

# 基于白平衡和相对全变分的低照度水下图像增强

张薇, 郭继昌\*

天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072

**摘要** 针对低照度水下图像存在色偏和细节模糊的问题, 提出一种基于白平衡和相对全变分的低照度水下图像增强算法。该算法依据光线在水中选择性衰减的特性, 对水下图像进行全局光照补偿以提高图像亮度, 并采用灰度世界算法校正水下图像颜色; 依据引导滤波的保边平滑性构造新的相对全变分约束来估计照度图, 并基于低照度成像模型得到反射图像, 即增强后的水下图像。主观效果、客观分析及应用比较实验均证明了本文算法在校正色偏和增强图像细节方面的有效性。

**关键词** 图像处理; 图像增强; 光照补偿; 白平衡; 引导滤波; 相对全变分

中图分类号 TP751.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.121016

## Low-Illumination Underwater Image Enhancement Based on White Balance and Relative Total Variation

Zhang Wei, Guo Jichang\*

School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** To solve the problem of color cast and detail blur in low-illumination underwater images, a low-illumination underwater image enhancement algorithm based on white balance and relative total variation is proposed. According to the characteristics of selective attenuation of light in water, the algorithm firstly performs global illumination compensation for underwater images to improve image brightness and uses gray world algorithm to correct underwater image color. Then a new relative total variation constraint is constructed according to the edge preserving smoothness of guided filtering to estimate the illumination map. Finally, a reflection image, namely an enhanced underwater image, is obtained based on the low-illumination imaging model. The subjective effect, objective analysis, and application comparison experiments all prove the effectiveness of the proposed algorithm in correcting color cast and enhancing image details.

**Key words** image processing; image enhancement; illumination compensation; white balance; guided filtering; relative total variation

**OCIS codes** 100.2000; 100.2980; 100.4994

## 1 引言

水下图像在图像分类、目标检测等计算机视觉领域扮演着重要角色。然而由于低光照水下环境光照范围有限, 获取的水下图像物体辨识度差, 能见度低, 使低照度水下图像增强成为一项具有挑战性的水下计算机视觉任务。光照不足时, 水下图像存在亮度和对比度低、区域特征不明显、细节模糊等问题, 不同光谱区域的光在水中的衰减速率不同, 导致

图像出现色偏和伪影, 这些问题给图像预处理阶段带来极大的困难。因此低照度水下图像增强算法在海洋工程中具有重要研究价值。

目前, 传统的低照度图像增强算法大概可以分为以下几类: 基于直方图均衡的方法<sup>[1-2]</sup>、基于暗通道先验的方法<sup>[3-5]</sup>、基于色调映射的方法<sup>[6-8]</sup>以及基于 Retinex 模型的算法<sup>[9-10]</sup>等。近年来, 基于全变分的低照度图像增强算法取得了较好的图像增强效果, 为低照度水下图像增强提供了新的研究思路。

收稿日期: 2019-09-09; 修回日期: 2019-10-08; 录用日期: 2019-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(61771334)

\* E-mail: jcguo@tju.edu.cn

文献[11]提出一种基于相对全变分(RTV)<sup>[12]</sup>的低照度图像增强算法,采用相对全变分约束来估计照度图,然后代入低照度成像模型,得到增强的图像,该算法较好地增强了图像亮度和细节,但由于相对全变分约束在分离照度图的结构和纹理时,会将噪声当作结构保留下来,从而放大图像的噪声。因此,文献[13]在其基础上将图像从RGB颜色空间转换到YCbCr颜色空间,然后采用BM3D算法<sup>[14]</sup>对亮度通道Y进行自适应去噪。文献[15]在文献[13]的低照度图像形成模型上增加了一个噪声项,采用相对全变分约束估计照度图和噪声图,提高了图像亮度,降低了噪声。然而不同于地面环境,水对光的选择性吸收以及水中悬浮粒子对光的散射导致图像出现色偏和模糊。因此,面向地面图像的低照度图像增强算法,不能很好地用于增强低照度水下图像。

针对基于相对全变分的低照度图像增强算法应用在水下图像处理中的局限性,本文提出一种基于白平衡和相对全变分的低照度水下图像增强算法,对图像的红、绿通道进行全局光照补偿以提高图像亮度,并采用灰度世界算法<sup>[16]</sup>去除图像色偏;通过相对全变分约束估计照度图,为了更好地平滑照度图纹理,增强结构,将原始相对全变分中的高斯滤波替换成引导滤波,以得到准确估计的照度图,最后将照度图代入低照度图像形成模型,得到反射图像,即颜色校正和细节增强的水下图像。

