

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003327

基于颜色校正和改进二维伽马函数的水下图像增强^{*}

王 聪 薛晓军 李 恒 张国银 王海瑞 赵 磊
(昆明理工大学 信息工程与自动化学院 昆明 650500)

摘 要: 针对由于光在水体中衰减、散射,造成捕获的水下图像存在偏色、对比度低、清晰度差、光照不均等问题,提出一种基于颜色校正和改进二维伽马函数的水下图像增强方法。首先,用带颜色恢复的多尺度 Retinex 增强算法(MSRCR)校正偏色问题,获得一个输入图像;然后用改进的二维伽马函数降低光照不均匀对水下图像的影响,并用基于自适应 Sigmoid 函数双直方图均衡化(BEASF)增强图像对比度,获得另一个输入图像;最后结合对比度、显著性、饱和度、曝光度4个权重进行多权重融合,得到最终的增强图像。实验结果表明,该算法不仅能有效的改善水下图像偏色的问题,而且增强了图像的细节和对比度。

关键词: MSRCR; 二维伽马函数; BEASF; 拉普拉斯金字塔; 多权重融合

中图分类号: TP391.9; TN919.8 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Underwater image enhancement based on color correction and improved 2D gamma function

Wang Cong Xue Xiaojun Li Heng Zhang Guoyin Wang Hairui Zhao Lei

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

Abstract: Due to the attenuation and scattering of light in the water, the image captured underwater has the problems of color deviation, low contrast, poor definition and uneven illumination. In this paper, an underwater image enhancement method based on color correction and improved 2D gamma function is proposed. Firstly, MSRCR is used to correct the color deviation problem to obtain an input image; secondly, the improved two-dimensional gamma function is used to reduce the influence of uneven illumination on the underwater image, and BEASF is used to enhance the image contrast to obtain another input image; finally, the four weights of contrast, saliency, saturation and exposure are combined for multi-weight fusion to obtain the final enhancement image. Experimental results show that this algorithm can effectively improve the problem of underwater image color deviation, and enhance the details and contrast of the image.

Keywords: MSRCR; 2D gamma function; BEASF; laplace pyramid; multi weight fusion

0 引 言

随着人们对海洋世界的探索,如何获得高质量的水下图像成为一个关键问题。海底环境中有着丰富的石油资源、海洋生物和沉船等,海洋也是国防战略安全的重要领域,因此海洋资源的开发利用对人类具有重要的意义,这包括水下基础设施的检测、水产养殖、人造物体的探测、海洋生态学研究等。与普通的成像不同,在水下环境中,由于水和悬浮粒子对不同波长的光有选择性的吸收

和散射,导致捕获的水下图像颜色失真、雾化模糊,降低了图像的清晰度和对比度。低质量的水下图像给计算机视觉系统的目标检测、物体识别、环境监测等任务的后续处理带来了不利影响,因此如何提高水下图像质量是一个具有挑战性的工作。

近年来,国内外对水下图像的研究主要从图像复原和图像增强两方面展开。现在的复原方法往往是基于水下成像模型,该模型是根据雾天成像模型,通过暗通道先验得到图像的暗原色图和透射图,以改善水下图像清晰度。在图像增强方面,Ancuti 等^[1]提出一种基于融合的

收稿日期: 2020-07-12 Received Date: 2020-07-12

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(61863016,61263023)项目资助

方法来增强水下图像,利用白平衡消除偏色,利用对比度自适应直方图增强对比度,得到两个输入图,再用拉普拉斯金字塔融合,最后得到视觉效果良好的水下图像,但在处理场景较深的图像时有局限性,未能消除蓝色背景。杨卫中等^[2]用基于对比度受限直方图均衡化处理水下海参图像,提高了图像细节和对比度,但没有考虑光波在水下衰减的问题。在图像复原方面,王鑫等^[3]利用暗原色先验计算图像暗原色,并用稀疏表示对暗原色去噪和优化,达到去模糊和去噪的效果,但未考虑水下图像颜色失真的问题。Fabbri 等^[4]使用生产对抗网络来增强水下图像,能够很好地校正颜色,在一定程度上提高水下图像质量,但由于没有合理的用于监督学习的成对标签图像,限制了基于深度学习的水下图像增强。孙杰^[5]则用改进的暗通道先验算法提高图像清晰度,并结合带颜色恢复的多尺度 Retinex 增强算法(MSRCR)修复颜色,但图像的细节仍不够丰富。

综上所述,针对水下图像存在清晰度差、颜色失真、低对比度和光照不均问题^[6],本文提出一种基于颜色校正和改进二维伽马函数的水下图像增强方法。首先通过 MSRCR 算法对颜色进行修复,获得第一个输入图像;然后用改进的二维伽马函数降低光照过强区域的亮度,提高过暗区域的亮度,凸显更多细节信息,优化清晰度;再用基于自适应 Sigmoid 函数双直方图均衡化(BEASF)提升图像整体对比度,并在防止过增强的同时保持亮度,得到第二个输入图像;最后通过高斯和拉普拉斯金字塔融合两个输入图像,得到增强的水下图像。

