

基于背景光估计与暗通道先验的水下图像复原

谢昊伶¹, 彭国华¹, 王凡¹, 杨成²

¹西北工业大学理学院, 陕西 西安 710025

²北京大学工学院, 北京 100871

摘要 依据背景光的海洋光学定义,提出了一种新的自然光照条件下的水下图像复原方法。基于合理假设及光学理论公式推导,估计出计算背景光所需的水体光学参数(衰减系数和散射系数);利用散射系数与波长的关系分别计算红、绿、蓝三个通道的传输函数值,并使用导向滤波精细化传输图像;最终通过逆求解成像模型复原水下图像。实验结果表明所提算法在恢复场景物体原始颜色及去除背景散射方面有一定的优势。

关键词 海洋光学; 水下图像复原; 背景光理论值; 暗通道先验; 自然光照

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0101002

Underwater Image Restoration Based on Background Light Estimation and Dark Channel Prior

Xie Haoling¹, Peng Guohua¹, Wang Fan¹, Yang Cheng²

¹School of Natural and Applied Sciences, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710025, China;

²College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract A new underwater image restoration method under natural light is proposed according to the ocean optics definition of background light. Optical parameters of water (attenuation coefficient and dissipation coefficient) used to calculate the background light are estimated based on reasonable hypothesis and deduction of optical theory formula. The relationship between scattering coefficient and wavelength is used to calculate the values of transmission functions of three channels (red, green and blue), and guided filtering is used to refine the transmission image. Finally, the underwater image is reconstructed with an inverse solving imaging model. Experimental results show that the proposed algorithm has some advantages in restoring the original color of the scene and removing the backscattering.

Key words oceanic optics; underwater image restoration; theoretical value of background light; dark channel prior; natural lighting

OCIS codes 010.7340; 010.1350; 100.2000; 330.7326;

1 引 言

近年来,随着军事、经济以及生物学的发展,海洋已经逐渐成为各国学者研究的热点。水下图像作为一种水下信息载体,为了解海洋环境提供了非常好的素材。水下恶劣的成像条件使得 CCD 所采集到的图像质量普遍较差。水分子和悬浮颗粒对光

的散射效应使得图像普遍存在带雾感,降低了图像对比度;前向散射造成图像细节模糊;不同波长的光在水中传输时的衰减系数不同,造成水下成像物体颜色退化^[1];这些都严重影响了后续可能进行的特征提取和目标识别。

水下图像复原方法基于水下成像模型,通过逆求解成像模型来获取复原图像,该方法依赖于对水

收稿日期: 2017-05-23; 收到修改稿日期: 2017-08-21

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2015JM6296)

作者简介: 谢昊伶(1993—),女,硕士研究生,主要从事水下图像处理和目标识别方面的研究。

E-mail: xiehaoling@mail.nwpu.edu.cn

导师简介: 彭国华(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事图像处理和计算机辅助几何设计方面的研究。

E-mail: penggh@nwpu.edu.cn

体光学参数、相机参数、水体点扩散函数及景物距离等信息的获取。Bongiorno 等^[2]根据实验测量数据计算衰减系数,建立了彩色传递函数,并结合相机的相应光谱曲线对失真图像的颜色进行校正。Wang 等^[3]基于对水下图像后向散射光噪声的分析,估计出水体的点扩散函数,并将测得的所需水体光学参数用于图像复原。以上图像复原方法都需预知水体光学参数及物距等信息。实际上,不同水域、甚至是同一水域在不同时间的水体光学参数都有所不同,这一特点大大限制了水下图像复原方法的使用。2009年,何恺明^[4]提出暗通道先验理论,用于大气去雾。自然光照条件下水下图像退化的主要原因是水体或水中的悬浮颗粒对光有散射作用,这与大气中雾天成像原理相似^[5]。使用暗通道先验原理复原图像不需要事先测量水体光学参数,因此理论上可以将该方法用于水下图像复原。但自然光照条件下的水下图像与雾天图像又有一些区别:不同于雾天中的白色,水下图像呈现蓝(绿)色基调,因此直接将暗通道先验原理应用于水下图像复原效果欠佳。

