

基于亮通道色彩补偿与融合的水下图像增强

代成刚^{1,2,3}, 林明星^{1,2,3*}, 王震^{1,2,3}, 张东⁴, 管志光⁵

¹ 山东大学机械工程学院, 山东 济南 250061;

² 山东大学机械工程学院机械基础实验教学中心, 山东 济南 250061;

³ 山东大学机械工程学院高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东 济南 250061;

⁴ 山东省科学院自动化研究所, 山东 济南 250013;

⁵ 山东交通学院工程机械学院, 山东 济南 250023

摘要 光在水中传播时受水的吸收作用和水中微粒的散射作用而发生衰减;因水的浊度变化,且水下拍摄时景深不一,导致水下获取的图像雾化程度和色彩偏差不同。传统的去雾算法用于处理这些模糊程度和色差多变的图像时效果欠佳。针对该问题,提出基于亮通道色彩补偿与融合的水下图像增强算法。首先,基于亮通道对原图像进行色彩补偿,获得色彩补偿的图像;再对色彩补偿的图像进行自适应对比度拉伸获得对比度高的清晰图像;最后采用多尺度融合策略对色彩补偿后的图像及对比度拉伸后的图像进行融合。结果表明,本文算法可广泛应用于多种水下降质图像,且在任何先验信息的条件下,能有效提高水下图像对比度和平衡图像色彩。

关键词 图像处理; 水下图像增强; 图像融合; 亮通道; 色彩补偿

中图分类号 TN911.73

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1110003

Color Compensation Based on Bright Channel and Fusion for Underwater Image Enhancement

Dai Chenggang^{1,2,3}, Lin Mingxing^{1,2,3*}, Wang Zhen^{1,2,3}, Zhang Dong⁴, Guan Zhiguang⁵

¹ School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China;

² National Demonstration Center for Experimental Mechanical Engineering, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China;

³ Key Laboratory of High-efficiency and Clean Mechanical Manufacture of Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China;

⁴ Institute of Automation Shandong Academy of Sciences, Jinan, Shandong 250013, China;

⁵ School of Construction Machinery, Shandong Jiaotong University, Jinan, Shandong 250023, China

Abstract Light is attenuated in underwater environments owing to the scattering and absorption effects. Because of the changes in water turbidity and different depths of the fields in underwater photography, the level of fuzziness and color deviation of the images captured underwater is different. Traditional defogging algorithms appear to have limited effectiveness in the case of these images with varying degrees of fuzziness and color deviation. Therefore, the color compensation based on the bright channel and the image fusion method for underwater image enhancement is proposed to resolve this problem. First, in order to obtain a color-compensated version of the original image, the color compensation based on the bright channel is performed on the original image. This color-compensated image is then subjected to adaptive contrast stretching to obtain a clear image with high contrast. Finally, the multiscale fusion strategy is adopted to fuse the color-corrected and contrast-stretched images. Experimental result shows that the proposed algorithm can be employed in a wide range of applications dealing with multiple underwater degraded images. Furthermore, the proposed method can effectively improve underwater image contrast and balance image color without any prior information.

Key words image processing; underwater image enhancement; image fusion; bright channel; color compensation

OCIS codes 100.2000; 010.7340; 100.2980; 330.1690

收稿日期: 2018-03-29; 修回日期: 2018-05-04; 录用日期: 2018-06-13

基金项目: 山东省重点研发计划(产业关键技术)(2016CYJS02A01)

* E-mail: mxlin@sdu.edu.cn

1 引言

海洋蕴含着丰富的自然资源。随着陆地资源的日益缺乏,海洋渐渐成为沿海国家争夺的焦点。水下探测技术对海洋资源探索、海洋环境监测、海洋军事应用等具有重要意义。目前,光学探测和声呐探测是水下探测的两种主要手段。对比声呐图像,光学图像的分辨率高,包含的视觉感知信息丰富,故基于光视觉的探测技术应用于水下近距离作业具有声呐探测无法代替的优势。但光在水中传播时,水介质及水中微粒会对光线分别产生吸收与散射作用。吸收作用导致水下拍摄的图像颜色失真;散射作用导致水下获取的图像雾化^[1]。因此,水下获取的图像存在模糊、对比度低、色彩不均等缺陷,这类降质的图像对后续的目标分割和特征提取造成巨大影响。

水下图像清晰化方法可分为图像复原方法和图像增强方法^[2]。图像复原方法的原理是基于水下图像退化模型,通过逆求解水下成像模型对图像进行恢复。图像增强方法是用定量的客观指标来评价图像处理结果,算法过程中不过多考虑水下成像模型。

图像复原方面,受 He 等^[3]的影响,许多研究人员利用暗通道先验方法对水下图像进行处理。Li 等^[4]基于水下光学成像模型,通过构建图像最小信息丢失原则对水下图像进行恢复,并采用直方图先验对恢复后的图像进行对比度增强。李黎等^[2]采用改进的水下暗原色先验算法去除后向散射光,再通过白平衡算法对增强后的水下图像进行颜色校正。倪锦艳等^[5]通过设置阈值参数对得到的透射率图进行自适应调节,并通过调整图像估计灰度轴的位置还原图像的颜色,达到提高图像清晰度和颜色校正的目的。上述方法在一定程度上改善了水下图像质量,但仅适用于特定场合,如适用于处理后向散射严重的水下图像,针对后向散射轻微的水下图像改善效果不很明显,实际应用范围有限。

图像增强方法主要包括:基于直方图的水下图像增强算法、基于 Retinex 的水下图像增强算法、基于滤波和信号处理的水下图像增强算法和基于融合的水下图像增强算法。Singh 等^[6]提出基于曝光的递归直方图均衡化图像增强方法,该方法可获得较低的均方误差和较高的峰值信噪比,但未能有效解决颜色失真问题。Zhang 等^[7]提出扩展多尺度 Retinex 的水下图像增强算法,将带色彩恢复的多尺度视网膜增强算法(MSRRCR)扩展到 CIELAB 颜色空间,成功抑制图像增强过程中产生的光晕现象,但

