

DOI:10.16136/j.joel.2022.01.0249

基于 OTSU 分割和融合的非均匀光照水下图像增强

王 聪, 李 恒*, 薛晓军, 张国银, 王海瑞, 赵 磊

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500)

摘要:针对深海和夜间水域补充照明造成的水下图像光照不均,水中悬浮颗粒造成的图像噪声、低对比度、偏色等问题,提出一种新的非均匀光照水下图像增强方法。首先,用高斯滤波去除水下图像的噪声;其次,用最大类间方差法(大津法, maximum inter class variance, OTSU)分割出图像的明暗区域掩膜,将亮度图分割成明暗区域,并对暗区域进行同态滤波处理,校正光照不均造成的阴影;接着,用加权平均法融合明暗区域得到新的亮度图,重新合成彩色图像;最后,对水下图像用对比度受限自适应直方图均衡化(contrast limited adaptive histogram equalization, CLAHE)和灰度世界进行增强对比度和颜色失真校正,得到增强的水下图像。实验结果表明,本文提出的算法能够有效的改善光照不均问题,并去除水下图像噪声、增强图像对比度,有利于后续目标检测、追踪等任务的进行。

关键词:非均匀光照;高斯滤波;大津法;同态滤波;加权平均法;融合

中图分类号:TN911 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0086(2022)01-0030-07

Underwater image enhancement with nonuniform illumination based on OTSU segmentation and fusion

WANG Cong, LI Heng*, XUE Xiaojun, ZHANG Guoyin, WANG Hairui, ZHAO Lei

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

Abstract: Aiming at the problems of uneven illumination of underwater image caused by supplementary illumination of deep sea and night waters, image noise, low contrast and color deviation caused by suspended particles in water, an underwater image enhancement method with nonuniform illumination is proposed. Firstly, the noise of underwater image is removed by Gaussian filter. Secondly, the maximum inter class variance (OTSU) method is used to segment the light and dark region mask of the image, divide the brightness map into light and dark regions, and homomorphic filtering is performed on the dark regions to correct the shadows caused by uneven illumination. Then, the new brightness map is obtained by fusing the light and dark areas with weighted average method, and the color image is synthesized again. Finally, the underwater image is processed with contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE), and gray world to enhance contrast and color distortion correction, get enhanced underwater image. The experimental consequences express that the proposed method can valid ameliorate the uneven illumination problem, remove the underwater image noise and enhance the image contrast, which is conducive to the subsequent target detection, tracking and other tasks.

Key words: nonuniform illumination; Gaussian filtering; OTSU; homomorphic filtering; weighted average method; fusion

* E-mail: 5617014@qq.com

收稿日期: 2021-04-16 修订日期: 2021-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(61863016)资助项目

1 引言

水下图像在海洋环境监测、海洋牧场养殖等方面有着重要的研究意义,但由于成像环境的特殊,拍摄的水下图像多会颜色失真。水下悬浮颗粒等介质造成水下成像有着严重的前向散射,导致水下图像存在大量脉冲噪声,对比度低,边缘信息丢失。在深海和夜间水域,人工补充照明造成拍摄的水下图像在近光区域过亮、远光区域过暗,存在严重的光照不均现象^[1]。因此如何在非均匀光照的条件下获得高质量的水下图像是一个具有挑战性的问题。

目前传统的水下图像复原与增强方法主要分为以下几类:基于水下成像模型、基于直方图均衡、基于多尺度融合、基于暗通道等。PAN 等^[2]提出了基于去雾网络和白平衡融合的水下图像增强算法,该方法很好的去除了水下图像的前向散射,增强了图像的边缘信息,但在处理蓝色的水下图像时不能很好的消除蓝色。ANCUTI 等^[3]提出了基于拉普拉斯金字塔融合的水下图像增强算法,该方法校正了水下图像的颜色失真并增强了对比度,但未考虑景深。CHIANG 等^[4]提出了基于暗通道和波长补偿的水下图像增强算法,但图像仍存在大量噪声。然而现有的水下图像复原与增强算法主要针对自然光照情况下的浅海水下图像,并不能很好的应用于人工照明为主的深海和夜间水下图像。

