

DOI:10.16136/j.joel.2022.07.0718

改进的伽马校正与多尺度融合的水下图像增强

李华昆, 李 恒*, 赵 磊, 王海瑞

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 由于光在水下传播会发生吸收和散射, 导致采集的水下图像出现模糊、对比度低、色偏、光照不均匀等问题。针对以上问题, 提出了一种改进的伽马校正与多尺度融合的水下图像增强算法。首先基于 G 通道对 R 和 B 通道进行补偿, 并对 RGB 三通道进行直方图拉伸后使用灰度世界 (Gray World) 算法得到颜色校正图像; 然后使用改进的伽马函数改善颜色校正后图像光照不均匀问题, 得到光照均匀图像, 并进行归一化处理; 再对光照均匀图像使用限制对比度的自适应直方图均衡化 (contrast limited adaptive histogram equalization, CLAHE) 算法得到对比度提升图像; 最后采用多尺度融合算法对以上得出的 3 幅图片进行融合, 得出增强图像。实验结果表明, 提出的算法对不同水下环境的图像均有较好的处理效果, 图像质量评价指标得到明显提高。

关键词: 通道补偿; 伽马校正; 限制对比度的自适应直方图均衡化; 多尺度融合

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1005-0086(2022)07-0700-09

Underwater image enhancement based on improved Gamma correction and multi-scale fusion

LI Huakun, LI Heng*, ZHAO Lei, WANG Hairui

(Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: As the absorption and scattering of light in underwater propagation, problems such as fuzzy, low contrast, color deviation and uneven illumination appear in underwater images taken. In view of the above problems, an improved underwater enhancement algorithm based on Gamma correction and multi-scale fusion is proposed. Firstly, Red and Blue channels are compensated based on Green channel, and the correction image is obtained by Gray World algorithm after histogram stretching of RGB three channels. Then, the color corrected image is corrected for uneven illumination by using the improved Gamma function to obtain the uneven illumination corrected image, and the illumination uniformity image is normalized. Then, the contrast of the image after uneven illumination correction is improved by contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) algorithm to obtain the contrast improved image. Finally, the multi-scale fusion algorithm is used to fuse the above three images to obtain the enhanced image. Experimental results show that the proposed algorithm has good processing effects on images in different underwater environments, and the image quality evaluation index is significantly improved.

Key words: channel compensation; Gamma correction; contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE); multi-scale fusion

1 引言

人类在对海洋的探索与开发过程中, 会面临

诸多困难, 首先面临的就是由于水中广泛分布的微粒、微生物与光的衰减性等问题, 光在水下传播过程中会发生吸收和散射, 因此摄像机采集到的

* E-mail: LIHENG@kust.edu.cn

收稿日期: 2021-10-20 修订日期: 2021-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(61863016)和地区科学基金(61263023)资助项目

图像会出现色偏、模糊、对比度低、光照不均等问题。水下图像对于完成海洋生物研究、海洋矿产开发、海洋军事应用、水下考古、海底光缆铺设等方面具有重要作用^[1]。因此,水下图像存在的问题亟待解决,以促进后续对海洋资源的开发利用。

许多研究人员已经对此方面展开了研究,文献[2]提出了水下光衰减先验景深估计模型,并使用基于学习的监督线性回归训练模型系数,计算出准确的深度图,可以估计背景光和透射率,以恢复水下的真实场景光。文献[3]提出了一种基于图像模糊和光吸收的景深估计方法,从而复原图像。文献[4]提出了一种基于各通道均值、中值和标准差的背景光估计模型与以较低的复杂性获得较优的透射率模型,并使用白平衡算法还原图像的色彩,提高图像对比度。文献[5]首先将G通道和B通道均衡并对RGB通道重新分配,在CIE-Lab颜色空间中使用自适应拉伸进行颜色校正,以改善图像对比度、清晰度、色偏。文献[6]在暗通道理论的基础上,提出了一种以B、G通道为基础的水下暗通道来估计透射率,并以此暗通道来估计水下光学模型中的背景光,取得了较好的效果。文献[7]提出了一种基于不同颜色通道之间的衰减差异的先验方法来估计景深,并利用景深从模糊图像中恢复场景光,以此来恢复水下图像。文献[8]提出了一种基于平稳小波融合的新策略,图像质量得到有效提升。文献[9]根据超像素图像分割法确定图像背景光,然后采用红通道先验获得透射率,有效提升了图像对比度和可视化效果。文献[10]使用提出的评分公式和四叉树细分的分层搜索方法估计背景光,通过分解RGB通道衰减曲线获得透射率图,复原效果较好。以上方法均能对水下图像进行不同程度的提升,但是仍存在以下问题:1)在对颜色校正时,未考虑到对水下图像颜色通道进行补偿,导致处理后的图像仍存在颜色偏差;2)未考虑到水下光照不均的影响。

