

# 基于全变分和颜色平衡的水下图像复原

郝雅丽, 侯国家\*, 李月梅, 黄宝香, 潘振宽

青岛大学计算机科学技术学院, 山东 青岛 266071

**摘要** 针对水下图像存在的雾化、模糊和颜色失真问题, 提出一种基于全变分和颜色平衡的水下图像复原方法。以完整水下光学成像模型为基础, 分别结合四叉树细分法与光在水中传播特性估计背景光, 利用水下中值暗通道先验估计透射率, 并采用共轭梯度和迭代最小二乘法估计模糊核。为提高计算效率, 引入交替方向乘法对变分能量方程进行逆求解得到去雾、去模糊的图像。在此基础上, 在 YCbCr 空间采用颜色平衡算法对颜色通道进行补偿以校正色彩失真。与 6 种流行的水下图像增强和复原方法进行比较, 实验结果表明, 所提方法可以有效地去除雾化和模糊、校正色偏、恢复出清晰、色彩真实的水下图像。

**关键词** 图像处理; 水下图像复原; 水下光学成像模型; 全变分模型; 颜色平衡

中图分类号 TP391 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222442

## Underwater Image Restoration Based on Total Variation and Color Balance

Hao Yali, Hou Guojia\*, Li Yuemei, Huang Baoxiang, Pan Zhenkuan

College of Computer Science & Technology, Qingdao University, Qingdao 266071, Shandong, China

**Abstract** Aiming at solving the problems of fogging, blurring and color distortion in underwater images, an underwater image restoration method is proposed based on total variation and color balance. Depending on the complete underwater optical imaging model, the background light is estimated by combining the quadtree subdivision algorithm and the propagation characteristics of light in water, the transmittance is estimated by using the underwater median dark channel prior, and the fuzzy kernel is estimated by using the conjugate gradient and iterative least square method. In order to improve the computational efficiency, the alternating direction multiplier method is introduced to inverserly solve the variational energy equation to obtain a haze-free and deblurred image. In addition, a color balance algorithm is proposed to compensate color channel in YCbCr space for correcting color distortion. Compared with six popular underwater image enhancement and restoration methods, the experimental results show that the proposed method can effectively remove fog and blur, correct color deviation, and restore a clear and true color underwater image.

**Key words** image processing; underwater image restoration; underwater optical imaging model; total variation model; color balance

## 1 引言

在海洋生物资源、水下矿藏能源探测中, 水下图像是获取海洋信息的重要载体。然而, 水中悬浮颗粒及水体本身对光的吸收和散射导致获取得到的水下图像质量严重退化, 产生细节模糊、对比度低、色偏严重(红色光能量最低, 最先被吸收, 水下图像通常呈现蓝绿色调)等问题, 给水下图像的人工判读带来极大的困难, 并限制其在高层视觉任务中的应用。因此, 研究水下图像处理技术, 还原真实且清晰的水下场景, 对海洋世

界的探索具有重要意义。

现有的传统水下图像清晰化方法可分为水下图像增强和水下图像复原两大类<sup>[1]</sup>。水下图像增强方法大致可以分为基于直方图均衡化的方法<sup>[2-3]</sup>、基于滤波变换的方法<sup>[4-5]</sup>和基于图像融合的方法<sup>[6-7]</sup>等。这些方法主要通过调整图像的像素分布来改善对比度、颜色和亮度。此类方法不考虑分布内在联系, 简捷有效, 但往往存在过饱和或噪声放大等问题。水下图像复原方法则针对成像退化过程构建水下光学成像模型, 估计模型参数, 进而恢复出清晰真实的水下图像。由于

收稿日期: 2022-09-01; 修回日期: 2022-09-29; 录用日期: 2022-10-18; 网络首发日期: 2022-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(61901240, 42276203)、山东省自然科学基金(ZR2019BF042, ZR2021MD001)、山东省高等学校  
青创人才引育计划

通信作者: \*hgj2015@qdu.edu.cn

McGlamery<sup>[8]</sup>提出的水下光学成像模型与雾天成像模型存在一定的相似性,基于暗通道先验(DCP)<sup>[9]</sup>的方法广泛应用于水下图像复原中。例如,Drews等<sup>[10]</sup>结合红光在水下衰减最快的特性仅考虑图像的绿通道和蓝通道,提出采用水下暗通道先验(UDCP)估计透射率的复原方法。Peng等<sup>[11]</sup>基于图像模糊和光吸收(IBLA)提取退化图像的深度图,利用指数衰减模型估计透射率。最近,Song等<sup>[12]</sup>提出一种基于背景光统计模型和优化透射率图估计的复原方法(ULAP),由于透射率的估计依赖红通道的信息,因此该方法仅适用于没有或者存在很少红色调的图像。基于光学成像模型的方法虽然在不同程度上去除了图像中的水雾,但由于大多数方法忽略了前向散射带来的模糊问题,并没有恢复出更多的细节、结构等图像信息。

近年来,变分方法在水下图像处理方面,特别在图像去雾、去模糊及对对比度增强等方面有着广泛并出色的应用。Ding等<sup>[13]</sup>提出一种在变分框架下估计透射率图和场景深度图的方法,提升了去雾效果,但未考虑颜色失真问题。Xie等<sup>[14]</sup>结合水下图像的红通道的稀疏特性,提出一种水下图像盲复原方法(UNTV),将成像模型的分量集成到变分模型中,改善了图像的模糊、对比度低等问题,然而同样难以有效去除色偏。Zhuang等<sup>[15]</sup>提出一种水下图像增强方法(Bayes),将Retinex模型和高阶梯度先验集成到变分模型中,改善了水下图像的视觉效果,但是对比度提升不够显著。

