同尺度下加权平均项的权重; k 为尺度参数,当 $k=1$ 时,即为 SSR 算法,MSR 算法通常取 $k=3$ 。MSR 算法从不同尺度上对增强后的图像进行加权处理,提高了图像的细节和颜色保真度。

3 所提算法

3.1 差异通道增益

不同于在大气中的衰减,可见光的各个颜色分量在水下环境中的衰减速率不同,其中红色分量的衰减最为剧烈,而蓝光分量和绿光分量的衰减较小,从而导致图像整体呈现为蓝绿色。为了纠正水下图像的不同颜色分量,采用差异通道增益进行预处理。灰度世界算法是常用的白平衡方法,以灰度世界算法的假设为基础,设定一幅彩色图像中 R 、 G 和 B 分量的平均值趋于相等,即物体对光线的平均反射率是定值^[18]。但是常规的灰度世界算法对三个颜色通道均采用了相同的计算方式,从而导致处理水下图像的过程中存在局限性。为了差异化处理三个通道,对传统灰度世界算法进行如下改进。

1) 计算图像的平均灰度值,表达式为

$$\begin{cases} K_1 = \frac{(R_{\text{aver}} + G_{\text{aver}} + B_{\text{aver}})}{3}, \\ K_2 = (R_{\text{aver}} \times G_{\text{aver}} \times B_{\text{aver}})^{\frac{1}{3}} \end{cases}, \quad (5)$$

式中: K_1 为图像的算数平均灰度值; K_2 为图像的几何平均灰度值; R_{aver} 、 G_{aver} 和 B_{aver} 分别为图像中红、绿和蓝通道的像素平均值。在数学原理中,存在算术平均大于几何平均的关系,即 $K_1 > K_2$ 。

2) 计算图像中 R 、 G 和 B 通道差异增益值,表达式为

$$\begin{cases} R_{\text{new}} = (R_{\text{avg}}/K_2) \times R \\ G_{\text{new}} = (G_{\text{avg}}/K_1) \times G, \\ B_{\text{new}} = (B_{\text{avg}}/K_1) \times B \end{cases}, \quad (6)$$

式中: R_{avg} 、 G_{avg} 和 B_{avg} 为原始颜色分量的平均; R_{new} 、 G_{new} 和 B_{new} 为差异处理后的新通道。为了匹配水下环境,实验采用强增益处理方式,即采用较小的 K_2 值来获得较大的增益比以补偿红色分量;对于蓝色分量和绿色分量,则采用 K_1 增益。通过这样的差异处理方式,预处理的结果更接近光照均匀场景。

3.2 改进的 MSR 算法

MSR 算法既可以提高图像的保真度,也可以进行动态范围的压缩。在 MSR 算法的基础上进行优化,提出一种改进的 MSR 算法。传统的 MSR 算法在单个尺度上的数学表达式为

$$R_{\text{ssr}}(x, y) = \lg \left[\frac{S(x, y)}{S(x, y) * G(x, y)} + 1 \right]. \quad (7)$$

为了避免将图像转化至对数域后出现像素值为负的情况,通常在图像转化到对数域后进行加一处理。但存在的缺点是会造成一部分数据丢失,进而破坏数据的完整性。为了规避类似不足,采用 tanh 函数来代替 log 函数,即

$$R_{\text{ssr}} = \tanh \left[\frac{S(x, y)}{S(x, y) * G(x, y)} \right]. \quad (8)$$

tanh 函数的曲线接近于对数曲线,同时具有更好的特性,如光滑性和有界性。tanh 函数表达式为

$$\tanh(x) = \frac{\exp(x) - \exp(-x)}{\exp(x) + \exp(-x)}. \quad (9)$$

两种函数的图像对比曲线如图 2 所示。

为了验证改进的 MSR 算法的有效性,对一组水下图像采用传统 MSR 算法和改进算法 MSR 处理后的效果进行对比,结果如图 3 所示。从图 3 可以看到,传统的 MSR 算法会造成严重的光晕效应或色偏,相比于传统的 MSR 算法,所提的改进算法效果明显,在全局保真和细节恢复上表现更优秀。