Li 等^[6]应用暗通道理论,使用导向三角双边滤波估计透射率,结合去噪及颜色校正方法来恢复图像,未对全局背景光的估计做较大改进;杨爱萍等^[7]在暗通道先验的基础上利用灰度阴影法去除颜色失真,并修改了透射率及全局背景光的估计准则;该算法对全局背景光的选取依赖于透射率图的估计,即依赖于原始场景内容。如果采集到的图像存在过曝和光照不均等问题,该方法估计出的背景光数值也会受到较大影响;Zhao 等^[8]基于暗通道图像复原理论,分别计算了红(R)、绿(G)、蓝(B)三个通道的透射率图,在全局背景光的估计准则上先选取暗通道内前 0.1% 最亮的像素点,在这些像素点中有最大 G-R 或 B-R 值的被认为是全局背景光所在像素点。该估计准则能在一定程度上减小水中白色物体对全局背景光估计的干扰。但当水中白色区域较大时,暗通道内前 0.1% 最亮的像素点大部分、甚至是全部会落在白色区域,使最终估计的全局背景光数值偏大,从而影响图像复原质量。

本文通过实验发现对水中全局背景光估计的好坏在很大程度上影响了图片复原的质量,因此结合海洋光学理论及暗通道先验原理提出了一种新的自然光照条件下的水下图像复原方法。主要工作包括:1)对全局背景光进行理论值估计;2)利用散射系数与波长之间的关系,分别计算三个通道的透射率;3)使用导向滤波对透射率图进行精细化处理,以提

高图像复原的速度。本文算法在无需人为提供水体光学参数的前提下自适应地复原图像,且遇到较为恶劣的成像条件时也能较好地控制全局背景光的估计值,使其不易估计过大或过小,较好地解决了自然光照条件下水下图像存在的色偏以及背景散射导致的模糊等问题,避免了白色物体及成像过曝对全局背景光估计的影响,从而提高了图像复原的质量。

2 水下成像模型

2.1 海洋光学基本理论

当光束在水中传输时,水的吸收效应会使光能量产生衰减,且水中悬浮粒子和水分子的散射会改变其原本的传输方向。纯净的海水对 475 nm 光的透射最好,而黄-红光谱的光能量在上层 100 m 范围的深度内几乎完全被衰减掉^[9]。根据 Lambert-Beer 经验定律,光在介质中的传播呈指数衰减。假设介质是均匀的,其透射率可以表示为

$$t_{\lambda}(x) = \exp[-c_{\lambda}l(x)], \lambda \in \{R, G, B\}, \quad (1)$$

式中 c_{λ} 是海水对波长为 λ 的光的衰减系数, $l(x)$ 表示场景中点 x 与相机之间的距离。总的衰减系数 c_{λ} 可以分解成吸收系数 a_{λ} 与散射系数 b_{λ} 之和。

2.2 水下成像模型

1980 年 McGlamery^[10]提出了经典的水下成像系统计算机模型,他认为成像系统接收到的光辐射由三部分组成,如图 1 所示,这三个分量分别为直接入射分量 $D_{\lambda}(x)$ 、前向散射分量 $F_{\lambda}(x)$ 及后向(背景)散射分量 $B_{\lambda}(x)$ 。自然光照条件下的水下成像模型可表示为

$$I_{\lambda}(x) = J_{\lambda}(x)t_{\lambda}(x) + [J_{\lambda}(x) * h_{\lambda}(x)]t_{\lambda}(x) + B_{\lambda}(x), \quad (2)$$

式中 $J_{\lambda}(x)$ 表示未经退化的图像, $t_{\lambda}(x)$ 为传输函数, $h_{\lambda}(x)$ 为点扩散函数。背景散射分量又可写为