针对以上问题,本文提出一种改进的伽马校正与多尺度融合的水下图像增强算法。首先,基于G通道对R、B通道补偿后使用直方图拉伸其灰度级区间,再用Gray World算法校正图像色偏得到颜色校正图像;然后对颜色校正后图像利用改进的伽马函数改善图像光照不均匀带来的问题,并进行归一化操作得到光照不均匀校正图像;再用限制对比度的自适应直方图均衡化(contrast limited adaptive histogram equalization, CLAHE)算法提升光照不均匀校正后图像对比度得到对比度提升图像;最后对以上得出的3张图片使用多尺

度融合算法,得出最终增强图像。

2 水下光学成像模型

光在水中与空气有着不同的传播方式,光在水中会被吸收和散射,由于水比空气密度大,不同颜色的光因为波长不同导致衰减速率也不同,是水下图像出现色偏的原因;由于水中含有多种类型的微粒及微生物,导致光在水中传播时受微粒的影响而发生散射,是水下图像较为模糊的原因。Jaffe-McGlamery^[11]提出的水下成像模型如图1所示。

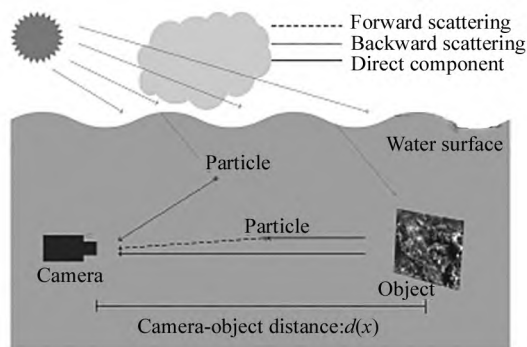


图1 水下光学成像模型

Fig. 1 Underwater optical imaging model

相机在水下拍摄的照片由3种分量组成:1)直接分量 E_d ,即未被微粒散射而直接被物体反射到相机的光;2)前向散射分量 E_f ,即物体反射出来的光,又经过微粒多次散射后到达相机的光;3)后向散射分量 E_b ,即背景光经过微粒散射后到达相机的光。

总的光学成像模型可以表示为下面3个分量的叠加,如式(1)所示:

$$I(x, y) = E_d(x, y) + E_f(x, y) + E_b(x, y), \quad (1)$$

式中, (x, y) 是像素点坐标, $I(x, y)$ 是退化的水下图像,由于相机和被拍摄的物体之间的距离 $d(x)$ 一般比较近,所以前向散射分量 E_f 带来的影响大都可以忽略。因此,常用的水下光学成像模型一般为:

$$I(x, y) = E_d(x, y) + E_b(x, y) = J(x, y)t(x, y) + A(1 - t(x, y)), \quad (2)$$

式中, $J(x, y)$ 为去模糊后图像, $t(x, y)$ 为透射率, A 为背景光。

3 本文算法

为解决水下拍摄图像存在的颜色偏差、对比度低、雾状模糊、以及亮度不均等问题,本文提出了一种改进的伽马校正与多尺度融合的水下图像增强算法。考虑到G通道特征在水下的良好保持性,首先

对易受影响的 R、B 通道进行补偿,直方图拉伸使 RGB 通道分布更均匀,再用 Gray World 算法校正色偏,得到颜色校正图像;然后把颜色校正后图像从 RGB 颜色空间转到 HSI 颜色空间,导向滤波提取亮度的光照分量,利用改进的伽马函数校正亮度 I 不均匀问题,得到 I^1 ,这样不仅很好改善了亮度问题,也不会影响图像的色彩,之后对 I^1 进行归一化处理得到 I^2 ,再把图像从 HSI 颜色空间转到 RGB 颜色空间,得到亮度较好的图像;最后,用 CLAHE 算法提升 I^1 对比度,得到 I^3 并从 HSI 颜色空间转到 RGB 颜色空间,得到对比度提升图像,最后对以上得出的 3 张图片采用多尺度融合算法,得出最终增强图像。其流程如图 2 所示。