考虑到水下图像存在散射所导致的雾化、模糊问题以及水体对光的选择性吸收产生的色偏问题,本文提出一种基于全变分模型和颜色平衡的水下图像复原方法,采用四叉树细分与最大亮度先验结合的方式估计全局背景光,利用水下中值暗通道先验估计透射率图,将完整水下光学成像模型集成到变分模型中,借助交替方向乘子法(ADMM)迭代求解来消除雾化和模糊,并利用颜色平衡算法校正水下图像的色偏,得到复原后的清晰图像。

## 2 水下光学成像模型

在水下视觉领域,Jaffe-McGlamery模型<sup>[8,16]</sup>被广泛应用于水下图像复原方法中,水下成像过程中所接收的总光强是由目标物体反射的直接分量、目标物体反射发生小角度散射的前向散射分量、环境光被悬浮颗粒等散射所造成的后向散射分量等3部分线性叠加组成的,其表达式为

$$I_c(x) = J_c(x) \cdot t_c(x) + J_c(x) \cdot t_c(x) * g_c(x) + B_c \cdot [1 - t_c(x)], \quad (1)$$

$$t_c(x) = \exp[-\beta_c d(x)], \quad (2)$$

$$g_c(x) = \left\{ \exp[-R_c d(x)] - \exp[-\beta_c d(x)] \right\} \cdot F^{-1} \left\{ \exp[-h_c d(x) \omega] \right\}, \quad (3)$$

式中: $x$ 为像素点; $c \in \{R, G, B\}$ ,分别表示红、绿、蓝通道; $I_c(x)$ 和 $J_c(x)$ 分别代表退化的水下图像和待恢复的图像; $B_c$ 为全局背景光; $t_c(x)$ 为水体的透射率; $d(x)$ 为每个场景点的深度; $\beta_c$ 是光谱衰减系数; $g_c(x)$ 为点扩散函数;\*表示卷积; $R_c$ 、 $h_c$ 和 $\beta_c$ 分别是颜色通道 $c$ 的经验系数; $F^{-1}$ 为快速傅里叶逆变换; $\omega$ 为径向频率。

当下水目标与相机的距离较小时,可以忽略前向散射分量造成的影响<sup>[17-18]</sup>。水下成像模型可以简化为

$$I_c(x) = J_c(x) \cdot t_c(x) + B_c \cdot [1 - t_c(x)]. \quad (4)$$

## 3 所提方法

为了消除水下图像的雾化、模糊以及颜色失真问题,提出基于全变分模型和颜色平衡算法的水下图像复原方法,所提方法如图1所示。首先,采用结合四叉树细分法与光在水中传播的特性的方式估计背景光 $B$ ,并利用中值滤波计算透射率图 $t$ 来复原水下图像。然后,设计基于完整水下光学成像模型的变分能量方程以恢复出清晰图像 $J$ 。最后,对水下图像转换颜色空间,并在YCbCr颜色空间平衡颜色去除色偏,得到恢复的水下图像。

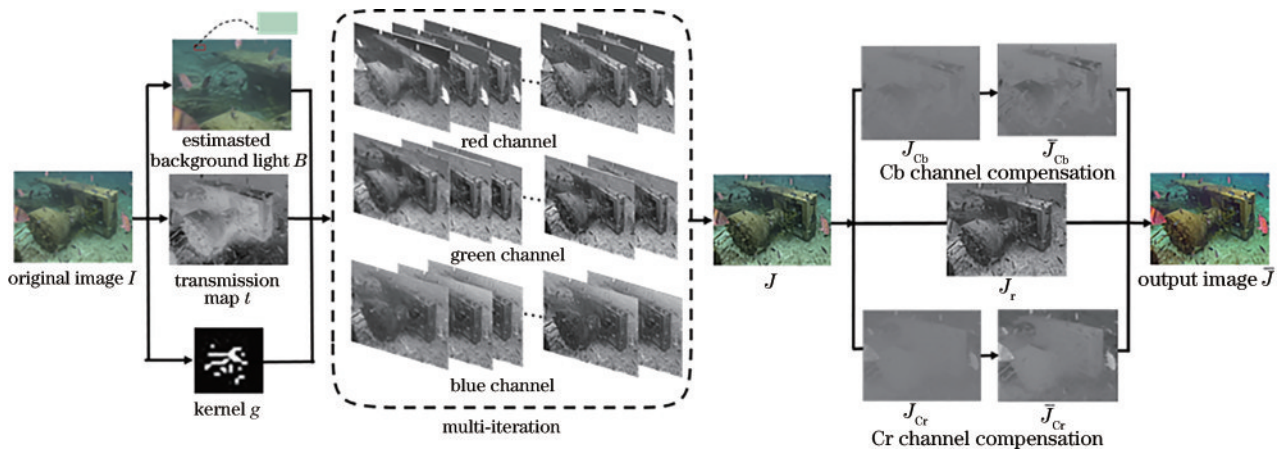


图1 所提方法框架图

Fig. 1 General framework of proposed method

### 3.1 全变分模型及 ADMM 求解

在大多数情况下,水下图像的模糊主要是由前向散射引起的,但为了降低算法的复杂度,研究者<sup>[17-18]</sup>经常假设水下物体距离摄像机较近,忽略前向散射,本研究将完整的水下光学成像模型集成到全变分模型中。近年来,对图像先验信息的研究<sup>[19-20]</sup>表明图像梯度满足稀疏性,即大部分的梯度值都集中在零值或者很小的值附近,这种特性使得自然图像的梯度分布非常接近超拉普拉斯分布,因此可对式(1)添加梯度约束项。基于此,建立水下图像复原变分能量方程:

$$\hat{J}_c = \arg \min \left\{ \frac{1}{2} \int_{\Omega} [(J_c \cdot t_c) * g - I_c - J_c \cdot t_c - B \cdot (1 - t_c)]^2 dx + \mu \int_{\Omega} |\nabla J_c| dx \right\}, \quad (5)$$

