

基于双透射率水下成像模型的图像颜色校正

王国霖^{1,2,3}, 田建东^{1,2*}, 李鹏越^{1,2,4}

¹中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;

²中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110016;

³中国科学院大学, 北京 100049;

⁴东北大学机器人科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819

摘要 针对水下图像颜色失真的问题,提出了基于双透射率水下成像模型的图像颜色校正算法。在水下成像模型的基础上,将透射率定义为直接分量透射率和后向散射分量透射率;通过红色暗通道先验获得后向散射分量透射率,并精确估计背景光,利用无退化像素点获得三通道的直接分量透射率;最后将两个透射率代入成像模型获得复原图像。实验结果表明,该算法仅依靠物理模型便能有效地去除水下图像的色偏。

关键词 海洋光学; 水下图像; 双透射率; 暗通道先验; 颜色校正

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0901002

Image Color Correction Based on Double Transmission Underwater Imaging Model

Wang Guolin^{1,2,3}, Tian Jiandong^{1,2*}, Li Pengyue^{1,2,4}

¹State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China;

²Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴Faculty of Robot Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China

Abstract We propose an image color correction algorithm based on a double transmission underwater imaging model to solve the color distortion problem associated with the underwater images. First, we divide the transmission as direct component transmission and backscatter component transmission based on the underwater imaging model. Subsequently, the backscatter component transmission is obtained by a red-dark channel prior, the background light is accurately estimated, and the direct component transmission of three channels is obtained based on the non-degenerate pixel points. Finally, both the transmissions are inserted into the imaging model to obtain the restored image. The experimental results demonstrate that the proposed algorithm can effectively remove the color cast of underwater images by relying only on the physical model.

Key words ocean optics; underwater image; double transmission; dark channel prior; color correction

OCIS codes 010.7340; 100.2000; 100.2980; 330.1690

1 引言

在海洋资源勘探及海洋热液喷口周边的生物资源研究中,水下机器人起着重要作用^[1]。在水下机器人环境感知中,操作人员通过视觉系统完成引导水下机器人工作、协助机械手进行目标物体的定位

和抓取姿态的选取等重要任务。然而,水下视觉系统受水质对光的散射和吸收作用的影响非常严重^[2],会出现水下图像信噪比低、色偏和模糊不清等问题^[3]。校正退化图像的颜色、消除图像中的无用信息、提高图像进一步处理结果的可靠性,是水下图像清晰化的主要目的。

收稿日期: 2019-03-19; 修回日期: 2019-04-24; 录用日期: 2019-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(91648118, 61473280, 61333019)、国家自然科学基金创新群体项目(61821005)

* E-mail: tianjd@sia.cn

目前,应用于水下图像清晰化的方法较多,其中:Hitam 等^[4]利用直方图均衡化(HE)将图像的灰度扩展到全部灰度级范围,利用对比度增强改善图像的视觉效果;Ancuti 等^[5]采用图像融合策略(Fusion)融合了基于白平衡算法和基于对比度受限的自适应直方图均衡化方法,前者用于水下图像颜色的校正,后者用于提高图像的细节表达能力,最终得到了清晰无色偏的水下图像;3)Fu 等^[6]提出了一种基于 Retinex 的水下图像增强方法,利用颜色恒常理论,去除光照非均匀性的影响,恢复图像;4)He 等^[7]提出的暗通道先验(DCP)算法利用大气散射简化模型得到了良好的去雾效果,被广泛应用于图像去雾和水下图像清晰化的迁移应用;5)Wen 等^[8]提出了一种新水下成像模型,首次引入透射率和散射率概念,并在暗通道求解中仅考虑蓝色通道和绿色通道信息,完成了模型的求解;6)杨爱萍等^[9]在新水下成像模型的基础上引入红通道预判和饱和度指标,提高了新水下成像模型求解的精度和稳健性。在上述算法中,直方图均衡化方法能有效地提高图像对比度,但应用在水下图像颜色校正时容易导致背景光过分增强;图像融合策略算法能够显著增强图像的细节,但由于该方法未考虑成像模型,增强后的图像容易出现颜色失真;DCP 算法能够较好地估计图像的透射率和背景光,但由于未考虑水体对光线的选择性吸收作用,算法的恢复效果受限;新水下成像模型方法虽然充分考虑了透射率的波长依赖关系,但两种基于新水下成像模型的图像复原方法在求解过程中仍保留着透射率和散射率的加法关系,与原成像模型无本质区别。

针对上述算法存在的问题,本文根据最新的水下辐射传递方程(RTE)的研究成果,提出了一种基于双透射率水下成像模型的图像颜色校正算法。该算法采用双透射率成像模型代替原模型,并在求解过程中仅保留两个透射率传输距离相同这一必要联系,在不利用其他信息的条件下,依靠单幅图像完成了模型的求解,最终实现了水下图像的颜色校正。

2 水下图像复原算法

水下图像复原算法利用单幅或多幅图像获得水下成像模型参数,采用逆模型方式实现图像的复原,复原效果较好,且与增强算法相比更可靠,目前该方法已被广泛应用于水下图像的颜色校正和模糊去除。原水下图像复原算法和雾天图像复原算法解决了光线在介质中传播时发生散射退化的问题。因此,依据大气散射简化模型推导的水下成像模型的图像复原方法得到了快速发展^[10-13],该方法在水下色偏现象较弱时表现出了良好的复原效果,然而当水下图像出现严重色偏或水体吸收作用不能忽略时,会出现复原效果不稳定甚至失效等问题。考虑水体的吸收作用,完善水下成像模型是水下图像复原算法研究的一个主要方向。