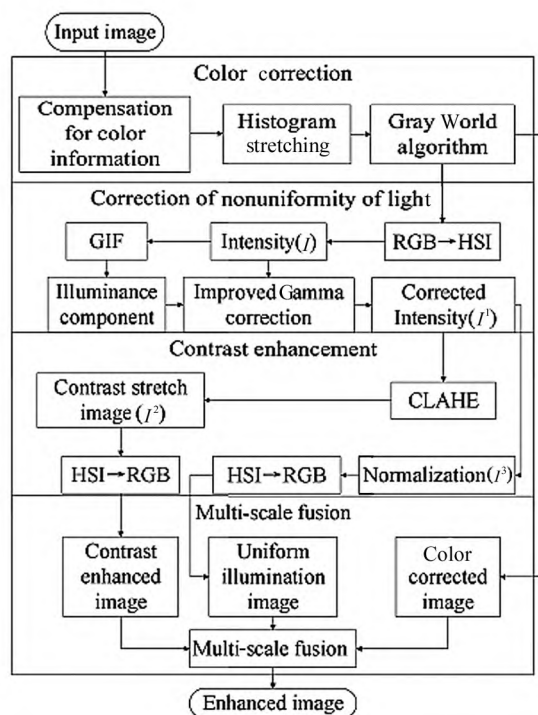


图 2 算法流程图

Fig. 2 Algorithm flow chart

3.1 水下图像颜色校正

雾天图像与水下图像有一定的相似性,一些去雾算法被用于水下图像处理,但处理结果达不到预期效果,主要是因为雾天图像不同波长的光衰减程度相似,而水下图像不同波长的光衰减程度不同^[12]。传统的白平衡算法是用来处理大气中图像的,若直接用来处理颜色偏差较大的水下图像,会导致红色过度补偿,颜色校正后图像偏红。为了避免这个问题,可以先对退化的水下图像进行颜色通道补偿^[13]。

ANCUTI 等^[14]提出一种针对水下图像 R 通道

进行补偿的算法。在此基础上,基于以下两个理论对此进行改进:1) 在一些混浊或浮游生物密集的区域,B 通道经常会衰减严重。因此,同时补偿 B 通道和 R 通道的衰减可以适用于更多水下环境;2) 对于补偿不足或过度的问题,使用直方图拉伸可以保证 3 个颜色通道在整个区域的分布信息一致,减少误差补偿^[15]。

补偿后的 R、B 通道为:

$$I_{1,c}(x,y) = I_c(x,y) + \alpha(\bar{I}_G - \bar{I}_c) \times [1 - I_c(x,y)] \times I_G(x,y), \quad (3)$$

式中, $c \in (R, B)$, I 为通道补偿前图像, \bar{I} 为通道补偿前图像平均值, α 是调节系数, I_G 是 G 通道, \bar{I}_G 是 G 通道平均值, I_1 是通道补偿后图像。

直方图拉伸后:

$$I_{2,c}(x,y) = \frac{I_{1,c}(x,y) - I_{1,cmin}}{I_{1,cmax} - I_{1,cmin}} \times 255, \quad (4)$$

式中, $I_{1,cmax}$ 为最大值, $I_{1,cmin}$ 为最小值, I_2 为直方图拉伸后图像。

经过以上处理,再使用 Gray World 算法校正图像色偏,得到的颜色校正图像如图 3 所示。从图 3 可以看出,若直接使用 Gray World 算法^[16]处理水下图像,色偏越大的水下图像处理后越明显偏红。经过通道补偿与直方图拉伸后,再使用 Gray World 算法处理的图像色彩较好,而且本文算法对不同情况水下色偏均有较好校正效果。

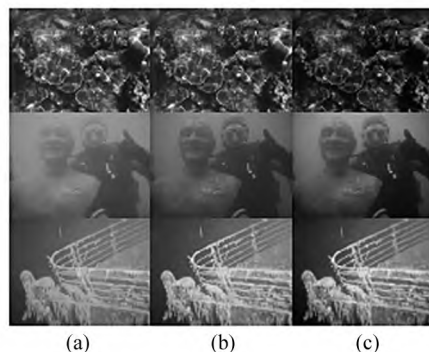


图 3 水下图像及颜色校正结果:(a) 水下图像;
(b) Gray World 算法;(c) 本文算法

Fig. 3 Underwater images and color correction results;
(a) Underwater images; (b) Gray World algorithm;
(c) Proposed algorithm

3.2 导向滤波提取光照分量

要想较好地改善光照不均影响,需要提取出亮度 I 较为准确的光照分量。常用的算法有高斯滤波、双边滤波、导向滤波等。高斯滤波提取的光照分

量边缘较模糊^[17];双边滤波算法运行时间长,且可能出现梯度翻转^[18];导向滤波运行速度快,且具有好的边缘保持性^[19]。因此,本文选用导向滤波求取光照分量,导向滤波原理如下:

在导向滤波中,假设输出图像 q 是引导图像 I 在局部窗口 ω_k 中线性变换所得为:

$$q_i = a_k I_i + b_i, \forall i \in \omega_k, \quad (5)$$

式中, i, k 是像素索引, a_k, b_i 是 ω_k 中常数的线性变换因子。对上式两边求导,有 $\nabla q = a_k \nabla I$, 表示当引导图像存在梯度时,输出图像也存在梯度。然后,使输出图像 q 与输入图像 p 之间的差最小,以确定线性变换因子,即让式(6)值最小:

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} ((a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \epsilon a_k^2), \quad (6)$$

