

# 基于颜色校正和细节保持的水下图像增强

陈小国<sup>1</sup>, 胡锦涛<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>新乡职业技术学院汽车技术系, 河南 新乡 453006;

<sup>2</sup>桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004

**摘要** 受散射和吸收的影响, 水下图像出现颜色失真、可视性低、细节丢失的问题。为了有效解决上述问题, 提出了基于颜色校正和细节保持的水下图像增强方法。首先, 采用基于 Retinex 启发的方法, 通过调整每个颜色通道的直方图分布来对颜色进行校正。然后, 一个基于中值和均值的平均值的双区间直方图用于改善低像素区域和高像素区域, 整合图像的对比度得到了显著提高。最后, 一个多尺度非锐化掩模方法用于整个图像的锐化, 以突显图像细节。实验结果表明, 所提方法有效地消除了图像颜色失真, 增强了图像对比度和细节。

**关键词** 图像处理; 图像退化; 水下图像增强; 双区间直方图; 颜色校正; 细节增强

**中图分类号** TP751 **文献标志码** A

**doi:** 10.3788/LOP57.241013

## Underwater Image Enhancement Based on Color Correction and Detail Preservation

Chen Xiaoguo<sup>1</sup>, Hu Jinqun<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Automotive Technology, Xinxiang Vocational and Technical College, Xinxiang, Henan 453006, China;

<sup>2</sup>School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

**Abstract** Quality of images that are captured underwater typically deteriorates owing to color distortion, low visibility, and detail losses caused by absorption and scattering. To effectively handle the above-mentioned problems, a novel underwater image enhancement method using color correction and detail preservation is proposed herein. First, a Retinex-inspired method is employed to achieve color correction by adjusting the histogram distribution of each color channel. Next, a dual-interval histogram based on the average of median and mean values is applied to improve the lower and upper pixel regions, which significantly improves the contrast of the integrated image. Finally, a multiscale unsharp masking method is used to sharpen the overall image to highlight the details of the output image. The experimental results show that the proposed method both effectively eliminates the color distortion and enhances the contrast and detail of the image.

**Key words** image processing; image degradation; underwater image enhancement; dual-interval histogram; color correction; detail enhancement

**OCIS codes** 100.2980; 100.2960; 100.3020; 110.3000

## 1 引言

海洋环境提供了丰富的矿产资源, 这些资源的开发和利用对国防安全和经济建设具有重要的意义。在研究水下环境时, 研究者经常利用水下视频

或图像来获取有价值的信息。然而, 水下成像环境较复杂于大气环境, 加上水下介质的散射和吸收作用, 经常导致水下图像或视频出现颜色失真、可视性低及细节丢失等问题<sup>[1]</sup>。因此水下图像清晰化技术逐渐成为研究热点。目前水下图像清晰化技术主要

收稿日期: 2020-06-22; 修回日期: 2020-07-02; 录用日期: 2020-07-07

基金项目: 广西壮族自治区重点实验室项目(PF18078X)

\* E-mail: 59931387@qq.com

分为两大类<sup>[2]</sup>:第一类考虑水下成像机理,通过分析水下图像的退化机理,估计成像参数并反演退化过程,以恢复出清晰的水下图像;第二类并不考虑水下成像机理,基于已有的图像增强技术,通过调整图像的像素来改善输出图像的对比度、亮度及颜色,进而获取高质量的图像。

在图像复原方面,受 He 等<sup>[3]</sup>提出的去雾方法启发,许多研究者将暗通道先验应用到水下图像复原。Chiang 等<sup>[4]</sup>提出一种基于波长补偿和暗通道先验的水下图像复原方法,该方法通过补偿每个光波的衰减量来校正颜色,并结合去雾方法复原图像。Galdran 等<sup>[5]</sup>提出一种基于红通道的水下图像复原方法,该方法降低了红通道的衰减和人工光源对透射率估计的影响。Li 等<sup>[6]</sup>利用最小信息损失和直方图先验进行水下图像增强,有效地提高了水下图像的对比度和亮度。Peng 等<sup>[7]</sup>提出一种基于图像模糊和光吸收的水下图像复原方法,该方法能够准确估计水下场景的深度。王国霖等<sup>[8]</sup>提出一种双透色率水下成像模型,并将其用于水下图像的颜色校正。Peng 等<sup>[9]</sup>利用与水深相关的颜色变化来估计环境光,并通过计算观察到的强度和透色率之间的差异来估计场景,最后利用自适应颜色校正和水下成像模型复原图像。刘玉珍等<sup>[10]</sup>提出一种基于背景光估计和透色率优化的水下图像复原方法。由于水下成像过程较复杂,现有的复原方法参数过于简单,通用性差,因此制约了该类方法的应用。

在图像增强方面,许多研究者将直方图、Retinex 及融合等方法逐渐应用到水下图像增强。Iqbal 等<sup>[11]</sup>提出一种无监督色彩校正方法,该方法将红色直方图拉伸到右侧改善红色的高像素值,将蓝色直方图拉伸到左侧降低蓝色的低像素值。Abdul 等<sup>[12-13]</sup>提出一种双图像瑞利拉伸直方图法,该方法从全局和局部对比度校正方面考虑,不仅增强了图像对比度,还增强了图像细节;在此基础上,还提出一种递归自适应直方图方法,该方法较好地改善了水下图像的对比度和色彩。Fu 等<sup>[14]</sup>将 Retinex 方法应用到水下图像增强,虽然增强的图像具有较好的视觉效果和更准确的颜色,但该方法需要 4~6 次迭代。Fu 等<sup>[15]</sup>针对水下图像的色彩校正和对比度增强,提出一种两阶的水下图像增强方法。Zhang 等<sup>[16]</sup>提出一种基于多通道卷积多尺度视网膜的去雾方法,并将其应用于水下图像增强。邹沛煜等<sup>[17]</sup>提出