式中: $\Omega$ 为二维图像空间的开放域子集; $I_c$ 为输入值即退化图像; $t_c$ 为透射率图; $g$ 为模糊核; $B$ 为全局背景

光;梯度项 $\nabla J_c$ 主要功能是去模糊,并通过添加约束来保证复原图像与输入图像误差最小, $\mu$ 为梯度项的系数,用以控制去模糊的程度。

由式(5)可知,求解变分模型前需先估计全局背景光 $B$ 和透射率图 $t$ 。针对背景光的估计,最直接的策略是选择水下图像中最亮的像素作为背景光,然而,这一方法鲁棒性较差,并不适用于前景物体比背景光亮的场景。考虑到水下图像前景区域可能存在过亮的物体干扰背景光的估计,为了提高估计背景光的准确性,首先使用二叉树细分法<sup>[21]</sup>将图像划分为4个矩形区域,然后通过计算每一个区域的得分(像素值的平均值减去该区域内像素值的标准差),选择1个得分最高的背景区域作为候选区域。最后,从前0.1%最亮的像素中选取图像蓝通道与红通道差最大的像素作为全局背景光。为了更好地展示该过程,图2给出了所提全局背景光估计算法的示例。



图2 全局背景光估计示例。(a)原始图像;(b)二叉树细分过程;(c)估计的背景光

Fig. 2 An example of estimating global background light. (a) Original image; (b) result of the quad-tree subdivision; (c) estimated global background light in red rectangle

考虑到水下暗通道先验(UDCP)存在过饱和问题,提出水下中值暗通道先验,在计算暗通道时忽略损失严重的红色通道,只用蓝绿通道来计算<sup>[10]</sup>。中值滤波器<sup>[22]</sup>能够更好地保留细节与边缘,同时在平滑区域可去除水雾。水下中值暗通道先验定义为

$$\theta(x) = \text{median}_{\vartheta(m,n)} \left[ \min_{c \in \{G,B\}} \frac{I^c(x)}{B^c} \right], \quad (6)$$

式中: $\vartheta(m,n)$ 是 $5 \times 5$ 的方块,对于方块内的点 $(m,n)$ ,选取G通道和B通道的最小值;median是中值滤波器,透射率图可以表示为

$$t(x) = 1 - \omega \theta(x), \quad (7)$$

式中,对于大部分场景 $\omega = 0.9$ 。

为了验证所提水下中值暗通道先验的有效性,分别与经典的DCP方法和UDCP方法进行比较,结果如图3所示。图3(a)为原始水下图像,图3(b)为DCP方法估计的透射率,图3(c)为UDCP方法估计的透射

率,图3(d)为所提方法估计的透射率,图3(e)~(g)分别为基于不同透射率复原的结果。对比图3(b)、图3(c)和图3(d)可以看出,采用所提方法估计的透射率比DCP和UDCP方法更能反映真实的远近景关系。同样,对应的复原图像去雾效果更佳,而且很好地保留了边缘区域的细节信息。

在求得背景光 $B$ 和透射率 $t$ 后,需进一步求解模糊核 $g$ 。由式(3)可知,求解 $g$ 需先求解衰减系数,然而,实际的水下图像包含不同的水体类型,导致衰减系数存在差异难以求解。为了解决这个问题,利用共轭梯度法和迭代最小二乘法<sup>[23]</sup>快速求解 $g$ ,并对其进行归一化处理。

在得到变分模型中的变量 $B$ 、 $t$ 和 $g$ 后,进一步采用ADMM算法对其进行快速求解,来提高收敛速度。具体求解过程如下:

引入辅助变量 $\omega = \nabla J$ ,变分能量方程(5)可转换为

$$\arg \min_{J,v,p} \left\{ \frac{1}{2} \int_{\Omega} [(J_c \cdot t) * g - I - J \cdot t - (1 - t) \cdot B]^2 dx + \mu \int_{\Omega} |\omega| dx + \sigma_1 \int_{\Omega} (\omega - \nabla J) dx + \frac{u_1}{2} \int_{\Omega} (\omega - \nabla J)^2 dx \right\}, \quad (8)$$