式中, ϵ 用来防止 a_k 过大,同时也能影响滤波效果。使用最小二乘法求解上式:

$$a_k = \frac{\frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} I_i p_i - \mu_k \bar{p}_k}{\sigma_k^2 + \epsilon}, \quad (7)$$

$$b_k = \bar{p}_k - a_k \mu_k, \quad (8)$$

式中, μ_k, σ_k 分别表示引导图像 I 在窗口 ω_k 中的均值和方差, $|\omega|$ 是 ω_k 中像素数量, \bar{p}_k 是 ω_k 中 p_k 的平均值大小。在计算每个 ω_k 的线性变换因子时,不同的 ω_k 会包含同一个像素 i , 当要求取某个像素的输出值时,只需把不同 ω_k 中线性变换因子求取平均值:

$$q_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k: i \in \omega_k} (a_k I_i + b_k) = \bar{a}_i I_i + \bar{b}_i, \quad (9)$$

式中, \bar{a}_i, \bar{b}_i 分别表示 a_k, b_k 在 ω_k 中的平均值。

3.3 改进的伽马函数校正图像光照不均匀

颜色校正过程中直方图拉伸虽然能让各通道像素分布更一致,但通常也会导致图像整体偏暗,影响图像的视觉效果;水下图像拍摄过程中,往往会有人工光源的影响,图像过亮或过暗都会影响图像的细节,因此对图像进行光照均匀处理是必要的。为降低过亮区域亮度,提高过暗区域亮度,本文对伽马校正函数进行改进,通过利用输入图像的光照分量的每个像素点构造的伽马值,达到自适应校正输入图像的效果。

文献[20]使用了一种全局伽马校正函数对全局光照分量进行校正:

$$O(x, y) = 255 \times \left(\frac{i(x, y)}{255} \right)^{\frac{1}{1+a \times \cos\left(\frac{\pi \times j(x, y)}{2 \times i_m}\right)}}, \quad (10)$$

式中, $O(x, y)$ 表示伽马校正后输出图像像素值, $i(x, y)$ 表示输入图像像素值, i_m 表示输入图像像素中间值,取 128, $a \in [0, 1]$, 文献[20]中 a 为 0.4。式(10)

中的伽马校正由于伽马值范围小,对较暗或较亮的区域校正效果不够好。当图像亮度均值趋于 128 时,往往会有较好的视觉效果,本文在此基础上加入了输入图像像素平均值 m , 对原伽马值进行改进,用 $1 - \theta \times \frac{m}{255}$ (或 $1 - \theta \times \left(1 - \frac{m}{255}\right)$) 代替 a , 实现对亮度的自适应调整,依据输入图像像素平均值实现图像的自适应校正, θ 是用于调节伽马参数的范围。本文改进的伽马校正有以下优点:1) 在输入图像像素值相同的情况下,当输入图像像素平均值 m 与 128 差值较大时,说明图像整体偏暗或偏亮,校正后像素值变化也会相对较大,这样校正后的图像像素平均值也会更接近 128;2) 亮度较为均匀,均值趋于 128 的图像经过本文伽马校正后,图像整体亮度不大;3) 更适用于本文颜色校正后图像偏暗的水下环境,可以更好地自适应提升整体亮度,对图像过亮或过暗区域校正效果都会有所提升,改进的伽马校正如下:

$$O(x, y) = 255 \times \left(\frac{i(x, y)}{255} \right)^{\gamma}, \quad (11)$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \left(1 - \theta \times \frac{m}{255}\right) \times \cos\left(\pi \times \frac{L(x, y)}{255}\right)},$$

$$\gamma_2 = \frac{1}{1 + \left(1 - \theta \times \left(1 - \frac{m}{255}\right)\right) \times \cos\left(\pi \times \frac{L(x, y)}{255}\right)}, \quad (12)$$

$$\gamma = \begin{cases} \gamma_1, \frac{m}{255} \leq 0.5 \\ \gamma_2, \frac{m}{255} > 0.5 \end{cases},$$

式中, $L(x, y)$ 表示提取的输入图像的光照分量像素值, m 表示输入图像像素平均值, γ 表示图像增强的指数值,决定图像增强效果,经过多次试验,当 θ 取值为 0.6 时,图像亮度校正效果最佳。改进前后伽马校正图像如图 4 所示,改进前后伽马校正图像通道 I 直方图如图 5 所示。可以看出,与改进前伽马校正相比,本文校正后的图像光照更均匀,亮度较高部分被明显降低,亮度低的部分被提升,更好压缩了图像动态范围,从图像亮度分量灰度级来看,本文校正后图像亮度值更集中于 128,符合伽马校正的改进目的。对伽马校正后图像进行归一化,可以部分增强图像对比度,以获得更好的视觉效果,效果如图 6 所示。