1 水下成像模型

在理想的传输介质中,成像通常主要受目标对象和摄像机的性能影响,但在水下图像成像过程中,成像效果受多方面因素影响,一天中不同时间太阳光入射水面的角度,水面是否平静,在水中成像的位置深度等。海水中的悬浮粒子数量远大于空气中的,因此水下成像过程中光在到达相机前,被悬浮粒子吸收和散射,水下图像呈现模糊和低对比度。由于不同波长的光会根据水深出现不同程度的衰减,衰减最快的是波长最长的红色(0~5 m),然后依次是橙色(10~15 m)、黄色(20~25 m)、绿色(25~30 m),波长最短的蓝光则能传输更远的距离,因此可以见到的深海水下图像通常偏蓝色或绿色。

根据大气散射模型,摄像机捕捉到图像的光可以由 3 个部分线性叠加组成,为直接衰减分量、前向散射分量和背景散射分量,如图 1 所示。

通常拍摄时目标物体距离摄像机较近,可以不考虑由水下悬浮颗粒造成的前向散射分量,则水下图像成像模型可简单的表达为^[7]:

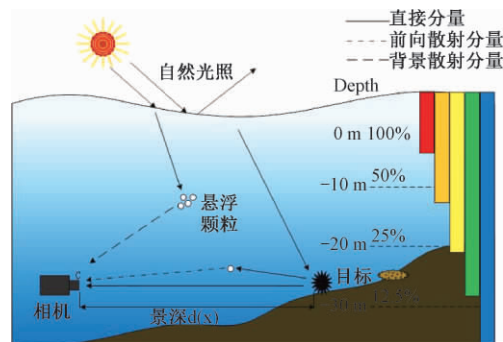


图 1 水下图像成像模型

Fig. 1 Underwater image imaging model

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

式中: $I(x, y)$ 是采集到的图像; $J(x, y)$ 是清晰图像; A 是背景光系数; $t(x, y)$ 是透射率; (x, y) 为像素位置。其中 $t(x, y)$ 可定义为:

$$t(x, y) = e^{-\beta d(x)} \quad (2)$$

式中: β 为光的衰减系数,不同波长的光衰减系数不同; $d(x)$ 为摄像机到拍摄目标之间的距离。

2 基于颜色校正和改进二维伽马函数的水下图像增强

2.1 MSRCR 算法

Retinex 理论指出照射光和物体表面的反射光决定了人视网膜接收到的物体的亮度,即:

$$I(x, y) = L(x, y) F(x, y) \quad (3)$$

式中: $I(x, y)$ 为采集到的图像; $L(x, y)$ 为照射光; $F(x, y)$ 为物体对环境的反射光。减弱照射光 $L(x, y)$ 即可得到还原的物体颜色, $L(x, y)$ 可通过对 $I(x, y)$ 进行高斯模糊得到,使得到的图像更符合人类的视觉系统^[8]。

单尺度 Retinex(SSR)的表达式如下:

$$\log[F(x, y)] = \log[I(x, y)] - \log[I(x, y) * g(x, y)] \quad (4)$$

式中: “*” 为卷积运算符号, $g(x, y)$ 为高斯函数,且满足归一化条件,即 $\iint g(x, y) dx dy = 1$ 。

多尺度 Retinex(MSR)的输出则是几个不同 SSR 的加权和,表达式为:

$$F_{\alpha}^{msr}(x, y) = \sum_{n=1}^3 \omega_n F_{n\alpha}(x, y) \quad (5)$$

式中: $\alpha \in (R, G, B)$, 表示 3 个颜色通道分量; $F_{n\alpha}(x, y)$ 是第 n 个尺度的第 α 个分量; $F_{\alpha}^{msr}(x, y)$ 是输出的第 α 个分量; ω_n 是第 n 个尺度的权重系数,通常 ω_n 取 1/3, $n = 1, 2, 3$ 。

为了解决图像颜色失真问题,在 RGB 颜色空间,引入颜色修正因子 $C_{\alpha}(x, y)$, 得到 MSRCR, 即:

$$F_{\alpha}^{\text{msrcr}}(x, y) = C_{\alpha}(x, y) F_{\alpha}^{\text{msr}}(x, y) \quad (6)$$

颜色修正因子 $C_{\alpha}(x, y)$ 通过调整 RGB 颜色通道之间的比例,来达到修正图像的颜色,其计算公式如下:

$$C_{\alpha}(x, y) = \lambda \{ \log [\theta I_{\alpha}(x, y)] - \log [\sum_{n=1}^3 I_n(x, y)] \} \quad (7)$$

式中: λ 为增益常数; θ 用以控制非线性强度。通过以上公式可得到颜色校正的输入图 I_1 。

白平衡常被用于水下图像的颜色校正,灰度阴影、灰度世界、最大 RGB、灰度边缘均属于白平衡算法。如图2所示,经试验可以发现,灰度阴影和灰度世界处理后的图像消除了绿色,但是图像的颜色鲜艳度和饱和度仍较低,整体亮度偏暗;最大 RGB 算法处理后的图像仍存在轻微的偏色问题;灰度边缘算法则没有有效的改善水下图像偏绿色的问题;而 MSRCR 则很好地消除了绿色偏色,提高了整体亮度,图像颜色更鲜艳,色彩饱和度适中,更贴合人眼的视觉系统,因此 MSRCR 能更好的校正水下图像的颜色。