了一种高低频分量融合的水下图像增强方法。Ancuti 等<sup>[18-19]</sup>提出一种基于融合的方法,首先从原图像中获取两个不同版本的图像,并将其作为融合分量;然后,分别从这两个图像中获取 4 个融合权重图;最后,采用多尺度融合技术对权重图和融合分量进行融合,以获得增强的图像。此外,还提出一种基于白平衡和融合的水下图像增强方法,该方法有效提高了暗区域亮度、全局对比度及边缘细节,并且提高了图像分割和关键点匹配的准确率。代成刚等<sup>[20]</sup>提出一种亮通道补偿和融合的水下图像增强方法。

以上方法虽然在颜色校正和对比度增强方面发挥了一定作用,但是复杂的方法设计和细节信息的丢失仍然有待提高。为了改善图像的颜色和提高图像对比度,并突显图像的细节,本文提出一种基于颜色校正和细节保持的水下图像增强方法。首先,从颜色校正方面考虑,提出一种基于 Retinex 启发的颜色校正方法,以有效移除颜色失真;然后,采用一个双区间直方图,以有效解决水下图像的低可视性;最后,采用多尺度锐化掩模技术,以锐化整个图像,突显图像细节信息。

## 2 方法原理

针对水下图像的颜色失真、可视性低及细节丢失等问题,首先通过颜色校正技术移除水下图像的颜色失真,然后通过增强对比度技术提高水下图像的可视性,最后利用细节锐化技术突显图像细节,以获得高质量的输出图像。

### 2.1 方法流程

所提方法的流程如图 1 所示。首先将原水下图像的红、绿、蓝通道分解,并采用基于 Retinex 启发的颜色校正方法对每个颜色通道进行颜色校正;然后采用基于每个颜色通道总像素的均值和最小像素与最大像素的中值的平均值的双区间直方图,将每个颜色通道分为低像素区域和高像素区域并实施增强处理,同时对每个通道增强的区域进行整合;最后将一个多尺度非锐化掩模技术应用到整个图像,以突显细节。

### 2.2 颜色校正

Retinex 方法是一种基于人眼的颜色恒常理论的图像增强方法<sup>[14]</sup>。单尺度的 Retinex 不能同时保持图像的保真度和一定动态范围的压缩,为了解决这种问题,对多尺度视网膜(MSR)引入多尺度策略,表达式为

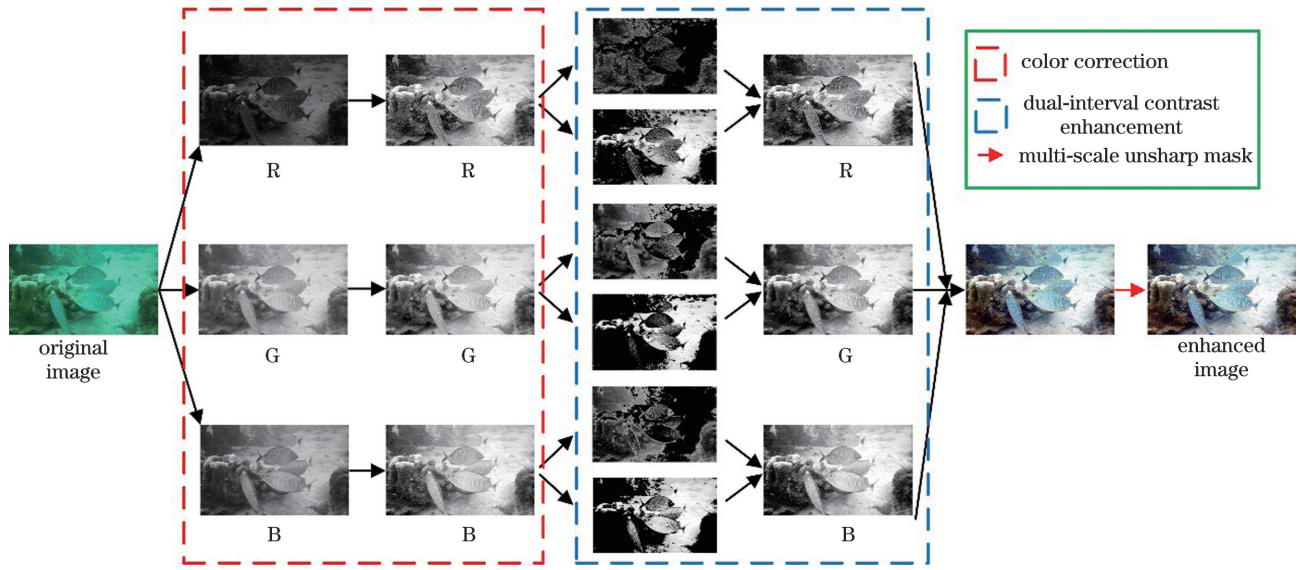


图1 所提方法流程

Fig. 1 Flowchart of the proposed method

$$M_{SR}(x, y) = \sum_{i=1}^n \omega_n \{ \log[S(x, y)] - \log[S(x, y) * G_n(x, y)] \}, \quad (1)$$