图 4 改进前后伽马校正图像

Fig. 4 Gamma correction image before and after improvement

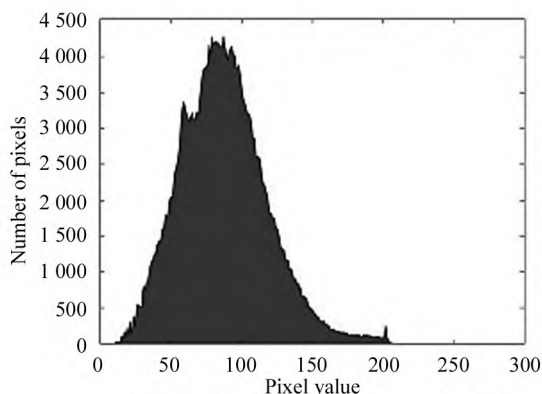
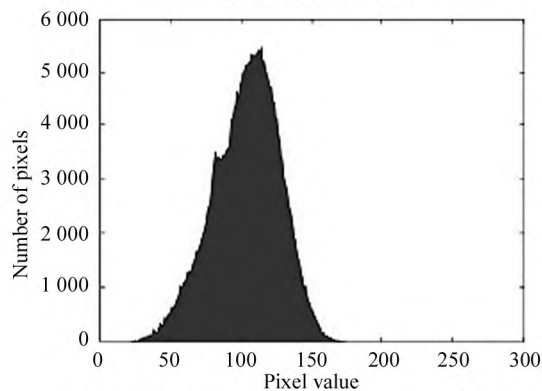
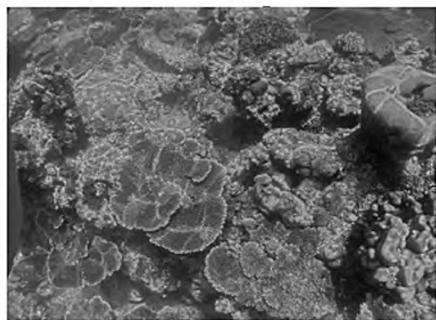
(a) *I*-channel histogram of Gamma corrected image before improvement(b) *I*-channel histogram of Gamma corrected image before and after improvement图 5 改进前后伽马校正图像 *I* 通道直方图Fig. 5 *I*-channel histogram of Gamma correction image before and after improvement

图 6 归一化后图像

Fig. 6 Normalized image

3.4 CLAHE 对比度增强算法

为了提高图像对比度并减少噪声的引入,本文采用 CLAHE 算法对伽马校正后 I^2 图像进行处理。CLAHE 算法先把整幅图像进行分块,再求每块的直方图;然后设置一个阈值,若某个灰度级的像素个数超过设置的阈值,则把超过部分均匀加到每个灰度级上,由于灰度级的再分配,会使部分灰度级像素数再次超过阈值,需要再次平均分配,反复多次,直到有很少的像素超出设定的阈值;最后采用双线性插值法消除分块处理产生的块效应。与经典的直方图均衡化(histogram equalization, HE)和自适应直方图均衡化(adaptive histogram equalization, AHE)算法进行对比,可以看出其他两种算法都会导致图像部分偏亮或偏暗,而本文采用的 CLAHE 算法不仅有效提升图像对比度,而且也不会出现另外两种方法造成的缺点,对比度增强图像如图 7 所示。

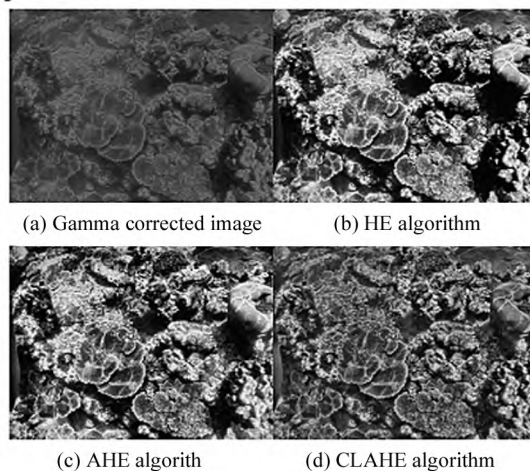


图 7 对比度增强前后图像

Fig. 7 Image before and after contrast enhancement

3.5 权重计算及图像融合

为进一步提升水下图像增强效果,本文选取颜色校正后图像、伽马校正归一化后图像、对比度提升后图像进行融合,提取 3 幅图像的特征,由此定义拉普拉斯对比度(W_{Lap})、局部对比度(W_{Lc})、显著性(W_s)、曝光(W_E) 4 种权重^[15],权重高的像素在融合图像中表现更明显,融合图像通过将占比不同的图像权重图组合起来,形成一幅具有多幅图像优势特征的图像,具有更好的表现效果。

拉普拉斯对比度权重通过拉普拉斯算子对输入图像亮度通道进行滤波,对所得结果取绝对值,即可获得全局对比度,可以获得较好的边缘和纹理信息。

局部对比度权重是通过求取某个像素值与周围

像素均值的标准差得到的权重图,可以进一步增强图像的局部细节与对比度,表达式为:

$$W_{Lc} = \|L^n - L_{lp}^n\|, \quad (13)$$

式中, n 表示输入图像的序列, L 表示Lab空间输入图像的亮度通道, L_{lp} 表示经过低通滤波的亮度通道。

显著性权重通过增强输入图像明暗区域对比度来增强图像全局对比度,在Lab空间进行处理,表达式为:

$$W_s = (L^n - L_m^n)^2 + (a^n - a_m^n)^2 + (b^n - b_m^n)^2, \quad (14)$$

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 L 通道像素的大小,当像素的归一化值接近0.5时,像素往往有更高的曝光外观,曝光权重表示为亮度平均值与0.5的高斯模型距离:

$$W_E = \exp\left(-\frac{(L(x,y) - 0.5)^2}{2 \times \sigma^2}\right), \quad (15)$$