2.1 水下成像模型

在水下图像处理研究领域,Jaffe-McGlamery^[14]水下光学成像系统(图1)被广泛应用于水下图像复原算法,该系统将相机接收到的光分为3部分:直接分量、前向散射分量和后向散射分量。其中,前向散射分量对成像影响的研究一般可以分为两种:一种是通过实验验证^[15]。前向散射分

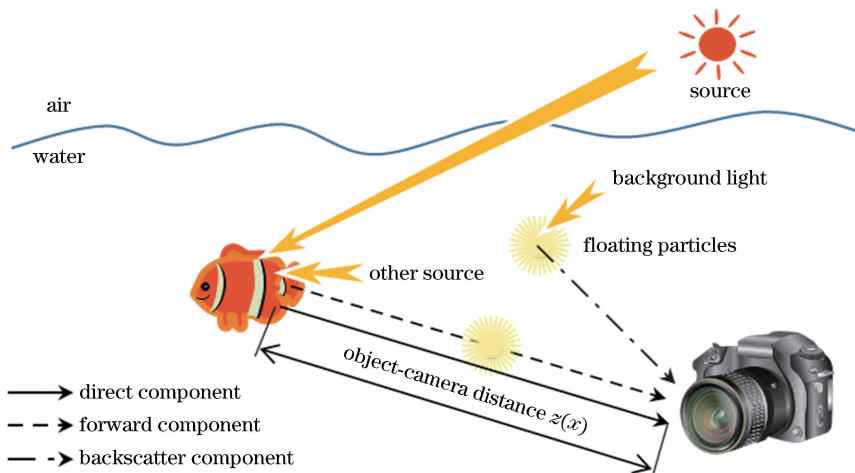


图1 水下光学成像系统

Fig. 1 Underwater optical imaging system

量较直接分量对成像结果的影响较小,因此直接忽略前向散射分量。另一种是将前向散射分量作为小角度散射的直接分量^[16],表示为直接分量与点扩展函数的卷积。目前有关前向散射分量的研究较少,本文算法主要针对与色偏现象有关的直接分量,不考虑前向散射分量。

现有的水下成像模型^[17]考虑水体对光的选择性吸收导致的 R、G、B 三通道衰减系数的差异,在大气散射模型的基础上进行改进,即

$$I_c = J_c t_c + A_c (1 - t_c), \quad (1)$$

式中: c 代表颜色通道 R、G、B; $J_c t_c$ 为直接分量; $A_c (1 - t_c)$ 为后向散射分量; I_c 为水下拍摄的图像; J_c 为复原后无色偏的清晰水下图像; A_c 为背景光(无穷远处测得的后向散射分量)。

2.2 双透射率水下成像模型

文献[11]通过实验证明了直接分量的衰减系数和后向散射分量的衰减系数不一致。本文基于(1)式,根据文献[11]的结论,定义了双透射率水下成像模型

$$I_c(x) = J_c(x) t_c^{(D)}(x) + A_c [1 - t_c^{(B)}(x)], \quad (2)$$

式中: $J_c(x) t_c^{(D)}(x)$ 为直接分量; $A_c [1 - t_c^{(B)}(x)]$ 为后向散射分量。由于 $t_c^{(D)}(x) \neq t_c^{(B)}(x)$, 因此 $t_c^{(D)}(x)$ 和 $t_c^{(B)}(x)$ 不能统称为透射率。考虑到 $t_c^{(D)}(x)$ 控制着直接分量在成像模型中的比例, $t_c^{(B)}(x)$ 控制着后向散射分量在成像模型中的比例,同时这两项参数均属于透射率范畴,故本文将 $t_c^{(D)}(x)$ 命名为直接分量透射率, $t_c^{(B)}(x)$ 命名为后向散射分量透射率。

假设传输介质为均匀介质,根据 Lambert-Beer 定律^[18],水中光的传输透射率表达式为

$$t_c(x) = \exp[-\sigma_c z(x)], \quad (3)$$

式中: $t_c(x)$ 为像素点 x 对应的透射率; $z(x)$ 为像素点 x 到相机的光线传输距离; σ_c 为衰减系数。

双透射率模型的直接分量透射率表达式为

$$t_c^{(D)}(x) = \exp[-\sigma_c^{(D)} z(x)], \quad (4)$$

式中: $\sigma_c^{(D)}$ 为直接分量的衰减系数,该系数和光线传输距离、光线波长相关。但从本文所用的简化模型和已知信息分析可知, $\sigma_c^{(D)}$ 随 $z(x)$ 的变化将导致参数无法求解,且水下拍摄时物体与相机的距离较小, $z(x)$ 较小, $z(x)$ 的变化对 $\sigma_c^{(D)}$ 的影响较小。因此,忽略 $z(x)$ 对 $\sigma_c^{(D)}$ 的影响,仅考虑 $\sigma_c^{(D)}$ 随光线波长变化在 R、G、B 三通道的变化。

双透射率模型的后向散射分量透射率的表达式为

$$t_c^{(B)}(x) = \exp[-\sigma_c^{(B)} z(x)], \quad (5)$$

式中: $\sigma_c^{(B)}$ 为后向散射分量的衰减系数,该系数和光线波长弱相关^[11]。为了满足实际求解的需要,在不利用其他先验信息复原单幅水下图像的情况下,忽略此处的弱相关,得到的最终关系式为

$$t_c^{(B)}(x) = t_R^{(B)}(x) = t_G^{(B)}(x) = t_B^{(B)}(x). \quad (6)$$

3 模型求解

对比双透射率成像模型和原模型可以看出,模型增加了一个变量,该变量能有效提升水下图像复原算法中成像模型的完整性。然而,变量的增加会直接导致模型稳健性下降,计算量增大,且原透射率求解方法不再适用。因此,本文基于原 DCP 透射率估计算法,提出了新的双透射率估计算法。