式中:  $S(x, y)$  为输入的图像;  $M_{SR}(x, y)$  为增强的图像;  $n$  为尺度;  $\omega_n$  为每个尺度对应的权重且  $\sum_{i=1}^n \omega_n = 1$ ;  $G_n(x, y)$  为高斯核函数且  $G_n(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right)$ ,  $\sigma$  为高斯核的尺度;  $(x, y)$  为像素点。基于均值和方差的复原方法在水下图像的颜色校正方面展示了有效性, 但是没有充分考虑红色通道的显著衰减, 使得校正的水下图像呈现微红色<sup>[1, 14, 16]</sup>。

不同于文献[1, 14, 16]中的颜色校正方法, 本文对 MSR 的颜色校正阶段进行如下改进。首先获取每个通道的均值:

$$M_{\text{mean}, c} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{SR, c}}{k \times l}, \quad c \in \{R, G, B\}, \quad (2)$$

式中:  $k$  和  $l$  分别为输入图像的行和列。然后, 根据(2)式, 选出均值最大的颜色通道, 并以最大的颜色通道为基准求出每个通道对应的均值比率, 表达式为

$$P_c = \frac{M_{\text{mean}, c}}{\max\{M_{\text{mean}, R}, M_{\text{mean}, G}, M_{\text{mean}, B}\}}. \quad (3)$$

根据水下的衰减特性, 颜色通道的衰减越严重, 整体的像素强度均值越小。为了校正衰减严重的颜色通道, 根据(3)式引入一个 Gamma 校正, 当  $P_c < 1$  时, 对低灰度区域进行扩大, 但是高灰度区域的动态范围被缩小, 图像整体的灰度增加, 进而达到衰减通道校正的目的<sup>[19]</sup>。最终通过一个 Gamma 校正操作将(3)式代入到(1)式中, 表达式为

$$M_{SR, c}(x, y) = 255 \times \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n \omega_n \{ \log[S_c(x, y)] - \log[S_c(x, y) * G_n(x, y)] \}}{255} \right\}^{P_c}. \quad (4)$$

尽管 Gamma 校正对衰减通道的低灰度区域进行了扩大, 但是高灰度区域的动态范围被缩小了。为了扩大整个图像的动态范围, 对校正图像的每个颜色通道引入一个简单有效的线性拉伸操作, 最终 MSR 被重新定义为

$$M_{SR, c, \text{final}}(x, y) = O_{c, \text{min}} + [M_{SR, c}(x, y) -$$

$$I_{c, \text{min}}] \times \left( \frac{O_{c, \text{max}} - O_{c, \text{min}}}{I_{c, \text{max}} - I_{c, \text{min}}} \right), \quad (5)$$

式中:  $M_{SR, c, \text{final}}(x, y)$  和  $M_{SR, c}(x, y)$  分别为输出图像和输入图像在  $(x, y)$  点的像素值;  $O_{c, \text{min}}$  和  $O_{c, \text{max}}$  分别为输出图像的最小和最大像素值;  $I_{c, \text{min}}$  和  $I_{c, \text{max}}$  分别为输入图像的最小和最大像素值。图2为颜色校正效果图, 所提颜色校正方法有效消



图 2 颜色校正结果。(a)原图;(b)基于均值和方差的颜色校正方法;(c)所提颜色校正方法

Fig. 2 Color correction results. (a) Raw images; (b) color correction method based on mean and variance; (c) proposed color correction method

减了水下蓝(绿)色失真,同时解决了红色通道的过补偿问题。

### 2.3 对比度增强

如图 2 所示,尽管水下图像的颜色失真被很好地消减,但水下图像的可视性低和细节丢失情况仍需提高。传统的直方图直接应用到水下图像时容易造成过增强<sup>[11]</sup>。为了解决上述问题,基于中值的双区间直方图已经展示了有效性<sup>[12]</sup>。然后,不同于文献[11]和[12],结合均值和中值的优势,取它们的平均值作为低像素区域和高像素区域的分割点。每个颜色通道对应的均值和中值分别表示为

$$M_{\text{mean}, c} = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l I_c(i, j)}{k \times l}, \quad (6)$$

$$M_{\text{median}, c} = \frac{I_{c, \max} + I_{c, \min}}{2}. \quad (7)$$

每个颜色对应的平均值为

$$A_{\text{average}, c} = \frac{M_{\text{mean}, c} + M_{\text{median}, c}}{2}. \quad (8)$$

在平均值点  $A_{\text{average}, c}$  被确定以后,任意输入的一个图像都被这个均值点分割为一个低像素区域和高像素区域,然后对两区域分别实施拉伸操作。局部均值点拉伸操作先统计直方图在该区域的比例并计算累计后的频率分布,最后计算子直方图拉伸后的像素值。对于任意一个颜色通道的输入像素值