针对以上情况,本文提出一种基于最大类间方差法(大律法, maximum inter class variance, OTSU)分割融合的非均匀光照水下图像增强算法。本文首先通过高斯滤波去噪,采用 OTSU 算法分割出水下图像明区域和暗区域两个掩膜,将水下图像由 RGB 空间转换到 HSV 空间,根据掩膜模板将水下图像的亮度图分割成明暗区域,并对暗区域进行同态滤波校正光照不均造成的阴影。接着用加权平均法融合明暗区域得到新的亮度图,将其与 S、H 重新合成彩色图像,最后对水下图像用对比度受限自适应直方图均衡化(contrast limited adaptive histogram equalization, CLAHE)和灰度世界进行增强对比度和颜色失真校正,得到增强的水下图像。

2 基于 OTSU 分割和融合的光照不均校正

2.1 水下成像模型

由于水下成像环境特殊,传输介质、光照、场景

位置等因素造成水下图像质量严重退化。水下图像由直接照明分量、前向散射分量、背景散射分量组成^[5],夜间水域或深海水下成像模型如图 1 所示。当物体与摄像机距离较小时,前向散射分量可忽略不计,而背景散射分量是入射光经过水中悬浮颗粒散射后进入摄像机的部分,其造成水下图像模糊、暗度低,则水下成像模型可简化为^[6]:

$$I_{\lambda}(x, y) = t_{\lambda}(x, y)J_{\lambda}(x, y) + (1 - t_{\lambda}(x, y))A_{\lambda}, \quad (1)$$

式中, (x, y) 为图像中像素坐标, $\lambda \in (R, G, B)$, $I_{\lambda}(x, y)$ 为拍摄到的图像, $J_{\lambda}(x, y)$ 为清晰图像, A_{λ} 为全局背景光, $t_{\lambda}(x, y)$ 为透射率, 其与散射系数 β_{λ} 和场景深度 $d(x, y)$ 有关, 可表示为^[7]:

$$t_{\lambda}(x, y) = \exp(-\beta_{\lambda}d(x, y)), \quad 0 < t_{\lambda}(x, y) < 1. \quad (2)$$

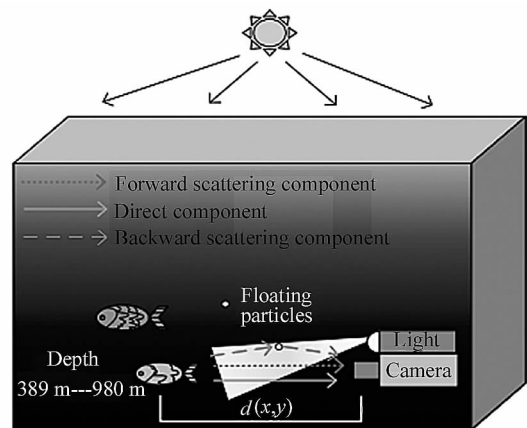


图 1 水下成像模型

Fig. 1 Underwater imaging model

2.2 基于 OTSU 的明暗区域分割

在分割水下图像前,本文首先采用高斯滤波对水下图像进行去噪预处理。为了能够快速有效的分割出水下图像的明暗区域,本文选用 OTSU^[8]进行计算。设图像灰度级为 i 的像素数为 m_i , 灰度范围为 $[0, L-1]$, 则总的像素数为:

$$M = \sum_{i=0}^{L-1} m_i. \quad (3)$$

各灰度值出现的概率为:

$$p_i = \frac{m_i}{M}, \quad (4)$$

对于 p_i , 有 $\sum_{i=0}^{L-1} p_i = 1$ 。

把图像中的像素用阈值 T 分为 C_0 和 C_1 , C_0 由灰度值在 $[0, T-1]$ 的像素组成, C_1 由灰度值在 $[T, L-1]$ 的像素组成。则区域 C_0 和 C_1 的概率分别为:

$$P_0 = \sum_{i=0}^{T-1} p_i, \quad (5)$$

$$P_1 = \sum_{i=T}^{L-1} p_i = 1 - P_0. \quad (6)$$

区域 C_0 和 C_1 的平均灰度分别为:

$$\mu_0 = \frac{1}{P_0} \sum_{i=0}^{T-1} ip_i = \frac{\mu(T)}{P_0}, \quad (7)$$

$$\mu_1 = \frac{1}{P_1} \sum_{i=T}^{L-1} ip_i = \frac{\mu - \mu(T)}{1 - P_0}, \quad (8)$$