该方法参数过多,难以实现水下图像实时处理。沈瑜等^[8]结合 Bilateral 双边滤波器与 Tetrolet 变换,提出了一种 $l_{\alpha\beta}$ 色彩空间水下图像清晰化算法,该算法可实现水下图像清晰化处理,但由于未充分考虑水体对光的选择性吸收衰减,导致处理后的图像仍有色偏。

基于融合的水下图像增强算法应用范围广,可有效解决水下图像模糊、对比度低、颜色失真等多种问题^[9]。本文结合水介质对光线的衰减特性,直接从分析图像性质入手,提出基于亮通道色彩补偿与融合的水下图像增强算法:首先提取水下图像亮通道,并基于亮通道对水下图像进行色彩补偿,获得色彩恢复的图像;再引入图像的均值和标准差,对色彩恢复后的图像进行自适应对比度拉伸,获得高对比度的清晰图像;最后分别求两幅图像的权重,根据权重对色彩恢复后的图像与对比度拉伸后的图像进行融合。为避免边缘突变在输出图像中产生伪影,采用多尺度图像融合策略。结果表明,本文方法可广泛应用于多种水下降质图像,能有效地从单幅图像中提高水下图像对比度和平衡水下图像色彩,且无需任何先验信息,无需通过理论模型估计水体衰减参数。

2 算法原理

从图像融合的角度对单幅水下失真图像应用两种不同的技术进行处理,得到色彩恢复的图像和对比度拉伸的图像,并分别求取两幅图像的融合权重进行图像融合,得到高质量的图像。

2.1 算法流程

算法流程如图 1 所示。首先基于亮通道对水下图像进行色彩恢复,获得色彩恢复的图像 Input 1;再对 Input 1 进行自适应对比度拉伸,获得对比度拉伸的图像 Input 2;然后分别计算两幅图像的色彩权重、饱和度权重和亮度权重,并对两幅图像的 3 个权重进行归一化处理,获得归一化权重 W_1 、 W_2 ;最后根据权重 W_1 、 W_2 对 Input 1 和 Input 2 进行融合。为避免边缘突变在输出图像中产生光晕,采用多尺度融合策略。

2.2 基于亮通道的色彩补偿

光在水中的衰减符合 Lambert-Beer 定律,即光束的衰减与传输距离和衰减系数呈指数关系。水对蓝色光谱附近的光衰减最小,其次是绿光,对红光衰减最大^[10-11]。光在水中的衰减情况如图 2 所示。由于水对不同波长的光具有不同的衰减系数,故水下图像大多呈蓝色或绿色。

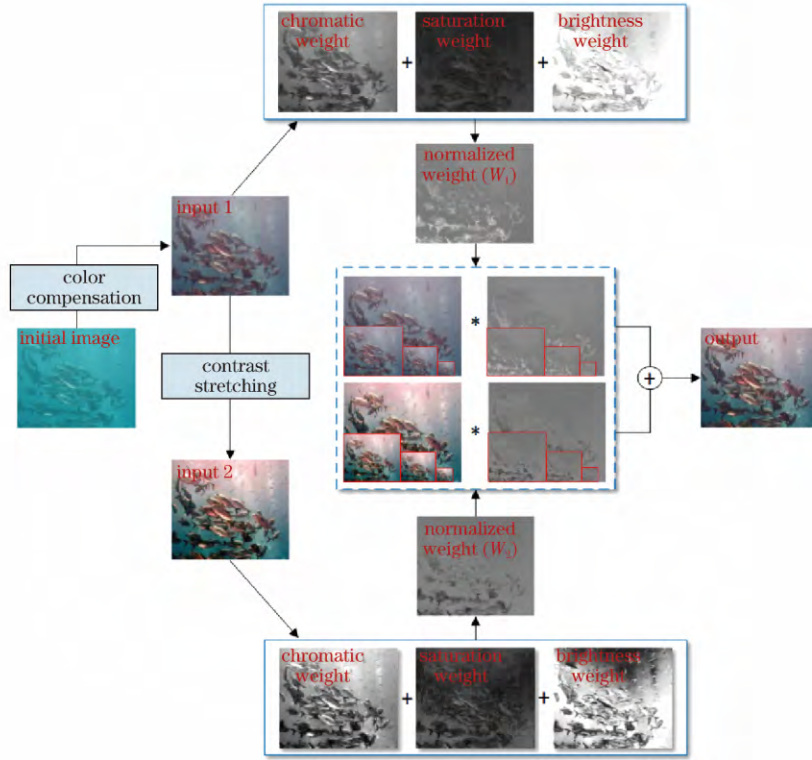


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of the proposed method

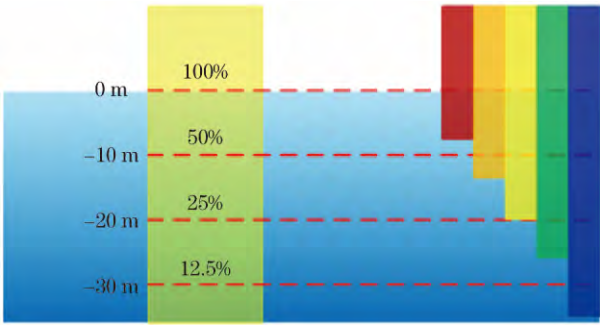


图 2 水下光线吸收示意图

Fig. 2 Schematic of underwater light absorption

根据 Jaffe-McGlamery 水下光学成像模型,相机接收到的光由直接分量、前向散射分量和后向散射分量组成,其简化模型^[2]为

$$I_C(x, y) = J_C(x, y) \exp[-n(\lambda)d(x)] + A_\infty \{1 - \exp[-n(\lambda)d(x)]\}, \quad (1)$$