$I_c(i, j)$ , 其对比的累加概率为  $P_{\text{CDF}}[I_c(i, j)]$ , 然后对低像素区域和高像素区域进行拉伸,得到的结果分别为

$$B_{\text{back}, c} = I_{c, \min} + (A_{\text{average}, c} - I_{c, \min}) \times P_{\text{CDF}}[I_c(i, j)], \quad I_c(i, j) \in [0, A_{\text{average}, c}], \quad (9)$$

$$B_{\text{fore}, c} = (A_{\text{average}, c} + 1) + [I_{c, \max} - (A_{\text{average}, c} + 1)] \times P_{\text{CDF}}[I_c(i, j)], \quad I_c(i, j) \in [A_{\text{average}, c}, 255]. \quad (10)$$

最后基于这个均值点,对拉伸后的低像素区域和高像素区域进行整合,如图 3 所示。其中,输入图像是 2.2 节颜色校正后的图像,主观效果表明,增强图像的可视性得到明显改善。

### 2.4 细节锐化

非锐化掩模对图像的锐化是理想的,并成功应用于水下图像<sup>[19, 21]</sup>。传统的锐化技术首先采用一个高斯核去模糊原图像,然后从原图像中减去这个模糊的图像,最后将差值添加到原图像中。不同于原始的锐化技术,本文采用多个不同尺度的高斯核去模糊原始图像,并求平均值以获取更精确的模糊图像。

$$A_{\text{blurred}} = G_n * A_{\text{original}}, \quad (11)$$

式中: $A_{\text{blurred}}$  为模糊的图像; $A_{\text{original}}$  为原始的图像(在 2.4 节,表示对比度增强的图像); $G_n$  为高斯核函数树。受 MSR 的启发,选择低、中、高三种不同

的尺度高斯核函数去模糊原图像,分别获得三个模糊的图像,即  $A_{\text{blurred}1}$ 、 $A_{\text{blurred}2}$  和  $A_{\text{blurred}3}$ 。最终,模糊图像的计算公式为

$$A_{\text{blurred}} = (A_{\text{blurred}1} + A_{\text{blurred}2} + A_{\text{blurred}3})/3. (12)$$

在模糊图像确定以后,锐化图像的计算公式为

$A_{\text{sharpened}} = A_{\text{original}} + (A_{\text{original}} - A_{\text{blurred}}) \times \alpha, (13)$   
 式中: $\alpha$  为一个锐化程度的控制因子,通常为  $0 \sim 2^{[21]}$ ,在实验设计中,通过大量的统计分析,被确定为 1.5。图 4 展示了最终的锐化图像,能清楚观察到,锐化图像的纹理信息更加突显、细节更加清晰。

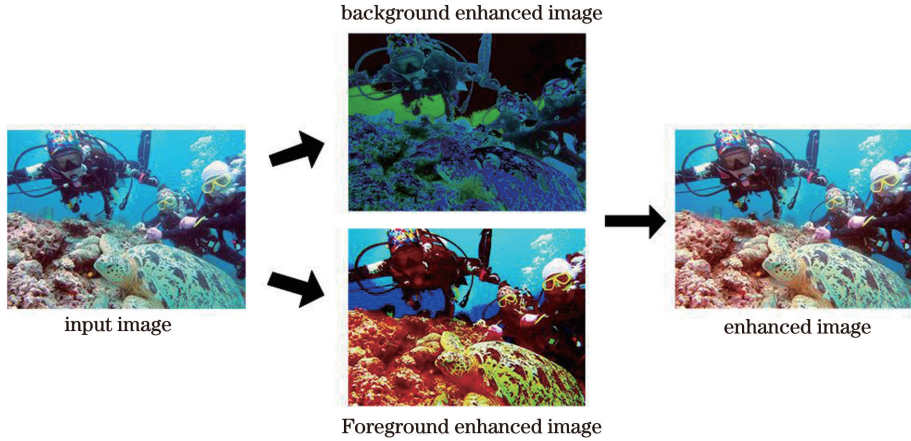


图 3 低增强区域和高增强区域的分离和整合过程

Fig. 3 Process of separating and integrating low-enhanced and upper-enhanced regions