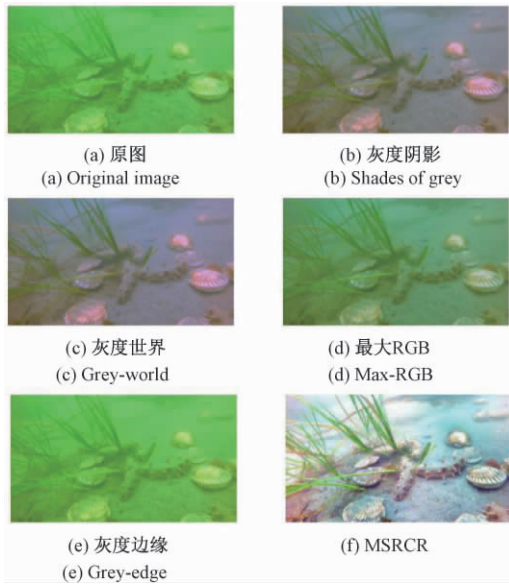


图2 颜色校正结果对比

Fig. 2 Comparison of color correction results

2.2 基于改进二维伽马函数的光照不均校正

1) 基于暗通道的光照分量提取

由于水下成像环境特殊,人们通常会使用人工光源进行照明补充,这往往会导致水下图像存在亮度不均匀的问题,同时也存在水下珊瑚、石头、动植物等投下的阴影,造成水下图像部分区域亮度较暗,使图像细节不清晰,纹理不突出。

根据暗通道理论,图像中除了天空部分的 RGB 通道,存在像素在其中至少一个通道的值非常小,即该区域

的光照强度很低,则暗通道可表示为^[9]:

$$J^{\text{dark}}(x, y) = \min_{(x, y) \in \Omega(x, y)} \left(\min_{\alpha \in (R, G, B)} (J_{\alpha}(x, y)) \right) \rightarrow 0 \quad (8)$$

式中: $J^{\text{dark}}(x, y)$ 为暗原色图; $J_{\alpha}(x, y)$ 表示颜色通道强度; $\Omega(x, y)$ 表示以像素 (x, y) 为中心的窗口,对图像做顺序统计滤波,本文选取的最小滤波窗口大小为 9×9 。

目前常用基于线性引导滤波、高斯滤波、Top-hat 等方法提取光照分量,为了更好的保持光照分量的边缘特性,本文选用双边滤波算法来准确的提取水下图像的光照分量,双边滤波的表达式如下:

$$I_b(i, j) = \frac{\sum_{x=1}^j J^{\text{dark}}(x, y) \psi(i, j, x, y)}{\sum_{x=1}^j \psi(i, j, x, y)} \quad (9)$$

$$\psi(i, j, x, y) = \exp \left(- \frac{(i-x)^2 + (j-y)^2}{2\sigma_d^2} - \frac{\|I(i, j) - I(x, y)\|^2}{2\sigma_r^2} \right) \quad (10)$$

式中: $I_b(i, j)$ 为输出的光照分量; $J^{\text{dark}}(x, y)$ 为暗原色图; $\psi(i, j, x, y)$ 为空间邻近度和像素相似度的核函数; $2\sigma_d^2$ 为距离参数; $2\sigma_r^2$ 为亮度参数。

2) 构造改进的二维伽马函数

为了减小过亮区域的亮度值,增强过暗区域的亮度值,本文根据光照分量构造光照不均匀校正函数,改进的二维伽马函数可以依据光照分量自适应的调整参数,解决水下图像光照不均的问题。输入图像为 MSRCR 颜色校正后的输入图 I_1 , 用式(9)提取的光照分量构造改进的二维伽马函数为:

$$O(x, y) = 255 \left(\frac{F_{\alpha}^{\text{msrcr}}(x, y)}{255} \right)^{\varphi} \quad (11)$$

$$\varphi = \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{m - I_b(i, j)}{m}} \quad (12)$$

$$m = \text{Mean}(I_b(i, j)) \quad (13)$$

式中: $O(x, y)$ 是图像校正后的亮度值; φ 是亮度增强的指数值; m 则是光照分量 $I_b(i, j)$ 的亮度平均值。若光照分量均值 $m = 128$, 输入图像 $F_{\alpha}^{\text{msrcr}}(x, y)$ 在像素点 (x, y) 的亮度值为 120, 则在相同像素点提取到输入图像的光照分量值 $I_b(i, j) = 64$, 经计算得到 $\varphi \approx 0.707$, 则校正后亮度值 $O(x, y) = 149.65$ 。由此可看出,当输入图像某点的亮度值小于平均亮度值时,改进的二维伽马函数可自适应地提高该点的亮度。同样的,当输入图像某点的亮度值大于平均亮度值,经校正后可适度降低该点的亮度。

