



基于颜色补偿和颜色线模型的水下图像增强

梁秀满 赵治刚 刘振东 于海峰 姚欣哲

Enhancement of underwater images based on color compensation and color line model

LIANG Xiuman, ZHAO Zhigang, LIU Zhendong, YU Haifeng, YAO Xinzhe

引用本文:

梁秀满, 赵治刚, 刘振东, 等. 基于颜色补偿和颜色线模型的水下图像增强[J]. 应用光学, 2025, 46(5): 1034–1043. DOI: 10.5768/JAO202546.0502003

LIANG Xiuman, ZHAO Zhigang, LIU Zhendong, et al. Enhancement of underwater images based on color compensation and color line model[J]. *Journal of Applied Optics*, 2025, 46(5): 1034–1043. DOI: 10.5768/JAO202546.0502003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0502003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[双头增强与非均匀校正的水下图像增强算法](#)

Dual-head enhancement and non-uniform correction for underwater image enhancement algorithm

应用光学. 2024, 45(2): 354–364 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0202002>

[基于多尺度残差注意力网络的水下图像增强](#)

Underwater image enhancement based on multiscale residual attention networks

应用光学. 2024, 45(1): 89–98 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0102003>

[基于凸优化的傅里叶叠层成像技术研究](#)

Research on Fourier ptychography technology based on convex optimization

应用光学. 2021, 42(4): 651–655 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0402003>

[基于凸优化的无荧光光场介观三维重建方法](#)

Convex optimization-based mesoscopic 3D reconstruction method for fluorescence-free light fields

应用光学. 2024, 45(6): 1179–1188 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0602002>

[基于图像分割和局部亮度调整的微光图像颜色传递算法](#)

Low-light image color transfer algorithm based on image segmentation and local brightness adjustment

应用光学. 2020, 41(2): 309–317 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0202004>

[基于彩色偏振图像的HSV空间目标增强方法](#)

Target enhancement method in HSV color space based on color polarized image

应用光学. 2023, 44(3): 548–555 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0302002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 05-1034-10

引用格式: 梁秀满, 赵治刚, 刘振东, 等. 基于颜色补偿和颜色线模型的水下图像增强 [J]. 应用光学, 2025, 46(5): 1034-1043.

LIANG Xiuman, ZHAO Zhigang, LIU Zhendong, et al. Enhancement of underwater images based on color compensation and color line model[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 1034-1043.



在线阅读

基于颜色补偿和颜色线模型的水下图像增强

梁秀满, 赵治刚, 刘振东, 于海峰, 姚欣哲

(华北理工大学 电气工程学院, 河北 唐山 063210)

摘要: 针对水下光衰减和悬浮粒子导致的水下图像蓝绿色偏和雾化问题, 提出了一种基于颜色补偿和颜色线模型的水下图像增强算法。首先, 通过改进颜色补偿算法对图像的衰减通道进行判断和补偿, 以降低图像色偏程度并提高颜色线的拟合效果。其次, 结合信息量评价指标和迭代阈值策略实现图像背景分离, 以避免前景明亮物体的影响, 从而提高背景光估计的准确性。然后, 利用颜色线与背景光矢量构建了一种能够准确估计透射率的加速凸优化算法, 以提高图像的去雾效果。最后, 通过对颜色通道进行归一化处理得到没有色偏的无雾图像。增强后图像的平均峰值信噪比(PSNR)、水下彩色图像质量评价(UCIQE)、水下图像质量评价(UIQM)和彩色投射因子 K 分别达到25.36 dB、0.64、5.02和0.02。实验结果显示, 相比其他算法, 本文算法能更有效地解决水下图像的颜色失真和雾化现象。

关键词: 颜色补偿; 颜色线模型; 水下图像增强; 背景光估计; 凸优化

中图分类号: TN202; TP391

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0502003

Enhancement of underwater images based on color compensation and color line model

LIANG Xiuman, ZHAO Zhigang, LIU Zhendong, YU Haifeng, YAO Xinzhe

(College of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: Aiming to address the issues of color distortion and haziness in underwater images caused by underwater light attenuation and suspended particles, a color compensation and color line model-based underwater image enhancement algorithm was proposed. Firstly, by improving the color compensation algorithm to assess and compensate for the attenuation channels in the image, the degree of color deviation was reduced and the fitting effect of the color line was improved. Secondly, by combining information entropy evaluation metrics and iterative threshold strategies, image background separation was achieved to avoid the influence of bright foreground objects, thereby enhancing the accuracy of background light estimation. Subsequently, an accelerated convex optimization algorithm was constructed using the color line and background light vectors to accurately estimate the transmittance, thus improving the image dehazing effect. Finally, normalization of the color channels could result in haze-free images without color deviation. The enhanced images could achieve an average peak signal-to-noise ratio (PSNR) of 25.36 dB, underwater color

收稿日期: 2024-03-19; 修回日期: 2024-06-29

基金项目: 河北省自然科学基金(D2024209006); 河北省教育厅科学研究项目(QN2024147); 华北理工大学研究生创新项目(2024S05, 2024S08)

第一作者: 梁秀满, E-mail: 13230857556@126.com

通信作者: 刘振东, E-mail: 2412605736@qq.com

image quality evaluation (UCIQE) of 0.64, underwater image quality measure (UIQM) of 5.02, and color cast factor K of 0.02. Experimental results demonstrate that compared to other algorithms, this method can more effectively address color distortion and haziness in underwater images.