式中 $I_C(x, y)$ 为衰减后的图像, $J_C(x, y)$ 为真实图像, $n(\lambda)$ 为与波长相关的衰减系数, $d(x)$ 为成像点到相机的距离, A_∞ 为背景光, $C \in \{R, G, B\}$ 表示图像红、绿、蓝三通道, 定义 $\exp[-n(\lambda)d(x)]$ 为透射率 $t_C(x)$, 并对等式两边取邻域内最大值和红、绿、蓝三通道的最大值, 以获得图像的亮通道, 即

$$\begin{aligned} \max_{C \in \{R, G, B\}} \max_{\Omega(x, y)} I_C(x, y) = \\ \max_{C \in \{R, G, B\}} \max_{\Omega(x, y)} \{J_C(x, y)t_C(x, y) + A_\infty[1 - t_C(x, y)]\}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $\max_{\Omega(x, y)} \max_{C \in \{R, G, B\}} I_C(x, y)$ 为亮通道图, 用 $I_L(x, y)$ 表示。等式两边减去 $I_C(x, y)$, 有:

$$\begin{aligned} I_L(x, y) - I_C(x, y) = \\ \max_{C \in \{R, G, B\}} \max_{\Omega(x, y)} \{J_C(x, y)t_C(x, y) + A_\infty[1 - t_C(x, y)]\} - \\ \{J_C(x, y)t_C(x, y) + A_\infty[1 - t_C(x, y)]\}. \end{aligned} \quad (3)$$

因 $A_\infty[1 - t_C(x, y)] > 0$, 且同一像素点上蓝通道透射率 $t_B(x, y)$ 最大, 故有:

$$\begin{aligned} I_L(x, y) - I_C(x, y) \geq \\ \max_{C \in \{R, G, B\}} \max_{\Omega(x, y)} [J_C(x, y)t_C(x, y)] - \\ [J_C(x, y)t_C(x, y)] \geq \\ J_C(x, y)t_B(x, y) - J_C(x, y)t_C(x, y), \end{aligned} \quad (4)$$

(4) 式简化为

$$\begin{aligned} I_L(x, y) - I_C(x, y) \geq \\ J_C(x, y)[t_B(x, y) - t_C(x, y)] \geq 0. \end{aligned} \quad (5)$$

由(5)式可知, 对于固定拍照场景, $J_C(x, y)$ 为定值, 当 C 取不同色彩通道时, $t_B(x, y) - t_C(x, y)$ 越大, 表明拍照景深 $d(x)$ 越大, 色彩衰减程度越大, 则该通道所需补偿值越大, 本文采用的补偿因子

$I_L(x, y) - I_C(x, y)$ 也随之越大且不为负值, 故基于亮通道补偿不会造成色彩信息丢失。虽然水下图像的蓝色通道衰减程度较小, 但若基于蓝色通道进行补偿, 则 $I_B(x, y) - I_C(x, y)$ 可能为负值, 会造成色彩信息丢失, 使补偿后的图像亮度偏低。若基于暗通道进行补偿, 则导致色彩补偿值皆为负值, 虽可平衡图像色彩, 但会导致图像整体亮度过低, 故提出以亮通道为基准对各通道色彩进行补偿。亮通道获取方法为

$$I_L(x, y) = \max_{C \in \{R, G, B\}} [\max_{\Omega(x, y)} I_C(x, y)], \quad (6)$$

式中 $\max_{C \in \{R, G, B\}} I_C(x, y)$ 为获取图像 $I_C(x, y)$ 中各像素点处红、绿、蓝通道的最大值, $\max()$ 为最大值滤波, 滤波模板 $\Omega(x, y)$ 尺寸取 15。

根据灰世界白平衡假设, 图像在衰减前红、绿、蓝三通道灰度值具有相同的均值^[9], 故图像红、绿、蓝三通道的补偿值应与亮通道平均值和红、绿、蓝各通道平均值之差成正比。因此, 对补偿项乘以亮通道均值与红、绿、蓝通道均值之差 $(\bar{I}_L - \bar{I}_C)$ 。

获取水下图像时, 因景深不一致, 图像各部分衰减程度不一致。为避免补偿过程中, 红、绿、蓝三通

道的局部区域过饱和, 色彩补偿时应对红、绿、蓝三通道中灰度值较小的像素进行补偿, 故对补偿项乘上 $[1 - I_C(x, y)]$ 因子。

基于以上分析, 提出基于亮通道的色彩恢复算法, 即:

$$I_{BC}(x, y) = N \{ \lfloor 255 \{ \eta (\bar{I}_L - \bar{I}_C) [1 - I_C(x, y)] \times I_C(x, y) + I_C(x, y) \} \rfloor \}, \quad C \in \{R, G, B\}, \quad (7)$$

式中参与计算的所有图像的像素值均除以 255 缩小到 $[0 \quad 1]$ 区间, $I_{BC}(x, y)$ 为色彩补偿后的图像, $I_C(x, y)$ 为衰减后的图像。经统计, 自然曝光的图像其亮度均值约为 125, η 可调节补偿后的图像亮度, $\eta = 3.3$ 可使补偿后的图像亮度均值满足上述规律, 故 $\eta = 3.3, \lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整操作, $N(\cdot)$ 表示将像素值线性拉伸至 $[0 \quad 255]$ 区间。 \bar{I}_C 为衰减后的图像红、绿、蓝各通道图像均值, \bar{I}_L 为亮通道图像均值。