式中, μ 是整幅图像的平均灰度:

$$\mu = \sum_{i=0}^{L-1} ip_i = \sum_{i=0}^{T-1} ip_i + \sum_{i=T}^{L-1} ip_i = P_0\mu_0 + P_1\mu_1. \quad (9)$$

两个区域的总方差为:

$$\tau^2 = P_0(\mu_0 - \mu)^2 + P_1(\mu_1 - \mu)^2 = P_0P_1(\mu_0 - \mu_1)^2. \quad (10)$$

让 T 在 $[0, L-1]$ 内轮流取值, 当 τ^2 最大时的 T 值即为该图像的最佳区域分割阈值。OTSU 分割的掩膜模板, 如图 2 所示。



图 2 OTSU 分割的掩膜模板:(a) 暗区域掩膜模板;(b) 明区域掩膜模板

Fig. 2 Mask template for OTSU segmentation:(a) Dark area mask;(b) Bright area mask

2.3 基于同态滤波的亮度校正

将经过高斯滤波去噪后得到的水下图像由 RGB 空间转换到 HSV 空间, 对其亮度图 $V(x, y)$ 进行单独处理。本文通过掩膜模板将亮度图分为明区域亮度图 $l(x, y)$ 和暗区域亮度图 $d(x, y)$, 对暗区域亮度图进行同态滤波处理以调整亮度。同态滤波的模型如下式所示:

$$d(x, y) = e(x, y)r(x, y), \quad (11)$$

式中, $e(x, y)$ 为照射分量, $r(x, y)$ 为反射分量。对暗区域亮度图取对数:

$$z(x, y) = \ln d(x, y) = \ln e(x, y) + \ln r(x, y), \quad (12)$$

再对式(12)做傅里叶变换, 将图像转换到频域:

$$F(z(x, y)) = F[\ln e(x, y)] + F[\ln r(x, y)], \quad (13)$$

式中, 即 $Z = E + R$ 。

本文选用巴特沃斯滤波器作为同态滤波的传递

函数:

$$B(u, v) = (R_h - R_l) \left[1 + \left(\frac{D_0}{cD(u, v)} \right)^{2n} \right]^{-1}, \quad (14)$$

式中, D_0 为截止频率, n 为滤波器阶数, c 用来控制滤波器函数的锐化, R_h 为高频增益, R_l 为低频增益, $D(u, v)$ 为频率 (u, v) 到滤波器中心 (u_0, v_0) 的距离, 令 $R_h > 1, R_l < 1$ 。本文设置巴特沃斯滤波器的参数为 $R_h = 2, R_l = 0.5, D_0 = 100, n = 1, c = 0.5$ 。压缩照射分量 $e(x, y)$ 的变化范围, 削弱 $E(u, v)$, 增强反射分量 $r(x, y)$ 的对比度, 提升 $R(u, v)$, 增强高频分量, 如下式所示^[9]:

$$S(u, v) = B(u, v)Z(u, v) = B(u, v)E(u, v) + B(u, v)R(u, v), \quad (15)$$

对式(15)逆变换到空域, 再取对数得到调整后的暗区域亮度图:

$$d'(x, y) = \exp[F^{-1}(S(u, v))]. \quad (16)$$

经过同态滤波的暗区域亮度图得到亮度的提升校正, 消除了部分暗影, 校正前后的亮度图对比如图 3 所示。

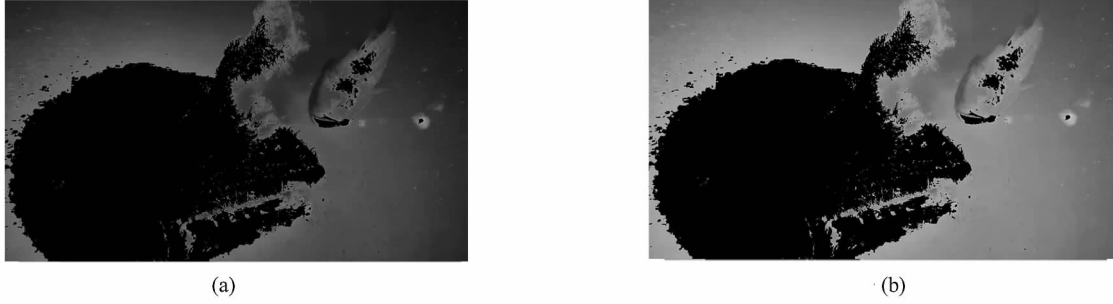


图3 校正前后的亮度图对比:(a) 暗区域亮度图校正前;(b) 暗区域亮度图校正后

Fig. 3 Comparison of brightness map before and after correction: (a) Dark area brightness map before correction; (b) Dark area brightness map after correction