## 2 基本理论

### 2.1 灰度世界算法

灰度世界算法是常用的白平衡算法,其假设自然界中的物体对于光线的平均反射率是一个定值。基于该假设,灰度世界算法能够有效地校正由水下光照特性引起的色偏,从而恢复出图像本来的颜色。算法具体过程如下:

1) 计算水下图像的平均灰度值:

$$\bar{G}_{\text{ray}} = \frac{\bar{R} + \bar{G} + \bar{B}}{3}, \quad (1)$$

式中: $\bar{R}$ 、 $\bar{G}$ 、 $\bar{B}$ 分别为红、绿、蓝通道的像素均值; $\bar{G}_{\text{ray}}$ 是三个通道的平均灰度值,该值是物体对光线的平均反射率。

2) 基于平均反射率 $\bar{G}_{\text{ray}}$ 将各个通道的增益系数表示为

$$k_r = \frac{\bar{G}_{\text{ray}}}{\bar{R}}, k_g = \frac{\bar{G}_{\text{ray}}}{\bar{G}}, k_b = \frac{\bar{G}_{\text{ray}}}{\bar{B}}, \quad (2)$$

式中: $k_r$ 、 $k_g$ 、 $k_b$ 分别为红、绿、蓝通道的增益系数。

3) 基于各通道的增益系数,对每个通道进行灰度变换:

$$\begin{aligned} I'_r(p) &= k_r \cdot I_r(p), I'_g(p) = k_g \cdot I_g(p), \\ I'_b(p) &= k_b \cdot I_b(p), \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $p$ 为图像的像素点; $I_r(p)$ 、 $I_g(p)$ 、 $I_b(p)$ 分别为三个通道灰度变换前的像素值; $I'_r(p)$ 、 $I'_g(p)$ 、 $I'_b(p)$ 分别为三个通道灰度变换后的像素值。

该算法能够较好地去除图像色偏,改善图像颜色失真的问题,但该算法仅适用于颜色丰富的图像,因此在使用该算法前,对图像进行预处理,使灰度世界算法更好地校正水下图像色偏。

### 2.2 引导滤波

引导滤波<sup>[17]</sup>算法利用引导图指导输入图像的滤波过程,使输出图像保留输入图像的整体特征,并且与引导图像的纹理部分相似。该算法具有平滑图像细节、保留图像边缘、计算速度快等特点。引导滤波假设引导图像与滤波输出的图像存在局部线性关系,该关系模型可表示为

$$J(p) = a_q I(p) + b_q, \quad \forall q \in \Omega(p), \quad (4)$$

式中: $J(p)$ 为引导滤波输出的图像; $I(p)$ 为引导图像; $a_q$ 和 $b_q$ 为该线性函数的系数; $\Omega(p)$ 为以像素点 $p$ 为中心的局部窗口。

通过求解系数 $a_q$ 和 $b_q$ 的最优解,使滤波输出图像 $J(p)$ 和输入图像之间的差值最小,即最小化代价函数,代价函数可表示为

$$L(a_q, b_q) = \sum_{q \in \Omega(p)} \{ [a_q I(p) + b_q - X(p)]^2 + \lambda a_q^2 \}, \quad (5)$$

式中: $X(p)$ 为输入图像; $\lambda$ 为正则化系数。为避免 $a_q$ 的值过大,通过该函数求出 $a_q$ 和 $b_q$ ,从而求出滤波输出图像 $J(p)$ 。

引导滤波算法能够很好地对照度图进行精细化,实现保边平滑的效果。

### 2.3 相对全变分

相对全变分模型<sup>[12]</sup>能够较好地分离图像纹理细节和主结构,从而实现图像对比度增强,相对全变分模型可表示为

$$R_{\text{TV}}(p) = \frac{D_x(p)}{L_x(p) + \epsilon} + \frac{D_y(p)}{L_y(p) + \epsilon}, \quad (6)$$