Key words: color compensation; color-line model; underwater image enhancement; background light estimation; convex optimization

引言

海洋作为全球最大的资源库,蕴含丰富的自然资源,包括各类矿产、珍贵生物、可利用的海洋能源以及水化学资源等^[1]。水下图像采集是实现海洋资源开发的重要基础,而水下图像受到水下光线衰减程度不同和悬浮粒子造成散射等因素的影响,通常出现蓝绿色偏和雾化现象,这对水下视觉信息的获取造成了挑战^[2]。因此,对水下图像进行处理以提高图像的清晰度和信息获取质量具有重要的研究价值。

水下图像质量增强的方法通常可分为基于非物理模型的方法、基于物理模型的方法和基于深度学习的方法3类。基于非物理模型的方法一般是通过改变像素灰度值或对频率分量进行增强来实现的。ZHANG W等人^[3]提出了一种衰减色彩通道校正算法,在进行图像颜色通道拉伸前,先对通道进行衰减补偿,减少了直接动态拉伸造成颜色伪影。ANCUTI C O等人^[4]构建了一种结合衰减补偿的白平衡算法,该方法利用绿色通道作为上级通道对衰减程度最高的红通道进行补偿,得到了较好的效果。ZHANG W等人^[5]提出了一种分段色彩校正和双先验优化对比度增强的算法,在减少色偏的同时,提升了水下图像的对比度。然而,此类方法是直接对退化图像的像素进行调整的,没有考虑水下成像的原理,图像可能会出现过度增强的情况。

基于物理模型的方法是通过估计光学成像模型中的参数,来恢复未退化的清晰图像的方法。HE K等人^[6]提出了一种暗通道先验(dark channel priority, DCP)方法用于户外图像去雾,由于水下退化图像和有雾图像类似,这种方法也被广泛应用于水下图像恢复。随后,许多研究根据水下图像的特点修改DCP方法,来改进其在水下图像增强上的不足。DREWS J P等人^[7]开发了水下暗通道先验(underwater DCP, UDCP)方法,根据水下特性将绿色和蓝色通道作为候选通道,来实现图像恢复。然而,这些方法恢复的水下图像颜色信息较

差。FATTAL R等人^[8]应用颜色线模型,将获取的颜色信息从暗通道的一维提升到RGB颜色空间的三维,提出了一种基于颜色线先验理论的去雾算法。ZHOU Y等人^[9]通过水下RGB通道的光衰减关系,将颜色线模型运用到水下图像恢复中。基于物理模型的图像恢复算法可以有效解决退化图像雾化和颜色失真问题,其关键问题在于估计成像模型中的背景光和透射率,以实现准确的图像恢复。因此,基于物理成像模型的水下图像恢复算法在背景光和透射率的估计准确性方面仍需提高。

基于深度学习的方法利用大量成对或未成对的数据进行训练,需要耗费大量时间。PAN P等^[10]构建了一种水下图像处理方法,该方法结合卷积神经网络和滤波器来消除颜色失真并减少图像噪声。ISIAM M J等^[11]提出了一种基于条件生成对抗网络的水下图像增强算法,这类方法需要成对数据集进行训练来实现图像增强效果。由于水下图像数据集的匮乏,使用数据集进行网络训练所得到的模型性能存在局限性。相比之下,传统的图像增强算法在水下图像增强方面仍然表现优异,并且无需耗费大量时间来训练网络模型。

针对目前水下图像质量增强算法的不足,本文结合非物理模型方法来提高颜色线的拟合效果,并利用准确估计的背景光和拟合的颜色线来实现物理模型方法参数的准确估计,提出一种基于颜色补偿和颜色线模型的水下图像增强算法。本文的主要贡献为:1)提出了一种改进的颜色补偿方法,根据水下图像各通道的衰减情况自适应地进行颜色补偿,用来解决水下特殊环境导致的颜色失真问题,并提高颜色线拟合效果;2)提出了一种分离图像前景和背景的改进背景光估计方法,通过信息量评价指标筛选出信息量较少的背景光候选区域,并进一步使用迭代阈值策略分离候选区域的背景,避免了前景明亮物体的影响,以提高背景光估计的准确性;3)构建了一种利用颜色线和背景光矢量准确求解透射率的加速凸优化算法,

以提高透射率估计的准确性,从而提高水下图像去雾的质量;4)实验结果表明,本文算法与对比算法比较,可以更有效地解决图像颜色失真和雾化现象,提高图像的信息获取质量。

1 基本原理

颜色线是自然图像中存在的一种规律,自然图像中大部分的小图像块都只表现了某物体的单色表面,而这些小图像块的像素点在RGB颜色空间中沿一维直线分布^[8]。小图像块的像素值满足场景亮度的因式分解,可表示为

$$J(x) = l(x)\mathbf{R}, x \in \Omega \quad (1)$$

式中: $J(x)$ 为目标准反射的光量; $l(x)$ 为小图像块 Ω 中每个像素 x 亮度的大小; \mathbf{R} 为物体反射光的颜色向量。Jaffe-McGlamery 的水下图像成像模型将水下成像表示为直接反射分量和后向散射分量组成,表达式为

$$I_c(x) = J_c(x)t_c(x) + A_c(1 - t_c(x)), c \in \{R, G, B\} \quad (2)$$

式中: $I_c(x)$ 为从相机获取的图像; $J_c(x)$ 为未退化的图像; c 为红、绿、蓝三通道之一; x 为像素坐标; A_c 为背景光; $t_c(x)$ 为透射率。将式(1)代入式(2)可以得到水下图像局部成像模型:

$$I(x) = l(x)\mathbf{R} + (1 - t)\mathbf{A}, x \in \Omega \quad (3)$$

式中: $\mathbf{R} = t\mathbf{R}$, 在小图像块内,透射率 t 和 \mathbf{R} 均为固定值,像素点仅受到 $l(x)$ 的影响。如图1所示:深灰色箭头表示清晰无雾图像的颜色线,并且直线经过原点;虚线表示有雾图像的颜色线,会产生 $(1-t)\mathbf{A}$ 的偏置,导致其不经过原点。通过背景光估计方法可以求出背景光 \mathbf{A} 。理想情况下,颜色线和背景光矢量所在的直线相交于一点,通过求解其交点来估计出透射率,再结合光学成像模型恢复出无雾图像。