基于亮通道色彩补偿后的图像如图 3 所示。对比色彩补偿前后的伪色彩图可知, 采用本文方法进行色彩补偿后, 图像的红、绿、蓝各通道色彩更均衡。

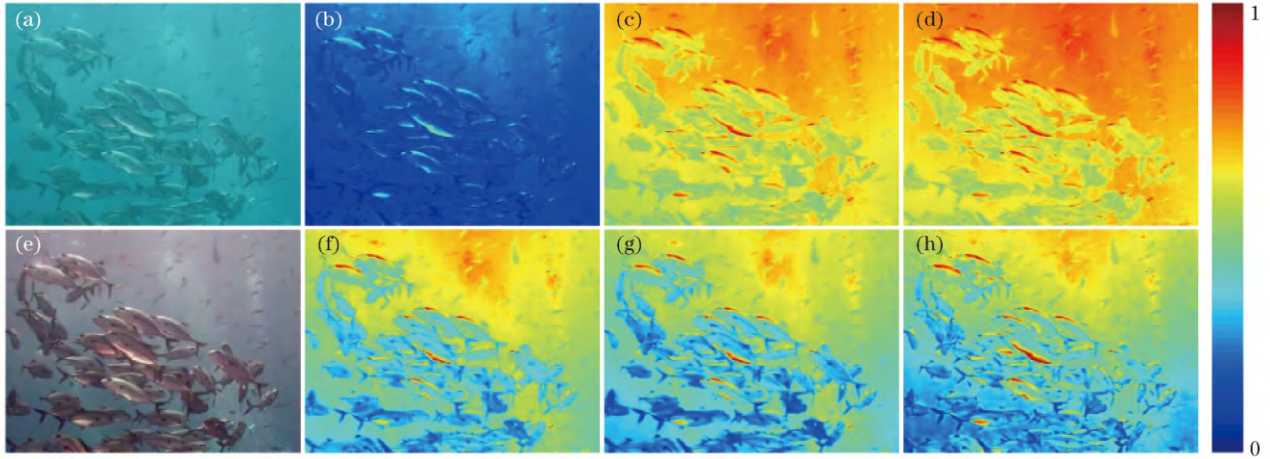


图 3 色彩补偿前后对比。(a)原图;(b)原图红通道;(c)原图绿通道;(d)原图蓝通道;(e)基于亮通道色彩补偿后图像;(f)色彩补偿后红通道;(g)色彩补偿后绿通道;(h)色彩补偿后蓝通道

Fig. 3 Contrast color-compensated image and original image. (a) Original image; (b) red channel; (c) green channel; (d) blue channel; (e) color compensated image based on bright channel; (f) color compensated red channel; (g) color compensated green channel; (h) color compensated blue channel

2.3 自适应对比度拉伸

除吸收效应外, 水介质中的悬浮颗粒还对入射光线产生散射效应。散射包括前向散射和后向散射, 散射效应导致水下图像雾化和模糊^[12]。水下光学成像如图 4 所示, 前向散射是目标的反射光到达相机镜头前遇到水中悬浮颗粒发生小角度随机散射而引起的光学效应^[13]; 后向散射是非目标反射光到达

相机镜头前遇到水中悬浮颗粒发生小角度随机散射而引起的光学效应, 表示为背景光的指数衰减^[14-15]。

因水的浊度不同, 光的散射程度不同, 导致水下获取的图像模糊程度不同。研究发现, 模糊程度大的图像标准差小, 需进行较大程度的对比度拉伸, 反之亦然。故引入图像标准差和均值, 对色彩补偿后的图像进行自适应对比度拉伸, 对比度拉伸程度取

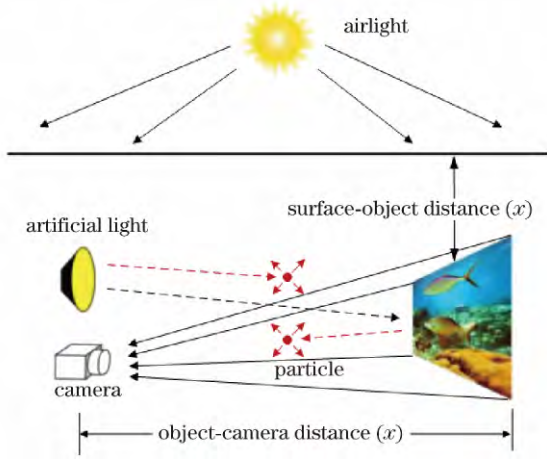


图 4 水下光学成像示意图

Fig. 4 Schematic of underwater optical imaging

决于图像标准差。为使输出图像视觉效果自然,使拉伸后的图像均值保持在 0.5。算法如下:

$$\begin{cases} I_{out}(x, y) = \left\lfloor \left[\frac{I_{NC}(x, y) - \bar{R}_{NC}}{V_{NC}} + 0.5 \right] \times 255 \right\rfloor \\ \text{if } I_{out}(x, y) \leq 0, I_{out}(x, y) = 0 \\ \text{if } I_{out}(x, y) \geq 255, I_{out}(x, y) = 255 \\ I_{Bout}(x, y) = B[I_{out}(x, y)] \end{cases}, \quad (8)$$

式中 $I_{NC}(x, y)$ 为 (7) 式中 $\eta(\bar{I}_L - \bar{I}_C)[1 - I_C(x, y)]I_C(x, y) + I_C(x, y)$, $I_{out}(x, y)$ 为对比度

拉伸后的图像, \bar{R}_{NC} 和 V_{NC} 分别为 $I_{NC}(x, y)$ 的均值和标准差, $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整数操作, 经 (8) 式进行对比度拉伸后的像素值可能小于 0 或大于 255, 采用 $[0 \ 255]$ 阈值进行输出值限制。 $I_{Bout}(x, y)$ 为经双边滤波后的图像, $B[\cdot]$ 为对图像进行双边滤波。双边滤波在滤除噪声的同时可有效保持图像边缘信息。采用双边滤波对处理后的图像进行滤波, 以减少对比度拉伸过程中的噪声。对比度拉伸后的图像如图 5 所示。

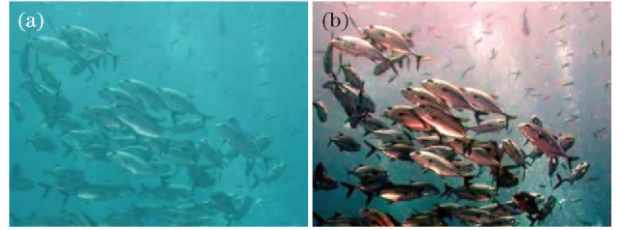


图 5 自适应对比度拉伸后的图像。

(a) 原图; (b) 对比度拉伸后的图像

Fig. 5 Adaptive contrast-stretched image.