2.4 渐入渐出的加权平均融合

为了避免图像融合后出现明显的拼接边缘,本文选用渐入渐进的加权平均融合法将校正后的暗区域亮度图和明区域亮度图进行融合。加权平均融合法公式如下:

$$V'(x, y) = \begin{cases} l(x, y) & (x, y) \in l \\ \omega_1 l(x, y) + \omega_2 d'(x, y) & (x, y) \in (l \cap d'), \\ d(x, y) & (x, y) \in d \end{cases} \quad (17)$$

式中, $V'(x, y)$ 为融合后的亮度图像, $l(x, y)$ 和 $d'(x, y)$ 为明暗区域两幅待拼接的亮度图, ω_1 和 ω_2 分别为 $l(x, y)$ 和 $d'(x, y)$ 中重叠区域对应像素的权值, 且 $\omega_1 + \omega_2 = 1, 0 < \omega_1, \omega_2 < 1$ 。

在两幅待融合图像的重叠区域,使权值随着距离变化。 ω_1 由 1 逐渐变为 0, ω_2 由 0 逐渐变为 1, 使过渡区域更加平滑自然^[10]。

在将两幅待融合图像的重叠区域,使权值随着距离变化。 ω_1 由 1 逐渐变为 0, ω_2 由 0 逐渐变为 1, 使过渡区域更加平滑自然^[10]。

加权平均融合后得到校正后的亮度图 $V'(x, y)$, 然后将其与饱和度 S、色调 H 重新合成彩色图像, 图像整体亮度校正前后直方图对比如图 4 所示。由图 4 可以看出图像在进行亮度校正前有部分像素集中在 0—50 的较暗区域, 在进行亮度校正后像素集中

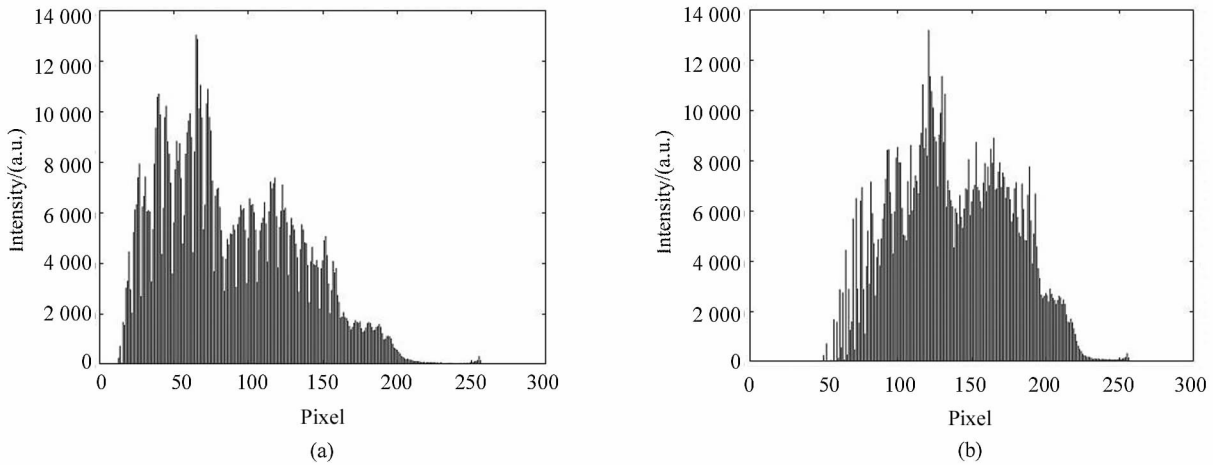


图4 校正前后直方图对比:(a) 亮度校正前直方图;(b) 亮度校正后直方图

Fig. 4 Comparison of histogram before and after brightness correction: (a) Histogram before brightness correction; (b) Histogram after brightness correction