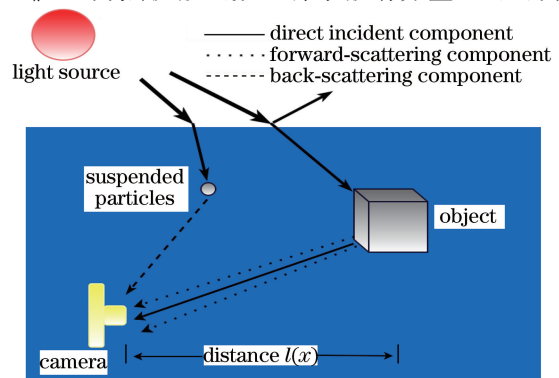


图 1 水下成像模型

Fig. 1 Model of underwater imaging

$$B_{\lambda}(x) = B_{\lambda,\infty}[1 - t_{\lambda}(x)], \quad (3)$$

式中 $B_{\lambda,\infty}$ 表示无穷远点处的背景光或全局背景光。

假设相机与目标物体的距离不大,忽略前向散射对成像带来的影响,则(2)式可以简化为

$$I_{\lambda}(x) = J_{\lambda}(x)t_{\lambda}(x) + B_{\lambda,\infty}[1 - t_{\lambda}(x)]. \quad (4)$$

3 基于暗通道先验的水下图像复原

3.1 暗通道先验

He 等^[4] 针对室外无雾图像提出了暗通道先验,即在大多数非天空区域的图像局部域中,某些像素总会在至少一个彩色通道具有非常低的强度值,甚至趋近于 0,即

$$J_D(x) = \min_{y \in \Omega(x)} [\min_{\lambda \in \{R,G,B\}} J_{\lambda}(y)] \rightarrow 0, \quad (5)$$

式中 $J_{\lambda}(y)$ 表示 RGB 三通道图像 J 中某个通道下的单通道图像, $\Omega(x)$ 表示以 x 为中心的局部块,

$J_D(x)$ 表示图像 J 的暗通道。暗通道通常存在于阴影、黑色以及颜色鲜艳的物体中^[11]。

3.2 基于暗通道先验的水下图像复原

自然光照条件下的水下成像模型如(4)式所示。假设对任一个颜色通道而言,水下退化图像 $I_{\lambda}(x)$ 在局部区域 $\Omega(x)$ 内的传输函数 $t_{\lambda}(x)$ 近似保持不变。首先对 $I_{\lambda}(x)$ 在局部区域 $\Omega(x)$ 作最小化运算,可得

$$\min_{y \in \Omega(x)} [I_{\lambda}(y)] = \min_{y \in \Omega(x)} \{J_{\lambda}(y)t_{\lambda}(y) + B_{\lambda,\infty}[1 - t_{\lambda}(y)]\}. \quad (6)$$

(6)式中的 $B_{\lambda,\infty}$ 在图像上的所有像素点是定值,传输函数 $t_{\lambda}(x)$ 在局部区域 $\Omega(x)$ 内是定值,所以(6)式中右侧的两项可以从最小运算操作符中提取出来。(6)式两边同时除以 $B_{\lambda,\infty}$,并在三个颜色通道上取最小值,可得

$$\min_{\lambda \in \{R,G,B\}} \left\{ \frac{\min_{y \in \Omega(x)} [I_{\lambda}(y)]}{B_{\lambda,\infty}} \right\} = \min_{\lambda \in \{R,G,B\}} \left\{ \frac{\min_{y \in \Omega(x)} [J_{\lambda}(y)t_{\lambda}(y)]}{B_{\lambda,\infty}} + [1 - t_{\lambda}(x)] \right\}. \quad (7)$$

(7)式中的最小化运算是线性的^[12],其又可写为

$$\min_{\lambda \in \{R,G,B\}} \left\{ \frac{\min_{y \in \Omega(x)} [I_{\lambda}(y)]}{B_{\lambda,\infty}} \right\} = \min_{\lambda \in \{R,G,B\}} \left\{ \frac{\min_{y \in \Omega(x)} [J_{\lambda}(y)t_{\lambda}(y)]}{B_{\lambda,\infty}} \right\} + \min_{\lambda \in \{R,G,B\}} [1 - t_{\lambda}(x)]. \quad (8)$$