式中: $\epsilon = 0.001$ ;  $D_x(p) = \sum_{q \in \Omega(p)} g_{p,q} \cdot |(\partial_x \mathbf{S})_q|$ 和  $D_y(p) = \sum_{q \in \Omega(p)} g_{p,q} \cdot |(\partial_y \mathbf{S})_q|$ 分别为像素 $p$ 在 $x$ 和 $y$ 方向上的局部全变分(WTV);  $L_x(p) = \left| \sum_{q \in \Omega(p)} g_{p,q} \cdot (\partial_x \mathbf{S})_q \right|$ 和  $L_y(p) = \left| \sum_{q \in \Omega(p)} g_{p,q} \cdot (\partial_y \mathbf{S})_q \right|$

分别为像素  $p$  在  $x$  和  $y$  方向上的局部固有变分 (WIV), 其中  $\mathbf{S}$  代表图像,  $\partial_x$  和  $\partial_y$  分别表示在  $x$  和  $y$  方向上求偏导,  $g_{p,q}$  为高斯函数, 定义了局部区域的空间相关性, 用于增强图像结构, 函数尺度由  $\sigma$  控制。

$D(p)$  用于计算局部区域  $\Omega(p)$  内的绝对空间差, 局部区域中图像纹理和结构越多时,  $D(p)$  的值越大。由于在相同方向上局部窗口中的结构比纹理的梯度值更大, 因此只包含结构的局部区域的  $L(p)$  值通常比只包含纹理的局部区域的  $L(p)$  值要大。结构部分的  $R_{TV}(p)$  值比纹理部分的小, 使得结构可以较好地 从纹理中分离出来。

### 3 本文算法

本文基于白平衡和相对全变分的低照度水下图像增强方法包括两个步骤: 1) 基于白平衡方法的图像颜色校正; 2) 基于相对全变分的图像清晰度恢复。具体流程图如图 1 所示。

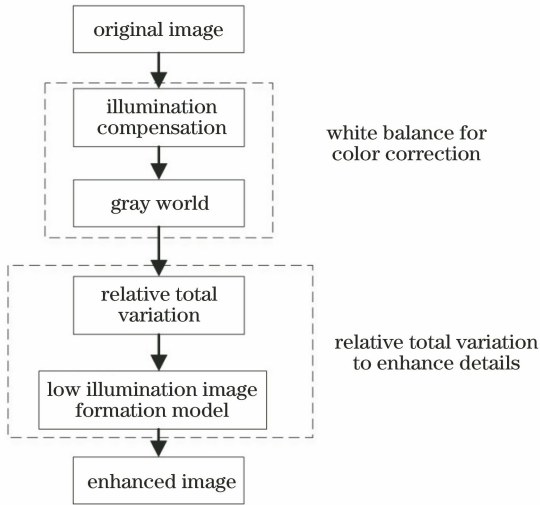


图 1 算法流程图

Fig. 1 Algorithm flow chart

#### 3.1 基于白平衡的颜色修正

由于不同光谱区域的光在水中传播时的衰减速率不同, 其中红光衰减最快, 蓝绿光衰减最慢, 因此水下图像通常呈现蓝绿色偏。灰度世界法在处理地面图像或者光照充足的水下图像时, 能较好地校正图像颜色, 但应用于低照度水下图像会失效, 这是由于低照度水下图像的红、绿、蓝三通道的像素均值很低, 图像颜色不够丰富, 且存在部分黑色或灰色区域。

Ancuti 等<sup>[18]</sup> 在 2018 年提出一种新的白平衡算法, 该算法基于各个通道的像素差值对红通道和蓝

通道进行补偿, 然后用灰度世界算法对颜色补偿后的图像进行颜色校正。

在此基础进行改进, 基于以下三个理论对各通道进行全局光照补偿:

1) 在低光照条件下, 红光和绿光严重衰减, 图像的蓝通道相对红、绿通道有更高的灰度值, 因此用蓝通道来补偿红、绿通道;

2) 在对红通道进行补偿时, 由于灰度世界假设所有通道的均值相同, 而红通道均值和绿通道均值的差值体现了红、绿通道衰减的不平衡性, 因此基于该差值对红通道进行补偿, 对绿通道的补偿也是如此;

3) 为了避免红、绿通道的饱和, 只对红、绿通道值较小的区域进行补偿。

补偿后的红通道像素值为

$$I_{rc}(p) = I_r(p) + (\bar{I}_b - \bar{I}_r) \cdot [1 - I_r(p)] \cdot I_b(p), \quad (7)$$