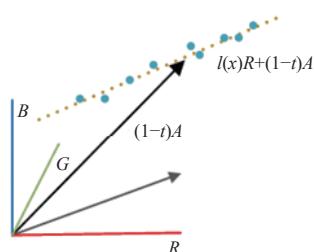


图1 RGB 空间中的颜色线

Fig. 1 Color lines in RGB space

2 本文算法

本文水下图像增强算法主要由颜色补偿、背景光估计、透射率估计、图像去雾以及颜色通道归一化组成,如图2所示。首先,利用改进的颜色补偿算法在降低图像色偏程度的同时提高颜色线的拟合效果。其次,通过结合信息量评价指标和迭代阈值策略的背景光估计方法提高背景光的准确性。然后,运用背景光矢量和颜色线构建的加速凸优化算法估计出透射率。最后,将恢复的无雾图像进行颜色通道归一化得到最终增强图像。

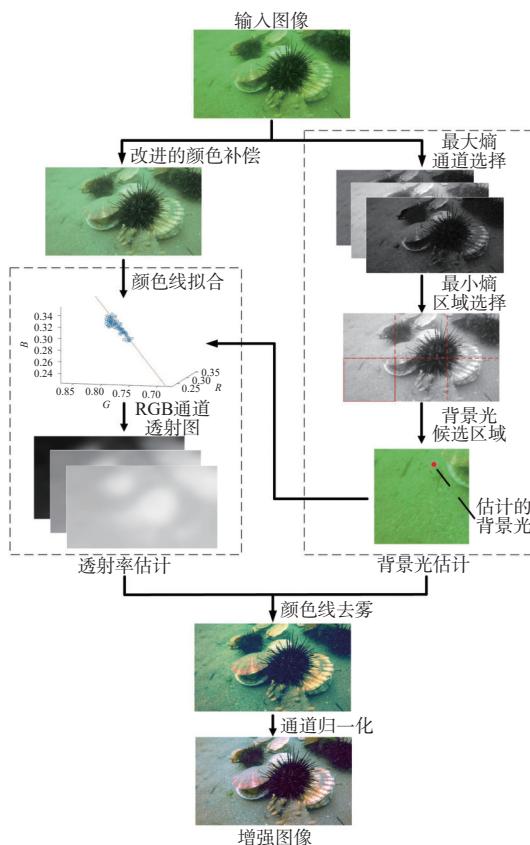


图2 算法总体流程图

Fig. 2 Block diagram of the algorithm

2.1 改进的颜色补偿算法

为了避免水下图像增强出现颜色伪影现象,本文针对颜色补偿算法进行改进,以提高颜色线的拟合效果。文献[4]提出利用绿色通道对红色和蓝色通道进行颜色补偿,然而在浑浊的水下环境中,绿色通道相对保存完好,而对于深水环境,蓝色通道保存相对较好^[3]。文献[4]提出的方法将绿色通道作为补偿的上级通道,对于蓝色偏图像的补偿效果较差。因此,本文改进了颜色补偿算法,以更好地补偿蓝绿色偏图像的衰减通道。首先,计算各通道的平均像素值:

$$\bar{I}_c = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_c(i, j), c \in \{R, G, B\} \quad (4)$$

式中: M 和 N 分别是输入图像 I 的高度和宽度。然后, 将平均像素值的最大值、中间值和最小值所在颜色通道分别定义为最大颜色通道 I_{\max} 、中间颜色通道 I_{int} 和最小颜色通道 I_{\min} , 采用 I_{\max} 对 I_{int} 和 I_{\min} 分

别进行补偿。此外, 由于文献 [4] 算法处理不同图像效果不稳定, 部分图像会出现过度补偿, 本文将两个衰减通道补偿系数分别改为 $I_{\max_z}/I_{\text{int}_z}$ 与常数 1 两者的最小值、 I_{\max_z}/I_{\min_z} 与常数 1 两者的最小值。补偿后中间颜色通道 I_{int_c} 和补偿后最小颜色通道 I_{\min_c} 表示如下:

$$I_{\text{int}_c}(x) = I_{\text{int}}(x) + \min\left(\frac{I_{\max_z}}{I_{\text{int}_z}}, 1\right) \times (\bar{I}_{\max} - \bar{I}_{\text{int}}) \times (1 - I_{\text{int}}(x)) \times I_{\max}(x) \quad (5)$$

$$I_{\min_c}(x) = I_{\min}(x) + \min\left(\frac{I_{\max_z}}{I_{\min_z}}, 1\right) \times (\bar{I}_{\max} - \bar{I}_{\min}) \times (1 - I_{\min}(x)) \times I_{\max}(x) \quad (6)$$

式中: I_{\max_z} 、 I_{int_z} 和 I_{\min_z} 表示每个通道的像素总值, \bar{I}_{\max} 、 \bar{I}_{int} 和 \bar{I}_{\min} 为每个通道的平均像素值。从图 3 可以观察到, 文献 [4] 的蓝色偏图像处理效果不佳, 而本文算法对于蓝绿色偏的水下图像都有较好的补偿效果。此外, 在原图和补偿图像上随

机取相同位置的 7×7 像素大小的小图像块, 记录区域内像素点的 RGB 空间分布。可以看到原图和文献 [4] 的像素点空间分布相对比较分散, 而本文颜色补偿算法的图像块颜色线拟合效果有所提升。