式中, σ 为标准差,本文取0.25。

得到输入图像的4个权重图之后,本文再对其进行归一化:

$$\begin{cases} W_n = W_{Lap}^n + W_{Lc}^n + W_s^n + W_E^n \\ \bar{W}_n = \frac{W_n}{\sum_{n=1}^3 W_n} \end{cases}, \quad (16)$$

式中, W 表示和权重图, \bar{W} 表示归一化权重图。

本文采用多尺度融合算法对得到的水下图像进行进一步增强,首先使用拉普拉斯金字塔把3幅输入图像 I_n 分别分解为 l 层,同时使用高斯金字塔对3

幅归一化权重图 W 分别进行相同层数分解,对各输入图像及其归一化权重图分解的尺寸相同的层分别进行融合,得到融合图像:

$$F_l = \sum_{n=1}^3 G_l[\bar{W}_n(x,y)] \times L_l[I_n(x,y)]. \quad (17)$$

4 实验结果与分析

为证明本文所提出的校正方法的有效性,本文从主观评价、客观评价2个方面对本文算法进行评估,并在主观评价、客观评价方面与文献[2—7]进行对比分析,同时分析本文算法的应用效果。

4.1 主观评价

针对不同的水下环境,将本文方法与文献[2—7]进行对比,结果如图8所示。

从图8可以看出,文献[2]增强了图像的清晰度和对比度,但会使色偏不严重的图像明显偏红,暗部细节不清晰;文献[3]增强了图像清晰度和对比度,但对色偏严重的图像颜色校正效果不好,而且会使图像亮处更亮,暗处更暗;文献[4]对图像色偏校正和清晰度提升有着较好的效果,但对于包括近景物体在内的某些图像,无法估计准确的背景光,而且容易造成图像亮区域过曝,细节信息丢失;文献[5]在提高浅水图像的可见度、改善细节上具有较好的效果,但对深海色偏严重图像颜色校正效果不好;文献[6]显著提升了图像细节,但使图像色偏更严重了;文献[7]无法在复杂的水下照明条件、周围环境和色调下估计背景光和透射率,但对色偏严重图像颜色校正效果不好,色偏不严重图像校正后图像偏黄,而且可能造成过曝;本文提出的校正方法在处理不同

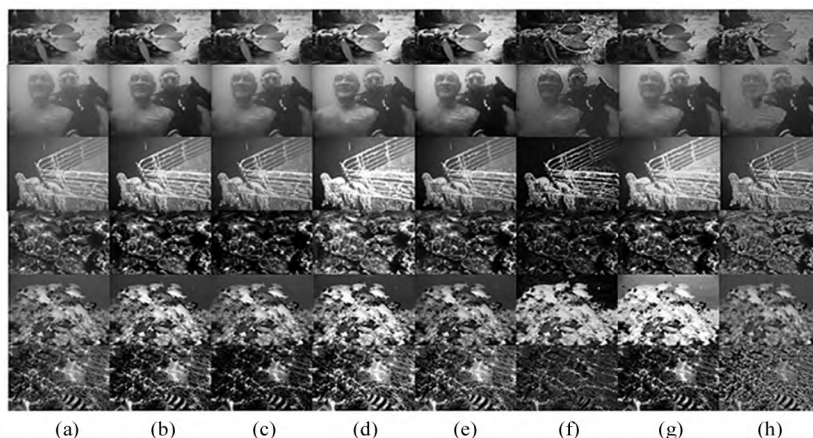


图8 不同算法校正结果:(a) 原图;(b) 文献[2];(c) 文献[3];(d) 文献[4];(e) 文献[5];(f) 文献[6];(g) 文献[7];(h) 本文算法

Fig. 8 Correction results of different algorithms:(a) Raw image;(b) Ref.[2];(c) Ref.[3];(d) Ref.[4];(e) Ref.[5];(f) Ref.[6];(g) Ref.[7];(h) Proposed algorithm

水下环境的图像色偏时均有较好的效果,去除了散射引起的图像模糊,提升了图像对比度,图像亮度也更加均匀,具有较好的主观效果。

4.2 客观评价

在主观评价方面,本文增强效果相对较好;客观评价方面,本文采用图像处理领域常用的均方误差(mean square error, MSE)、峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)、水下图像质量评价(under-water image quality measure, UIQM)^[21]作为本文水下图像客观评价指标。MSE 数值越小表示算法引入的防火墙噪声越少,PSNR 数值越小表示图像质量越