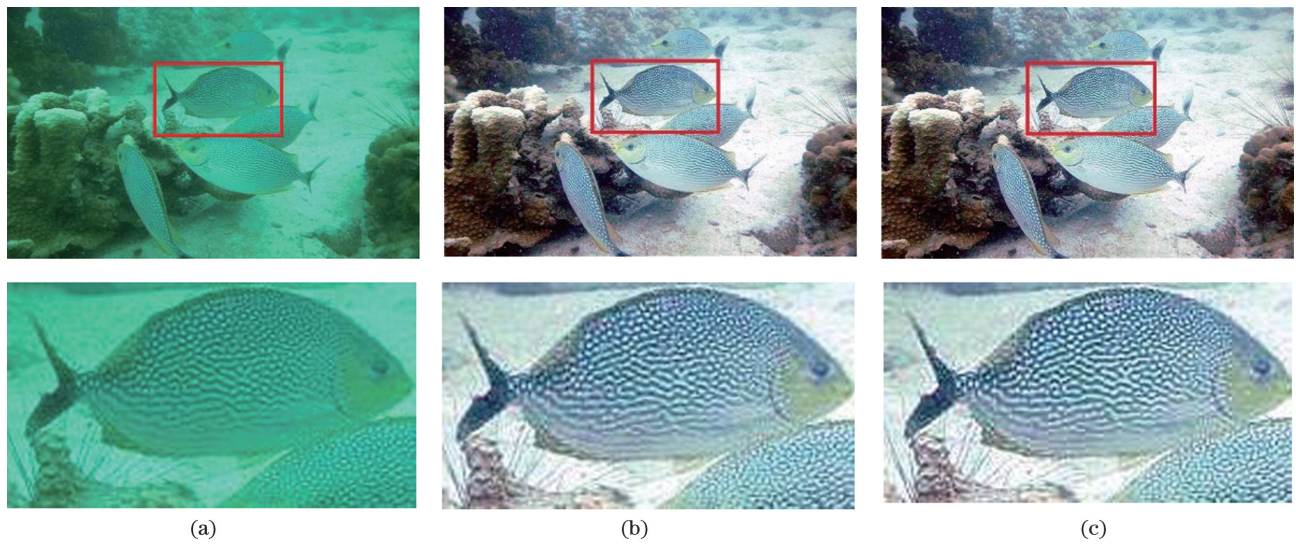


图 4 细节锐化结果。(a)原始图像;(b)对比度增强图像;(c)细节锐化图像

Fig. 4 Detail sharpen results. (a) Original image; (b) contrast enhanced image; (c) detail sharpened image

### 3 实验结果与分析

为了评估所提方法的性能,分别进行颜色校正评估、主观评估、客观评估,此外还进行扩展应用。同时对基于混合技术的水下图像颜色校正方法<sup>[1]</sup>、基于自动红通道的水下图像复原方法<sup>[5]</sup>、基于暗通道先验泛化的水下图像复原方法<sup>[9]</sup>、基于两阶的水下图像增强方法<sup>[15]</sup>、基于单通道卷积 MSRCR 的水下图像增强方法<sup>[16]</sup>、基于融合的水下图像增强方法<sup>[18]</sup>及所提方法进行对比。

#### 3.1 色彩校正评估

为了评估所提方法颜色校正的有效性,选择不同型号的水下专用成像系统捕获带有标准色彩卡的水下图像作为测试图像,水下图像来源于文献<sup>[19]</sup>。颜色校正结果如图 5 所示。由图 5 可知:文献<sup>[5]</sup>和文献<sup>[9]</sup>中的方法不能有效地解决颜色失真,也不能显著提高图像的对比度;文献<sup>[16]</sup>和文献<sup>[18]</sup>中的方法在一定程度上对图像的对比度有一定改善,但文献<sup>[16]</sup>中的方法增强的图像过亮;虽然文献<sup>[9]</sup>中的方法较好地移

除了图像的颜色失真,但图像细节不突显;文献[1]和文献[15]中的方法较好地提高了图像的对比度,但文献[1]中的方法引入了微红色现象,文

献[15]中增强的图像中背景出现暗褐色伪影;所提方法增强的图像具有高的对比度、自然的颜色和清晰的纹理。



图 5 颜色校正的评估。(a)原图;(b)文献[1]中的方法;(c)文献[5]中的方法;(d)文献[9]中的方法;  
(e)文献[15]中的方法;(f)文献[16]中的方法;(g)文献[18]中的方法;(h)所提方法

Fig. 5 Evaluation of color correction. (a) Original image; (b) method in Ref. [1]; (c) method in Ref. [5]; (d) method in Ref. [9]; (e) method in Ref. [15]; (f) method in Ref. [16]; (g) method in Ref. [18]; (h) proposed method

### 3.2 主观评估

为了验证所提方法增强图像的有效性,从水下图像呈现的外观方面考虑,选择蓝色、绿色及黄色三类图像作为测试图像,水下图像来源于文献[22]。

从图 6 可知:文献[9]中的方法处理后,图像仍然存在严重的失真,且出现局部过亮或过暗现象;对于退化轻微的水下图像,文献[5]和文献[15]中的方法增强的结果出现过暗或局部微红色现象;虽然文献[1]中的方法较好地提高了图像的对比度,但是引入了红色伪影;文献[18]中的方法在颜色校正方面表现出令人满意的结果,但图像对比度提高有限;虽

然文献[16]中的方法显著提高了对比度和颜色,但是在细节突显方面弱于所提方法。

从图 7 可知:文献[5]和文献[9]中的方法在颜色校正方面性能不优异;文献[15]和文献[18]中的方法在颜色校正方面的性能优于文献[5]和文献[9],但在图像对比度提高方面性能不优异,且细节信息丢失;文献[1]中的方法在对比度提高方面优于文献[15]和文献[18],但是增强的图像出现局部红色伪影;文献[16]中的方法在颜色校正和对比度增强方面都获取令人满意的结果,但是所提方法在图像细节增强和局部颜色校正方面优于文献[16]。