3.1 红色暗通道先验

自然无雾状态下非天空的局部区域内至少存在一个像素点,在 R、G、B 三通道中某通道的值较低^[7],该规律即为暗通道先验,其数学定义为

$$J^{(\text{dark})}(x) = \min_{c \in \{R, G, B\}} \{ \min_{y \in \Omega(x)} [J_c(y)] \} \approx 0, \quad (7)$$

式中: $J^{(\text{dark})}(x)$ 为暗通道先验值; $\Omega(x)$ 为中心像素点为 x 的像素区域; $J_c(y)$ 为 y 点的无雾清晰图像在 R、G、B 三通道的值。暗通道先验理论指出,自然无雾非天空区域下的像素点 $J^{(\text{dark})}(x) \rightarrow 0$ 。

相比于雾的散射,水下退化图像除了存在介质对光的散射外,还存在介质对光的吸收,吸收作用直接导致不同波长的光在水下经过相同距离时衰减程度不同,造成水下图像的严重色偏问题。DCP 算法的核心思想为暗通道先验,色偏的出现导致 R 通道值过小,求得的透射率过大,算法无法正常使用。为了应对水下图像复原的需要, Galdran 等^[10]提出了 DCP 的改进算法 RDCP,即

$$J^{(\text{RDCP})}(x) = \min \left\{ \min_{y \in \Omega(x)} [1 - J_R(y)], \min_{y \in \Omega(x)} [J_G(y)], \min_{y \in \Omega(x)} [J_B(y)] \right\} \approx 0, \quad (8)$$

式中: $J^{(\text{RDCP})}(x)$ 为红色暗通道先验值。该公式利用 $[1 - J_R(y)]$ 代替 $J_R(y)$, 避免了水对光的选择性吸收导致的 R 通道值较低的问题,有效解决了暗通道先验方法在水下图像存在严重色偏时失效的问题,完成了透射率求解。

3.2 背景光

水体和水中悬浮物对光线的选择性吸收导致水下图像存在严重的色偏现象。水中悬浮物对环境光的后向散射,导致了图像的雾化现象。色偏现象和雾化现象统称为水下图像的退化现象。随着传输距

离的增加,退化现象呈指数增加,如(3)式所示,传输距离与透射率存在指数关系,如(2)式所示,在无穷远处 $1 - t_c^{(B)}(x) = 1$,后向散射分量等于背景光,可以看出,背景光像素点即为拍摄场景中的最远像素点。

水下图像的背景光的选取会受到人造光照环境和白色物体的干扰,导致图像中亮度最大的区域不再为背景光区域。因此,背景光的选取需要从两方面考虑:一方面,背景光对应的背景区域具有局部亮度变化缓慢的特点,因此该区域在三通道的局部像素的标准差均较小;另一方面,背景区域的色偏最严重,因此该区域色偏最大的颜色通道的像素均值较大。为了获得稳健性的背景区域,同时避免人造光照环境和白色物体对背景光估计的影响,本文首先对图像进行四叉树分级搜索,找到上述标准差较小且均值较大的图像块作为目标区域;然后,为了避免背景光估计值过大造成的过度恢复现象,选取目标区域内与纯黑色像素点欧式距离最小的点的像素值作为图像的背景光。

3.3 后向散射分量透射率

根据 DCP 透射率求解方法和文献[16]中的推

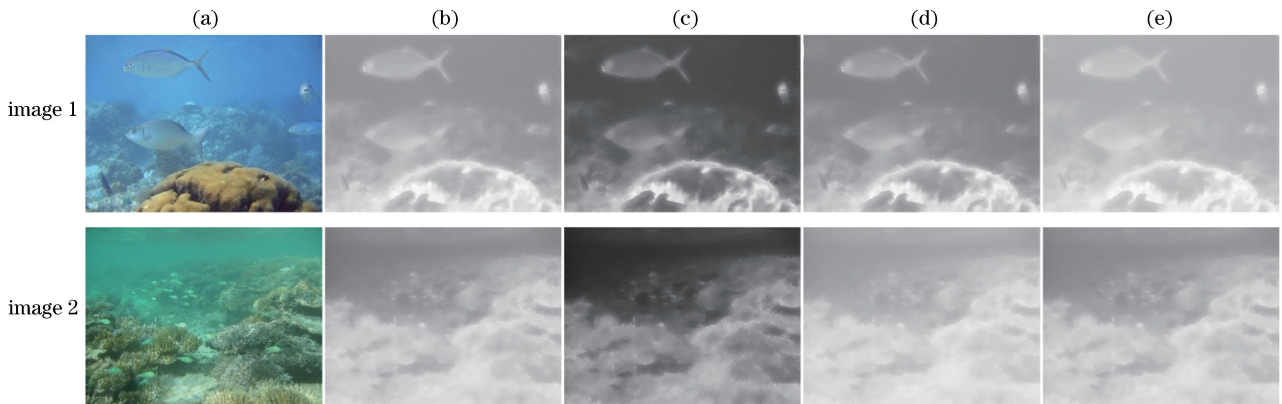


图2 图像透射率。(a)原始图像;(b)后向散射分量透射率;(c) R 通道直接分量透射率;(d) G 通道直接分量透射率;(e) B 通道直接分量透射率

Fig. 2 Image transmission. (a) Original images; (b) backscatter component transmission; (c) direct component transmission of R channel; (d) direct component transmission of G channel; (e) direct component transmission of B channel

3.4 直接分量透射率

由(2)式可知,为了从单幅图像中获取 $t_c^{(D)}(x)$,完成水下图像色偏的校正,需要已知 $J_c(x)$,即找到图像中无退化像素点或像素区域。但在色偏比较严重的水下图像中无法直接得到无退化像素点。为解决该问题,本文利用符合无雾大气环境的空中透视现象^[7]和灰度世界假设^[19]指导背景光的恢复。