本文提出的改进的二维伽马函数校正前后图像亮度图细节对比如图3所示,校正前后图像的直方图对比如图4所示。可观察到原图中过亮区域的亮度得到了降低,物体阴影处较暗区域的亮度得到了提升,良好地解决

了图像阴影处光照不均匀问题,提高了图像的质量,使其更符合人类的视觉感知系统^[10]。

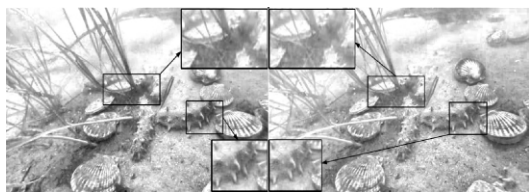


图3 二维伽马函数校正前后图像亮度图细节对比
Fig. 3 Details comparison of brightness map before and after corrected by the 2D gamma function proposed

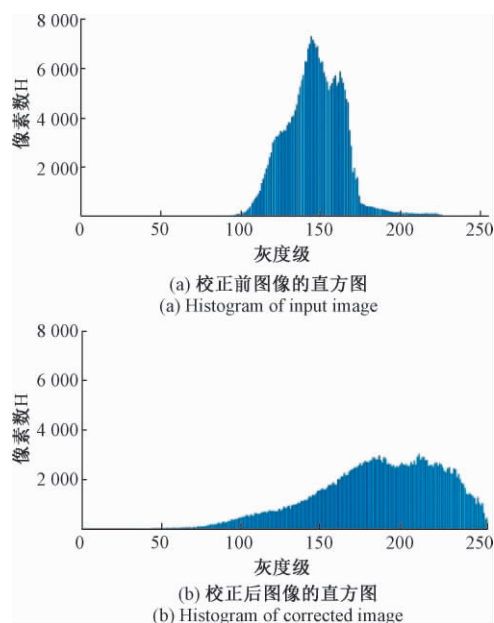


图4 二维伽马函数校正前后图像的直方图
Fig. 4 Histograms of images before and after corrected by the 2D gamma function proposed

2.3 基于自适应 Sigmoid 函数双直方图均衡化的对比度增强

为了避免在增强对比度过程产生新的噪声,并出现过增强现象,本文采用了基于 BEASF^[11] 的对比度增强,以得到第二幅输入图 I_2 。如图 5 所示,与常用的两种增强对比度的算法比较,自适应二维伽马算法(AGCWD)增强对比度的效果不明显,过曝光使得图像细节不清晰;直方图均衡化(HE)处理后图像过增强且颜色失真;本文采用的 BEASF 算法处理后的图像适当地增强了对比度,且图像细节丰富。

2.4 基于多权重的拉普拉斯金字塔图像融合

1) 权重设计

为了获得颜色鲜艳和对比度都很好的水下图像,本

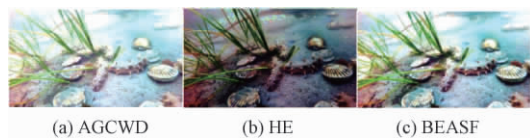


图5 各方法对比度增强结果对比
Fig. 5 Comparison of contrast enhancement results of each algorithm

文通过分别提取两个输入图像的特征,定义4种权重图,即拉普拉斯对比权重、亮度权重、显著性权重、饱和度权重,根据这4种权重图融合得到的图像具有更好的质量^[12]。

(1) 拉普拉斯对比权重

拉普拉斯算子可有效的检测到图像的边缘和纹理信息,在输入图像的亮通道上应用拉普拉斯滤波,并计算其绝对值,以获得全局对比 W_{LC}^n 。

(2) 亮度权重

亮度权重代表了颜色相对的明暗程度,当亮度较小时,图像会更灰暗。将输入图像从 RGB 空间转换到 HSV 空间,亮度权重可由 RGB 三个通道与亮度通道的标准差得到:

$$W_L^n = \sqrt{\frac{[(R^n - V^n)^2 + (G^n - V^n)^2 + (B^n - V^n)^2]}{3}} \quad (14)$$