根据暗通道先验原理,(8)式等号右边第一项为 0,则透射率计算式为

$$\max_{\lambda \in \{R,G,B\}} [t_{\lambda}(x)] = 1 - \frac{\min_{\lambda \in \{R,G,B\}} \{ \min_{y \in \Omega(x)} [I_{\lambda}(y)] \}}{B_{\lambda,\infty}}. \quad (9)$$

一般来说,在水下环境中光的衰减系数随波长的增大而增大。Smith 等^[13] 测量了干净的自然水中 200~800 nm 光谱范围的吸收系数和散射系数,发现自然水对 450 nm 波段附近光的总衰减最小。根据对传输函数的定义,对 RGB 图像而言,B 通道的传输函数值最大,因此 B 通道的传输函数可以估算为

$$t_B(x) = 1 - \frac{\min_{\lambda \in \{R,G,B\}} \{ \min_{y \in \Omega(x)} [I_{\lambda}(y)] \}}{B_{\lambda,\infty}}, \quad (10)$$

其余两个通道的传输函数需根据海洋光学理论进行进一步估计。 $B_{\lambda,\infty}$ 在文献[4]中的估计方法一般是取自各颜色通道的暗通道中强度值最高的像素,即

$$B_{\lambda,\infty} = \max_{x \in I} [\min_{y \in \Omega(x)} I_{\lambda}(y)], \lambda \in \{R,G,B\}. \quad (11)$$

将估计得到的透射率和背景光代入(11)式,得到复原的 $J_{\lambda}(x)$ 为

$$J_{\lambda}(x) = \frac{I_{\lambda}(x) - B_{\lambda,\infty}}{t_{\lambda}(x)} + B_{\lambda,\infty}. \quad (12)$$

4 基于背景光理论值估计与透射率修正的水下图像复原

4.1 全局背景光对图像复原质量的影响

水下成像过程中会产生严重的后向散射效应,使得到的水下图像存在强烈的背景噪声。实际上,全局背景光估计的好坏直接影响水下图像色调的恢复及背景噪声的去除。针对水下降质图像的主要表现,选用熵、色偏检验、对比度三个指标作为复原后图像的客观质量评价标准。

熵可以在一定程度上衡量一副图像所包含的信息量,其值越大说明图像所包含的信息量越大,质量越好;彩色图像的色偏与图像色度的均值及分布特性相关。采用 Li 等^[14] 提出的方法在 CIE Lab 色彩空间计算比较各算法的颜色恢复性能,色偏值越大表示复原后图像的色偏越严重且算法在颜色复原方面的性能越弱;由于水下成像存在严重的背景散射效应,即其他方向的光经多次散射后进入相机,因此水下采集的图像普遍存在雾感和模糊感,造成图像对比

度降低。通过计算复原后图像的对比度比较各算法在去除背景散射方面的性能。对比度是衡量图像清晰度、细节及灰度层次表现的重要指标。在CIE Lab色彩空间计算了各复原图像的对比度,对比度数值越大说明复原算法在去除背景散射方面越有效。

为说明全局背景光的估计值对图像复原质量的影响,针对图 2(a)分别让 R、G、B 三个通道的全局背景光数值在 [25.5, 255] 范围内变动,每次增加 25.5,观察利用 (12) 式复原得到的图像的熵、对比度、色偏的变化情况,结果如图 2(a)~(c) 所示。