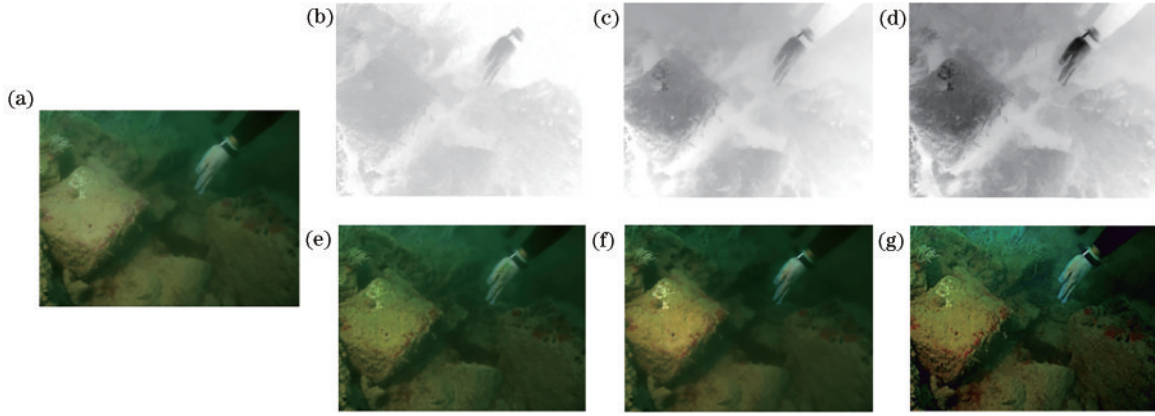


图 3 透射率估计对比。(a)原图;(b)~(d) DCP、UDCP 及所提方法的透射率图;(e)~(g) DCP、UDCP 及所提方法的复原结果  
Fig. 3 Comparison of the estimated transmission maps using different methods. (a) Original image; (b)~(d) the transmission maps obtained by DCP, UDCP, and the proposed method; (e)~(g) the corresponding restored results by DCP, UDCP, and the proposed method

式中: $\mu$ 是非负的惩罚参数; $\sigma_1$ 是拉格朗日乘子。

1) 固定  $\omega$  求解  $J$ , 先从式(8)中提取出所有与  $J$  相关的约束项, 并建立优化方程:

$$E(J) = \arg \min_J \left\{ \frac{1}{2} \int_{\Omega} [(J \cdot t) * g - I - J \times t - (1-t) \times B]^2 dx + \sigma_1 \int_{\Omega} (\omega - \nabla J) dx + \frac{u_1}{2} \int_{\Omega} (\omega - \nabla J)^2 dx \right\}, \quad (9)$$

令  $F_1^k = \hat{g} * [I + B \cdot (1-t)] \cdot t - [I + B \cdot (1-t)] \cdot t - u(\nabla \omega + \nabla \sigma_1)$ ,  $G_1^k = \omega^k + \frac{\sigma_1}{u}$ , 根据式(9)解得关于 Euler-Lagrange 方程为

$$\begin{cases} \hat{g} * g * J \cdot t \cdot t - \hat{g} * J \cdot t \cdot t - g * J \cdot t \cdot t + J \cdot t \cdot t - F_1^k - u = 0, & \text{in } \Omega \\ (\nabla J - G_1) \cdot n = 0, & \text{in } \partial\Omega \end{cases}, \quad (10)$$

式中,  $n$  表示单位法向量。有

$$J^{k+1} = \text{Re} \left[ \frac{F(F_1)}{t^2 + 4} \right], \quad (11)$$

式中:  $F$  表示傅里叶变换;  $\text{Re}$  表示取实部;  $k$  表示迭代次数。

2) 固定  $J$  求解  $\omega$ , 同步步骤 1) 建立优化方程:

$$E(\omega) = \arg \min_{\omega} \left[ \gamma_1 \int_{\Omega} |\omega| + \sigma_1 \int_{\Omega} (\omega - \nabla J) dx + \frac{u_1}{2} \int_{\Omega} (\omega - \nabla J)^2 dx \right], \quad (12)$$

使用广义软阈值公式求解变量  $\omega$ , 其解析表达式如下:

$$\omega^{k+1} = \max \left( \left| \nabla J^{k+1} - \frac{\sigma_1^k}{u} \right| - \frac{\gamma^1}{u_1}, 0 \right) \cdot \frac{\nabla J^{k+1} - \frac{\sigma_1^k}{u}}{\left| \nabla J^{k+1} - \frac{\sigma_1^k}{u} \right|}, \quad (13)$$

3) 更新拉格朗日乘子  $\sigma_1$ :

$$\sigma_1 = \sigma_1 + u \cdot (\omega - \nabla J). \quad (14)$$

### 3.2 颜色平衡算法

由于不同波长的光在水中的衰减程度存在差异, 因此拍摄到的水下图像普遍存在颜色失真问题。去除散射分量的影响之后, 水下图像的清晰度显著提高, 但

是仍存在整体亮度偏暗、颜色不真实的问题。基于此, 进一步设计了一种基于 Cb、Cr 通道色彩补偿的颜色平衡算法来校正色彩。

Ancuti 等<sup>[24]</sup>观察到绿色通道保留较多的图像景深信息, 红光、蓝光衰减严重, 可以用绿通道来补偿红、蓝通道。在对红、蓝通道进行补偿时, 由于灰度世界假设所有通道的均值相同, 红绿通道和蓝绿通道之间的均值差分别体现了红绿通道和蓝绿通道衰减的不平衡性, 基于该差值实现对红、蓝通道的补偿。然而, 在 RGB 颜色空间, 由于 3 个通道之间的相关性, 使用绿色通道分量来补偿红、蓝通道分量会不可避免地引入绿色通道信息, 图像的颜色分布不均衡。考虑到 YCbCr 颜色空间由亮度通道 Y 和两个颜色通道 Cb、Cr 组成, Cb 和 Cr 为蓝色和红色的浓度偏移量。在 YCbCr 空间, Y 通道、Cb 通道和 Cr 通道是相互独立的, 因此将图像从 RGB 颜色空间转换到 YCbCr 空间上<sup>[25]</sup>:

$$\begin{pmatrix} J_Y \\ J_{Cb} \\ J_{Cr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.169 & -0.331 & 0.500 \\ 0.500 & -0.419 & -0.081 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} J_R \\ J_G \\ J_B \end{pmatrix}, \quad (15)$$