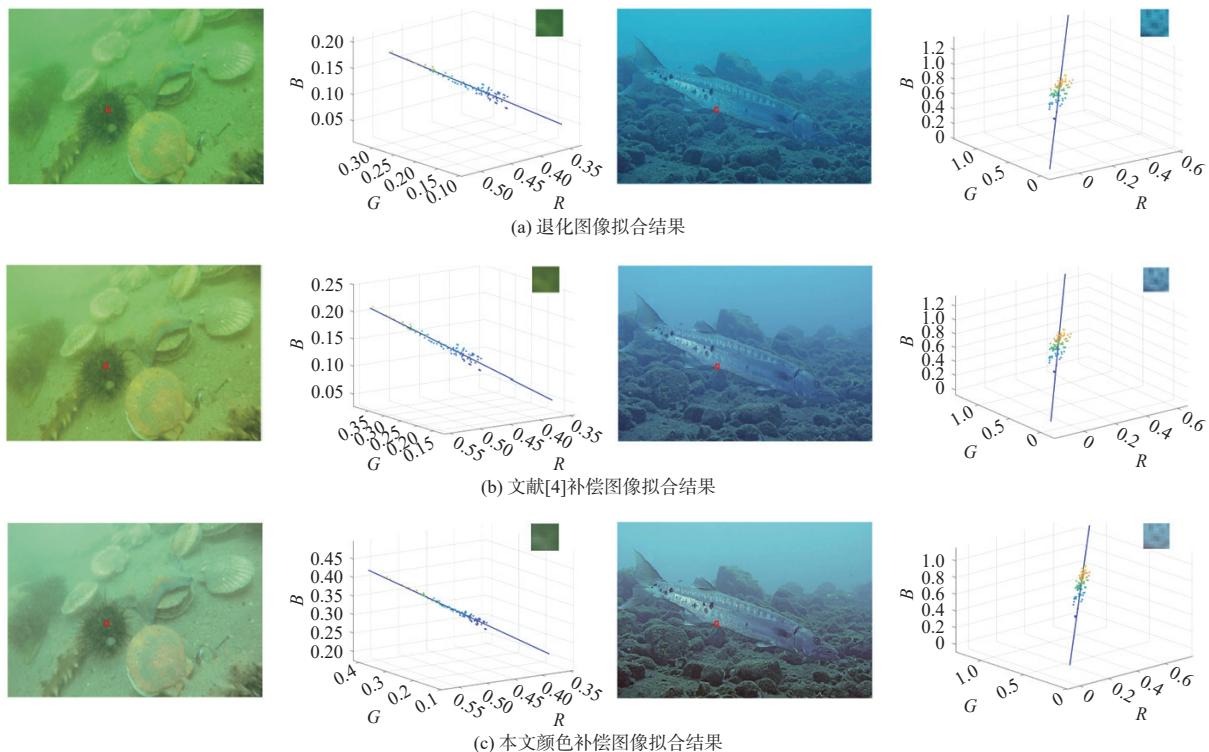


图 3 颜色补偿结果对比图

Fig. 3 Color compensation results comparison diagram

2.2 改进的背景光估计算法

考虑到在浅水或有人工光源情况下获取的水下图像前景物体会呈现高亮度, 导致估计的背景光不准确。本文针对背景光估计算法进行改进, 结合信息量评价指标和迭代阈值策略分离出前景

和背景, 以避免前景明亮物体的影响来提高背景光估计的准确性。首先, 使用一元灰度熵作为信息量评价指标, 可表示为

$$H = \sum_{i=0}^{255} p_i \log p_i \quad (7)$$

式中: H 为一元灰度熵; i 表示像素灰度值; p_i 是指所选通道中灰度值为 i 的像素出现的概率。选取 RGB 通道中一元灰度熵最大的通道的灰度图作为被划分的图像。其次, 为了减少后续背景分离的计算量并保证实验效果, 本文从大连理工大学-獐子岛联合实验室的数据集中选取 200 张图像进行分块, 结果表明, 基于 6 块分割估计的背景光与基于更多分块估计值的差别不明显, 本文选用基于 6 块分割求取背景光。由于信息量较小的区域包

含背景的可能性更大, 所以在划分区域中选择一元灰度熵最小的区域作为候选区域。然后, 将选择的候选区域对应的输入图像块作为背景光候选区域, 再利用迭代阈值策略分离出背景, 进一步降低前景物体的影响。迭代阈值策略先将背景光候选区域分解成红、绿、蓝三通道, 再根据迭代确定的最佳分离点将每个通道的背景分离输出, 具体实现如算法 1 所示(见表 1)。最后, 在分离出的候选背景区域中, 选择最亮的像素值作为背景光估计值。

表 1 算法 1

Table 1 Algorithm 1

算法 1: 背景光候选区域的背景分离算法

```

输入:  $I_H^c(x), c \in \{R, G, B\}$ 
1: for each  $c \in \{R, G, B\}$  do
2: 初始化:  $Loss = 1, I_{\min H} = \min(I_H^c), I_{\max H} = \max(I_H^c), Num1 = 0, Num2 = 0, S1 = 0, S2 = 0, I_{\text{init}} = (I_{\min H} + I_{\max H})/2$ 
3: while  $Loss \geq 0.5$  do
4: for each  $i \in [1, M_H], j \in [1, N_H]$  do
5: if  $I_H^c(i, j) > I_{\text{init}}$  then
6:  $Num1 = Num1 + 1;$ 
7:  $S1 = S1 + I_H^c(i, j);$ 
8: else
9:  $Num2 = Num2 + 1;$ 
10:  $S2 = S2 + I_H^c(i, j);$ 
11: end if
12: end for
13:  $\bar{I}_{S1} = S1/Num1;$ 
14:  $\bar{I}_{S2} = S2/Num2;$ 
15:  $I_{\text{new}} = (\bar{I}_{S1} + \bar{I}_{S2})/2;$ 
16: Update  $Loss = |I_{\text{init}} - I_{\text{new}}|$ ;
17:  $I_{\text{init}} = I_{\text{new}};$ 
18: if  $Loss \geq 0.5$  then
19:  $Num1 = 0, Num2 = 0;$ 
20:  $S1 = 0, S2 = 0;$ 
21: end if
22: end while
23:  $I_{\text{opt}} = I_{\text{init}};$ 
24: for each  $i \in [1, M_H], j \in [1, N_H]$  do
25: if  $I_H^c(i, j) < I_{\text{opt}}$  then
26:  $I_B^c(i, j) = I_H^c(i, j);$ 
27: else
28:  $I_B^c(i, j) = I_{\text{opt}}(i, j);$ 
29: end if
30: end for
31: end for
32:  $I_B = \sum\{I_B^R, I_B^G, I_B^B\};$ 
输出:  $I_B$ 