符合无雾大气环境的空中透视现象表示为:自然环境中人眼通过空中透视现象判断距离的远近,

导过程,首先将(2)式所示的双透射率水下成像模型变形为

$$\frac{I_c(x)}{A_c} = \frac{J_c(x)}{A_c} t_c^{(D)}(x) + [1 - t_c^{(B)}(x)], \quad (9)$$

将(8)式代入(9)式,得到简化项

$$\frac{J^{(RDCP)}(x)}{A_c} t_c^{(D)}(x) \approx 0, \quad (10)$$

利用(10)式将未知量 $t_c^{(D)}(x)$ 消去,获得最终结果

$$t_c^{(B)}(x) = 1 - \min \left\{ \frac{\min_{y \in \Omega(x)} [1 - I_R(y)]}{1 - A_R}, \frac{\min_{y \in \Omega(x)} I_G(y)}{A_G}, \frac{\min_{y \in \Omega(x)} I_B(y)}{A_B} \right\}. \quad (11)$$

为了观测背景光在图像中的占比,本文分析了后向散射分量透射率。后向散射分量透射率如图2(b)所示,图中像素点的值越小,表明该区域的色偏越严重,复原后图像的颜色变化越明显。本文算法在获取后向散射分量透射率图后,为了避免透射率图求解过程中采用局部最小值方法所引起的块效应、提高图像复原精度、降低图像处理的时间成本,最终选择导向滤波作为透射率图的后处理算法。

还原三维立体世界。灰度世界假设表示为:一幅色彩变化较大的图像的 R、G、B 元素的平均值合成的是一种普通的灰色。为了修正水体吸收带来的色偏影响,还原真实色彩图像,需将图像背景还原为水体固有颜色或水体对光造成均匀衰减时呈现的黑色。然而,水体的远距离无色偏观测和无吸收水体的无穷远观测在真实世界无法实现,因此本文引入空中透视现象和灰度世界假设,将无色水体的无穷远观测取薄雾色,并根据光照环境作不同的处理,即:当

原图背景光较其他区域亮度值较大时,表明该图像拍摄于自然光照环境,为了不破坏原图的光照环境,采用了三通道亮度值的平均值作为背景光校正的结果;当原图背景光亮度值小于或等于其他区域的亮度时,表明该图像拍摄于人造光照环境,为了避免恢复图像的整体亮度不够,提高三通道亮度值的平均值并将其作为背景光校正的结果,参考值为原亮度值的 1.4 倍。

在 3.2 节得到了背景光和其所在图像位置。为了避免背景光 R 通道值为 0 造成的恢复图像的 R 通道过度增强,设背景光 R 通道的最小值为 25,定义背景光像素点为 x_0 。 x_0 像素点受水体的吸收作用最强,色偏最大,因此更易于用来校正水下图像的颜色。将校正的背景光值代入像素点 x_0 ,得到无退化像素点的值 $J_c(x_0)$ 。将 $J_c(x_0)$ 代入(2)式,求得直接分量透射率为

$$t_c^{(D)}(x_0) = \frac{I_c(x_0) - A_c[1 - t_c^{(B)}(x_0)]}{J_c(x_0)}。 \quad (12)$$

考虑到后向散射分量透射率和直接分量透射率在参数 $z(x)$ 上具有的相关性,为了获得图像中的所有像素点的直接分量透射率,将(4)式代入(5)式,可得

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_c^{(D)}}{\sigma_c^{(B)}} &= \frac{\ln t_c^{(D)}(x_0)}{\ln t_c^{(B)}(x_0)}, \quad (13) \\ t_c^{(D)}(x) &= \exp[-\sigma_c^{(D)}z(x)] = \\ &\{\exp[-\sigma_c^{(B)}z(x)]\}^{\frac{\sigma_c^{(D)}}{\sigma_c^{(B)}}}。 \quad (14) \end{aligned}$$

图 2(c)、(d)和(e)分别反映了波长 620 nm 附近的红光、540 nm 附近的绿光和 450 nm 附近的蓝光在传输过程中的衰减情况。可以看出,3 组图均满足距离越远衰减程度越剧烈的特点。比较 3

组图可以看出,红光衰减得最快,蓝光和绿光在不同水域的衰减程度不同。以上现象符合水中光线传播的规律,说明本文利用空中透视现象和灰度世界假设作为背景光恢复的指导切实可行。虽然该方法能够较好地实现直接分量透射率的获取,但图像中无背景区域时,图像的恢复结果失去了原有的稳定性,此时利用图像的三通道均值代替背景光能有效解决该问题。

3.5 总流程

综上所述,本文基于双透射率水下成像模型的图像颜色校正流程如图 3 所示。

将(2)式进行变形,得

$$J_c(x) = \frac{I_c(x) - A_c[1 - t_c^{(B)}(x)]}{\max[t_c^{(D)}(x), t_0]}, \quad (15)$$

(15)式中的 t_0 是为避免 $t_c^{(D)}(x)$ 过小而设置的临界值,该值能有效防止恢复图像出现过亮像素点或像素区域。将 3.2 节得到的背景光、(11)式得到的后向散射分量透射率和(14)式得到的直接分量透射率代入(15)式,得到最终复原的水下图像。

4 实验结果与分析

将本文算法与文献[13]算法、文献[5]中图像融合增强(Fusion)算法和文献[10]中 RDCP 复原算法进行对比实验,同时考虑到本文算法为模型的改进方法,将本文算法和文献[8]算法、文献[16]算法进行恢复效果对比。文献[13]算法首先利用卷积神经网络(CNN)和自适应双边滤波,为水下成像模型提供了高精度透射图,并实现了图像复原,然后将复原结果和基于白平衡的色偏去