分别对 Cb、Cr 通道进行颜色补偿:

$$\bar{J}_{Cb} = \lambda(J_{Cb} - A_{Cb}) + A_{Cb}, \quad (16)$$

$$\bar{J}_{Cr} = \gamma(J_{Cr} - A_{Cr}) + A_{Cr}, \quad (17)$$

式中:  $J_{Cb}$ 、 $J_{Cr}$  与  $\bar{J}_{Cb}$ 、 $\bar{J}_{Cr}$  分别表示  $J$  与  $J_1$  的 Cb 通道和 Cr

通道;  $A_{Cb}$ 、 $A_{Cr}$  分别为 Cb、Cr 的均值;  $\lambda$  和  $\gamma$  表示权重系数, 控制颜色补偿程度。最后, 将其转换回 RGB 颜色空间, 获得输出图像  $\bar{J}$ :

$$\begin{pmatrix} \bar{J}_R \\ \bar{J}_G \\ \bar{J}_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.000 & 0.000 & 1.403 \\ 1.000 & -0.344 & -0.714 \\ 1.000 & 1.773 & 0.000 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{J}_Y \\ \bar{J}_{Cb} \\ \bar{J}_{Cr} \end{pmatrix} \quad (18)$$

## 4 实验结果与分析

为了验证所提算法的有效性和优点, 分别与 6 种水下图像增强复原算法在 UIEB 数据集<sup>[26]</sup>上进行主观和客观实验对比。选用的对比算法包括红通道先验 (RCP) 算法<sup>[27]</sup>、图像模糊和光吸收 (IBLA) 算法<sup>[11]</sup>、水下光衰减先验 (ULAP) 算法<sup>[12]</sup>、水下归一化全变分模型 (UNTV) 算法<sup>[14]</sup>、水下卷积神经网络 (UWCNN) 算法<sup>[28]</sup>以及贝叶斯 Retinex (Bayes) 算法<sup>[15]</sup>。

### 4.1 主观实验

从图库中选取 6 组具有代表性的水下退化图像, 涵盖色偏、雾化、低光照等场景, 如图 4 所示。其中, 图 4(a) 是原图, 图 4(b)~(h) 是 6 种对比算法与所提算法的增强和复原结果。RCP 和 UNTV 算法复原后的图像在一定程度上改善了色偏以及雾化的问题, 但图像整体

偏暗。IBLA 算法在提升对比度方面表现较好, 但颜色校正效果不理想, 如 image3 和 image4。ULAP 算法明显改善了色偏问题, 并且提升了图像的清晰度但对于偏蓝的图像 (image1, image2 与 image5), 复原结果引入红色调, 而对于水下低光照图像 (image6), 复原的结果加深了暗部区域。此外, UWCNN 和 Bayes 算法增强后的图像对比度低, 去雾效果不明显。相比之下, 所提算法去雾效果明显, 复原后的图像清晰度较高, 恢复的色彩更加真实自然, 尤其对于水下低光照图像 (image6), 亮度提升更加显著, 色彩自然并且细节突出。

为了评估所提算法在色彩校正方面的有效性, 选取带有标准色卡的水下图像进行测试, 色彩校正结果如图 5 所示。从图 5(d)、(g)、(h) 可以看出, 由 IBLA、UWCNN 和 Bayes 算法得到的色卡图像多个色块出现偏差, 整体色卡颜色不鲜明, 不能有效地校正颜色失真的问题。同样地, RCP、ULAP 和 UNTV 算法复原出的色卡整体偏蓝, 效果也不佳。相比之下, 所提算法复原的色卡图像色彩鲜明, 不同色块颜色可清晰区分, 色块颜色与标准色卡较为接近。实验结果表明, 所提颜色平衡算法能有效去除色偏, 恢复出的颜色更加自然。

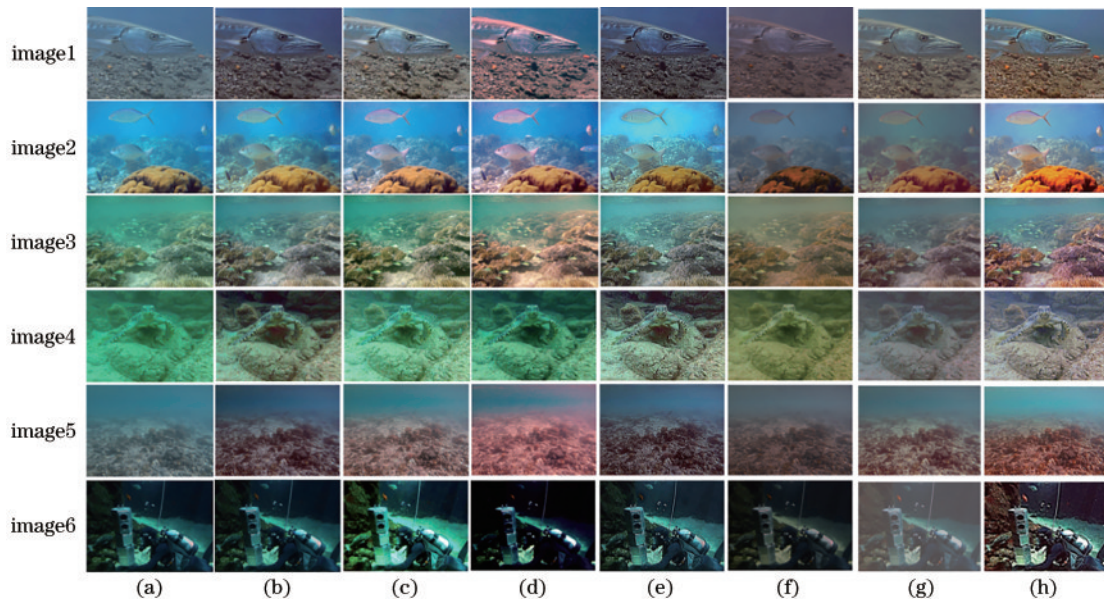


图 4 不同算法的复原结果。(a)原图;(b) RCP算法;(c) IBLA算法;(d) ULAP算法;(e) UNTV算法;(f) UWCNN算法;(g) Bayes算法;(h)所提算法