式中: $n = 1, 2$, 代表输入图的序号; V 为亮度。

(3) 显著性权重

显著图可以将图像中的阴影区域与较亮区域分开,本文使用全局对比和颜色空间分布的方法来得到显著性权重,可用式(15)表示。

$$W_S^n = (l^n - l_m^n)^2 + (a^n - a_m^n)^2 + (b^n - b_m^n)^2 \quad (15)$$

式中: l 代表 Lab 空间中的亮度; a, b 为颜色分量值; l_m^n, a_m^n, b_m^n 分别为 l^n, a^n, b^n 的平均值。

(4) 饱和度权重

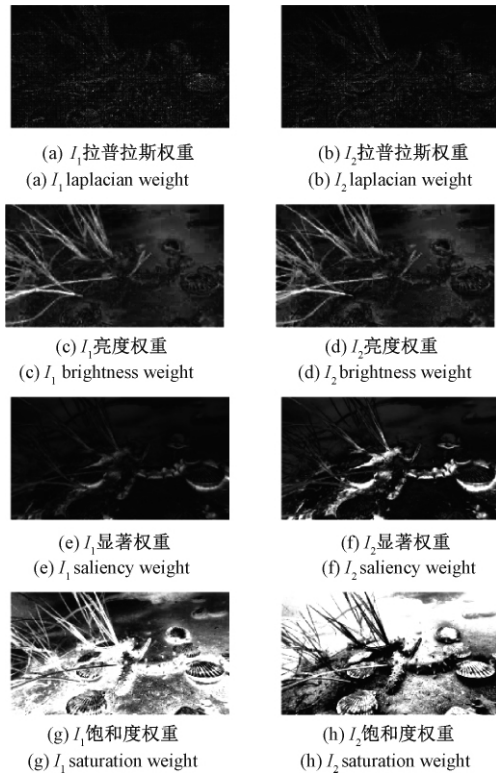
饱和度代表了图像的色彩鲜艳程度,一种颜色与相同亮度的灰度图差值越大饱和度越高,图像颜色越鲜艳。将输入图像映射到区间 $[0, 1]$,通常当像素的亮度均值更接近 0.5 时,图像拥有更丰富的色彩,标准差的均值约为 0.25,则饱和度权重可表示为^[13]:

$$W_E^n = \exp\left(-\frac{(E - 0.5)^2}{2 \times 0.25^2}\right) \quad (16)$$

式中: E 为图像像素的饱和度值,经计算求得的输入图 I_1 和输入图 I_2 的 4 种权重如图 6 所示:

2) 权重归一化

对拉普拉斯对比权重、亮度权重、显著性权重、饱和度权重先求和再进行归一化,计算公式如下:

图6 输入图 I_1 和 I_2 的4个权重图Fig. 6 Four weighted maps of input image I_1 and I_2

$$W^n = W_{LC}^n + W_L^n + W_S^n + W_E^n \quad (17)$$

$$\widetilde{W}^n = \frac{W^n}{\sum_{n=1}^2 W^n} \quad (18)$$

式中: W_{LC}^n 为拉普拉斯对比权重; W_L^n 为亮度权重; W_S^n 为显著性权重; W_E^n 为饱和度权重; \widetilde{W}^n 为归一化权重。

4) 图像融合

基于单尺度的图像融合易出现光晕现象,而基于像素的融合方法过于复杂,计算量大,因此本文采用更简便的多尺度融合方法。

首先对两幅输入图像做拉普拉斯金字塔分解,对两幅归一化权重图做高斯金字塔分解,然后对其进行分层的多尺度融合,最后得到还原的输出图像^[14]。

$$R_c(x, y) = \sum_n G_c \{ \widetilde{W}^n(x, y) \} L_c \{ I_n(x, y) \} \quad (19)$$

$$R(x, y) = \sum_n \widetilde{W}^n(x, y) I_n(x, y) \quad (20)$$

式中: $R_c(x, y)$ 为每层分解图像, $I_n(x, y)$ 为输入图像, c 为金字塔的层数,本文取 $c = 5$, G_c 表示第 c 层高斯金字塔, L_c 表示第 c 层拉普拉斯金字塔; $R(x, y)$ 为输出图像。每个分解层所对应的尺度不同,融合过程如图7所示^[15]。

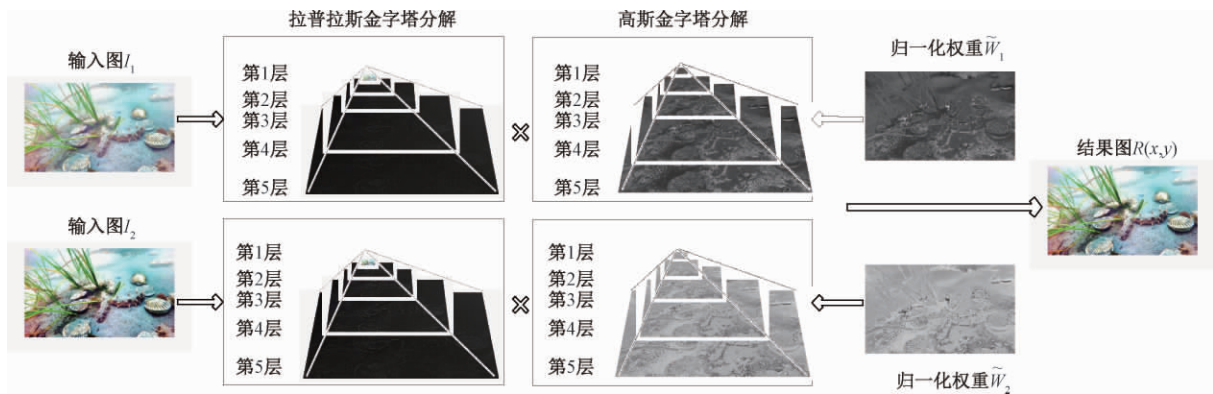


图7 融合过程

Fig. 7 Fusion process

3 算法流程与实现

在水下自然环境下获取的图像通常会受到光照、遮挡、阴影等情况的影响,即对亮度比较敏感,而在 RGB 颜色空间中, R、G、B 三个颜色通道会随亮度改变而改变,由于 HSV 颜色空间比 RGB 颜色空间更接近人眼对色彩的感知经验,且亮度可单独操作,不会出现色彩失真,因此本文在 HSV 颜色空间中对图像光照不均进行校正,总体算法流程如图8所示。