```

为了验证明亮物体的干扰效果, 本文选择了包含明亮物体的蓝绿色偏图像进行实验, 如图 4 所

示。在相同的图像增强算法中, 将采用 DCP^[6] 算法和本文改进算法估计的背景光分别进行图像恢复

对比。可以观察到, DCP 算法中背景光的估计方法受到了明亮物体的干扰, 其恢复图像出现了大量的红色光覆盖现象, 而本文方法避免了图像过亮, 呈现出更好的视觉效果。

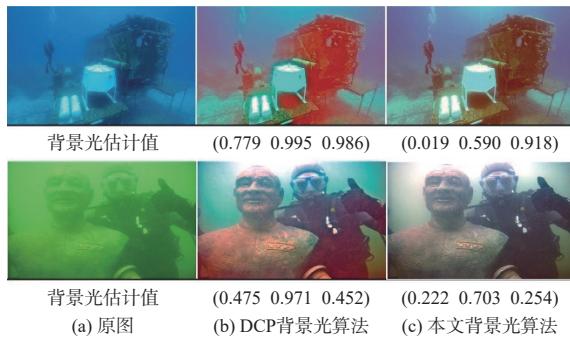


图 4 背景光估计算法对比图

Fig. 4 Comparison of background light estimation algorithms

2.3 基于颜色线模型的透射率估计算法

透射率估计的准确性是水下图像去雾的关键, 本文利用颜色线与背景光构建了一种准确估计透射率的加速凸优化算法。首先根据文献 [8] 方法对颜色补偿图像进行颜色线拟合, 生成满足条件的颜色线, 再通过颜色线和背景光矢量的交点来估计透射率。事实上, 在实际的 RGB 空间中, 两条线可能没有交点, 故将相交问题转化为最小优化问题, 表达式为

$$\arg \min_{l,s} (\|l\mathbf{D} + \mathbf{V} - s\mathbf{A}\|_2) \quad (8)$$

式中: $l\mathbf{D} + \mathbf{V}$ 表示颜色线; l 表示自由参数; $\mathbf{D} = x_1 - x_2$, 表示颜色线方向向量; $\mathbf{V} = x_1$, 表示颜色线相对坐标原点的偏差; x_1 和 x_2 为图像块中随机选择

的两个像素点; $s = 1 - t$ 。图像恢复时, 两条线的近似相交会导致透射率估计产生相交误差, 从而使得到的透射率估计值偏高, 造成恢复图像亮度低。通过使用交叉迭代的方式找到两条线之间的最小距离, 来减小相交误差的影响, 并估计出式 (8) 中 l 和 s 的值。在计算出两条线之间的最小距离前提下, 相交误差表示模值是 m 的单位向量, 其方向垂直于颜色线和背景光矢量。将颜色线、背景光和空间中相交误差的相交状态作为约束条件, 具体公式表示为

$$[\|\mathbf{D}\|^2 - \langle \mathbf{A}, \mathbf{D} \rangle] \begin{bmatrix} l \\ s \end{bmatrix} = [-\langle \mathbf{D}, \mathbf{V} + \mathbf{E} \rangle] \quad (9)$$

式中: \mathbf{E} 表示相交误差。通过引入惩罚函数来增强增广函数的鲁棒性、对偶性和凸性, 利用透射率估计公式和约束条件构造了增广拉格朗日函数, 表示为

$$L(l, s, \lambda) = \|l\mathbf{D} + \mathbf{V} - s\mathbf{A}\|_2^2 - \langle \lambda, Ml + Ns + \langle \mathbf{D}, \mathbf{V} + \mathbf{E} \rangle \rangle + \frac{\omega}{2} \| -\langle \mathbf{D}, \mathbf{V} + \mathbf{E} \rangle - Ml - Ns \|^2 \quad (10)$$

式中: $M = \|\mathbf{D}\|^2$; $N = -\langle \mathbf{A}, \mathbf{D} \rangle$; λ 和 ω 是对偶变量及其迭代步长。为了减少计算量, 在估计透射率时, 先计算红色通道的透射率, 再利用不同颜色通道之间的总体衰减系数得到绿色通道和蓝色通道的透射率^[9]。针对此类函数中两个变量具有可分离性的凸优化问题, 本文采用快速交替方向乘子法 (fast alternating direction method of multipliers, FADMM) 进行求解^[12]。FADMM 相对 ADMM 具有更快的收敛速度, 可以提高凸优化问题中透射率估计的性能。具体实现步骤如算法 2 所示(见表 2)。

表 2 算法 2

Table 2 Algorithm 2

算法2: 基于加速凸优化算法的透射率估计

输入: $I(x_1)$; $I(x_2)$; \mathbf{A}

1: 初始化: $\mathbf{D} = x_1 - x_2$, $\mathbf{V} = x_1$, $l = 0$, $s_0 = \hat{s}_1 = 0$, $\lambda_0 = \hat{\lambda}_1 = 0$, $\omega > 0$, $\alpha_1 = 1$, $n = 20$;