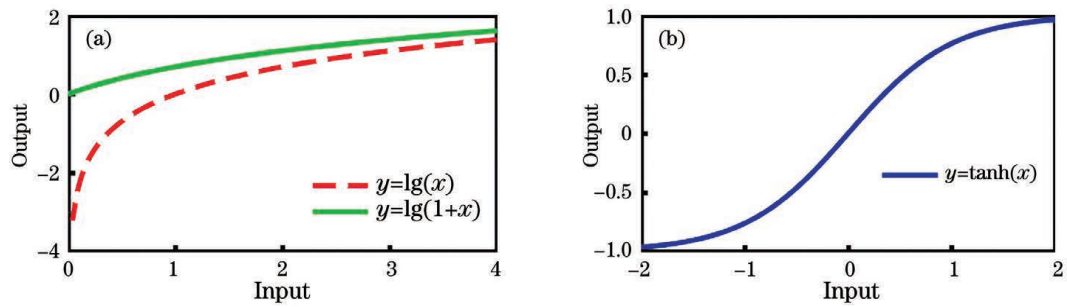


图 2 两种函数的图像对比。(a)log 函数;(b)tanh 函数

Fig. 2 Graphic comparison of two functions. (a) log function; (b) tanh function

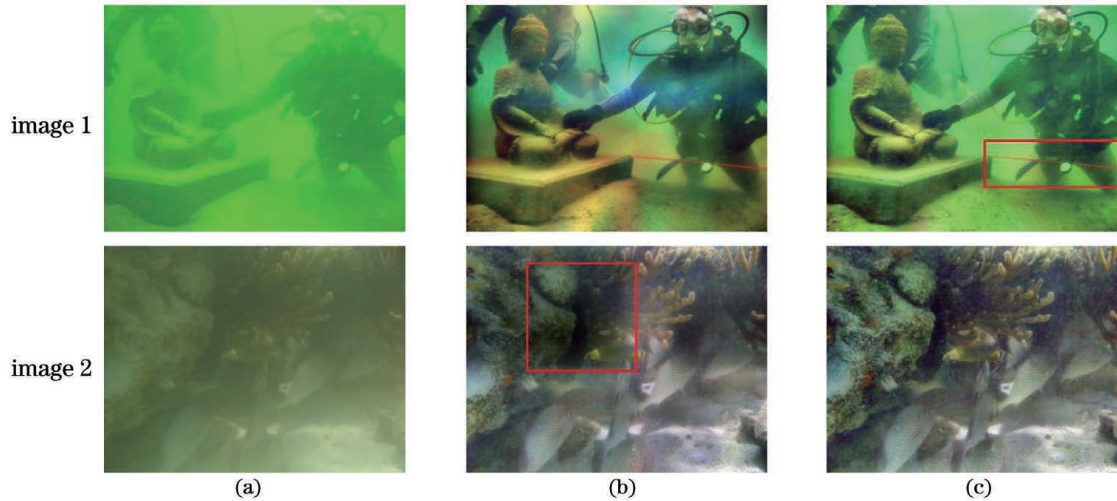


图 3 不同算法处理前后的效果。(a)原图;(b)传统的 MSR 算法;(c)改进的 MSR 算法

Fig. 3 Effects of different algorithms before and after processing. (a) Original images; (b) traditional MSR algorithm; (c) improved MSR algorithm

3.3 伽马增强

经过差异通道和改进的 MSR 算法增强后的水下图像仍然存在亮度不均和较低对比度的情况,此时可通过自适应伽马校正对其进行改善。将图像转换至 YCbCr 空间,提取亮度信息 Y ,保持增强后的 Cb 和 Cr 通道不变,对亮度信息 Y 进行增强,表达式为

$$Y_{re}(x, y) = Y(x, y)^\gamma, \quad (10)$$

式中: $Y_{re}(x, y)$ 为伽马增强后的图像亮度信息; γ 为伽马校正因子。对于不同的环境会自适应调节 γ 值,表达式

$$\gamma = \frac{Y(x, y) - Y_{\min}(x, y)}{Y_{\max}(x, y) - Y_{\min}(x, y)}, \quad (11)$$

式中: $Y_{\max}(x, y)$ 为亮度通道的最大值; $Y_{\min}(x, y)$ 为亮度通道的最小值。经过(11)式处理后, γ 值会分布在 $[0, 1]$ 区间。结合增强的 Cb 和 Cr 通道,可以起到自适应增强和调节亮度信息的作用。