4 实验结果与分析

本文实验所采用的数据集为大连理工大学-獐子岛联合实验室采集的水下地形、地貌、机器人运作等图像数据和其他文献常用的图像。为了验证本文算法的有效性,将本文方法与文献[14,16]的水下图像增强结果图作比较。

4.1 主观评价

在实验验证中,将本文方法与文献[14,16]的复原方法结果进行比较如图9所示。从图9可以看出,文

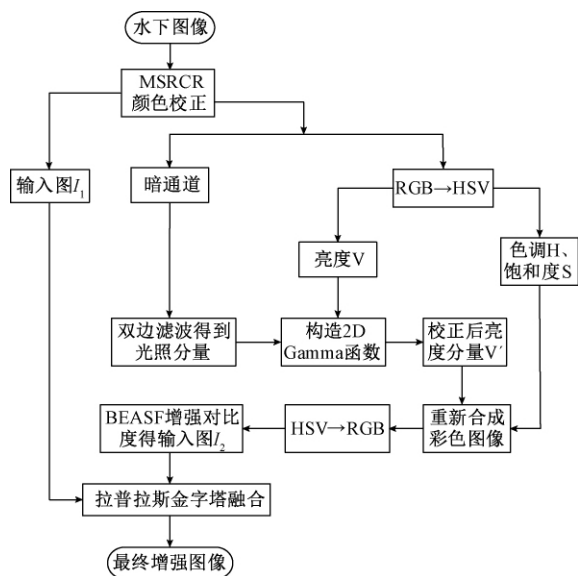


图8 本文算法流程

Fig.8 Algorithm flow chart

献[16]校正了图像颜色失真,但水下图像部分较暗区域的细节不清晰;文献[3]的方法处理后的图像偏色问题加重,图像质量不佳;文献[2]的方法处理后的图像增强了对比度和清晰度,但图像仍轻微偏色,且在类似天空背景区域出现了严重的颜色失真;文献[1]在颜色校正后真实拍摄图像仍偏蓝绿色,质量不高。文献[4]在处理

蓝色偏色图像时取得了较好的效果,但在处理绿色偏色图像时出现红色过补偿现象。而本文方法则有效的校正了水下图像偏蓝绿色的问题,校正后的水下图像颜色饱满,图像细节清晰,未出现过增强现象,保持了图像的整体亮度,并且图像整体光照均匀。

4.2 客观评价

本文采用4种常用的水下图像质量评价指标对以上几种方法做客观评价,即水下图像色彩评价指标(UICM)、对比度评价指标(UIConM)、质量评价指标(UIQM)、清晰度评价指标(UISM)^[17]。

表1为本文与文献[1-4,16]算法处理后的水下图像质量评价。由UICM可看出,文献[4]的数值最高,但越高的数值不代表图像有着更好的视觉效果,因为会造成图像颜色过饱和及偏色问题,而本文颜色校正效果更符合人眼视觉习惯;由UIConM可看出,文献[10]算法处理后的图像对比度数值较高,但对比度过高会造成图像过增强,而本文在适当提高对比度的同时更好的保留了图像较暗区域的细节信息;由UISM可看出本文有效的增强了水下图像的清晰度,有利于水下目标检测的进行;由综合质量评价指标UIQM可看出,本文算法的指标最高,这表明本文处理后的水下图像整体质量最好,拥有更自然的颜色,同时大大提高了图像的对比度和清晰度。