2: for $k = 1, \dots, n$ do

3: $l_{k+1} = \arg \min_l L(l, \hat{s}_k, \hat{\lambda}_k)$;

4: $s_{k+1} = \arg \min_s L(l_{k+1}, s, \hat{\lambda}_k)$;

5: $\lambda_{k+1} = \hat{\lambda}_{k+1} - \omega(Ml_{k+1} + Ns_{k+1} + \langle \mathbf{D}, \mathbf{V} + \mathbf{E} \rangle)$;

6: $\alpha_{k+2} = \left(1 + \sqrt{1 + 4\alpha_{k+1}^2}\right)/2$;

7: $\hat{s}_{k+2} = s_{k+1} + \frac{\alpha_{k+1} - 1}{\alpha_{k+2}}(s_{k+1} - s_k)$;

8: $\hat{\lambda}_{k+2} = \lambda_{k+1} + \frac{\alpha_{k+1} - 1}{\alpha_{k+2}}(\lambda_{k+1} - \lambda_k)$;

9: end for

输出: $t_{k+1} = 1 - s_{k+1}$

由于颜色线筛选条件的限制,需要运用马尔科夫随机场模型对不完整的透射图进行插值处理,并结合引导滤波对透射图进行细化^[9]。在获得RGB三通道透射图后,再根据估计的背景光和透射图利用成像模型进行图像恢复,得到去雾图像。此外,由于动态拉伸算法没有充分考虑水下图像的颜色衰减,直接应用到水下图像的颜色校正易出现红色伪影^[13]。本文预先对图像的衰减颜色通道进行了颜色补偿,再对颜色通道中的像素值归一化处理,使去雾后的图像颜色更接近于图像本身的颜色。直方图分布范围最大值 $I_{\max}^c(x)$ 和最小值 $I_{\min}^c(x)$ 可表示为

$$I_{\max}^c(x) = I_{\text{mean}}^c(x) + \eta I_{\text{var}}^c(x) \quad (11)$$

$$I_{\min}^c(x) = I_{\text{mean}}^c(x) - \eta I_{\text{var}}^c(x) \quad (12)$$

式中: $c \in \{R, G, B\}$; $\eta = 2$ ^[14]; $I_{\text{mean}}^c(x)$ 和 $I_{\text{var}}^c(x)$ 分别表示均值和方差。使用归一化技术重新定义每个像素的值,表达式为

$$I_{\text{CR}}^c = (I^c(x) - I_{\min}^c(x)) / (I_{\max}^c(x) - I_{\min}^c(x)) \quad (13)$$

式中 I_{CR}^c 为输出图像。

3 实验结果与分析

为了评估本文算法的有效性,本文采用水下图像增强基准数据集(underwater image enhancement benchmark dataset, UIEBD)^[15]和大连理工大学-獐子岛联合实验室的数据集进行测试,利用主观评价、客观评价、消融实验、运行时间及应用测试进行验证。将数据集分为深蓝、深绿、浅蓝和浅绿4种有代表性的类别,从各类别中随机选取图像进行增强,并与基于物理模型方法的UDCP^[7]和IBLA^[16]算法、结合卷积神经网络的UDHE^[10]算法,以及基于非物理模型的ACDC^[3]和PCDE^[5]算法进行性能比较。

3.1 主观评价

首先,本文对退化色卡图像进行实验,如图5所示。可以看出,UDCP和IBLA算法处理后的图像浓雾现象没有改善,IBLA和ACDC算法处理后的色卡图像整体出现了色偏情况。UDHE和PCDE算法处理后的图像偏暗,部分色块出现黑色情况。而本文算法增强后的色卡呈现出更好的视觉效果,其浓雾现象显著减少,同时色彩信息得到了更好的保留。

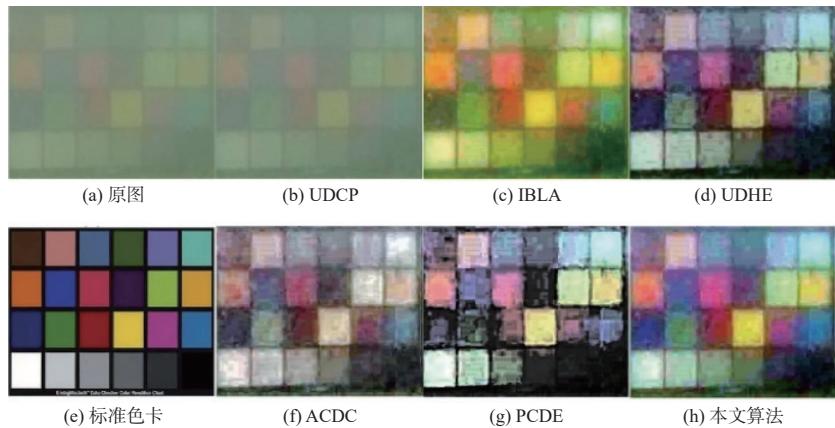


图 5 色卡恢复实验对比图

Fig. 5 Color card recovery experiment comparison

然后,对不同程度退化图像进行各算法的增强实验,结果如图6所示。从图6(a)、图6(b)可以看出,具有蓝色高饱和度失真的图片在UDCP和IBLA算法处理后仍存在严重的颜色失真,而另外几种算法虽然减少了蓝色失真,但清晰度下降且图像偏暗。从图6(c)、图6(e)可以看出,IBLA和PCDE算法出现了增强图像变暗、绿色失真和红色