4 实验分析

为了验证所提算法的有效性和鲁棒性,首先进

行大量的对比实验,其次从主观和客观两方面来评估所提算法。实验平台为 CPU i5-8300H 2.30 GHz、内存为 8 G;软件为 MATLAB 2015(a)。

4.1 主观评价

选取 6 幅水下不同性质的图像,将其分为人物组、鱼群组 and 珊瑚组,利用文献[8-9, 13]中的算法和所提算法对 6 幅图像进行处理,处理结果如图 4~6 所示。

图 4 为两组水下人物图像。从图 4 可以看到,所提算法在消除色偏的同时边缘轮廓更加清晰,具有更好的细节保真度;文献[9, 13]对人物的处理效果较好,提高了清晰度和对比度,但是存在光晕现象,部分边缘信息没有表现出来,如图 4(c) 和图 4(d) 所示;文献[8]提高了图像的对比度和清晰度,但是处理效果不明显,如图 4(b) 所示。

图 5 为两组鱼群图像。从图 5 可以看到,所提算法在去除了严重雾状模糊的同时消除了光晕模糊,处理后的图像颜色更加清晰自然;文献[9, 13]提高了图像的清晰度和对比度,但是出现了不同程度

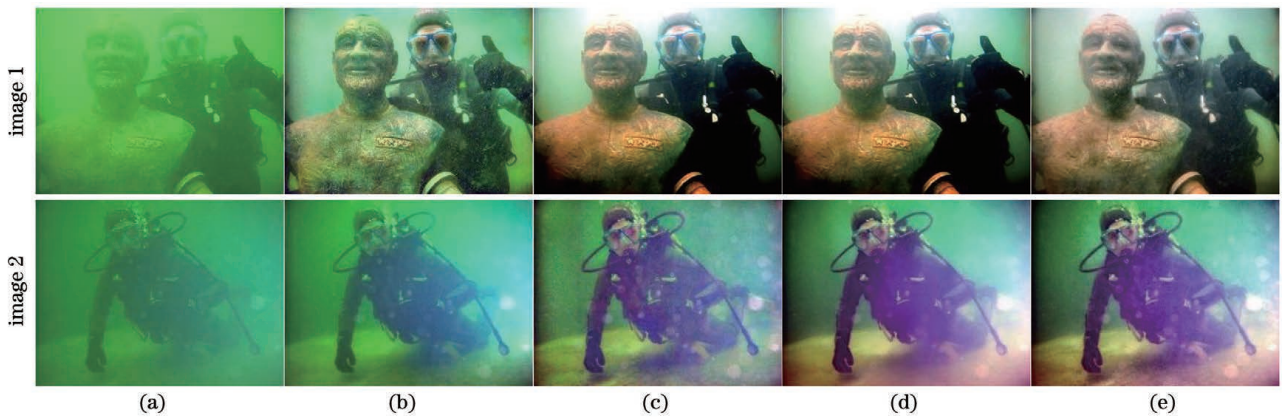


图 4 人物图像的处理结果。(a)原图；(b)文献[8]；(c)文献[9]；(d)文献[13]；(e)所提算法

Fig. 4 Processing results of character image. (a) Original images; (b) Ref. [8]; (c) Ref. [9]; (d) Ref. [13].
(e) proposed algorithm