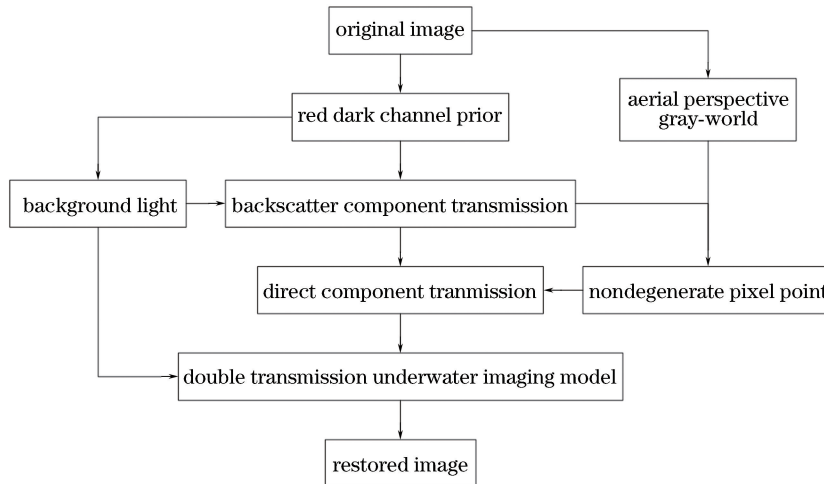


图 3 算法流程

Fig. 3 Algorithm flow

除算法的结果进行多尺度融合,最后利用 HWD (hybrid wavelets and directional filter banks)方法对融合结果进行去噪和边缘增强,获得了清晰无色偏水下图像。在恢复效果和图像质量对比中,考虑到图像质量评价指标和图像边缘细节有关,本文算法不涉及后续增强步骤,未进行图像边缘处理。为了保证比较的公平性,同时验证本文算法二次处理的有效性,加入包含锐化算法处理的实验作为对比项。锐化采用 MATLAB 内置自适应

直方图均衡化算法 *adaphisteq*,对 CIELab 颜色模型的亮度分量 L 进行处理。

4.1 颜色校正对比

为了验证本文算法颜色校正的表现,本文进行了水下色板颜色校正的对比实验。图 4(a)、(b)截取于文献[20],图像质量较差,其中图 4(a)为空气中自然光照条件下拍摄的 6 色色板图,图 4(b)为水下 15 m 处拍摄的图像。可以看出,图像整体存在蓝色色偏,色板的红色色块亮度较暗。

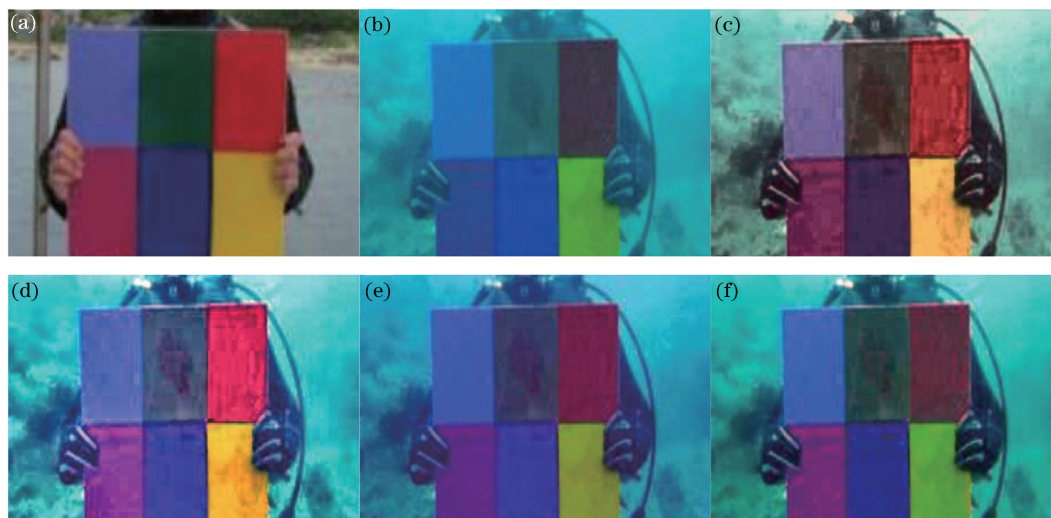


图 4 颜色校正实验。(a)标准色板;(b)原始图像;(c)文献[13]算法;(d) Fusion 算法;(e) RDCP 算法;(f)本文算法

Fig. 4 Color correction test. (a) Standard color checker; (b) original image; (c) method in Ref. [13]; (d) Fusion method; (e) RDCP method; (f) proposed method

从图 4(c)、(d)可以看出,文献[13]算法和 Fusion 算法的颜色恢复较好,且图像细节也得到了明显增强,但图像红色色块增强过度。从图 4(e)可以看出,基于成像模型复原的图像比较自然。从图 4(f)可以看出,本文算法复原的图像,红色色块亮度正常,绿色色块恢复结果较为自然。虽然本文算法可以解决图像的色偏问题,但其利用空中透视现象和灰度世界假设作为背景光恢复的指导,校正后的图像饱和度有所下降。

4.2 恢复效果对比

实验所用图像的来源如下:岩石来自文献[10],珊瑚和鱼来自网络,图 5 中的岩石图像和图 7 中的鱼图像均存在严重的绿色色偏,且两幅图的拍摄环境均有人造光源干扰项。图 6 需同时恢复近处珊瑚和远处植物。

由图 5(b)和图 7(b)可以看出,文献[13]算法处理后的图像已无明显的色偏现象,图像细节得到了较大增强。由图 5(c)可以看出,Fusion 算法处理后的图像比较清晰,且色偏现象得到了很大程度的改