失真的情况。从图6(d)、图6(f)可以看出,UDHE和PCDE算法增强后的图像亮度分别过低和过高。从图6(f)、图6(g)可以看出,对于前景有明亮物体的图像,IBLA和PCDE算法增强后的图像会出现过曝。综合来看,本文算法能够有效解决蓝绿图像的颜色失真和雾化现象,并且图像亮度和色彩更加均衡。

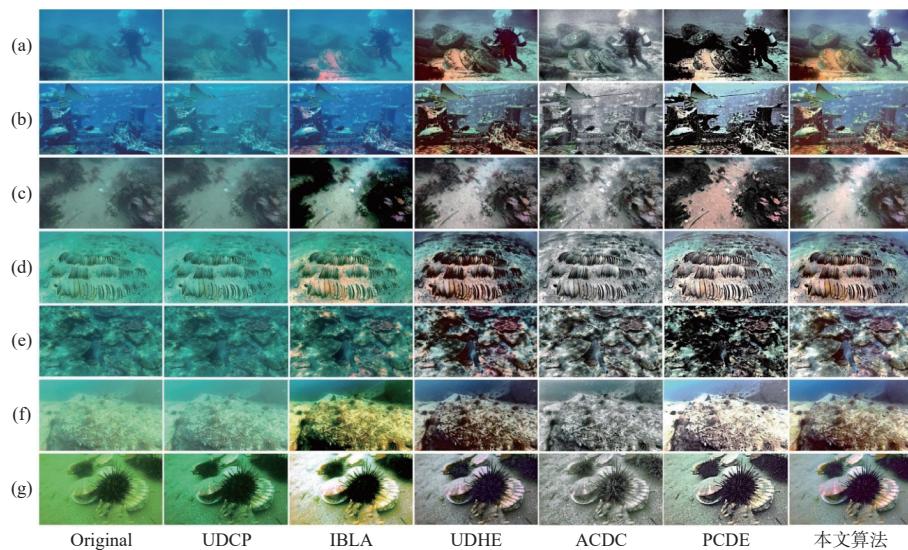


图 6 各算法实验结果对比图

Fig. 6 Comparison of experimental results of each algorithm

3.2 客观评价

为了进一步验证所提算法, 本文使用峰值信噪比 (PSNR)、水下彩色图像质量评价 (UCIQE)^[17]、水下图像质量评价 (UIQM)^[18] 和彩色投射因子 K ^[19] 对各算法增强得到的图像进行客观评估。

PSNR 表示图像最大像素值和噪声的比值, 增强后图像的比值越大说明处理效果越好。UCIQE 是图像的色度、饱和度和对比度的线性组

合。UIQM 是图像色度、清晰度和对比度的线性组合。UCIQE 和 UIQM 的实验结果值越大代表图像质量越好。彩色投射因子 K 是图像的平均色度和色度中心距离的比值, K 值越小表示图像的颜色伪影越少。

本文将图 6(a)~图 6(c) 作为蓝色偏图像, 图 6(d)~图 6(g) 作为绿色偏图像进行实验, 算法的实验评价指标值如表 3 所示。

表 3 各算法图像增强效果的量化评估

Table 3 Quantitative evaluation of image enhancement effect of each algorithm

	算法	PSNR/dB	UCIQE	UIQM	K
蓝色偏图像	UDCP	16.03	0.50	1.58	0.49
	IBLA	16.50	0.56	2.08	0.58
	UDHE	17.79	0.62	4.77	0.03
	ACDC	14.67	0.52	4.53	0.05
	PCDE	12.60	0.60	3.51	0.09
	本文	25.29	0.64	4.94	0.02
绿色偏图像	UDCP	17.60	0.51	1.97	0.62
	IBLA	14.63	0.62	3.16	0.48
	UDHE	14.86	0.63	4.85	0.03
	ACDC	16.19	0.54	4.78	0.08
	PCDE	14.69	0.58	3.90	0.06
	本文	25.42	0.65	5.10	0.02

可以观察到, 各对比算法的 PSNR 指标值偏小, 表明所提算法的增强图像颜色失真程度相比对比算法较小, 并且所提算法的彩色投射因子 K 的值最小, 表明增强的图像颜色伪影最少。此

外, UDCP 和 ACDC 算法增强的绿色偏图像的指标要优于蓝色偏图像, 而本文算法处理蓝绿色偏图像相对均衡。综合来看, 本文算法增强的图像在 PSNR、UCIQE、UIQM 和彩色投射因子 K 指标上

都优于其他算法,在蓝绿色偏图像增强中都有较好的增强效果。

3.3 消融实验

为了证明所提算法中各改进模块的有效性,本文设置了以下消融研究,包括本文算法没有改进的颜色补偿 (without enhanced color compensation, -w/o ECC)、没有改进的背景光估计 (without enhanced background light estimation, -w/o EBLE) 和没有所提方法的透射率估计 (with proposed transmittance estimation, -w/o PTE)。实验结果如图 7 所示。通过增强图像可以观察到: -w/o ECC 由于缺少颜色补

偿,导致图像出现颜色伪影,背景呈现偏紫色; -w/o EBLE 由于前景明亮物体的干扰,导致图像部分区域出现颜色过曝; -w/o PTE 的图像出现了暗像素和饱和度过高的情况; 而本文算法融合了各个模块后,增强图像的效果较好,对色偏和雾化现象的处理更加均衡。此外,消融研究对图 5~图 7 所涉及的不同程度的退化图像进行实验,得到的消融实验评价指标如表 4 所示。可以观察到,本文方法在各指标上都达到了最优值。综合消融实验的主观和客观评价可以看出,本文的水下图像增强算法中各个模块对增强图像的效果都有积极作用。