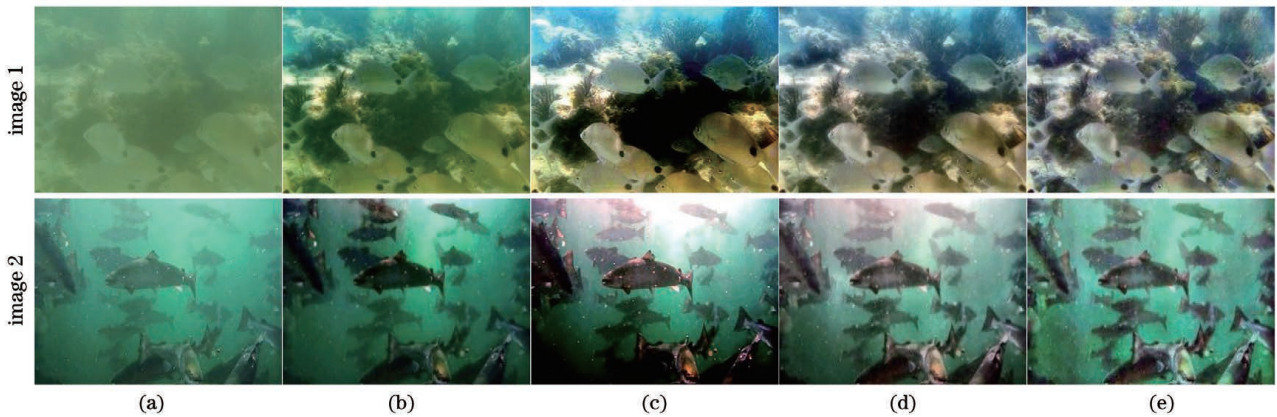


图 5 鱼群图像的处理结果。(a)原图；(b)文献[8]；(c)文献[9]；(d)文献[13]；(e)所提算法

Fig. 5 Processing results of fish swarm images. (a) Original images; (b) Ref. [8]; (c) Ref. [9]; (d) Ref. [13].
(e) proposed algorithm

的光晕模糊,如图 5(c)和图 5(d)所示;文献[8]在一定程度上提高了图像的对比度,但是效果不明显且有轻微的光晕现象,如图 5(b)所示。

图 6 为两组珊瑚图像。从图 6 可以看到,所提

算法在有效去除了雾状模糊的同时提高了颜色保真度,图像颜色自然,更加符合人类的视觉特征;文献[8-9]提高了图像的对比度,但是出现了不同程度的颜色失真,如图 6(b)和图 6(d)所示,文献[8]中的

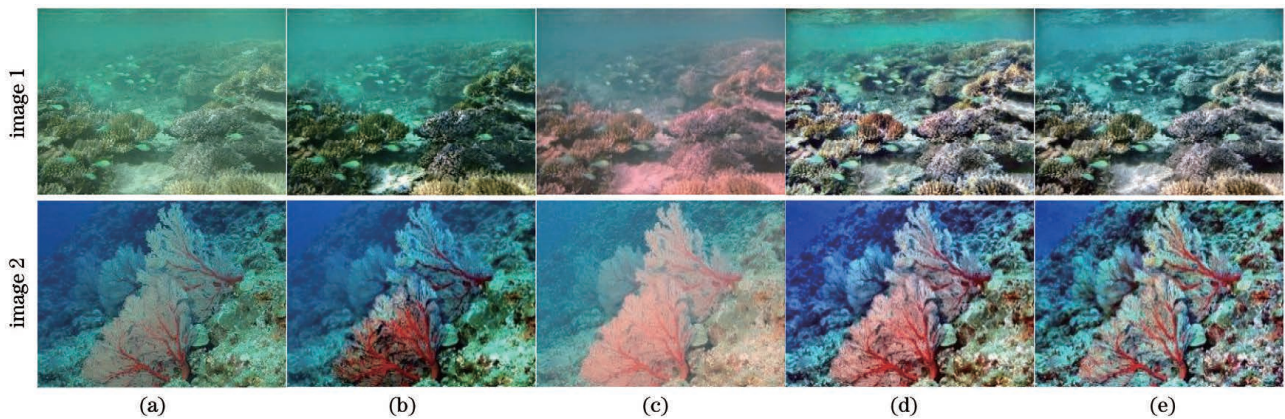


图 6 珊瑚图像的处理结果。(a)原图；(b)文献[8]；(c)文献[9]；(d)文献[13]；(e)所提算法

Fig. 6 Processing results of coral images. (a) Original images; (b) Ref. [8]; (c) Ref. [9]; (d) Ref. [13].
(e) proposed algorithm

图像暗区域对比度不明显,亮度较低;文献[13]的处理效果不佳,处理后的图像色彩失真以及对比度不明显,如图 6(c)所示。

综上所述,所提算法处理后的水下图像在主观视觉上更加清晰自然。考虑到计算机视觉技术的应用性,还需要从客观角度来分析图像的信息。

4.2 客观分析

4.2.1 信息熵

图像信息熵是反映图像质量的指标之一。数字图像中的色彩表现为像素值,每个像素值出现的概

率量化结果即为图像信息熵所拟合的值。所提算法旨在提高水下图像的清晰度和对比度,像素值的概率分布越均衡,图像信息熵越大,图像轮廓越清晰,色彩越丰富^[19],说明算法对图像增强的效果越好。信息熵的计算公式为