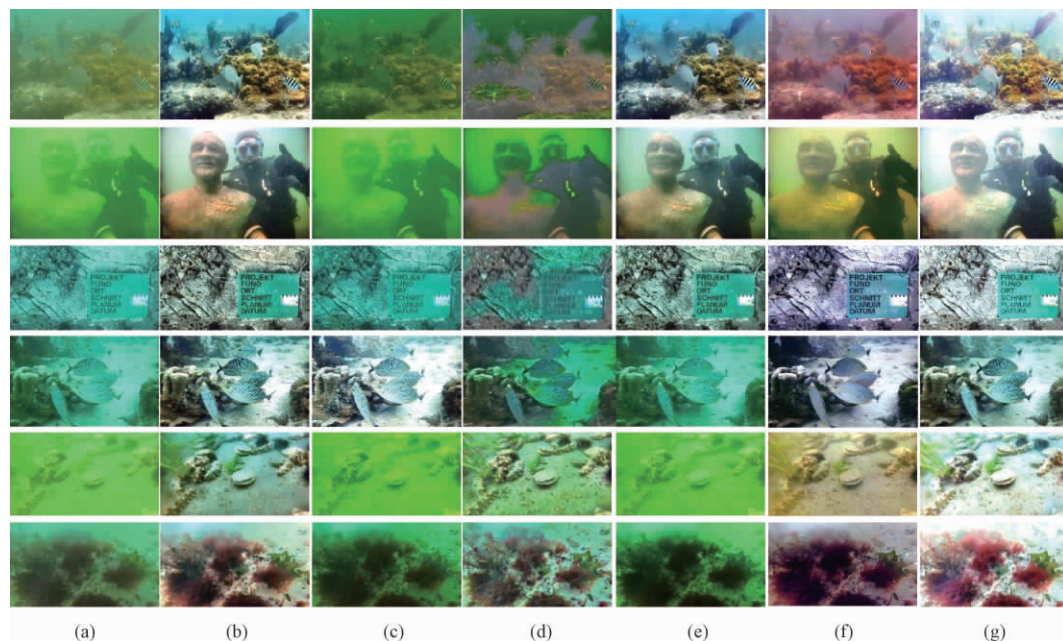


图9 (a) 原图; (b) 文献[16]方法; (c) 文献[3]方法; (d) 文献[2]方法; (e) 文献[1]方法; (f) 文献[4]方法; (g) 本文方法

Fig.9 (a) Original image; (b) Result using the method of Ref. [16]; (c) Result using the method of Ref. [3];

(d) Result using the method of Ref. [2]; (e) Result using the method of Ref. [1]; (f) Result using the method of Ref. [4];

(g) Result using our method

表1 水下图像质量评价
Table 1 Quality evaluation of underwater image

图像	1				2			
评价指标	UICM	UIConM	UISM	UIQM	UICM	UIConM	UISM	UIQM
原图	-40.998 3	0.455 2	1.927 7	1.040 6	-106.793 5	0.463 6	1.217 4	-0.994 7
本文算法	-7.406 6	0.688 2	4.512 7	3.584 3	-18.472 5	0.557 4	3.421 5	2.482 2
文献[16]方法	-57.250 6	0.671 0	2.075 8	1.397 7	-131.122 6	0.5717	1.197 6	-1.299 9
文献[3]方法	-33.473 8	0.708 4	3.747 5	2.695 6	-25.872 9	0.556 7	2.391 6	1.966 9
文献[2]方法	-14.731 5	0.353 6	5.333 5	2.423 7	-44.389 8	0.414 4	5.406 9	1.826 4
文献[1]方法	-58.835 0	0.649 6	2.144 1	1.296 6	-152.594 5	0.556 7	2.391 6	-1.869 4
文献[4]方法	33.622 1	0.490 4	2.254 4	3.367 2	-13.442 6	0.440 1	1.339 8	1.590 0
图像	3				4			
评价指标	UICM	UIConM	UISM	UIQM	UICM	UIConM	UISM	UIQM
原图	-91.658 4	0.885 8	7.173 7	2.700 7	-100.045 6	0.727 0	6.732 9	1.755 1
本文算法	-31.554 9	0.936 8	7.160 6	4.573 9	-31.585 4	0.855 5	6.738 3	4.154 9
文献[16]方法	-103.220 9	0.806 5	7.066 6	2.059 4	-113.325 2	0.685 7	3.1133	0.174 8
文献[3]方法	-43.014 8	0.860 0	7.240 3	3.999 9	-33.970 6	0.819 5	6.738 1	3.961 6
文献[2]方法	-29.393 9	0.508 4	4.612 2	2.350 7	-43.470 5	0.414 7	4.672 7	1.636 8
文献[1]方法	-105.749 4	0.814 7	7.011 2	2.000 9	-121.919 9	0.723 9	6.779 0	1.151 9
文献[4]方法	-6.764 1	0.819 9	6.972 5	4.799 5	-12.130 4	0.728 4	5.762 8	3.963 9
图像	5				6			
评价指标	UICM	UIConM	UISM	UIQM	UICM	UIConM	UISM	UIQM
原图	-93.825 8	0.503 9	2.346 6	-0.151 3	-93.723 8	0.548 8	2.725 3	0.123 8
本文算法	-19.791 4	0.736 3	5.1361	3.591 1	20.164 5	0.725 2	4.361 5	4.435 2
文献[16]方法	-113.325 2	0.685 7	3.113 3	0.174 8	-56.892 0	0.725 2	2.3697	1.688 2
文献[3]方法	-24.961 4	0.727 9	4.149 4	2.636 5	-0.246 6	0.707 3	3.5503	3.570 4
文献[2]方法	-14.977 0	0.336 2	4.822 9	2.204 0	-19.221 5	0.357 0	4.9758	2.203 8
文献[1]方法	-136.461 8	0.632 2	2.848 5	-0.746 6	-75.290 6	0.725 0	2.5147	1.211 6
文献[4]方法	8.694 8	0.554 6	3.114 7	3.147 8	20.139 9	0.651 3	2.6813	3.688 8

5 结 论

由于水下的特殊环境,使得采集到的水下图像存在颜色失真、对比度低、清晰度差、光照不均匀等问题。因此本文提出一种基于改进二维伽马函数和融合的水下图像增强方法。该算法先用MSRCR消除颜色失真,有效的去除了水下图像蓝绿色的偏色;然后采用改进的二维伽马函数平衡图像的整体亮度,改善水下图像阴影较暗处区域的亮度,并用BEASF增强图像的对比度,凸显图像细节;最后采用多权重的拉普拉斯金字塔将图像进行融合,得到质量好、符合人眼视觉的水下增强图像,有利于后续水下目标检测和跟踪等工作的进行。虽然本文取得了较好的效果,但是在水下图像景深较大的情况下,还未能更准确的估计景深,需要进一步加强改进。