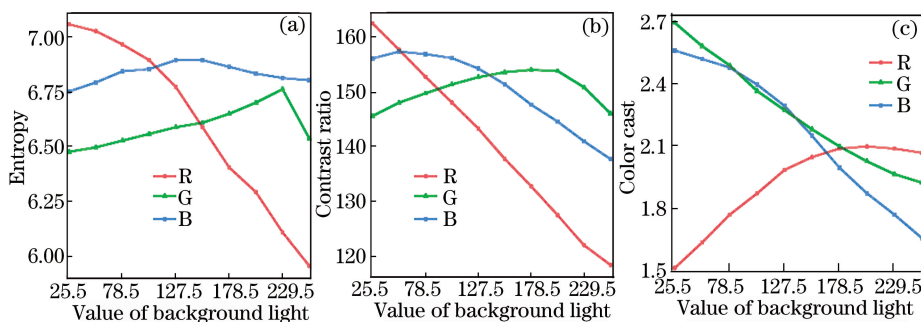


图 2 背景光对(a)熵、(b)对比度和(c)色偏的影响

Fig. 2 Effects of background light on (a) entropy, (b) contrast ratio and (c) color cast

从分析结果中可以看出,R、G、B 三个通道中,任意一个通道的全局背景光数值的改变均会影响图像复原的质量。由图 2 可知,复原后图像的熵、对比度、色偏都对 R 通道全局背景光数值的变化最为敏感;复原后图像的熵对 B 通道全局背景光数值的变化不敏感;复原后图像的对比度对 B、G 通道全局背景光数值的变化敏感度基本一致。

环境光从各个角度散射入相机镜头造成的^[15]。根据海洋光学理论,自然光照条件下后向散射分量可表示为^[10]

$$B(r) = \int_0^l \beta(\theta) E_n \exp(-cl) (1 - F/l)^2 dl, \quad (13)$$

式中 $r = (\theta, \varphi)$, 其中 θ 为散射角, φ 为景物反射面与相机视角的夹角; E_n 为目标物平面上的光照强度; c 为衰减系数; F 为相机焦距; l 为物距; $\beta(\theta)$ 为体积散射函数。一般地, $F \ll l$, 因此 $1 - F/l \approx 1$, 则 (13) 式可写为

$$B(r) = \frac{k(f)\beta(\theta)E_n}{c} [1 - \exp(-cl)], \quad (14)$$

式中 $k(f)$ 为一个关于焦距的参数, $f = 20$ mm 时对应 $k = 1.06$ 。

计算各个方向所产生的后向散射,并对 (14) 式进行积分可以得到

$$B(r) = \int_r \frac{k(f)\beta(\theta)E_n}{c} [1 - \exp(-cl)] dr. \quad (15)$$

根据散射系数的计算公式, (15) 式可近似为

$$B(r) = \frac{k(f)b_\lambda E_n}{c} [1 - \exp(-cl)]. \quad (16)$$

将 (16) 式与背景散射分量表达式进行对比,同时考虑不同波长的情况,发现全局背景光的理论表达式为

$$B_{\lambda,\infty} = k(f)b_\lambda E_n / c_\lambda, \quad (17)$$

式中 E_n 可以由图像最大灰度值表示。

为说明 (17) 式计算得到的全局背景光数值更有利于得到更高质量的复原图像,以图 4(a) 为例,分

由以上分析可得:1) 全局背景光选取的好坏将影响图像复原的质量;2) 图像复原的质量对 R 通道全局背景光数值的变化最为敏感,对 B 通道不敏感。

He 等^[4]利用暗通道获取全局背景光,选取暗通道中亮度最大的前 0.1% 的像素,此时水下图像全局背景光的选取极易受到水中白色物体的干扰,使得背景光数值估计过高。如图 3 所示,红色圈为所选定背景光的大致位置。