善,色彩鲜艳,但该算法由于未考虑成像模型,增强后的图像色偏这一本质问题未被解决,导致岩石处理后变成了鲜艳的粉色,而远景中的岩石仍存在绿色色偏。由图 6(d)可以看出,RDCP 算法恢复后的图像颜色更加自然,且物体的边缘细节也得到了提高,但该算法的恢复效果有限,恢复后的图像仍存在一定的色偏。由图 5(e)可见,本文算法恢复后的人造光照环境更加自然,且远景的岩石残留的绿色色偏较少,图像整体呈无色偏状态。由图 6(e)可以看出,珊瑚和远处植物颜色恢复得较好。由图 7(e)可以看出,环境光更加自然,视觉效果较好。在图 8 中,图 8(a)来自网络,图 8(b)截取于相应文献。image 1 和 image 2 为本文算法与文献[8]算法的比较,image 3 和 image 4 为本文算法与文献[16]算法的比较。可以看出,文献[8]算法能够较好地提高图像的对比度,文献[16]算法能在一定程度上解决图像的色偏问题。与这两种算法相比,本文算法恢复的图像颜色较自然,水体的蓝色色偏或绿色色偏都得到了有效校正。

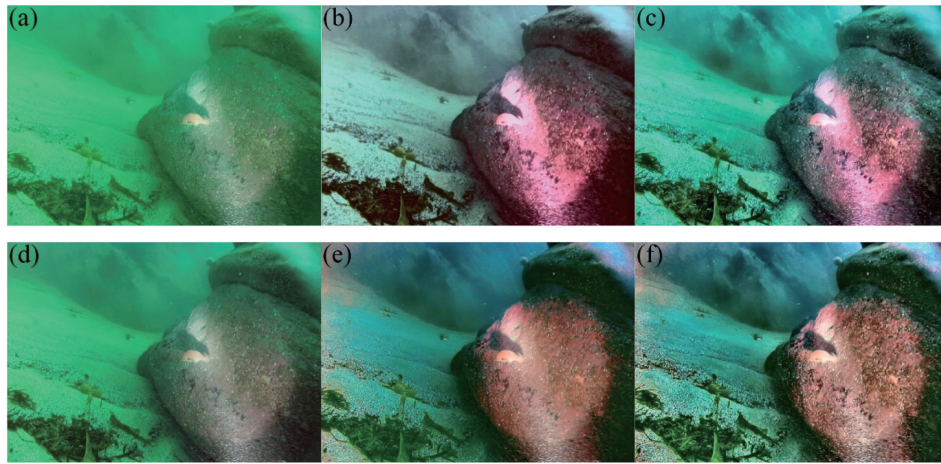


图 5 岩石颜色校正对比。(a)原始图像;(b)文献[13]算法;(c) Fusion 算法;(d) RDCP 算法;(e)本文算法;(f)本文算法加锐化
 Fig. 5 Comparison of pena color correction. (a) Original image; (b) method in Ref. [13]; (c) Fusion method;
 (d) RDCP method; (e) proposed method; (f) proposed method and sharpening method

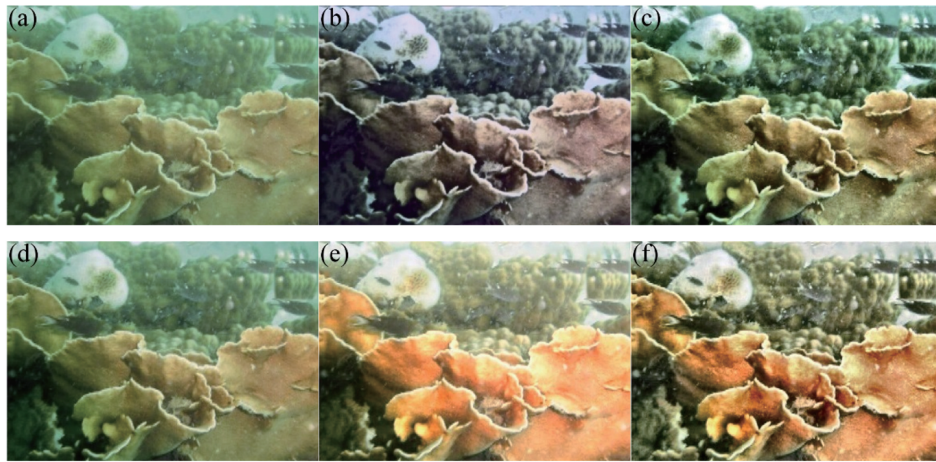


图 6 珊瑚颜色校正对比。(a)原始图像;(b)文献[13]算法;(c) Fusion 算法;(d) RDCP 算法;(e)本文算法;(f)本文算法加锐化
 Fig. 6 Comparison of coral color correction. (a) Original image; (b) method in Ref. [13]; (c) Fusion method;
 (d) RDCP method; (e) proposed method; (f) proposed method and sharpening method