参考文献

- [1] ANCUTI, COSMIN, CODRUTA O, et al. Enhancing underwater images and videos by fusion [P]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2012.
- [2] 杨卫中,徐银丽,乔曦,等. 基于对比度受限直方图均衡化的水下海参图像增强方法[J]. 农业工程学报, 2016,32(6): 197-203.
- [3] YANG W ZH, XU Y L, QIAO X, et al. Method for image intensification of underwater sea cucumber based on contrast-limited adaptive histogram equalization [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016,32(6): 197-203.
- [4] 王鑫,朱行成,宁晨,等. 融合暗原色先验和稀疏表示的水下图像复原[J]. 电子与信息学报, 2018,40(2): 264-271.
- [5] WANG X, ZHU X Ch, NING CH, et al. Combination of dark-channel prior with sparse representation for underwater image restoration [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018,40(2): 264-271.
- [6] FABBRI C, JAHIDUL I M, SATAR J. Enhancing underwater imagery using generative adversarial networks [J]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2018.
- [7] 孙杰. 基于MSRCR的水下图像清晰化算法[J]. 无线电工程, 2019,49(9): 783-787.
- [8] SUN J. Underwater image enhancement algorithm based on MSRCR [J]. Radio Engineering, 2019, 49(9): 783-787.

- [6] 李社蕾,崔聪颖. 基于 SIFT 算法的水下图像拼接技术研究[J]. 物联网技术, 2018, 8(4): 51-53.
LI SH L, CUI C Y. Research on underwater image mosaic technology based on SIFT algorithm[J]. Internet of things technologies, 2018, 8(4): 51-53.
- [7] 冯雨,易本顺,吴晨玥,等. 一种红通道反转的水下图像复原算法[J]. 小型微型计算机系统, 2019, 40(1): 196-200.
FENG Y, YI B SH, WU CH Y, et al. Underwater image restoration algorithm based on reversed red-channel[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2019, 40(1): 196-200.
- [8] QI X Z, YU F T. Research on image contrast enhancement algorithm for underwater environment[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2013, 40(1): 32-34, 46.
- [9] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior[C]. 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2009: 1956-1963.
- [10] 王殿伟,王晶,许志杰,等. 一种光照不均匀图像的自适应校正算法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(6): 1383-1390.
WANG D W, WANG J, XU ZH J. Adaptive correction algorithm for non-uniform illumination images[J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(6): 1383-1390.
- [11] GARCIA A, EDGAR F, RAUL E, et al. Image enhancement using bi-histogram equalization with adaptive sigmoid functions[C]. International Conference on Electronics, Communications and Computers, 2014.
- [12] 代成刚,林明星,等. 基于亮通道色彩补偿与融合的水下图像增强[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 86-95.
DAI CH G, LIN M X, et al. Color compensation based on bright channel and fusion for underwater image enhancement[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 86-95.
- [13] 胡玉娟,曹风云. 基于图像融合的水下彩色图像的增强方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2013, 36(8): 58-63.
HU Y J, CAO F Y. Underwater color image enhancement method based on image fusion[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2013, 36(8): 58-63.
- [14] 唐鉴波,朱桂斌,王田,等. 基于曝光融合的单幅图像去雾算法[J]. 计算机应用, 2014, 34(3): 820-823.
TANG J B, ZHU G B, WANG T, et al. Single image dehazing method based on exposure fusion[J]. Journal of Computer Applications, 2014, 34(3): 820-823.
- [15] 杨爱萍,田鑫,杨炳旺,等. 基于多特征融合的单幅水下图像清晰化[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2018, 51(10): 1031-1041.
YANG AI P, TIAN X, YANG B W, et al. Single underwater image sharpening based on multi-feature fusion[J]. Journal of Tianjin University, 2018, 51(10): 1031-1041.
- [16] PAN P W, YUAN F, CHENG E. Underwater image de-scattering and enhancing using dehazenet and HWD[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2018, 26(4): 531-540.
- [17] 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.

作者简介



王聪, 2018 年于周口师范学院获得学士学位, 现为昆明理工大学的硕士研究生, 主要研究方向为数字图像处理。

E-mail: 1040348522@qq.com

Wang Cong received B. Sc. from Zhoukou Normal University in 2018. Now she is a M. Sc. candidate at Kunming University of Science and Technology. Her main research direction is digital image processing.



薛晓军(通信作者), 2010 年于昆明理工大学获硕士学位, 现为昆明理工大学实验师, 主要研究方向为嵌入式系统设计及应用。

E-mail: 258467274@qq.com

Xue Xiaojun (Corresponding author) received M. Sc. from Kunming University of Science and Technology in 2010. Now she is an experimenter at Kunming University of Science and Technology. Her main research direction is embedded systems and application.