图 7 消融实验结果比较

Fig. 7 Comparison of results of ablation experiments

表 4 消融实验评价指标平均得分

Table 4 Mean scores of evaluation indexes of ablation experiments

方法	PSNR/dB	UCIQE	UIQM	K
-w/o ECC	16.12	0.56	4.15	0.05
-w/o EBLE	17.79	0.55	3.79	0.06
-w/o PTE	13.96	0.61	2.96	0.37
本文算法	23.82	0.68	4.95	0.02

3.4 运行时间及应用测试

由于本文算法主要是结合物理模型实现的,所以将基于物理模型的对比算法与所提算法进行比较。从数据集中随机选择 50 张图像进行实验,并计算它们的平均运行时间。结果如表 5 所示。

表 5 运行时间平均值对比
Table 5 Run time average comparison

算法	UDCP	IBLA	本文算法
运行时间/s	4.57	5.28	3.89

可以看出,对比基于物理模型的 UDCP 算法和 IBLA 算法,本文算法在处理时间上有所提升,能够在较短的时间内完成图像处理任务,并且增强效果在主客观评价上要优于这两种算法。此外,本文利用 Surf 特征点匹配对所提算法进行了应用测试^[20]。如图 8 所示,可以看出本文算法在特征提取方面对蓝绿色偏的退化图像都有较好的提

升,丰富了图像的细节特征。

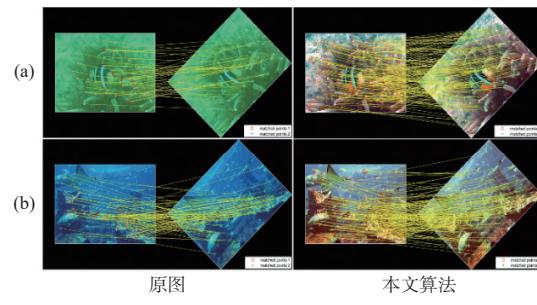


图 8 特征点匹配对比图

Fig. 8 Feature point matching comparison diagram

4 结论

针对目前水下图像处理算法的不足,本文提出了一种基于颜色补偿和颜色线模型的水下图像增强算法。该方法首先通过改进颜色补偿算法来减少图像色偏以提高颜色线拟合效果; 其次根据改

进的背景光估计算法求得背景光; 然后利用颜色线和背景光构建求解透射率的加速凸优化算法; 最后对去雾图像进行颜色通道归一化处理, 得到没有色偏的无雾图像。通过对比实验可知, 算法在主客观评价上都优于其他算法, 能够有效解决水下图像的颜色失真和雾化现象, 提升图像的清晰度和对比度。此外, 算法在应用测试中, 图像的特征点匹配度相比原图提升较高, 应用信息的保留效果较好。下一步将关注利用颜色线模型解决图像噪声的问题, 进一步提高算法对水下图像的处理效果。

参考文献:

- [1] 陈清江, 王炫钧, 邵菲. 基于多尺度残差注意力网络的水下图像增强[J]. *应用光学*, 2024, 45(1): 89-98.
CHEN Qingjiang, WANG Xuanjun, SHAO Fei. Underwater image enhancement based on multiscale residual attention networks[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(1): 89-98.
- [2] 杨潇, 孙帮勇. 双头增强与非均匀校正的水下图像增强算法[J]. *应用光学*, 2024, 45(2): 354-364.
YANG Xiao, SUN Bangyong. Dual-head enhancement and non-uniform fusion for underwater image enhancement algorithm[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(2): 354-364.
- [3] ZHANG W, WANG Y, LI C. Underwater image enhancement by attenuated color channel correction and detail preserved contrast enhancement[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2022, 47(3): 718-735.
- [4] 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.
- [5] ZHANG W, JIN S, ZHUANG P, et al. Underwater image enhancement via piecewise color correction and dual prior optimized contrast enhancement[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2023, 30: 229-233.
- [6] HE K, SUN J, X TANG. Single image haze removal using dark channel prior[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [7] DREWS J P, NASCIMENTO E, MORAES F, et al. Transmission estimation in underwater single images[C]//IEEE International Conference on Computer Vision Workshops. New York: IEEE, 2013.
- [8] FATTAL R. Dehazing using color-lines[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2014, 34(1): 1-14.
- [9] ZHOU Y, WU Q, YAN K, et al. Underwater image restoration using color-line model[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2018, 29(3): 907-911.
- [10] PAN P, 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.
- [11] ISIAM M J, XIA Y, SATTAR J. Fast Underwater Image enhancement for improved visual perception[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(2): 3227-3234.
- [12] BUCCINI A, DELL'ACQUA P, DONATELLI M. A general framework for ADMM acceleration[J]. *Numerical Algorithms*, 2020, 85: 829-848.
- [13] ZHANG W, PAN X, XIE X, et al. Color correction and adaptive contrast enhancement for underwater image enhancement[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2021, 91: 106981.
- [14] ZHANG W, LI G, YING Z. A new underwater image enhancing method via color correction and illumination adjustment[C]//2017 IEEE Visual Communications and Image Processing (VCIP). St. Petersburg, FL, USA: IEEE, 2017: 1-4.
- [15] LI C, GUO C, REN W, et al. An underwater image enhancement benchmark dataset and beyond[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2019, 29: 4376-4389.
- [16] 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.
- [17] YANG M, SOWMYA A. An underwater color image quality evaluation metric[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(12): 6062-6071.
- [18] PANETTA K, GAO C, AGAIAN S. Human-visual-system-inspired underwater image quality measures[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2015, 41(3): 541-551.
- [19] XU X, CAI Y, LIU C, et al. Color cast detection and color or correction methods based on image analysis[J]. *Measurement & Control Technology*, 2008, 5: 63687685.
- [20] LI X, LEI C, YU H, et al. Underwater image restoration by color compensation and color-line model[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2022, 101: 116569.