图 3 暗通道先验的全局背景光位置

Fig. 3 Global background light location for Dark Channel Prior

全局背景光有其自身的海洋光学定义,依据理论表达式对其进行更符合水下成像特点的估计。

4.2 全局背景光的理论值计算

自然光照条件下成像时的背景光并不起源于被摄景物,而是由成像视角内的悬浮粒子和水分子将

别使用文献[4]及所提方法估计出全局背景光数值,并将其代入(12)式进行复原,复原结果如图4(b)、(c)所示。由图可见,在视觉效果上,文献[4]的算法基本没有对图像进行明显的复原,而所提方法对色偏进行了一定矫正且去除了部分背景噪声。文献[4]给出的全局背景光估计值为[115, 252, 181],所提方法的估计结果为[30, 232, 181]。用文献[4]的方法估计全局背景光数值容易将背景光定位在偏白色的区域,而在该区域,R、G、B三个通道的全局背景光估计值相对均衡且偏大,特别是R通道的全局背景光估计值偏大,从而影响了图像复原质量。所提方法基于(17)式进行全局背景光计算,在计算中需要预估一些能反映水体自身性质的光学参数。与文献[4]的方法不同,所提方法不完全依赖于所采集图像的场景内容,因此对全局背景光的估计不易受到水中白色物体及图像中过曝区域的影响。这些参数在计算中的出现使得全局背景光的估计更具稳健性。

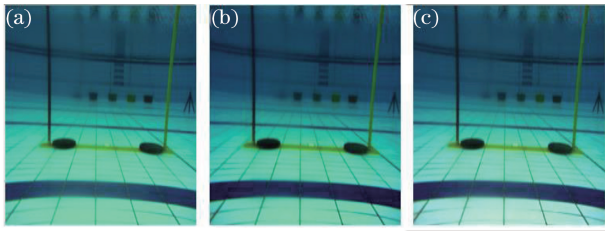


图4 原图及图像复原质量。

(a)原图;(b)采用文献[4]中的方法;(c)采用所提方法

Fig. 4 Original image and image restoration quality.

(a) Original image; (b) using method in Ref. [4];

(c) using proposed method

根据(17)式,要得到全局背景光的数值,需要估计出图像三个通道的衰减系数及散射系数。

4.3 衰减系数的估计

由传输函数 $t(x)$ 的表达式可知,物距与传输函数数值成反比,场景离相机镜头越远传输函数值越小。假设传输函数图中最小值处的场景与相机的距离刚好为相机所处水深,则由(1)式可以推出B通道的衰减系数为

$$c_B = \frac{\ln\{\min [t_B(x)]^{-1}\}}{d}, \quad (18)$$

式中 d 表示相机所处水深。

4.4 散射系数的估计

由第4.1节分析结果中的结论2)可知,图像复原的质量对B通道全局背景光数值的变化不敏感,因此以文献[4]的方法计算B通道全局背景光强度,并以此作为参考求解其余两个通道的背景光理

论值最为合理。用文献[4]中的全局背景光估计准则估计出B通道的全局背景光强度,并以此估计出B通道的传输图,结合(17)、(18)式得到B通道的散射系数。

文献[16]通过采集大量数据,得到水的散射系数 b_λ 与波长 λ 的关系为

$$b_\lambda = (-0.00113\lambda + 1.62517)b(\lambda_r), \quad (19)$$

式中 $b(\lambda_r)$ 为参考波长的散射系数。通过(19)式及求出的B通道的散射系数可得到其余两个通道的散射系数。最后利用散射系数的比值 b_G/b_B 和 b_R/b_B 对R、G通道的透射率进行了重新估计,即

$$\begin{cases} t_R(x) = [t_B(x)]^{b_R/b_B} \\ t_G(x) = [t_B(x)]^{b_G/b_B} \end{cases} \quad (20)$$

利用估计出的R、G通道的传输函数,再类比(18)式计算出R、G通道的衰减系数。利用计算出的衰减系数及散射系数即可估计出R、G通道的全局背景光强,并将其用于图像复原。

4.5 算法流程

后向散射是水下图像对比度下降及色偏产生的重要原因之一,能否较好地估计出背景光的数值直接决定了图像复原的质量^[8]。所提算法基于背景光的海洋光学理论表达式,在合理假设的基础上自适应地估计出背景光数值,并估计出三个通道的透射率,求得最终的复原图像。这种新的水下图像复原算法流程为:1)由文献[4]的方法估计出原始图像 I 的透射率 $t_B(x)$ 及B通道的全局背景光数值 $B_{B,\infty}$; 2)根据(18)式及预先知道的相机所处水深,估计出B通道的衰减系数;3)根据(17)式计算出B通道的散射系数,并根据(19)式得到其余两个通道的散射系数;4)利用各通道散射系数比值 b_G/b_B 、 b_R/b_B 来修正R、G通道的透射率 $t_R(x)$ 、 $t_G(x)$,并类比(18)式计算出R、G通道的衰减系数;5)根据(17)式计算R、G通道的全局背景光数值 $B_{R,\infty}$ 、 $B_{G,\infty}$; 6)利用(12)式复原图像。