在适当亮度区域。

2.5 对比度增强和颜色校正

与常用的直方图均衡化等算法相比^[11], CLAHE 算法能够有效地适当增强图像对比度, 防止出现过增强现象^[12]。所以本文采用 CLAHE 算法来增强水

下图像对比度。

由于人工补充照明下的水下图像颜色失真现象不严重, 因此使用灰度世界法来进行颜色校正就能取得很好的效果, 最终获得光照均匀、对比度高、色彩丰富的图像。

3 算法流程与实现

在深海区域或夜间水域环境下,摄像机拍摄到的图像光线明暗差别大,若在RGB颜色空间进行亮

度校正,图像三个通道会随亮度改变而变化,导致图像颜色失真。而在 HSV 颜色空间中,可对图像的亮度分量单独操作,保留图像原始色彩,因此本文在 HSV 颜色空间中进行水下图像非均匀光照的校正,本文算法流程图如图 5 所示。

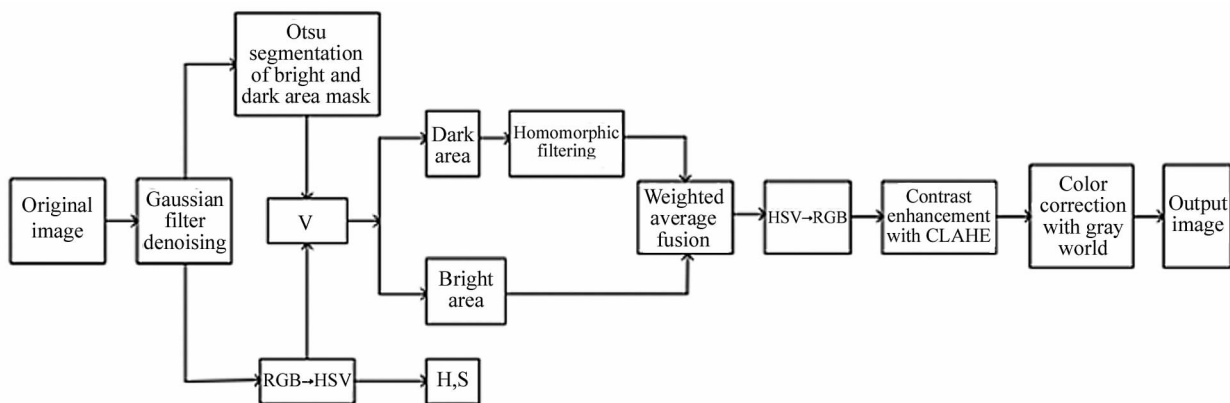


图 5 本文算法流程图

Fig. 5 Algorithm flow chart of this paper

4 实验结果与分析

本文实验采用的数据集为 ocean networks canada (ONC)提供的 OceanDark 数据集,该数据集为位于东北太平洋的 ONC 摄像机在深度 389 m—980 m 处使用人工照明拍摄的水下图像。为了验证本文算