低,与原图像相比失真较大,UIQM 是包括色彩评价、对比度评价、清晰度评价在内的综合评价指标,数值越小表示图像处理整体效果越差。图 9 中图像评价指标如表 1—3 所示,表 1 为 MSE 评价指标,表 2 为 PSNR 评价指标,表 3 为 UIQM 评价指标。

从表 1—3 中数据可以看出,本文算法处理后的图像评价指标有明显提高,根据表中数据可以判断出本文算法引入的噪声较少,图像保留有效信息更多,而且在色彩、对比度、清晰度方面都有较好的效果。

表 1 均方误差指标

Tab. 1 Index of MSE

Methods	Ref. [2]	Ref. [3]	Ref. [4]	Ref. [5]	Ref. [6]	Ref. [7]	Proposed algorithm
Image1	296.30	352.90	968.34	605.99	2 603.69	573.48	296.07
Image2	771.41	582.08	378.80	1 085.49	2 305.51	291.08	169.47
Image3	412.14	267.27	1 635.98	737.98	5 427.74	511.88	196.58
Image4	1 255.27	2 860.29	600.27	604.00	3 358.87	1 319.82	348.25
Image5	525.66	191.59	1 375.5	370.81	1 946.04	3 430.09	326.46
Image6	719.84	2 136.70	654.12	100.64	1 850.97	980.48	634.42

表 2 峰值信噪比指标

Tab. 2 Index of PSNR

Methods	Ref. [2]	Ref. [3]	Ref. [4]	Ref. [5]	Ref. [6]	Ref. [7]	Proposed algorithm
Image1	23.414	22.654	18.271	20.306	13.975	20.546	23.417
Image2	19.258	20.481	22.347	17.775	14.503	23.491	25.840
Image3	21.980	23.861	15.993	17.450	10.785	21.039	25.195
Image4	17.143	13.567	20.347	20.321	12.869	16.926	22.712
Image5	20.924	25.307	16.746	22.439	15.239	12.778	22.993
Image6	19.558	14.833	19.974	28.103	15.457	18.216	20.080

表 3 水下图像质量评价指标

Tab. 3 Index of UIQM

Methods	Ref. [2]	Ref. [3]	Ref. [4]	Ref. [5]	Ref. [6]	Ref. [7]	Proposed algorithm
Image1	2.739	3.625	4.102	2.623	2.202	2.431	5.014
Image2	0.745	0.379	2.863	1.790	0.605	1.407	4.021
Image3	3.911	1.566	2.438	0.963	2.930	0.991	4.570
Image4	4.754	3.360	4.857	4.560	3.488	5.308	5.474
Image5	2.171	1.724	1.909	0.283	1.397	0.308	3.758
Image6	3.854	2.886	4.080	4.356	4.156	4.484	5.304

4.3 应用测试

图像增强的目的是为了进一步的应用,为了验证本文算法的应用效果,本文采用低光照图片去验证本文对低光照及光照不均匀图像的处理效果,效果图如图9所示;为验证本文对水下图像清晰度及细节的提升情形,采用尺度不变特征变换(scale invariant feature transform, SIFT)进行特征点匹配测试,图像纹理特征越清晰,特征点匹配个数越多,效果图如图10所示。



图9 低光照图像校正:(a) 低光照图像;(b) 校正结果

Fig. 9 Low-light image correction:

(a) Low-light images; (b) Correction results

从图9可以看出,本文算法对低光照图像有着较好的校正效果,图像亮度得到提升,使暗部细节更加清晰,图像对比度也得到了有效提升,说明本文算法也适用于光线较暗及光照不均匀的图像的处理。

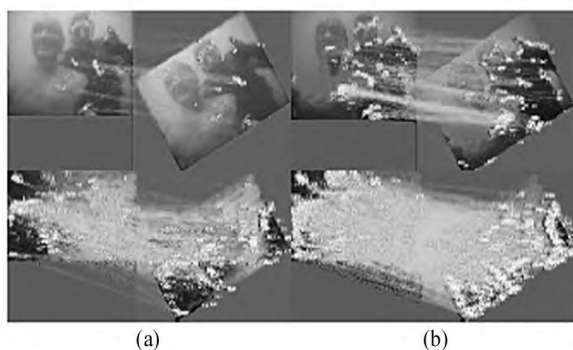


图10 特征点匹配结果:

(a) 原图匹配结果;(b) 增强图像匹配结果

Fig. 10 Feature point matching results:

(a) Matching results of raw image;

(b) Enhanced image matching results

从图10可以看出,原图匹配的特征点个数较少,在用本文算法对图像进行增强后,特征点匹配个数增加了很多,证明本文算法具有增强图像清晰度和细节的作用。

5 结论

色彩失真、图像不清晰、对比度低、光照不均匀等是水下图像普遍存在的问题,为解决上述问题,本文提出了一种改进的伽马校正与多尺度融合的水下图像增强方法。该算法不需要先验信息,直接对退化的水下图像进行处理,对不同水下环境图像均有较好的颜色校正效果,有效提升了图像的清晰度与对比度,图像亮度更均匀,暗处和亮处的细节更明显。与其他算法相比而言,本文算法取得的结果在主观方面与客观方面均取得了较好的效果,有利于海洋资源的开发利用,水下目标的检测与跟踪准确度的提升。