(a) Original image; (b) contrast-stretched image

2.4 计算权重

2.4.1 饱和度权重

饱和度权重可调整输入图像的高度饱和区域, 使融合后的图像饱和度均匀^[9]。饱和度权重计算方法如下:

$$W_{S,k}(x, y) = \sqrt{\{[R_k(x, y) - L_k(x, y)]^2 + [G_k(x, y) - L_k(x, y)]^2 + [B_k(x, y) - L_k(x, y)]^2\} / 3}, \quad (9)$$

式中 k 为第 k 张求权重的图像, $W_{S,k}(x, y)$ 为饱和度权重图, $L_k(x, y)$ 为输入图像灰度图, $R_k(x, y)$ 、 $G_k(x, y)$ 、 $B_k(x, y)$ 分别为输入图像的红、绿、蓝三通道图像。

2.4.2 色彩权重

色彩权重用于调节输入图像的色彩在输出图像中的比率。该权重的计算是依据颜色滤波公式^[16], 即

$$W_{C,k}(x, y) = L_k(x, y) \{1 + \cos[\alpha H_k(x, y) + \phi] S_k(x, y)\}, \quad (10)$$

式中 $W_{C,k}(x, y)$ 为色彩权重, $L_k(x, y)$ 为输入图像灰度图, $S_k(x, y)$ 为输入图像饱和度, $H_k(x, y)$ 为输入图像的色调, 根据文献^[16]的结论, $\phi = 250^\circ$, $\alpha = 2$ 。

2.4.3 亮度权重

亮度权重是为亮度适中的像素点分配较大的权重, 对过亮或过暗的像素点分配较小的权重。统计

大量自然曝光图像的亮度均值及标准差, 将像素值映射到 $[0 \ 1]$ 区间后, 亮度均值的平均数约为 0.5, 标准差的均值约为 0.25^[17]。基于这一统计规律, 亮度权重计算方法为

$$W_{B,k}(x, y) = \exp\left\{-\frac{[L_k(x, y) - 0.5]^2}{2 \times 0.25^2}\right\}, \quad (11)$$

式中 $W_{B,k}(x, y)$ 为亮度权重图, $L_k(x, y)$ 为图像灰度图。

2.4.4 权重归一化

对饱和度权重、色彩权重、亮度权重进行归一化处理, 计算方法如下

$$\bar{W}_k(x, y) = \frac{W_k(x, y)}{\sum_k W_k(x, y)}, \quad (12)$$

$$W_k(x, y) = W_{S,k}(x, y) + W_{C,k}(x, y) + W_{B,k}(x, y), \quad (13)$$

式中 $\bar{W}_k(x, y)$ 为归一化的权重。色彩补偿后的图像及对比度拉伸后的图像标准化权重图如图 6 所示。

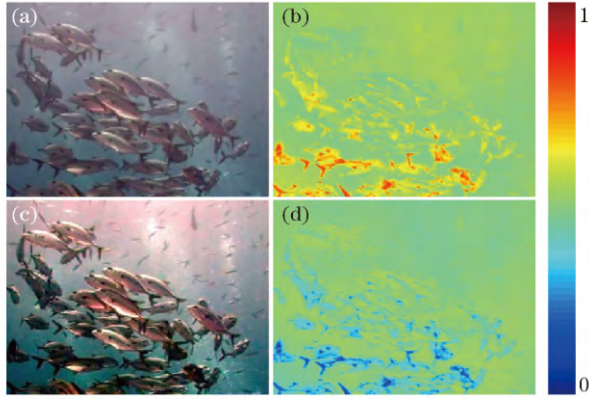


图 6 权重图。(a)色彩补偿后图像 input1;(b) input1 标准化权重;(c)对比度拉伸后图像 input2;(d) input2 标准化权重

Fig. 6 Weight maps. (a) Color-compensated image (input1); (b) normalized weight maps for input1; (c) contrast-stretched image (input2); (d) normalized weight maps for input2

2.5 图像融合

为避免单尺度融合时在输出图像中产生光晕,本文采用多尺度融合技术,其基础是 Burt 和 Adelson 最初提出的拉普拉斯金字塔,目前已成为成熟的图像融合技术^[18]。具体方法如下:1)基于拉普拉斯算子,将各输入图像分解为多尺度的拉普拉斯金字塔;2)基于高斯滤波算子,将各权重图分解为多尺度的高斯金字塔;3)对拉普拉斯金字塔和高斯金字塔在各尺度上进行融合;4)将金字塔还原为输出图像。多尺度融合计算如下:

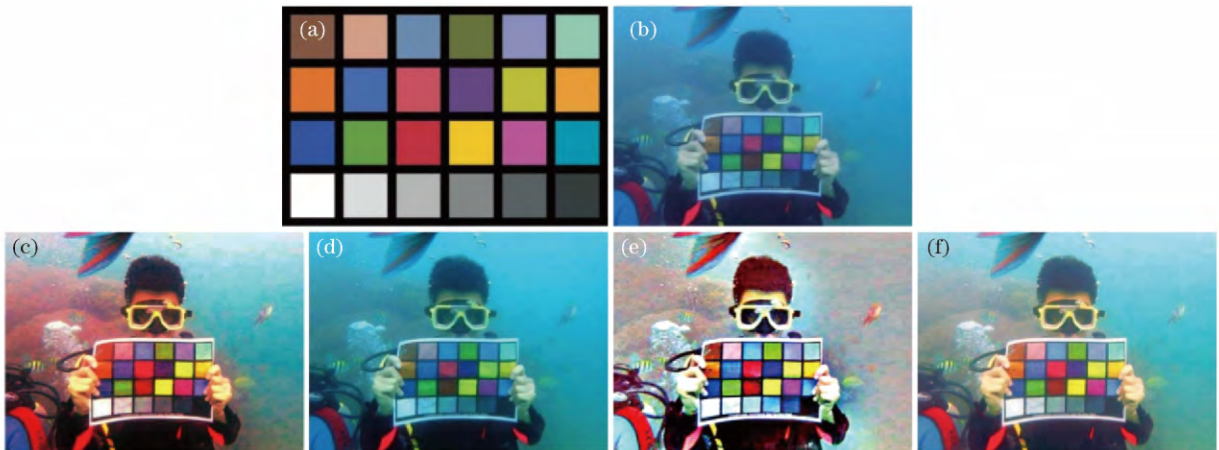


图 7 颜色恢复测试。(a)标准颜色卡;(b)原图;(c) CALHE 处理结果;(d) DCP 处理结果;
(e) MSRCR 处理结果;(f)本文算法处理结果

Fig. 7 Color recovery test. (a) Standard color checker; (b) original image; (c) CALHE method; (d) DCP method; (e) MSRCR method; (f) proposed method

3.2 视觉效果对比

使用 8 张图片,分两组实验,第一组原图像色彩

$$F_l(x, y) = \sum_k L_l[I_k(x, y)]G_l[\bar{W}_k(x, y)], \quad (14)$$

式中 $F_l(x, y)$ 为输出图像金字塔, l 为金字塔的层数(本文取 5 层), k 为进行融合的图像数量, $L_l[I_k(x, y)]$ 表示将输入图像进行拉普拉斯金字塔分解, $G_l[\bar{W}_k(x, y)]$ 表示对标准化权重图进行高斯金字塔分解。最后对输出图像金字塔进行向上采样操作,得到最终输出图像,即

$$I_{\text{final}}(x, y) = \sum_l U[F_l(x, y)], \quad (15)$$

式中 $I_{\text{final}}(x, y)$ 为最终输出图像, $U[F_l(x, y)]$ 表示对图像金字塔进行向上采样操作。

3 结果与讨论

为验证本文算法的有效性,分别进行颜色恢复实验、视觉效果对比和图像质量评价。用于对比的算法包括:限制对比度自适应直方图均衡化(CALHE)算法、暗通道先验去雾(DCP)算法和带色彩恢复的多尺度视网膜增强(MSRCR)算法。

3.1 色彩恢复实验

色彩恢复结果如图 7 所示。由图 7 可知,采用 CALHE 算法和 MSRCR 算法处理后的图像对比度增强,但 CALHE 算法处理后的图像颜色偏红,MSRCR 算法处理后的图像边沿处存在大量光晕。DCP 算法处理后的图像颜色偏蓝,色彩恢复效果不佳。对比颜色测试卡可知,采用本文算法处理后的图像色彩均恢复正确。

失真不同,如图 8 所示;第二组原图像模糊程度不同,如图 9 所示。



图 8 色彩失真图片测试。(a)原图;(b) CALHE 处理结果;(c) DCP 处理结果;
(d) MSRCR 处理结果;(e)本文算法处理结果

Fig. 8 Color distortion image test. (a) Original image ; (b) CALHE method ; (c) DCP method ;
(d) MSRCR method ; (e) proposed method

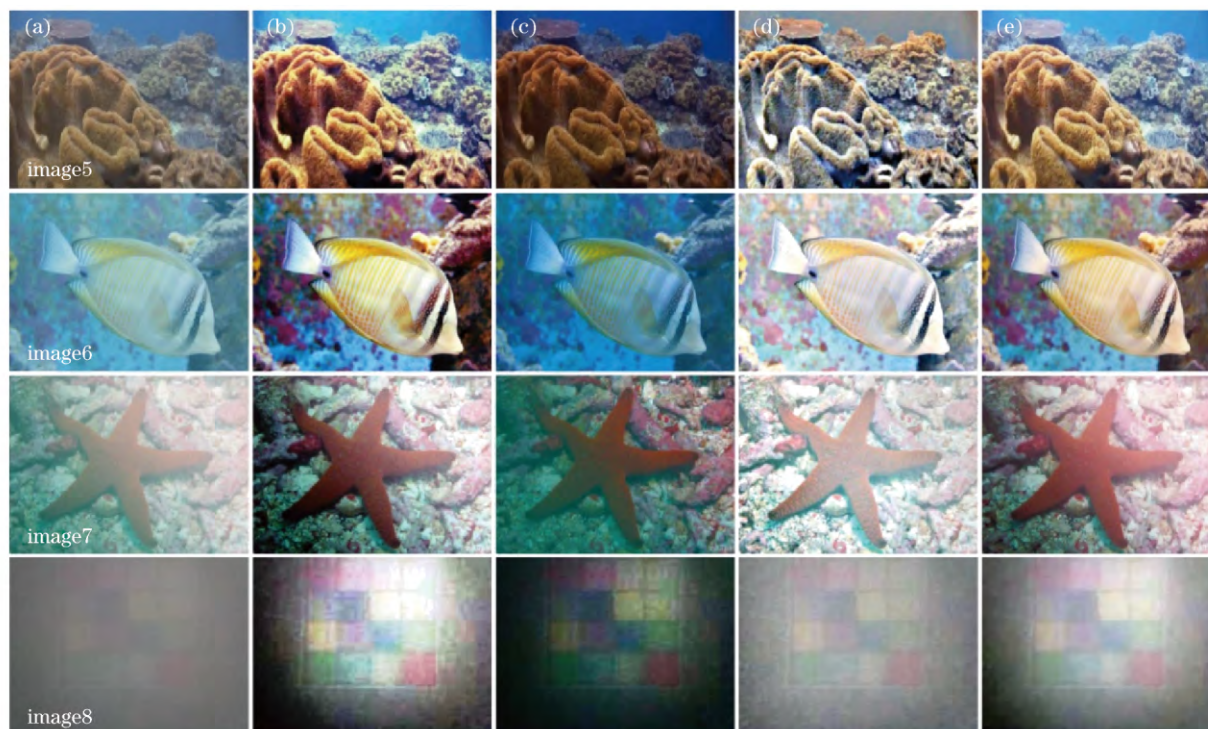


图 9 雾化图片测试。(a)原图像组;(b) CALHE 处理结果;(c) DCP 处理结果;
(d) MSRCR 处理结果;(e)本文算法处理结果

Fig. 9 Hazed image test. (a) Group of original images ; (b) CALHE method ; (c) DCP method ;
(d) MSRCR method ; (e) proposed method