法的有效性,将与 4 种常见的经典算法^[2,3,13,14]做比较。

4.1 主观分析

在实验验证中,将本文算法与 4 篇文献的算法结果图进行主观比较分析。从图 6 可以看出文献[2]能够较好的校正水下图像的光照不均问题,但校

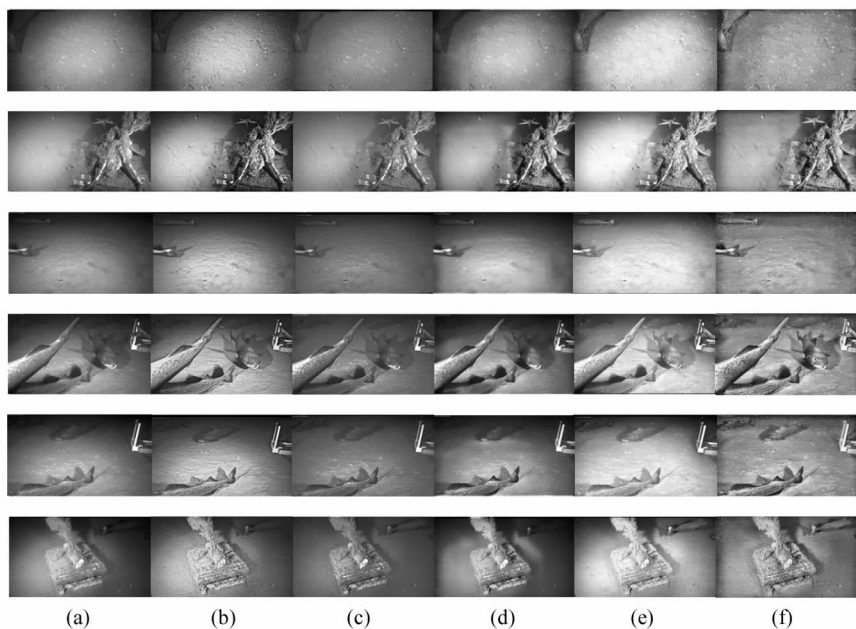


图 6 增强结果对比:(a)原图;(b)文献[2]方法;(c)文献[3]方法;(d)文献[13]方法;(e)文献[14]方法;(f)本文方法

Fig. 6 Comparison of enhanced results:(a) Original images;(b) Results using the method of Ref. [2];

(c) Results using the method of Ref. [3]; (d) Results using the method of Ref. [13];

(e) Results using the method of Ref. [14]; (f) Results using our method

正后图像颜色不够鲜艳;文献[3]校正后的水下图像光照不均问题加重;文献[13]没有校正光照不均问题,图像暗处区域细节仍较模糊;文献[14]在一定程度上改善了光照不均问题,但水下图像仍有偏色问题;而本文算法处理后的水下图像很好的改善了光照不均的问题,且图像颜色饱和、细节清晰、对比度高。

4.2 客观分析

本文采用常用的 4 种水下图像评价指标对以上几种算法做客观评价,即水下图像色彩评价指标(UICM)、对比度评价指标(UIConM)、清晰度评价

指标(UISM)、质量评价指标(UIQM)^[15],水下图像质量评价如表 1 所示。

由 UICM 可看出文献[2]、[3]、[13]不同程度的改善了水下图像颜色失真问题,文献[14]加重了偏色,本文校正后数值较高,表明本文处理后水下图像颜色更自然饱满。由 UIConM 和 UISM 可看出本文算法数值最高,证明本文算法增强后的水下图像拥有更好的对比度和细节清晰度,有利于水下目标检测的进行。由综合质量评价 UIQM 可看出本文的数据指标最高,这表明本文算法处理后的水下图像综合质量最好,更符合人眼视觉。

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

Image		1				2			
Parameter		UICM	UIConM	UISM	UIQM	UICM	UIConM	UISM	UIQM
Original image		-17.560 1	0.528 4	2.031 7	2.159 0	-38.514 2	0.472 1	1.140 3	1.822 9
Method of this article		0.003 4	0.722 0	3.941 4	4.605 3	-1.128 8	0.607 4	3.130 8	3.355 8
Ref. [2]		0.096 2	0.642 2	3.280 6	3.324 5	-0.330 0	0.562 6	2.746 9	2.522 1
Ref. [3]		-3.193 1	0.518 9	2.809 6	3.536 7	-8.401 7	0.468 8	2.193 2	2.552 8
Ref. [13]		-6.033 0	0.529 7	2.467 0	2.517 6	-29.434 3	0.508 1	1.636 0	2.199 5
Ref. [14]		-18.303 6	0.530 2	2.097 4	2.430 7	-40.394 6	0.458 9	1.064 9	1.907 9
Image		3				4			
Parameter		UICM	UIConM	UISM	UIQM	UICM	UIConM	UISM	UIQM
Original Image		-21.519 3	0.394 3	1.117 1	1.064 1	-13.863 4	0.509 7	1.960 3	1.791 5
Method of this article		1.472 3	0.563 5	3.063 2	3.410 8	-0.806 3	0.688 3	3.613 7	3.980 5
Ref. [2]		-0.246 0	0.441 4	2.148 8	1.956 4	-0.445 8	0.551 8	2.706 8	2.528 2
Ref. [3]		-12.646 0	0.404 4	1.831 1	2.511 9	-6.568 3	0.524 3	2.556 9	2.937 6
Ref. [13]		-17.045 3	0.394 6	1.347 6	1.413 6	-7.377 1	0.527 8	2.274 4	2.015 6
Ref. [14]		-23.968 7	0.398 2	1.129 9	1.294 5	-15.643 2	0.515 6	1.995 4	2.009 0
Image		5				6			
Parameter		UICM	UIConM	UISM	UIQM	UICM	UIConM	UISM	UIQM
Original Image		-16.435 1	0.510 0	1.927 2	1.921 4	-24.389 7	0.550 9	1.809 1	1.785 6
Method of this article		1.498 3	0.692 8	3.776 3	4.256 4	0.144 1	0.707 1	3.698 8	3.950 8
Ref. [2]		-0.303 5	0.547 9	2.750 8	2.711 2	0.931 3	0.509 0	2.562 5	2.426 1
Ref. [3]		-9.745 9	0.509 9	2.485 9	3.175 9	-13.996 6	0.548 8	2.500 3	3.159 5
Ref. [13]		-12.534 5	0.501 1	2.027 7	1.996 4	-21.720 7	0.521 8	1.819 1	1.916 5
Ref. [14]		-18.725 4	0.523 6	1.994 2	2.202 3	-28.267 5	0.548 6	1.767 2	2.041 5