式中:  $\bar{I}_r$ 、 $\bar{I}_b$  分别为红、蓝通道的像素值均值;  $I_r(p)$ 、 $I_b(p)$  分别为补偿前红、蓝通道的像素值;  $I_{rc}(p)$  为红通道补偿后的像素值。

补偿后的绿通道在每个像素位置  $p$  的像素值为

$$I_{gc}(p) = I_g(p) + (\bar{I}_b - \bar{I}_g) \cdot [1 - I_g(p)] \cdot I_b(p), \quad (8)$$

式中:  $\bar{I}_g$ 、 $\bar{I}_b$  分别为绿、蓝通道的均值;  $I_g(p)$ 、 $I_b(p)$  分别为补偿前绿、蓝通道的像素值;  $I_{gc}(p)$  为绿通道补偿后的像素值。

在对红、绿通道进行补偿后, 采用灰度世界算法去除图像色偏, 得到颜色校正后的水下图像。图 2 是该方法对低照度水下图像进行颜色校正后的结果。

观察图 2 的处理结果可以看出, 该方法较好地去除了低照度水下图像的蓝绿色偏。低照度水下图像的像素动态范围小, 整体亮度很低, 因此先对低照度水下图像进行了全局光照补偿, 使灰度世界算法实现更好的颜色均衡效果。

#### 3.2 基于相对全变分的图像清晰度恢复

反转后的低照度图像相似于雾天图像, 基于该现象, 文献[19-21]提出了一种低照度成像模型, 具体模型为

$$\mathbf{1} - \mathbf{I} = (\mathbf{1} - \mathbf{R}) \cdot \mathbf{T} + a(\mathbf{1} - \mathbf{T}), \quad (9)$$

式中:  $a=0.9$ ;  $\mathbf{I}$  是已知的低照度图像;  $\mathbf{1} - \mathbf{I}$  是反转后的低照度图像;  $\mathbf{R}$  是反射图, 即增强亮度和细节后的清晰图像;  $\mathbf{T}$  是图像的照度图。

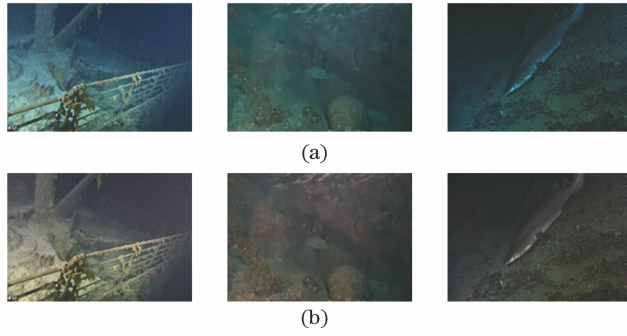


图2 低照度水下图像及颜色校正结果。(a)低照度水下图像;(b)颜色校正的结果

Fig. 2 Color correction results of low illumination underwater images. (a) Low illumination underwater images; (b) color correction results

由于本文经过颜色校正后的水下图像仍然是低照度的,因此该模型同样适用于该低光照水下图像的增强。基于该模型,准确地估计照度图是增强图像亮度和细节的关键,因此本文的照度图估计过程如下。

首先初始化照度图:

$$\hat{T}(p) = \max_{q \in \Omega(p)} \max_{c \in \{r, g, b\}} I_c(q), \quad (10)$$

式中: $\hat{T}(p)$ 为初始照度图; $I_c(q)$ ( $c = r, g, b$ )为红、绿、蓝三通道图。

照度图反映的是图像每个区域的光照强度,精确的照度图应该在纹理细节上是平滑的,同时还能保持整体结构,即具有局部一致性和结构性,然而(10)式中初始化的照度图保证了局部一致性,但缺乏结构性,因此本文采用基于相对全变分的方法来优化照度图,优化的目标函数可表示为

$$\arg \min_T \left( \|\hat{T} - T\|_F^2 + \lambda \|W \cdot \partial T\|_1 \right), \quad (11)$$

式中: $\lambda$ 为常系数,用来平衡前后两项; $\|\cdot\|_F$ 为Frobenius范数; $\|\cdot\|_1$ 为 $L_1$ 范数; $W$ 为照度图平滑权重。在(11)式中,第一项保证精细后的照度图 $T$ 和初始化的照度图 $\hat{T}$ 的相似性,第二项表示平滑度。