$$H = - \sum_{v=1}^N P_v \times \lg(P_v), \quad (12)$$

式中: H 为图像信息熵值; P_v 为灰度值为 v 的像素占图像总像素值的比例; N 为灰度级数。对 6 幅图像分别计算图像信息熵,计算结果表 1 所示。

表 1 各种算法的信息熵值

Table 1 Information entropy values of each algorithms

Image	Original	Ref. [8]	Ref. [9]	Ref. [13]	Proposed algorithm
Original image	7.5844	7.6042	7.4986	7.7205	7.9162
Fig. 4 image 1	7.3521	6.7881	7.1290	7.4598	7.8942
Fig. 4 image 2	6.6763	6.6832	6.2238	7.6631	7.8457
Fig. 5 image 1	7.7170	7.7334	7.6059	7.8675	7.8888
Fig. 5 image 2	7.3034	7.3796	7.1882	7.8665	7.8436
Fig. 6 image 1	7.4234	7.5105	7.5429	7.9249	7.9353

从表 1 可以看到,采用所提算法处理图 4 中 image 2,信息熵从 6.6763 提高到 7.8457,说明所提算法对图像信息熵有显著的提高,处理后的图像更清晰,颜色更丰富,较文献[8-9,13]表现更加优秀。

4.2.2 图像标准差

图像的标准差是反映图像质量的指标之一。图像的标准差反映了图像像素值与均值的离散程度,标准差越大,图像动态范围越大,图像就越清晰。为

了便于观察标准差,对求得的标准差值取对数后进行压缩处理,图像标准差的计算公式为

$$\lg(\sigma) = \lg \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [P(i, j) - \mu]^2}, \quad (13)$$

式中: M 和 N 为图像的长宽; $P(i, j)$ 为图像中第 i 行、第 j 列的像素值; μ 为均值。对 6 幅图像分别计算图像标准差,计算结果表 2 所示。

表 2 各种算法的标准差值

Table 2 Standard deviation values of each algorithms

Image	Original	Ref. [8]	Ref. [9]	Ref. [13]	Proposed algorithm
Fig. 4 image 1	6.9729	7.6050	7.8688	8.3120	8.3455
Fig. 4 image 2	5.8527	7.3017	7.1824	8.0203	8.0565
Fig. 5 image 1	5.4077	7.4011	7.8173	7.9497	8.0185
Fig. 5 image 2	7.5524	7.7608	7.6668	8.1743	8.2145
Fig. 6 image 1	6.7771	7.5926	8.0092	7.8667	7.9521
Fig. 6 image 1	7.1534	7.5485	8.1060	8.0532	8.1202

从表 2 可以看到,采用所提算法处理图 4 中 image 2,标准差从 5.4077 提高至 8.0185,说明所提算法对图像的标准差有显著的提高,处理后的图像动态范围更大,图像更加清晰,对比度更高,较文献[8-9,13]表现更加优秀。

5 结 论

针对水下图像存在纹理特征模糊、对比度低以及颜色失真等情况,提出一种基于差异通道增益及改进 Retinex 的水下图像增强算法。该算法通过对

红色通道进行增强以实现红色分量的补偿,使图像颜色更接近均匀光照场景;使用 tanh 函数来替换算法中的对数函数,可以减少图像在处理过程中的信息损失,保证处理后的图像信息的完整性;使用自适应伽马技术来改善图像的亮度分布。实验结果表明,所提算法处理后的信息熵从 6.6763 提高到 7.8457,图像标准差从 5.4077 提高至 8.0185;通过主观评价和客观评价的综合分析,相比于其他算法,所提算法处理后的图像更加清晰自然,符合人类视觉感观特点。