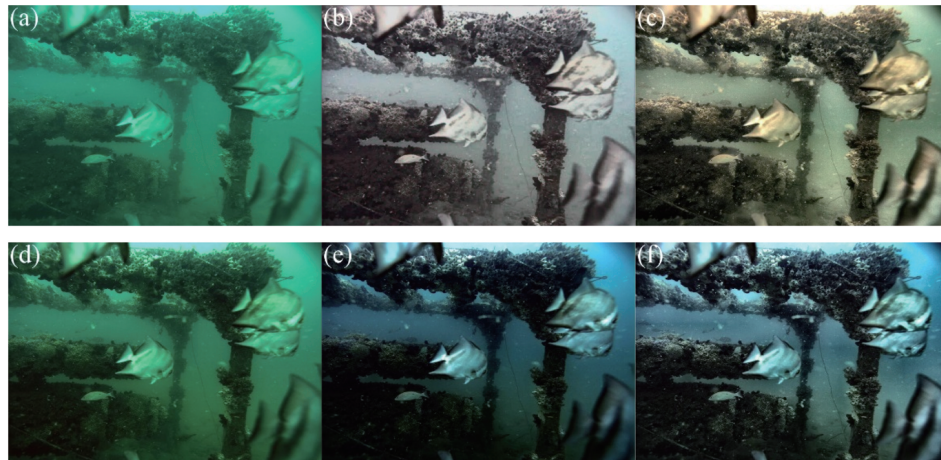


图 7 鱼颜色校正对比。(a)原始图像;(b)文献[13]算法;(c) Fusion 算法;(d) RDCP 算法;(e)本文算法;(f)本文算法加锐化
 Fig. 7 Comparison of fish color correction. (a) Original image; (b) method in Ref. [13]; (c) Fusion method;
 (d) RDCP method; (e) proposed method; (f) proposed method and sharpening method

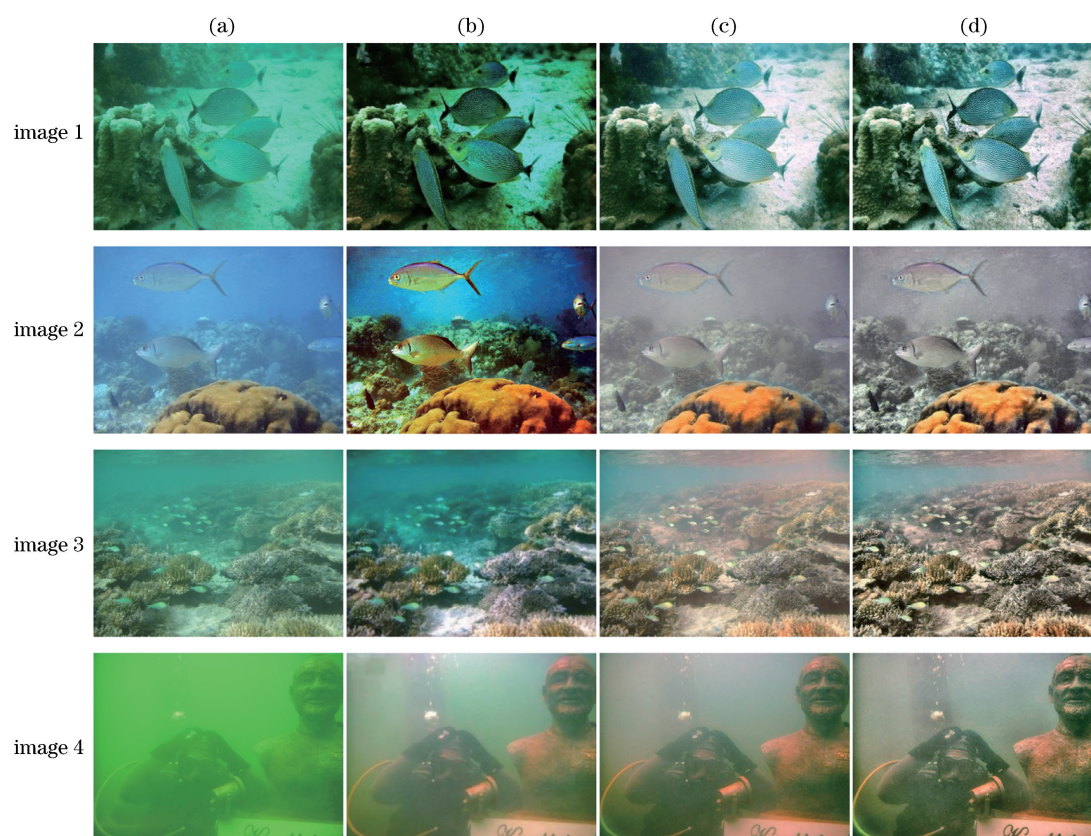


图 8 水下图像颜色校正对比。(a)原始图像;(b)文献[8]算法、文献[16]算法;(c)本文算法;(d)本文算法加锐化

Fig. 8 Comparison of underwater color correction. (a) Original image; (b) methods in Ref. [8] and Ref. [16]; (c) proposed method; (d) proposed method and sharpening method

本文算法虽然能够较好地解决水下图像的色偏问题,但由于未加入增强算法作为后处理,细节恢复相比文献[13]算法和 Fusion 算法较差。本文算法加入增强算法后,未破坏原算法去除色偏的结果,颜色校正更加自然,且细节也得到了较好的恢复。

4.3 图像质量对比

针对水下图像无参考的特征,选用 3 个指标对图像质量进行量化:自然图像质量评价指标(NIQE)^[21]、图像信息熵(Entropy)和水下彩色图像质量评价指标(UCIQE)^[22]。

NIQE 满足水下图像无参考的特点,通过单幅图像将现有图像与原训练好的模型参数进行对比,便可得到主观评价分数。NIQE 与图像的自然性存在负相关,其值越小,图像越接近自然状态。Entropy 反映了待评价图像的平均信息量,清晰图像比模糊图像的熵值高。UCIQE 为基于 CIELab 颜色模型,专用于水下图像质量评测的指标,其值为图像的色度、饱和度和对比度的加权线性组合,UCIQE 值越大,说明图像的视觉效果越好。

表 1 为岩石、珊瑚和鱼 3 个实验的 NIQE、Entropy 和 UCIQE 指标的对比结果,加粗字体表示

对比结果最好。本文算法在未加锐化算法前复原的图像的 NIQE 和 UCIQE 均优于复原算法 RDCP,说明本文算法复原的图像更加自然,且色度和饱和度得到了更好的处理。加入锐化算法后,图像的 NIQE 和 UCIQE 均优于其他对比算法,Entropy 逼近 Fusion 算法,说明本文算法加入后续增强算法时,能在不破坏复原效果的前提下大幅提升图像的清晰度。