为了精细化照度图,基于相对全变分理论, $x$ 方向上的权重 $W_x(p)$ 可表示为

$$W_x(p) = \sum_{q \in \Omega(p)} \frac{G_{p,q}}{\left| \sum_{q \in \Omega(p)} G_{p,q} \cdot \partial_x \hat{T} \right| + \epsilon}, \quad (12)$$

式中: $G_{p,q}$ 为引导滤波函数;类似地,可以求出 $y$ 方向上的权重 $W_y(p)$ 。在RTV模型中采用高斯函数 $g_{p,q}$ 来平滑照度图,然而由于高斯函数在平滑照度图纹理细节的同时将结构也平滑掉,因此为了更好地保留照度图的结构,这里采用引导滤波,(11)式具体可以写为

$$\arg \min_T \left[ \|\hat{T} - T\|_F^2 + \lambda \sum_p \left( \frac{W_x (\partial_x T)^2}{|\partial_x \hat{T}| + \epsilon} + \frac{W_y (\partial_y T)^2}{|\partial_y \hat{T}| + \epsilon} \right) \right]. \quad (13)$$

由于(13)式中的权值是根据初始化照度图 $\hat{T}$ 确定的,而不是根据 $T$ 迭代确定的,且(13)式中只有二次项,因此可以直接进行计算,提高了算法的计算效率。通过求解该目标函数得到精细化之后的照度图 $T$ ,然后将照度图 $T$ 代入(9)式得到亮度和细节增强的水下图像 $R$ 。

(13)式中的参数 $\lambda$ 用于控制照度图的平滑程度,图3描述了不同的 $\lambda$ 值对应的照度图平滑情况。

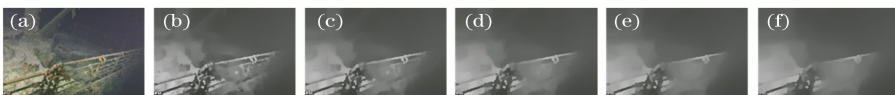


图3 照度图估计结果。(a)原图;(b) $\lambda=0.01$ ;(c) $\lambda=0.02$ ;(d) $\lambda=0.03$ ;(e) $\lambda=0.04$ ;(f) $\lambda=0.05$

Fig. 3 Estimation results of illuminance diagram. (a) Original image; (b)  $\lambda=0.01$ ; (c)  $\lambda=0.02$ ; (d)  $\lambda=0.03$ ; (e)  $\lambda=0.04$ ; (f)  $\lambda=0.05$

由图3可以看出, $\lambda$ 值越大照度图越平滑,结构性越差,因此 $\lambda$ 值设置为0.01。当 $\lambda=0.01$ 时,估计的照度图较好地保持了图像的结构,且细节

纹理平滑,此外,照度图的亮暗程度反映了不同区域的光照强度,越暗的地方光照越弱,越亮的地方光照越强。



## 4 实验结果与分析

本文方法在 MATLAB 软件平台上实现,为了验证算法在处理低照度水下图像时的有效性,分别采用本文方法和 CLAHE<sup>[1]</sup>、DCP<sup>[4]</sup>、Retinex 算法<sup>[10]</sup>、Dehaze 算法<sup>[22]</sup>、VCIP 算法<sup>[23]</sup>、RTV 算法<sup>[15]</sup>对低照度水下图像进行增强,并对增强结果进行主

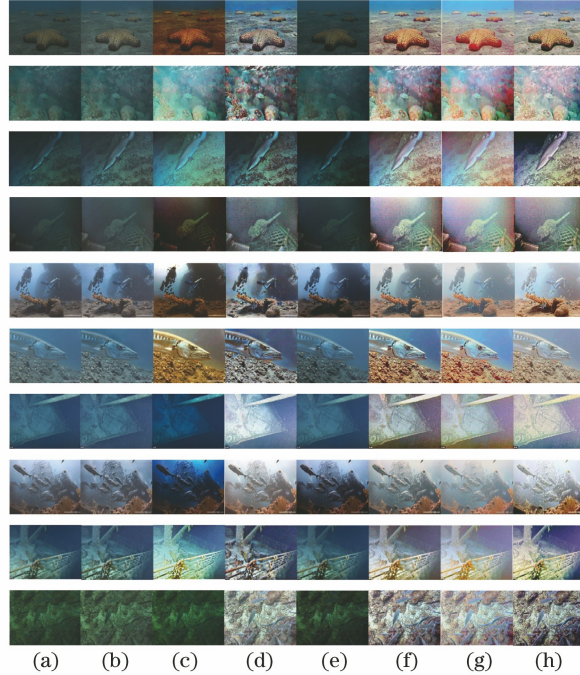


图 4 各方法增强结果对比。(a)原图;(b) CLAHE;(c) DCP;(d) Retinex;(e) Dehaze;(f) VCIP;(g) RTV;(h)本文方法  
Fig. 4 Comparison of enhancement results of each algorithm. (a) Original image; (b) CLAHE; (c) DCP; (d) Retinex; (e) Dehaze; (f) VCIP; (g) RTV; (h) our method