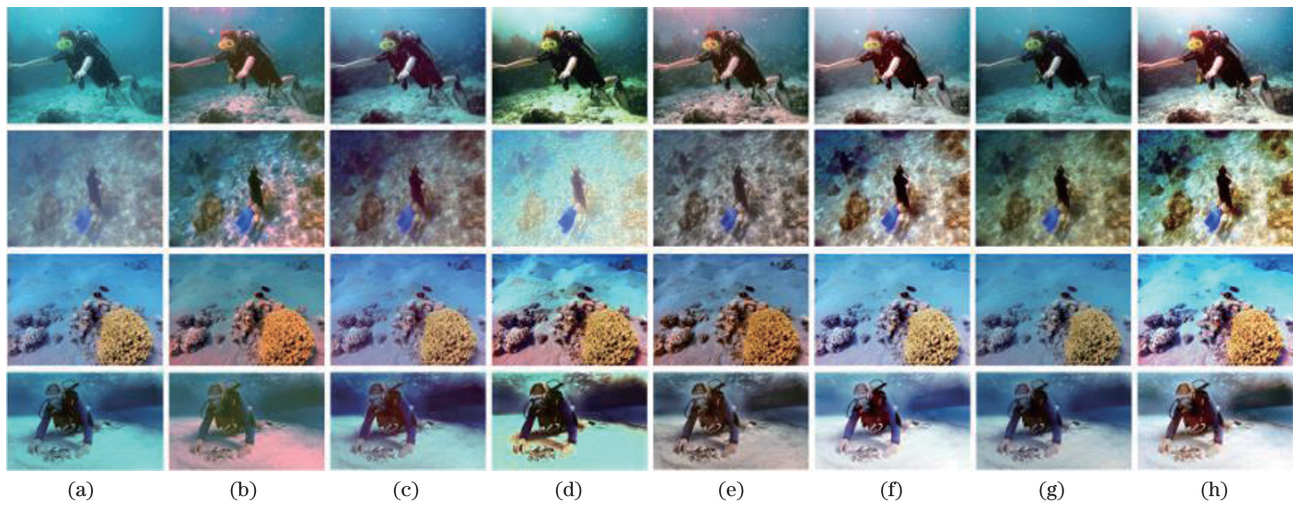


图 6 蓝色水下图像的评估。(a)原图;(b)文献[1]中的方法;(c)文献[5]中的方法;(d)文献[9]中的方法;  
(e)文献[15]中的方法;(f)文献[16]中的方法;(g)文献[18]中的方法;(h)所提方法

Fig. 6 Evaluation on bluish underwater images. (a) Original image; (b) method in Ref. [1]; (c) method in Ref. [5]; (d) method in Ref. [9]; (e) method in Ref. [15]; (f) method in Ref. [16]; (g) method in Ref. [18]; (h) proposed method

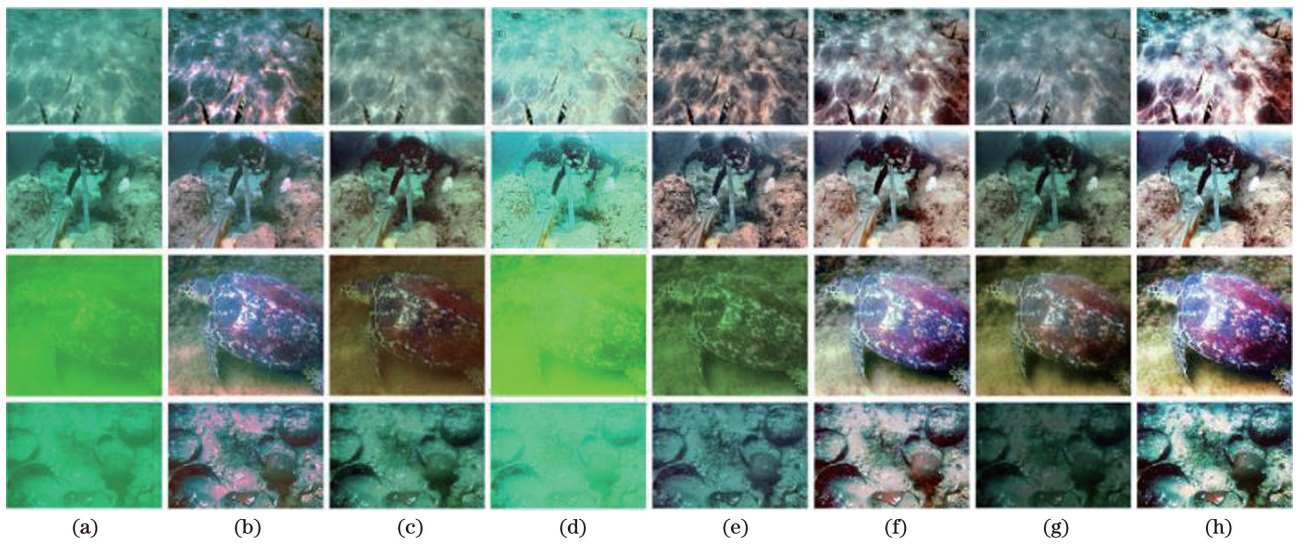


图 7 绿色水下图像的评估。(a)原图;(b)文献[1]中的方法;(c)文献[5]中的方法;(d)文献[9]中的方法;  
(e)文献[15]中的方法;(f)文献[16]中的方法;(g)文献[18]中的方法;(h)所提方法

Fig. 7 Evaluation on greenish underwater images. (a) Original image; (b) method in Ref. [1]; (c) method in Ref. [5]; (d) method in Ref. [9]; (e) method in Ref. [15]; (f) method in Ref. [16]; (g) method in Ref. [18]; (h) proposed method

从图 8 可知:文献[9]中的方法并不能有效移除颜色失真;文献[5]和文献[18]中的方法在颜色失真方面有一定的改进,但是对于黄色失真严重的水下图像,效果并不显著;文献[1]和文献[15]中的方法在对比度提高方面都表现出了有效性,但是文献[1]中增强的图像出现了局部红色伪影,文献[15]中增强的图像出现了局部黑色伪影;文献[16]中的方法在颜色校正和对比度提高方面优于上述方法,但是对于黄色显著的水下图像,出现过增强现象,细节信息的突显弱于所提方法。