从指标对比可以看出,本文在未使用增强算法(直方图均衡化、锐化、白平衡等)时,仅依靠双透射率水下成像模型复原图像即可得到比较自然的复原图像,较好地重现了水下图像的色度和饱和度,且加入增强算法后,图像清晰度大幅提升,4.2 节恢复效果的对比验证了这一结论。

5 结 论

水下图像存在严重的色偏现象,导致利用暗通道先验对水下图像复原的方法失效,虽然 DCP 算法的水下改进算法 RDCP 能够较好地估计出透射率图,解决了暗通道先验失效这一问题,但其应用的由大气散射简化模型推导的水下成像模型不能较好地

表 1 处理方法的定量对比
Table 1 Quantitative comparison of processing methods

Image	Method	NIQE	Entropy	UCIQE
Pena	Original image	3.5468	7.6955	0.4498
	Method in Ref. [13]	3.8308	7.8418	0.6283
	Fusion	2.5636	7.9016	0.6276
	RDCP	3.0422	6.8497	0.4996
	Proposed method	2.9687	7.5814	0.6141
	Proposed method and sharpening method	2.4129	7.7540	0.6380
Coral	Original image	5.2514	7.4796	0.5279
	Method in Ref. [13]	5.2671	7.7947	0.5889
	Fusion	4.7605	7.8954	0.6294
	RDCP	5.4237	7.6856	0.5857
	Proposed method	5.2806	7.8215	0.6272
	Proposed method and sharpening method	4.7270	7.9351	0.6378
Fish	Original image	4.8431	7.4274	0.5120
	Method in Ref. [13]	4.5606	7.6409	0.5270
	Fusion	2.8281	7.7144	0.5871
	RDCP	3.0210	7.0727	0.5661
	Proposed method	2.7140	7.1059	0.6177
	Proposed method and sharpening method	2.7617	7.4806	0.6049

表达水对光的吸收作用,因此未从根本上解决水下图像复原的色偏问题。最新的水下辐射传递方程(RTE)的研究表明,直接分量的衰减系数和后向散射分量的衰减系数不一致,本文将这一理论引入成像模型,定义了带有两种透射率的水下成像模型,并通过单幅水下图像完成了模型求解,实现了水下图像的颜色校正。实验结果表明,相较于传统水下图像清晰化算法,本文仅使用双透射率水下成像模型的复原算法得到的复原图像更加自然,视觉效果更好,且加入增强算法后,图像细节能得到较大提升。

参 考 文 献

- [1] Bryson M, Johnson-Roberson M, Pizarro O, *et al.* True color correction of autonomous underwater vehicle imagery[J]. *Journal of Field Robotics*, 2016, 33(6): 853-874.
- [2] 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.
- [3] Tian J D, Murez Z, Cui T, *et al.* Depth and image restoration from light field in a scattering medium [C]//2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), October 22-29, 2017, Venice. New York: IEEE, 2017: 2401-2410.
- [4] Hitam M S, Yussof W N J H W, Awalludin E A, *et al.* Mixture contrast limited adaptive histogram equalization for underwater image enhancement[C]//2013 International Conference on Computer Applications Technology (ICCAT), January 20-22, 2013, Sousse. New York: IEEE, 2013: 6522017.
- [5] Ancuti C, Ancuti C O, Haber T, *et al.* Enhancing underwater images and videos by fusion [C]//2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 16-21, 2012, Providence, RI. New York: IEEE, 2012.
- [6] Fu X Y, Zhuang P X, Huang Y, *et al.* A retinex-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, 2014: 4572-4576.

- [7] 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.
- [8] Wen H C, Tian Y H, Huang T J, *et al.* Single underwater image enhancement with a new optical model[C]//2013 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS2013), May 19-23, 2013, Beijing. New York: IEEE, 2013: 753-756.
- [9] Yang A P, Qu C, Wang J, *et al.* Underwater image visibility restoration based on underwater imaging model [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(2): 298-305.
杨爱萍, 曲畅, 王建, 等. 基于水下成像模型的图像清晰化算法 [J]. 电子与信息学报, 2018, 40(2): 298-305.
- [10] 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.
- [11] Akkaynak D, Treibitz T. A revised underwater image formation model [C]//2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 18-23, 2018, Salt Lake City, UT. New York: IEEE, 2018: 6723-6732.
- [12] Han M, Chen C. Enhancing underwater image by dark channel prior and color correction [C]//2016 Sixth International Conference on Information Science and Technology (ICIST), May 6-8, 2016, Dalian, China. New York: IEEE, 2016: 505-510.
- [13] 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.
- [14] McGlamery B L. A computer model for underwater camera systems [J]. Proceedings of SPIE, 1980, 208: 221-231.
- [15] 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, Australia. New York: IEEE, 2013: 825-830.
- [16] 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.
- [17] Akkaynak D, Treibitz T, Shlesinger T, *et al.* What is the space of attenuation coefficients in underwater computer vision? [C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), July 21-26, 2017, Honolulu, HI. New York: IEEE, 2017: 4931-4940.
- [18] Gordon H R. Can the Lambert-Beer law be applied to the diffuse attenuation coefficient of ocean water? [J]. Limnology and Oceanography, 1989, 34(8): 1389-1409.
- [19] Foster D H. Color constancy [J]. Vision Research, 2011, 51(7): 674-700.
- [20] 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.
- [21] Mittal A, Soundararajan R, Bovik A C. Making a “completely blind” image quality analyzer [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2013, 20(3): 209-212.
- [22] Yang M, Sowmya A. An underwater color image quality evaluation metric [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(12): 6062-6071.