Fig. 4 Restoration results of different algorithms. (a) Original images; (b) RCP algorithm; (c) IBLA algorithm; (d) ULAP algorithm; (e) UNTV algorithm; (f) UWCNN algorithm; (g) Bayes algorithm; (h) proposed algorithm

### 4.2 客观实验

为了进一步验证所提算法的性能, 选择 3 种常用无参考水下图像质量评价指标 UCIQE<sup>[29]</sup>、UIQM<sup>[30]</sup>和 FDUM<sup>[31]</sup>对复原结果进行客观评估。UCIQE 基于 CIELab 空间对色度、亮度的对比度和饱和度等 3 个分量进行线性组合。UIQM 基于人眼视觉系统, 反映色

彩度、清晰度和对比度的综合性能。FDUM 结合空域和频域来量化图像颜色, 利用暗通道先验衡量低对比度, 使用清晰度来评估模糊度。UCIQE、UIQM 和 FDUM 的值均是越高表明图像质量越好。从表 1 可以看出, 所提方法的 UCIQE 值高于其他对比方法, 说明复原后图像对比度和饱和度得到了明显提升。另一方

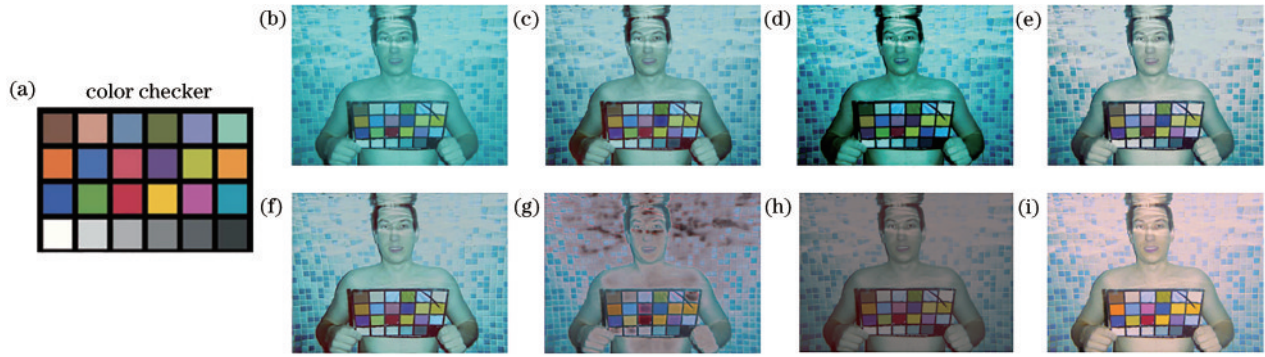


图5 色彩校正结果。(a)标准色卡;(b)原图;(c) RCP算法;(d) IBLA算法;(e) ULAP算法;(f) UNTV算法;(g) UWCNN算法;(h) Bayes算法;(i)所提算法

Fig. 5 Comparison of color correction. (a) Color checker; (b) original image; (c) RCP algorithm; (d) IBLA algorithm; (e) ULAP algorithm; (f) UNTV algorithm; (g) UWCNN algorithm; (h) Bayes algorithm; (i) proposed algorithm

表1 不同算法复原图像的UCIQE指标对比

Table 1 Comparison of UCIQE metrics of restored images with different algorithms

No.	Raw	RCP	IBLA	ULAP	UNTV	UWCNN	Bayes	Proposed algorithm
image1	0.4559	0.5260	0.5673	0.6318	0.6182	0.4361	0.5023	<b>0.6375</b>
image2	0.5663	0.5783	0.6196	0.6502	0.6350	0.5067	0.5069	<b>0.6690</b>
image3	0.5008	0.5416	0.5865	0.5960	0.6297	0.4622	0.4909	<b>0.7836</b>
image4	0.4175	0.5337	0.4778	0.4944	0.5898	0.4531	0.4103	<b>0.5971</b>
image5	0.4526	0.5272	0.5366	0.5501	0.6204	0.4466	0.5101	<b>0.6319</b>
image6	0.5854	0.5725	0.6452	0.4788	0.6269	0.4744	0.4417	<b>0.6465</b>

面,从表2和表3可以看出,所提方法在UIQM和FDUM指标上亦均高于其他对比方法。其中,UIQM指标的分值维持在1.65以上,表明所提方法与其他方

法相比能更好地改善水下退化图像的雾化、模糊和颜色退化问题。

表2 不同算法复原图像的UIQM指标对比

Table 2 Comparison of UIQM metrics of restored images with different algorithms

No.	Raw	RCP	IBLA	ULAP	UNTV	UWCNN	Bayes	Proposed algorithm
image1	1.2010	1.4231	1.4409	1.6084	1.6436	1.1926	1.3137	<b>1.6701</b>
image2	1.1416	1.2280	1.3431	1.4736	1.5994	1.0312	0.9869	<b>1.6736</b>
image3	1.3831	1.4789	1.5752	1.5690	1.6937	1.3032	1.3174	<b>1.7225</b>
image4	1.4258	1.6014	1.5811	1.6896	1.6138	1.3671	1.2782	<b>1.6931</b>
image5	1.1904	1.5081	1.4057	1.4389	1.7019	1.2654	1.3186	<b>1.7652</b>
image6	1.7742	1.8249	1.8080	1.6488	1.8968	1.4976	0.9466	<b>1.9033</b>