通过对具有不同外观的水下图像的增强进行研究,实验结果表明,所提方法对不同退化程度的水下图像不仅能够有效移除颜色失真,提高图像的对比度,还能突显图像的细节信息。

### 3.3 客观评估

采用全参考的图像质量评估指标平均梯度(AG)<sup>[16]</sup>、无参考的图像质量评估指标水下彩色图像评估方法(UCIQE)<sup>[23]</sup>对各种方法处理的结果进行评估。参与评估的图像为图 6~8 三组图像,评估结果如表 1 所示。表 1 的数据表明,所提方法增强

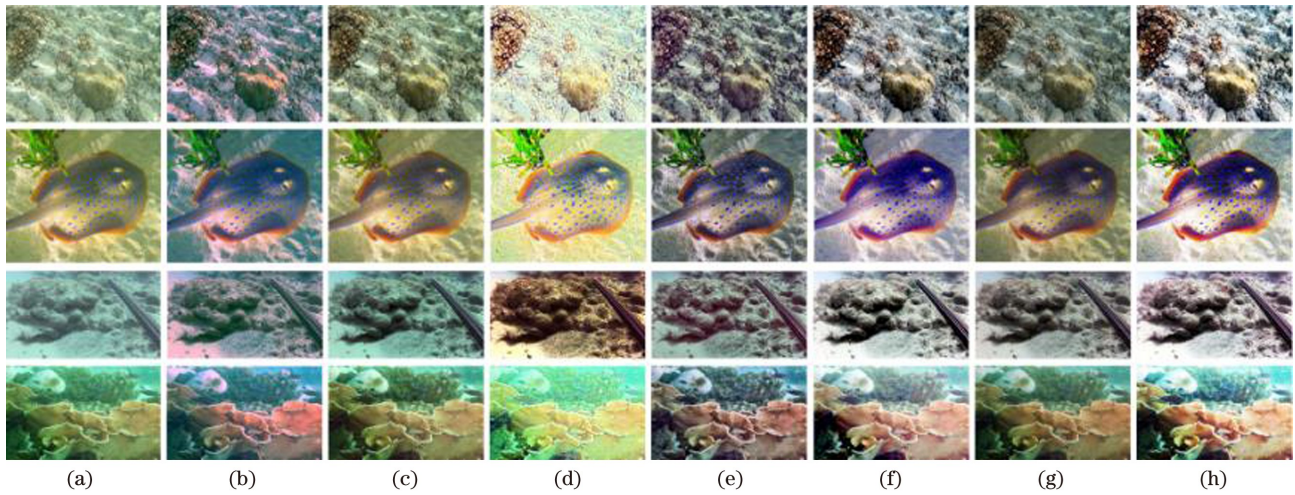


图8 黄色水下图像的评估。(a)原图;(b)文献[1]中的方法;(c)文献[5]中的方法;(d)文献[9]中的方法;(e)文献[15]中的方法;(f)文献[16]中的方法;(g)文献[18]中的方法;(h)所提方法

Fig. 8 Evaluation on yellowish underwater images. (a) Original image; (b) method in Ref. [1]; (c) method in Ref. [5]; (d) method in Ref. [9]; (e) method in Ref. [15]; (f) method in Ref. [16]; (g) method in Ref. [18]; (h) proposed method

的图像具有较高的AG和UCIQE值。高的AG值表明,增强的图像具有较高的清晰度,也就是说增强图像的可视性显著提高。高的UCIQE值表明,增强的图像很好地平衡了色度、饱和度及对比度,也就是说增强图像具有好的色度、饱和度及对比度。

表1 不同方法下的AG和UCIQE  
Table 1 AG and UCIQE under different methods

Figure	Method in Ref. [1]		Method in Ref. [5]		Method in Ref. [9]		Method in Ref. [15]		Method in Ref. [16]		Method in Ref. [18]		Proposed method	
	AG	UCIQE	AG	UCIQE	AG	UCIQE	AG	UCIQE	AG	UCIQE	AG	UCIQE	AG	UCIQE
Fig. 6	4.997	0.510	4.015	0.592	7.003	0.635	6.844	0.604	5.798	0.510	3.523	0.572	7.019	0.651
	4.146	0.549	4.316	0.580	7.041	0.624	6.756	0.571	5.447	0.549	4.360	0.583	7.046	0.612
	8.395	0.44	5.363	0.538	7.063	0.466	7.724	0.518	10.164	0.440	6.123	0.590	12.725	0.663
	6.139	0.647	5.610	0.624	9.328	0.715	7.743	0.684	6.809	0.647	5.007	0.616	9.045	0.692
Fig. 7	9.228	0.341	5.746	0.497	4.932	0.361	6.304	0.468	12.933	0.341	3.795	0.450	13.985	0.630
	5.774	0.402	3.415	0.457	5.94	0.494	5.495	0.543	6.869	0.402	3.660	0.490	9.187	0.633
	7.223	0.322	3.411	0.502	3.689	0.369	3.245	0.42	8.665	0.322	5.234	0.591	10.588	0.655
	9.168	0.513	7.725	0.586	12.904	0.535	12.505	0.607	11.682	0.513	7.457	0.575	14.614	0.637
Fig. 8	9.691	0.469	8.353	0.547	11.909	0.543	10.699	0.549	12.237	0.469	7.922	0.547	15.192	0.614
	10.158	0.533	8.753	0.549	13.561	0.56	12.601	0.577	11.539	0.533	8.109	0.569	15.872	0.637
	5.518	0.583	5.188	0.610	7.111	0.588	7.860	0.627	6.291	0.583	4.826	0.615	7.995	0.667
	6.277	0.419	4.578	0.518	7.966	0.602	5.756	0.529	6.791	0.419	5.194	0.524	7.341	0.562
Average	7.226	0.477	5.539	0.550	8.203	0.541	7.794	0.558	8.768	0.477	5.434	0.560	10.884	0.638