观察图 4(b)~(g),可以看到:CLAHE 算法和 Dehaze 算法对水下图像颜色校正、亮度和细节增强效果并不显著;暗通道先验法一定程度上增强了图像的亮度和细节,但图像存在色偏和欠增强的区域,这是由照度图和大气光估计不准确所导致;Retinex 算法较好地增强了图像的亮度和细节,但图像颜色饱和度低;VCIP 和 RTV 算法处理的图像有较好的颜色和清晰化效果,但图像存在过度曝光问题,而且 RTV 算法处理的图像明显存在颜色过饱和的区域。相比之下,本文较好地去除了图像色偏,增强了图像的亮度和细节,提高了图像整体的视觉效果。这是由于本文在采用灰度世界算法去色偏时,对低光照水下图像进行了预处理,即全局光照补偿,提高了灰度世界算法的灵活性,此外采用基于引导滤波的相对全变分算法,增强了照度图的纹理平滑效果和结构,从而提高了水下图像的清晰度。

观评价、客观分析及应用比较实验。

### 4.1 主观评价

在水下图像数据集中挑选 10 幅具有代表性的低照度水下图像,利用 CLAHE<sup>[1]</sup>、DCP<sup>[4]</sup>、Retinex 算法<sup>[10]</sup>、Dehaze 算法<sup>[22]</sup>、VCIP 算法<sup>[23]</sup>、RTV 算法<sup>[15]</sup>和本文方法对低照度水下图像进行处理,处理结果如图 4 所示。

### 4.2 客观比较

本文采用一种常用的水下图像质量评价指标(UIQM,其值用  $U_{IQM}$  表示)<sup>[24]</sup>对增强后的水下图像进行客观评价,该指标有三个水下图像属性度量指标:色彩度量指标(UICM,其值用  $U_{ICM}$  表示)、清晰度度量指标(UISM,其值用  $U_{ISM}$  表示)、对比度度量指标(UICoM,其值用  $U_{ICoM}$  表示),UIQM 是三个指标的线性组合,可表示为

$$U_{IQM} = c_1 \times U_{ICM} + c_2 \times U_{ISM} + c_3 \times U_{ICoM}, \quad (14)$$

式中: $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  为权重参数,根据文献[24]分别设置  $c_1=0.0282$ 、 $c_2=0.2953$ 、 $c_3=3.5753$ 。

对 60 张低照度水下图像的各评价指标求均值,对比结果如表 1 所示,表 1 中最好的结果被加粗。

由表 1 中的数据可以看出,就 UISM 和 UICoM 指标而言,本文方法的结果最好,说明本文算法有效增强了低照度水下图像的有用信息,

表1 水下图像的客观评价结果

Table 1 Objective evaluation results of underwater images

Parameter	CLAHE	DCP	Retinex	Dehaze	VCIP	RTV	Our method
$U_{ISM}$	3.3534	2.4067	5.0631	2.7266	3.8242	2.9947	<b>6.2862</b>
$U_{IConM}$	0.7221	0.6694	0.8434	0.6452	0.6964	0.5326	<b>0.9691</b>
$U_{ICM}$	1.2769	2.3988	2.5370	1.5522	<b>3.8694</b>	2.1789	3.6204
$U_{IQM}$	3.6081	3.1715	4.5822	3.1559	3.7282	2.8501	<b>5.4231</b>
Time /s	<b>3.0104</b>	4.6608	10.7763	5.3588	3.5426	14.8017	3.3865

提高了图像的清晰度和对比度;就 UICM 指标而言,本文算法低于 VCIP 算法,这表明 VCIP 算法处理后的图像有更多的颜色信息,然而越多的颜色信息并不代表图像的视觉效果越好,因为颜色信息过多可能造成图像过饱和,由图 4(f)~(h)所示,VCIP 算法处理后的图像有不同程度的颜色过饱和现象,而本文算法增强后的图像有更自然的主观视觉效果;就综合指标 UIQM 而言,本文算法得到的该指标最高,表明本文算法处理后的图像整体有更高的