参考文献:

- [1] CONG R M, ZHANG Y M, ZHANG C, et al. Research progress of deep learning driven underwater image enhancement and restoration[J]. Journal of Signal Processing, 2020, 36(9): 1377-1389.
- [2] 丛润民, 张禹墨, 张晨, 等. 深度学习驱动的水下图像增强与复原研究进展[J]. 信号处理, 2020, 36(9): 1377-1389.
- [3] SONG W, WANG Y, HUANG D, et al. A rapid scene depth estimation model based on underwater light attenuation prior for underwater image restoration[C]//Pacific Rim Conference on Multimedia, September 21-22, 2018, Hefei, China. Berlin: Springer, 2018: 678-688.
- [4] PENG Y T, COSMAN P C. Underwater image restoration based on image blurriness and light absorption[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(4): 1579-1594.
- [5] SONG W, WANG Y, HUANG D, et al. Enhancement of underwater images with statistical model of background light and optimization of transmission map [EB/OL]. (2019-06-19) [2021-10-20]. <https://arxiv.org/abs/1906.08673v1>.
- [6] HUANG D, WANG Y, SONG W, et al. Shallow-water image enhancement using relative global histogram stretching based on adaptive parameter acquisition[C]//24th International Conference on Multi Media Modeling, February 05-07, 2018, Bangkok, Thailand. Berlin: Springer, 2018: 453-465.

- [6] WEN H, TIAN Y, HUANG T, et al. Single underwater image enhancement with a new optical model[C]//2013 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, May 19-23, 2013, Beijing, China. New York: IEEE, 2013: 753-756.
- [7] CARLEVARIS-BIANCO N, MOHAN A, EUSTICE R M. Initial results in underwater single image dehazing [C]//OCEANS 2010, September 20-23, 2010, Seattle, WA. New York: IEEE, 2010: 1-8.
- [8] YADAV S, Raj K. Underwater image enhancement via color balance and stationary wavelet based fusion[C]//2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology, November 06-08, 2020, Bangluru, India. New York: IEEE, 2020: 1-5.
- [9] ZHU J Q, ZHOU L L, YAN J J, et al. Underwater image restoration method combining improved red channel prior and power law correction-based CLAHE algorithm[J]. Infrared Technology, 2021, 43(7): 696-701.
朱佳琦, 周丽丽, 闫晶晶, 等. 结合改进红通道先验与幂律校正 CLAHE 的水下图像复原方法[J]. 红外技术, 2021, 43(7): 696-701.
- [10] DAI C, LIN M, WU X, et al. Single underwater image restoration by decomposing curves of attenuating color[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 123(5): 105947.
- [11] MCGLAMERY B L. A computer model for underwater camera systems[C]//Ocean Optics VI 1979, October 23-25, 1979, Monterey, United States. Washington: SPIE, 1980, 208: 221-231.
- [12] LUO W, DUAN S, ZHENG J. Underwater image restoration and enhancement based on a fusion algorithm with color balance, contrast optimization and histogram stretching [J]. IEEE Access, 2021, 99: 31792-31804.
- [13] LI C, GUO J, GUO C, et al. A hybrid method for underwater image correction [J]. Pattern Recognition Letters, 2017, 94: 62-67.
- [14] ANCUTI C O, ANCUTI C, VLEESCHOUWER C D, et al. Color balance and fusion for underwater image enhancement[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 27(1): 379-393.
- [15] LI X, HOU G, TAN L, et al. A hybrid framework for underwater image enhancement [J]. IEEE Access, 2020, 8: 197448-19746.
- [16] GIJSENIJ A, GEVERS T. Color constancy using natural image statistics and scene semantics[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 33(4): 687-698.
- [17] 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.
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.
- [18] LI X, PAN J, HE Y, et al. Bilateral filtering inspired locality preserving projections for hyperspectral images[J]. Neurocomputing, 2015, 164: 300-306.
- [19] HE K, SUN J, TANG X. Guided image filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 35(6): 1397-1409.
- [20] LI Y, LIU X L, LIU Y. Adaptive local gamma correction based on mean value adjustment[C]//Fifth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control, September 18-20, 2015, Qinhuangdao, China. New York: IEEE, 2015: 1858-1863.
- [21] PANETTA K, GAO C, AGAIN S. Human-visual-system-inspired underwater image quality measures[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2015, 41(3): 541-551.

作者简介:

李 恒 (1978—), 男, 硕士, 高级实验师, 硕士生导师, 主要从事图像增强、缺陷检测方面的研究。