### 3.4 扩展应用

为了评估所提方法的性能,尝试将其应用于低光照图像。图9展示了多种场景下的低光照图像及其增强的结果,所提方法在不改变原始图像颜色的前提

下,有效提高了低光照图像的亮度,突显了细节。

## 4 结论

水下复杂的成像环境会使水下图像颜色失真、可





图 9 低光照图像的评估

Fig. 9 Evaluation on low light images

视性降低及细节信息丢失。针对水下图像的退化问题,提出了一种基于颜色校正和细节保持的水下图像增强方案。首先,一个基于 Retinex 启发的方法用于移除水下图像的颜色失真;然后,一个基于均值和中值的平均值的双区间直方图用于提高水下图像的低可视性;最后,一个多尺度的锐化掩模方法用于锐化整个图像,以突显图像细节。主观和客观评估结果表明,所提方法对水下图像增强具有有效性。扩展实验的评估结果表明,所提方法具有广泛适用性。

### 参 考 文 献

[1] Li C Y, Guo J C, Guo C L, et al. A hybrid method for underwater image correction[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2017, 94: 62-67.

[2] Zhang W D, Dong L L, Pan X P, et al. A survey of restoration and enhancement for underwater images [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 182259-182279.

[3] He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(12): 2341-2353.

[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] Galdran A, Pardo D, Picón A, et al. Automatic red-channel underwater image restoration[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2015, 26: 132-145.

[6] Li C Y, Guo J C, Cong R M, et al. Underwater image enhancement by dehazing with minimum information loss and histogram distribution prior[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, 25 (12): 5664-5677.

[7] 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.

[8] Wang G L, Tian J D, Li P Y. Image color correction based on double transmission underwater imaging model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39 (9): 0901002.  
王国霖, 田建东, 李鹏越. 基于双透射率水下成像模型的图像颜色校正[J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0901002.

[9] 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*, 2018, 27(6): 2856-2868.

[10] Liu Y Z, Chi K C, Lin S. Underwater image restoration based on background light estimation and transmittance optimization[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 57(14): 141010.  
刘玉珍, 迟凯晨, 林森. 基于背景光估计与透射率优化的水下图像复原[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 57(14): 141010.

[11] Iqbal K, Odetayo M, James A, et al. Enhancing the low quality images using unsupervised colour correction method [C]//2010 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, October 10-13, 2010, Istanbul, Turkey. New York: IEEE Press, 2010: 1703-1709.

[12] Abdul Ghani A S, Mat Isa N A. Enhancement of low quality underwater image through integrated global and local contrast correction [J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 37: 332-344.

[13] Abdul Ghani A S, Mat Isa N A. Automatic system for improving underwater image contrast and color through recursive adaptive histogram modification [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 141: 181-195.

[14] Fu X Y, Zhuang P X, Huang Y, et al. Aretinex-based enhancing approach for single underwater

- 
- image[C]//2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), October 27-30, 2014, Paris, France. New York: IEEE Press, 2014: 4572-4576.
- [15] Fu X Y, Fan Z W, Ling M, et al. Two-step approach for single underwater image enhancement [C]//2017 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), November 6-9, 2017, Xiamen, China. New York: IEEE Press, 2017: 789-794.
- [16] Zhang W D, Dong L L, Pan X P, et al. Single image defogging based on multi-channel convolutional MSRRCR[J]. IEEE Access, 2019, 7: 72492-72504.
- [17] Zou P Y, Zhang W D, Shi J Y, et al. Underwater image enhancement algorithm based on fusion of high and low frequency components [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(16): 161010.  
邹沛煜, 张卫东, 史金余, 等. 基于高低频分量融合的水下图像增强方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(16): 161010.
- [18] Ancuti C O, Ancuti C, Haber T, et al. Fusion-based restoration of the underwater images[C]//2011 18th IEEE International Conference on Image Processing, September 11-14, 2011, Brussels, Belgium. New York: IEEE Press, 2011: 1557-1560.
- [19] Ancuti C O, Ancuti C, de Vleeschouwer C, et al. Color balance and fusion for underwater image enhancement [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 27(1): 379-393.
- [20] 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): 1110003.  
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): 1110003.
- [21] Mohd Azmi K Z, Abdul Ghani A S, Md Yusof Z, et al. Natural-based underwater image color enhancement through fusion of swarm-intelligence algorithm[J]. Applied Soft Computing, 2019, 85: 105810.
- [22] Li C Y, Guo C L, Ren W Q, et al. An underwater image enhancement benchmark dataset and beyond [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2020, 29: 4376-4389.
- [23] Yang M, Sowmya A. An underwater color image quality evaluation metric [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(12): 6062-6071.