表3 不同算法复原图像的FDUM指标对比

Table 3 Comparison of FDUM metrics of restored images with different algorithms

No.	Raw	RCP	IBLA	ULAP	UNTV	UWCNN	Bayes	Proposed algorithm
image1	0.4613	0.5919	0.7031	0.9675	1.0101	0.3799	0.5250	<b>1.0702</b>
image2	0.5349	0.5946	0.6621	0.7610	1.0062	0.3469	0.3712	<b>1.0318</b>
image3	0.5152	0.6049	0.7320	0.7315	1.0499	0.4009	0.4735	<b>1.0546</b>
image4	0.3443	0.4723	0.5045	0.5266	0.7696	0.3603	0.2928	<b>0.7730</b>
image5	0.4596	0.6407	0.7216	0.7463	1.1097	0.4261	0.5874	<b>1.1893</b>
image6	0.5783	0.5768	0.8328	0.5263	0.9532	0.3336	0.3146	<b>1.0874</b>

为了进一步验证所提算法的有效性和鲁棒性,在整个UIEB图库(890幅水下退化图像)上进行客观对比实验,结果如表4所示。从表4可以看出,所提算法

的平均性能均优于其他对比算法,在UCIQE、UIQM和FDUM等3个客观质量评价指标上分别提升均超过20%。综合来说,所提算法在提高对比度和清晰度

表 4 客观质量评价指标平均值对比

Table 4 Comparison of average values of different objective quality evaluation metrics

Metric	Raw	RCP	IBLA	ULAP	UNTV	UWCNN	Bayes	Proposed algorithm
UCIQE	0.5121	0.5629	0.5969	0.6053	0.5978	0.5739	0.5184	<b>0.6237</b>
UIQM	1.2147	1.3995	1.4468	1.41	1.6147	1.3728	1.0467	<b>1.6546</b>
FDUM	0.4612	0.5393	0.6684	0.6575	0.8730	0.5552	0.5018	<b>0.8845</b>

的同时,更好地平衡了图像的色彩,复原后的图像信息量丰富、图像细节更多。

### 4.3 消融实验

所提算法主要分为图像去雾去模糊和颜色校正两个过程,为了验证这两个步骤对复原结果的作用,随机挑选 3 幅水下图像进行消融实验验证,复原结果如图 6 所示。

从图 6(b)、(c)可以明显看出,仅经过图去雾、去模糊处理后的图像在对比度、清晰度和细节方面都有了显著的增强,但是图像的色偏问题没有得到解决。而如果只进行颜色校正处理,虽然色偏问题得到了改善,但是在清晰度以及细节等方面提升明显不足。相比之下,图 6(d)表明,所提算法复原后的图像视觉效果最佳。

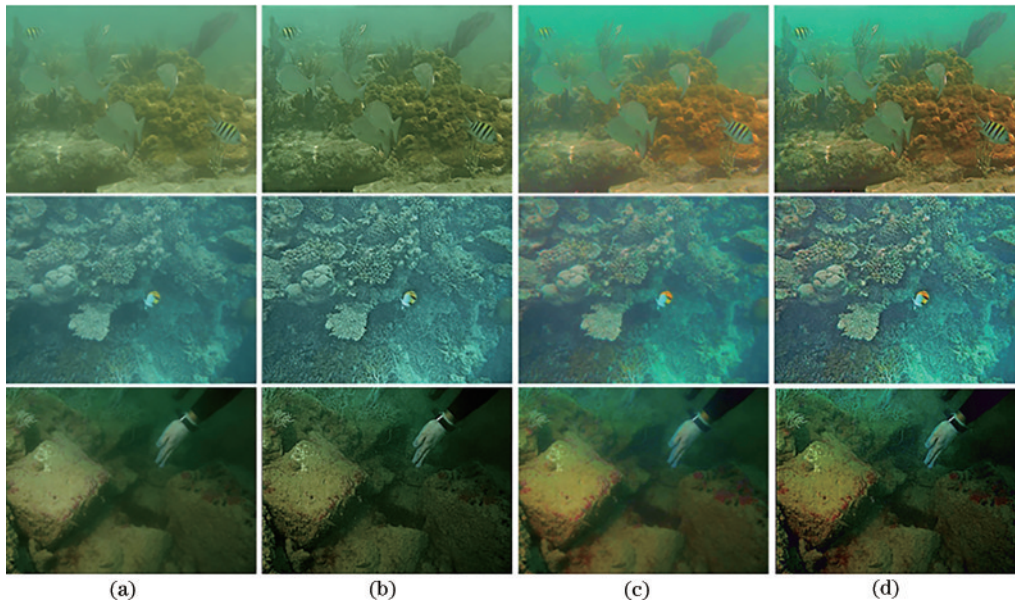


图 6 消融实验。(a)原图;(b)仅去雾去模糊;(c)仅颜色校正;(d)所提算法

Fig. 6 Ablation experiment. (a) Original images; (b) only defogging and deblurring; (c) only color correction; (d) proposed algorithm

## 5 结 论

针对水下成像存在的细节模糊、雾化和颜色失真等问题,提出一种基于全变分模型与颜色平衡的水下图像复原方法,该方法包含去雾去模糊和颜色校正两个阶段。从问题本身的成像过程出发,考虑到简化成像模型的局限性,基于完整水下成像模型,设计水下图像复原变分模型的规则项和数据项;然后,利用二叉树细分与光在水中传播的特性结合的方式和中值滤波对背景光和透射率图进行估计优化,引入交替方向乘子法对变分方程迭代求解;最后,设计了通道色彩补偿的颜色平衡算法消减颜色失真。实验结果表明,所提方法在去雾去模糊和颜色恢复方面具有良好的性能,视觉效果提升明显。

### 参 考 文 献

[1] 郭继昌,李重仪,郭春乐,等.水下图像增强和复原方

法研究进展[J].中国图象图形学报,2017,22(3):273-287.