能见度和更自然的视觉效果,此外由于本文算法在精细化照度图时只有二次项,不需要任何迭代,因此计算速度相对较快,仅次于 CLAHE 算法。

### 4.3 应用比较实验

尺度不变特征变换(SIFT)<sup>[25]</sup>特征点匹配在目标识别、目标跟踪等计算机视觉任务中起到了至关重要的作用,因此本文将各算法的图像增强结果应用于特征点匹配,并对特征点匹配结果进行对比,两组图像的比较结果如图 5 和图 6 所示。

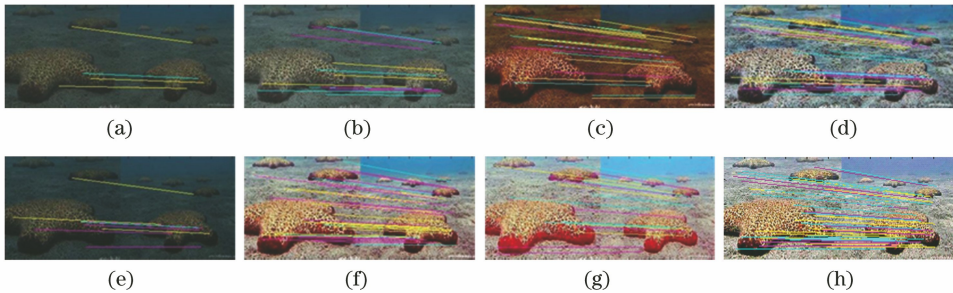


图 5 基于 SIFT 应用的比较结果(第 1 组)。(a)原图;(b) CLAHE;(c) DCP;(d) Retinex;(e) Dehaze;(f) VCIP;(g) RTV;(h)本文方法

Fig. 5 Comparison of results based on SIFT application (the first group). (a) Original image; (b) CLAHE; (c) DCP; (d) Retinex; (e) Dehaze; (f) VCIP; (g) RTV; (h) our method

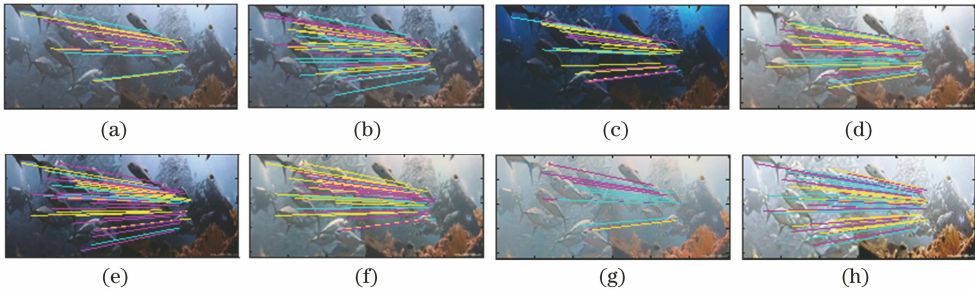


图 6 基于 SIFT 应用的比较结果(第 2 组)。(a)原图;(b) CLAHE;(c) DCP;(d) Retinex;(e) Dehaze;(f) VCIP;(g) RTV;(h)本文方法

Fig. 6 Comparison of results based on SIFT application (the second group). (a) Original image; (b) CLAHE; (c) DCP; (d) Retinex; (e) Dehaze; (f) VCIP; (g) RTV; (h) our method

在图 5(a)~(h)中,有效的 SIFT 特征点匹配个数分别为 4,12,23,37,8,38,19,46,在图 6(a)~(h)中,有效的 SIFT 特征点匹配个数分别为 18,45,29,43,46,39,20,55,相对而言,本文算法增强后的图像

检测与匹配的特征点更多,表明本文算法增强后的图像视觉效果更好,能见度高,且图像信息丰富,更适用于后续的计算机视觉任务。

## 5 结 论

根据低照度水下图像特点,提出了一种基于白平衡和相对全变分的低照度水下图像增强算法,该算法采用全局光照补偿提高了图像整体亮度,使灰度世界算法对图像有更好的颜色校正效果;根据引导滤波的特性构造相对全变分约束,提高了照度图的局部一致性和结构性,从而提高了水下图像的清晰度。实验结果证明,相比其他增强算法,本文算法有更好的视觉效果。