5 结 论

针对在深海和夜间水域拍摄的水下图像存在的光照不均、对比度低、大量噪声、偏色等问题,本文提出一种新的基于 OTSU 分割和融合的非均匀光照水下图像增强方法。实验结果表明,本文算法有效地改善了水下图像光照不均匀的问题,提高了对比度和图像的颜色饱和度。虽然本文方法在改善水下图

像光照不均问题上取得了较好的效果,但当水下图像有大面积黑暗区域时,增强后的图像会出现色块,因此在后续研究中需要进一步改进。

参考文献:

[1] 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):213-220.
- 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):213-220.
- [2] PAN P W, YUAN F, CHENG E. Underwater image de-sscattering and enhancing using dehazenet and HWD[J]. Journal of Marine Ence and Technology, 2018, 26(4): 531-540.
- [3] ANCUTI C, ANCUTI C O, HABER T, et al. Enhancing underwater images and videos by fusion[C]//IEEE Conference on Computer Vision & Pattern Recognition, June 16-21, 2012, Providence, RI, USA. New York: IEEE, 2012: 81-88.
- [4] CHIANG J Y, CHEN Y C. Underwater image enhancement by wavelength compensation and dehazing [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(4): 1756-1769.
- [5] FENG Y, YI B S, WU C Y, et al. Underwater image restoration algorithm based on reversed red-channel[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2019, 40(1): 196-200.
- 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.
- [6] HAN H, ZHOU Y, CAI C D. Underwater image restoration based on color attenuation prior and white balance[J]. Computer and Modernization, 2018, (4): 42-47, 55.
- 韩辉,周妍,蔡晨东.基于颜色衰减先验和白平衡的水下图像复原[J].计算机与现代化,2018,(4):42-47, 55.
- [7] NI J Y, LI Q W, ZHOU Y Q, et al. Underwater image restoration based on transmittance optimization and color temperature adjustment [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 96-103.
- 倪锦艳,李庆武,周亚琴,等.基于透射率优化和色温调节的水下图像复原[J].激光与光电子学进展,2017, 54(1):96-103.
- [8] GUO C X, LI Z B, QIAO X, et al. Image segmentation of underwater sea cucumber using GrabCut with saliency map[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015(S1):6.
- 郭传鑫,李振波,乔曦,等.基于融合显著图与 GrabCut 算法的水下海参图像分割[J].农业机械学报,2015(S1):6.
- [9] ANG 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.
- 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.
- [10] DAI C G, LIN M X, WANG Z, et al. Color Compensation Based on Bright Channel and Fusion for Underwater Image Enhancement[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 86-95.
- 代成刚,林明星,王震,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.
- [11] ARRIAGA-GARICA E F, SANCHEZ-YANEZ R E, GARCIA-HERNANDZ M G. Image enhancement using Bi-Histogram Equalization with adaptive sigmoid functions[C]// International Conference on Electronics. February 26-28, 2014, Puebla, México. New York: IEEE, 2014: 28-34.
- [12] 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.
- 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.
- [13] WANG X, ZHU X C, NING C, 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.
- 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.
- [14] WANG D W, WANG J, XU Z J, et al. Adaptive correction algorithm for non-uniform illumination images [J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(06): 1383-1390.
- 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(06): 1383-1390.
- [15] CAO F Y, ZHAO K, WANG X W Q, et al. An adaptive underwater image enhancement algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 5: 772-778.
- 曹风云,赵凯,王筱薇倩,等.自适应水下彩色图像增强算法[J].电子测量与仪器学报,2016,5:772-778.

作者简介:

李 恒 (1978—),男,硕士,高级实验师,昆明理工大学硕士生导师,主要从事图像处理方面的研究。