第一组测试结果显示,对于蓝色失真和橙色失真的图像,经 CALHE 处理后仍存在颜色失真,且出现局部过暗或过亮。DCP 因缺乏色彩补偿,处理后的图像还存在色差,对各种色彩失真的图像均失效。MSRCR 人为调节参数多,同一套参数可恢复橙色失真图像,但处理其他颜色失真图像时,因色彩补偿和增益不当,导致图像呈灰白色。本文算法基于亮通道对色彩进行补偿,不仅考虑红、绿、蓝各通道均值,还对图像局部色彩进行修正,故能有效恢复多种色彩失真图像。

第二组测试结果显示,对模糊程度低的图像,经 CALHE 处理后对比度提升,图片清晰;对雾化严重的图像, CALHE 处理后出现局部过亮或过暗。DCP 对雾化程度不同的图像均有效,但处理后亮度偏低。经 MSRCR 处理后,不同雾化程度的图像均

出现灰白,该算法失效。本文算法基于亮通道进行色彩补偿后,根据图像均值和方差进行自适应对比度拉伸,再通过双边滤波去除噪声,故对不同雾化程度的图像均有效。

3.3 图像质量评价

采用传统的图像质量评价指标:均方误差(MSE)和峰值信噪比(PSNR)对各种算法的处理结果进行评价,较低的 MSE 和较高的 PSNR 值表示算法引入少量的噪声和保留更多有价值的图像信息。参与评价的图像为图 8 和图 9 两组图像,评价结果如表 1 所示。由图 8 可知,Image1、Image2 经 DCP 处理后仍存较大的蓝色和绿色背景色差,该色差与原图相近,对 MSE 和 PSNR 计算结果造成影响。由表 1 数据表明,本文算法处理后的图像引入噪声小,保留有价值信息多,算法处理效果均优于其他算法。

表 1 水下图像质量评价

Table 1 Quality evaluation of underwater images

Image set	CLAHE		DCP		MSRCR		Proposed method	
	MSE	PSNR	MSE	PSNR	MSE	PSNR	MSE	PSNR
Image1	17334.7	5.742	1286.1	17.038	30025.7	3.356	13756.7	6.746
Image2	25656.7	4.039	131.2	26.950	40382.6	2.069	10960.7	7.732
Image3	10310.8	7.998	10852.3	7.776	5125.3	11.034	5098.9	11.189
Image4	11414.6	7.556	11241.3	7.623	7356.3	9.464	2926.18	13.468
Image5	6096.6	10.280	5987.6	10.358	8335.1	8.922	3926.3	12.191
Image6	9868.3	8.185	6853.7	9.772	9747.0	8.242	5490.1	10.735
Image7	7516.7	9.371	17752.8	5.638	7423.7	9.425	3174.0	13.115

4 应用测试

图像处理是为进一步分析和应用提供高质量图像。为验证本文算法处理后的图像的应用效果,设置图像处理前后应用对比实验。采用加速稳健特征(SURF)特征匹配测试,在相同特征相似度阈值条件下,对比图像处理前后的特征点匹配数目,测试数据如表 2 所示,应用测试效果如图 10 所示。将原图旋转后与原图像进行 SURF 特征匹配,在相同的阈值条件下,原图仅能正确匹配少量特征点,经本文算法处理后的图像正确匹配特征点数量增加。应用测试结果表明,本文算法处理后的图像在后续的特征提取过程中应用效果良好。

5 结 论

水下拍摄的图像不仅存在对比度低和颜色失真等问题,而且由于水油度的变化以及拍摄景深的变

表 2 原图像和增强后图像特征点匹配数量对比

Table 2 Number of feature points matching contrast in original images and images processed using our method

Image set	Original image	Proposed method
First group	4	28
Second group	8	19
Third group	6	56
Forth group	7	17

化,水下采集的图像还会出现模糊程度不同、色彩不均等现象。本文基于图像融合策略,提出一种水下图像增强算法。该算法无需计算水体环境参数,直接从原图像入手,基于亮通道对图像进行色彩补偿,不仅平衡图像的整体色彩也对局部色彩失真进行调整。同时,也针对水下图像模糊程度不同的问题提出自适应对比度拉伸方法,改善雾化程度不同的图像。最后采用多尺度融合策略将图像融合,以获得高质量的水下增强图像。结果表明,本文算法可适