Guo J C, Li C Y, Guo C L, et al. Research progress of underwater image enhancement and restoration methods [J]. Journal of Image and Graphics, 2017, 22(3): 273-287.

[2] Iqbal K, Salam R A, Osman A, et al. Underwater image enhancement using an integrated colour model[J]. IAENG International Journal of Computer Science, 2007, 34(2): 239-244.

[3] Garg D, Garg N K, Kumar M. Underwater image enhancement using blending of CLAHE and percentile methodologies[J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(20): 26545-26561.

[4] Hou G J, Pan Z K, Huang B X, et al. A hue preserving based approach for underwater color image enhancement [J]. IET Image Processing, 2017, 12(2): 292-298.

[5] Yu H F, Li X B, Lou Q, et al. Underwater image enhancement based on color-line model and homomorphic filtering[J]. Signal, Image and Video Processing, 2022,

- 16(1): 83-91.
- [6] 颜阳, 王颖, 丁雪妍, 等. 基于图像融合的自适应水下图像增强[J]. 计算机工程与设计, 2021, 42(1): 161-166. Yan Y, Wang Y, Ding X Y, et al. Adaptive underwater image enhancement method via image fusion[J]. Computer Engineering and Design, 2021, 42(1): 161-166.
- [7] 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. 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.
- [8] McGlamery B L. A computer model for underwater camera systems[J]. Proceedings of SPIE, 1980, 0208: 221-231.
- [9] 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.
- [10] Drews P, Jr, do Nascimento E, Moraes F, et al. Transmission estimation in underwater single images [C]//2013 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, December 2-8, 2013, Sydney, NSW, Australia. New York: IEEE Press, 2013: 825-830.
- [11] 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.
- [12] Song W, Wang Y, Huang D M, et al. A rapid scene depth estimation model based on underwater light attenuation prior for underwater image restoration[M]// Hong R C, Cheng W H, Yamasaki T, et al. Advances in multimedia information processing-PCM 2018. Lecture notes in computer science. Cham: Springer, 2018, 11164: 678-688.
- [13] Ding X Y, Liang Z, Wang Y F, et al. Depth-aware total variation regularization for underwater image dehazing[J]. Signal Processing: Image Communication, 2021, 98: 116408.
- [14] Xie J, Hou G J, Wang G D, et al. A variational framework for underwater image dehazing and deblurring [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2022, 32(6): 3514-3526.
- [15] Zhuang P X, Li C Y, Wu J M. Bayesian retinex underwater image enhancement[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2021, 101: 104171.
- [16] Jaffe J S. Computer modeling and the design of optimal underwater imaging systems[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1990, 15(2): 101-111.
- [17] Zhou J C, Liu Z Z, Zhang W D, et al. Underwater image restoration based on secondary guided transmission map[J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80(5): 7771-7788.
- [18] 简梦真, 李旦, 张建秋. 基于非均匀入射光成像模型的水下图像复原[J]. 光学学报, 2021, 41(15): 1501003. Jian M Z, Li D, Zhang J Q. Underwater image restoration based on non-uniform incident light imaging model[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(15): 1501003.
- [19] Pan J S, Hu Z, Su Z X, et al.  $L_0$ -regularized intensity and gradient prior for deblurring text images and beyond [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(2): 342-355.
- [20] 杨爱萍, 王金斌, 杨炳旺, 等. 联合深度去噪先验图像盲去模糊[J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1010003. Yang A P, Wang J B, Yang B W, et al. Joint deep denoising prior for image blind deblurring[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 1010003.
- [21] Kim J H, Jang W D, Sim J Y, et al. Optimized contrast enhancement for real-time image and video dehazing[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2013, 24(3): 410-425.
- [22] Tarel J P, Hautière N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]//2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision, September 29-October 2, 2009, Kyoto, Japan. New York: IEEE Press, 2009: 2201-2208.
- [23] Levin A, Weiss Y, Durand F, et al. Efficient marginal likelihood optimization in blind deconvolution[C]//2011 IEEE Conference on Computer Vision & Pattern Recognition, June 20-25, 2011, Colorado Springs, CO, USA. New York: IEEE Press, 2011: 2657-2664.
- [24] 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.
- [25] Yang Y, Peng Y H, Liu Z G. A fast algorithm for YCbCr to RGB conversion[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2007, 53(4): 1490-1493.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Li C Y, Anwar S, Porikli F. Underwater scene prior inspired deep underwater image and video enhancement [J]. Pattern Recognition, 2020, 98: 107038.
- [29] Yang M, Sowmya A. An underwater color image quality evaluation metric[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(12): 6062-6071.
- [30] 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.
- [31] Yang N, Zhong Q H, Li K, et al. A reference-free underwater image quality assessment metric in frequency domain[J]. Signal Processing: Image Communication, 2021, 94: 116218.