参 考 文 献

- [1] Xu M, Qiu S, Jin W Q, et al. Radon transform detection method for underwater moving target based on water surface characteristic wave[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1001003.
徐曼, 裘溯, 金伟其, 等. 基于水面特征波纹的水下运动目标 Radon 变换探测方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1001003.
- [2] Zhang W, Guo J C. Low-illumination underwater image enhancement based on white balance and relative total variation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(12): 121016.
张薇, 郭继昌. 基于白平衡和相对全变分的低照度水下图像增强[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(12): 121016.
- [3] Guo J C, Li C Y, Guo C L, et al. Research progress of underwater image enhancement and restoration methods[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2017, 22(3): 273-287.
郭继昌, 李重仪, 郭春乐, 等. 水下图像增强和复原方法研究进展[J]. *中国图象图形学报*, 2017, 22(3): 273-287.
- [4] Xu Y, Zeng X B. Underwater image restoration based on red-dark channel prior and inverse filtering[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 021009.
徐岩, 曾祥波. 基于红色暗通道先验和逆滤波的水下图像复原[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 021009.
- [5] Xie H L, Peng G H, Wang F, et al. Underwater image restoration based on background light estimation and dark channel prior[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0101002.
谢昊伶, 彭国华, 王凡, 等. 基于背景光估计与暗通道先验的水下图像复原[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0101002.
- [6] Cheng Y, Deng D X, Yan J, et al. Weakly illuminated image enhancement algorithm based on convolutional neural network [J]. *Journal of Computer Applications*, 2019, 39(4): 1162-1169.
程宇, 邓德祥, 颜佳, 等. 基于卷积神经网络的弱光照图像增强算法[J]. *计算机应用*, 2019, 39(4): 1162-1169.
- [7] Lin S, Liu S B, Tang Y D. Multi-input fusion adversarial network for underwater image enhancement[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(5): 20200015.
林森, 刘世本, 唐延东. 多输入融合对抗网络的水下图像增强[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(5): 20200015.
- [8] Shi L, Xi M L, Sun J. Underwater image enhancement algorithm based on controllable nuclear bilateral filtering Retinex[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2018, 35(1): 7-12.
石磊, 奚茂龙, 孙俊. 基于可控核双边滤波 Retinex 水下图像增强算法[J]. *量子电子学报*, 2018, 35(1): 7-12.
- [9] Zou L, Lu J Y, Hu Y, et al. Underwater image enhancement algorithm of uneven illumination[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2020, 39(2): 118-125.
邹立, 卢俊彦, 胡易, 等. 非均匀光照条件下的水下图像增强算法[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 39(2): 118-125.
- [10] Deng X Y, Wang H G, Zhang Y Q. Deep sea image enhancement method based on the active illumination[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(3): 0310003.
邓翔宇, 王惠刚, 张永庆. 基于主动光照的深海图像增强算法[J]. *光子学报*, 2020, 49(3): 0310003.
- [11] Lin S, Chi K C, Li W T, et al. Underwater optical image enhancement based on dominant feature image fusion[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(3): 0310003.
林森, 迟凯晨, 李文涛, 等. 基于优势特征图像融合的水下光学图像增强[J]. *光子学报*, 2020, 49(3): 0310003.
- [12] Tian H J, Cai M P, Guan T, et al. Low-light image enhancement method using Retinex method based on YCbCr color space[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(2): 0210002.
田会娟, 蔡敏鹏, 关涛, 等. 基于 YCbCr 颜色空间的 Retinex 低照度图像增强方法研究[J]. *光子学报*, 2020, 49(2): 0210002.
- [13] Yang S D, Chen Z H, Feng Z P, et al. Underwater image enhancement using scene depth-based adaptive background light estimation and dark channel prior algorithms[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 165318-165327.

- [14] Mc Glamery B L. A computer model for underwater camera systems [J]. Proceedings of SPIE, 1980, 208: 221-231.
- [15] Land E H. The Retinex theory of color vision [J]. Scientific American, 1977, 237(6): 108-128.
- [16] Hu Y B, Tang C, Tao S. Enhancement of optical interferometry fringe patterns based on multiscale Retinex algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(24): 241006.
胡一冰, 唐晨, 陶珊. 基于多尺度 Retinex 算法的光干涉条纹图像增强 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(24): 241006.
- [17] Rahman Z, Jobson D J, Woodell G A. Multi-scale Retinex for color image enhancement [C] // Proceedings of 3rd IEEE International Conference on Image Processing, September 19, 1996, Lausanne, Switzerland. New York: IEEE Press, 1996: 1003-1006.
- [18] Ma X M, Chen Z H, Feng Z P. Underwater image restoration through a combination of improved dark channel prior and gray world algorithms [J]. Journal of Electronic Imaging, 2019, 28(5): 053033.
- [19] Chen Z G, Yin F C. Enhancement of remote sensing image based on Contourlet transform [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(10): 2030-2037.
陈志刚, 尹福昌. 基于 Contourlet 变换的遥感图像增强算法 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(10): 2030-2037.