## 参 考 文 献

- [1] Zuiderveld K. Contrast limited adaptive histogram equalization[M]. Amsterdam: Elsevier, 1994: 474-485.
- [2] Singh K, Kapoor R, Sinha S K. Enhancement of low exposure images via recursive histogram equalization algorithms[J]. Optik, 2015, 126(20): 2619-2625.
- [3] Yang A P, Bai H H. Nighttime image defogging based on the theory of retinex and dark channel prior [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 041002.  
杨爱萍, 白煌煌. 基于 Retinex 理论和暗通道先验的夜间图像去雾算法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 041002.
- [4] 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.
- [5] Lu H B, Zhao Y F, Zhao Y J, et al. Image defogging based on combination of image bright and dark channels [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1115004.  
卢辉斌, 赵燕芳, 赵永杰, 等. 基于亮通道和暗通道结合的图像去雾[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1115004.
- [6] Jia X Y, Li T T, Jiang Z H, et al. Hue preserving low illumination image enhancement based on gene expression programming optimization [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(9): 091502.  
贾新宇, 李婷婷, 江朝晖, 等. 基因表达式编程优化的色调保持低照度图像增强[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(9): 091502.
- [7] Song R X, Li D, Yu J D. Low illumination image enhancement algorithm based on DT-CWT and tone mapping [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2018, 30(7): 1305-1312.
- 宋瑞霞, 李达, 余建德. DT-CWT 和色调映射相结合的低照度图像增强算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(7): 1305-1312.
- [8] Yang A P, Zhao M Q, Song C Y, et al. Low-light image enhancement based on tone mapping and dark channel fusion [J]. Journal of Tianjin University, 2018, 51(7): 768-776.  
杨爱萍, 赵美琪, 宋曹春洋, 等. 基于色调映射和暗通道融合的弱光图像增强[J]. 天津大学学报, 2018, 51(7): 768-776.
- [9] Yang M, Tan Z F, Cai L, et al. Illumination compensation for face images based on anisotropic retinex [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(12): 121007.  
杨梅, 谭泽富, 蔡黎, 等. 基于各向异性 Retinex 的人脸图像光照补偿[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 121007.
- [10] Zhang J, Zhou P C, Zhang Q. Low-light image enhancement based on iterative multi-scale guided filter retinex [J]. Journal of Graphics, 2018, 39(1): 1-11.  
张杰, 周浦城, 张谦. 基于迭代多尺度引导滤波 Retinex 的低照度图像增强 [J]. 图学学报, 2018, 39(1): 1-11.
- [11] Guo X J. LIME: a method for low-light Image enhancement [EB/OL]. (2016-05-17) [2019-09-01]. <https://arxiv.org/abs/1605.05034>.
- [12] Xu L, Yan Q, Xia Y, et al. Structure extraction from texture via relative total variation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(6): 1-10.
- [13] Guo X J, Li Y, Ling H B. LIME: low-light image enhancement via illumination map estimation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(2): 982-993.
- [14] Dabov K, Foi A, Katkovnik V, et al. Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(8): 2080-2095.
- [15] Li M D, Liu J Y, Yang W H, et al. Structure-revealing low-light image enhancement via robust retinex model [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 27(6): 2828-2841.
- [16] Buchsbaum G. A spatial processor model for object colour perception [J]. Journal of the Franklin Institute, 1980, 310(1): 1-26.
- [17] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 35(6): 1397-1409.

- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Narasimhan S G, Nayar S K. Contrast restoration of weather degraded images[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(6): 713-724.
- [21] Meng G F, Wang Y, Duan J Y, et al. Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization [C] // 2013 IEEE International Conference on Computer Vision, December 1-8, 2013, Sydney, Australia. *IEEE*, 2013: 617-624.
- [22] Cai B L, Xu X M, Jia K, et al. DehazeNet: an end-to-end system for single image haze removal [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, 25(11): 5187-5198.
- [23] Zhang W H, Li G, Ying Z Q. A new underwater image enhancing method via color correction and illumination adjustment [C] // 2017 IEEE Visual Communications and Image Processing (VCIP), December 10-13, 2017, St. Petersburg, FL. *IEEE*, 2017: 1-4.
- [24] Panetta K, Gao C, Agaian S. Human-visual-system-inspired underwater image quality measures [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2016, 41(3): 541-551.
- [25] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.