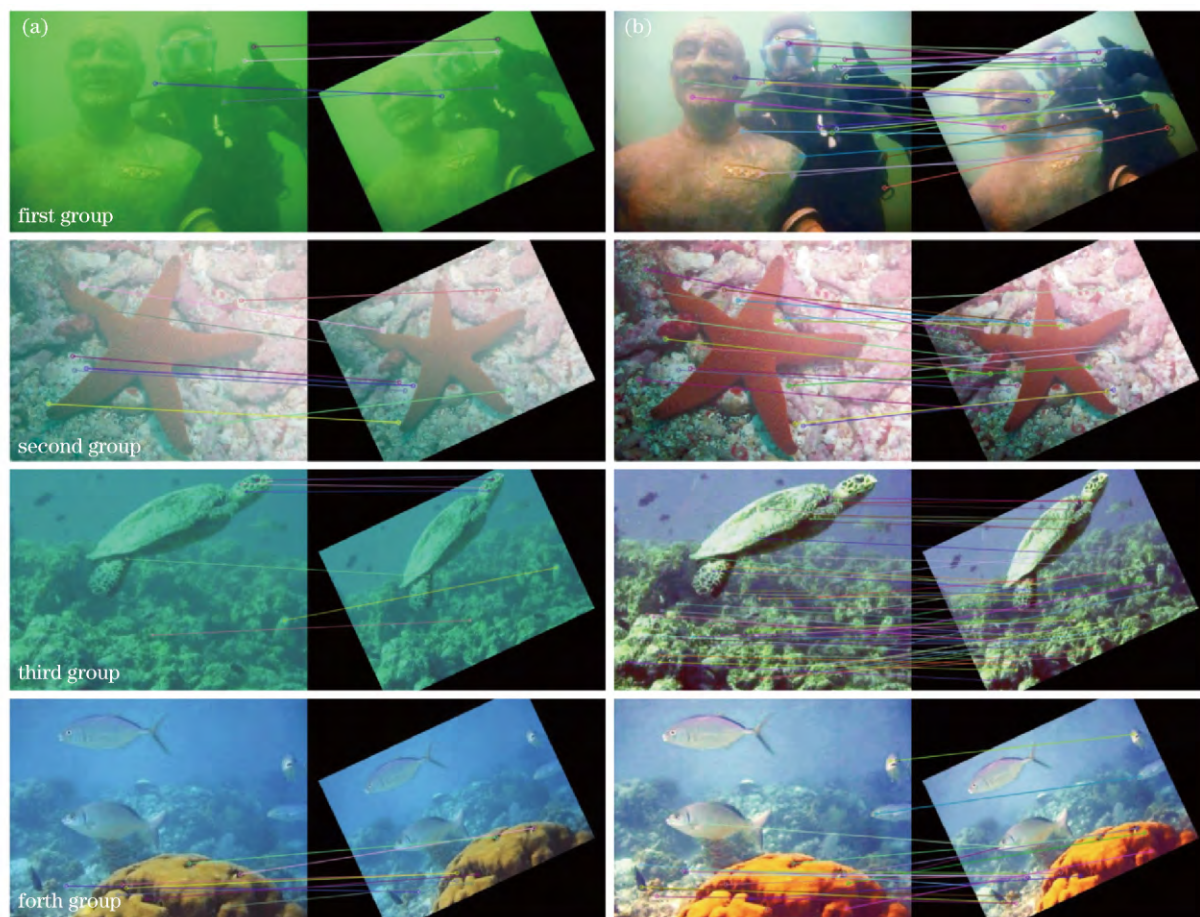


图 10 应用测试。(a)原图特征匹配;(b)本文算法处理后图像特征匹配

Fig. 10 Application test. (a) Feature point matching in the original image; (b) feature point matching in image processed using the proposed method

应多种水下降质图像,能有效恢复水下图像色彩及提高水下图像对比度。因基于亮通道对图像色彩进行补偿是将亮通道均值作为色彩衰减前的估计值对红、绿、蓝三通道进行色彩补偿,故可能使极少数图像局部亮度偏大;且本文方法通过引入整幅图像的标准差对图像进行对比度拉伸,为进一步提高图像质量,后续将引入图像局部标准差对图像进行精细化地分块处理。

参 考 文 献

- [1] Wang N, Zheng H Y, Zheng B. Underwater image restoration via maximum attenuation identification[J]. IEEE Access, 2017, 5: 18941-18952.
 - [2] Li L, Wang H G, Liu X. Underwater image enhancement based on improved dark channel prior and color correction[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1211003.
- 李黎,王惠刚,刘星. 基于改进暗原色先验和颜色校正的水下图像增强[J]. 光学学报, 2017, 37(12):

1211003.

- [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] 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.
 - [5] 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): 011001.
- 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): 011001.
- [6] Singh K, Kapoor R, Sinha S K. Enhancement of low exposure images via recursive histogram equalization algorithms[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2015, 126(20): 2619-2625.

- [7] Zhang S, Wang T, Dong J Y, *et al.* Underwater image enhancement via extended multi-scale Retinex[J]. Neurocomputing, 2017, 245: 1-9.
- [8] Shen Y, Dang J W, Wang Y P, *et al.* A color underwater image clearness algorithm based on Tetrolet transform[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(9): 0910002.
沈瑜, 党建武, 王阳萍, 等. 基于 Tetrolet 变换的彩色水下图像清晰化算法[J]. 光学学报, 2017, 37(9): 0910002.
- [9] Ancuti C O, Ancuti C, Vleeschouwer C D, *et al.* Color balance and fusion for underwater image enhancement[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 27(1): 379-393.
- [10] 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.
- [11] Lu H M, Li Y J, Zhang L F, *et al.* Contrast enhancement for images in turbid water[J]. Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision, 2015, 32(5): 886-893.
- [12] 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.
- [13] Jaffe J S. Underwater optical imaging: the past, the present, and the prospects[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2015, 40(3): 683-700.
- [14] 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.
- [15] Gao Y, Yun L J, Shi J S, *et al.* Enhancement dark channel algorithm of fog image based on the TV model[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(8): 0809001.
高银, 云利军, 石俊生, 等. 基于 TV 模型的暗原色理论雾天图像复原算法[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0809001.
- [16] Ancuti C O, Ancuti C, Bekaert P. Enhancing by saliency-guided decolorization[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2011, 257-264.
- [17] Fu X Y, Zeng D L, Huang Y, *et al.* A fusion-based enhancing method for weakly illuminated images[J]. Signal Processing, 2016, 129: 82-96.
- [18] Ancuti C O, Ancuti C. Single image dehazing by multi-scale fusion[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(8): 3271-3282.