图5为所提算法的流程图。

5 实验结果及分析

为了说明所提算法的有效性,将所提算法与文献[4]及其他图像增强或图像复原算法进行了比较。选用熵、色偏检验、对比度三个指标作为复原后图像的客观质量评价标准。

将所提算法与文献[4]算法进行视觉效果、客观指标、处理速度上的比较。将采集的6幅图像分为光照均匀且充分、光照均匀但稀少、光照不均匀三

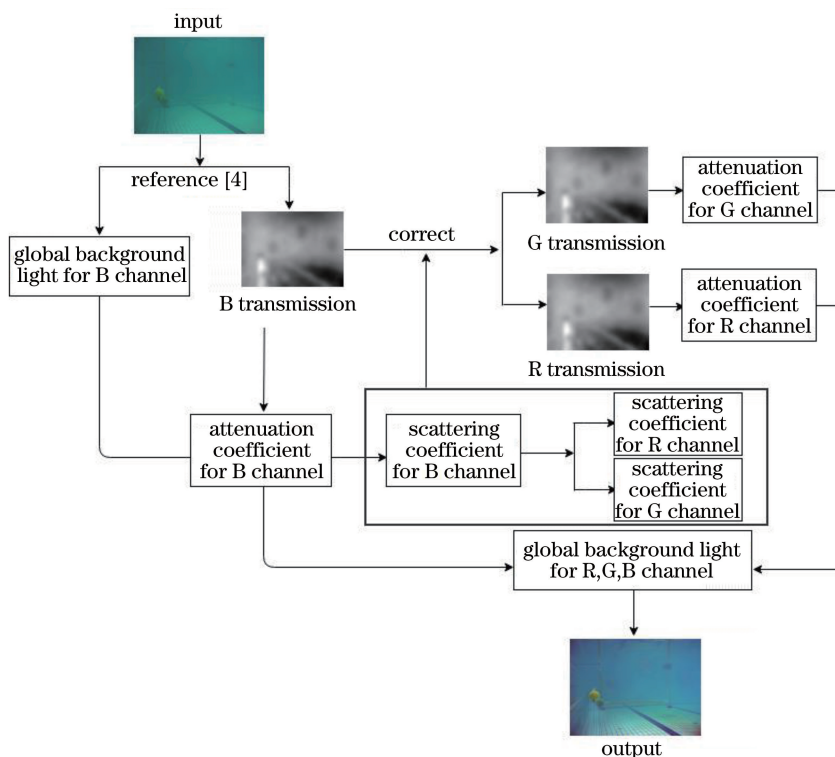


图 5 所提算法的流程图

Fig. 5 Flowchart of proposed algorithm

类,以比较在不同成像条件下所提算法与文献[4]中算法的优劣,结果分别如图 6~8 所示。表 1 给出了不同成像条件下所提算法与文献[4]中算法的图像复原效果的对比。

图 6~8 和表 1 给出了不同成像条件下采用所提算法与文献[4]的算法得到的图像复原效果的对比。由于可以预先得知场景的原始颜色,从复原结果来看所提算法在复原场景原始颜色方面较文

献[4]有较大优势。图 6 为光照均匀且充分的图像,这类图像的成像条件较好,图像亮度均匀。从结果来看,所提算法能有效纠正色偏,提高图像对比度,图像复原效果优于文献[4]。图 7 为光照均匀但稀疏的图像,此类图像采集于较深的区域,光线昏暗,色偏严重。从复原效果上看,因为光线不足,文献[4]中的算法与所提算法都没有很好地复原场景,但所提算法的复原效果优于文献[4]。

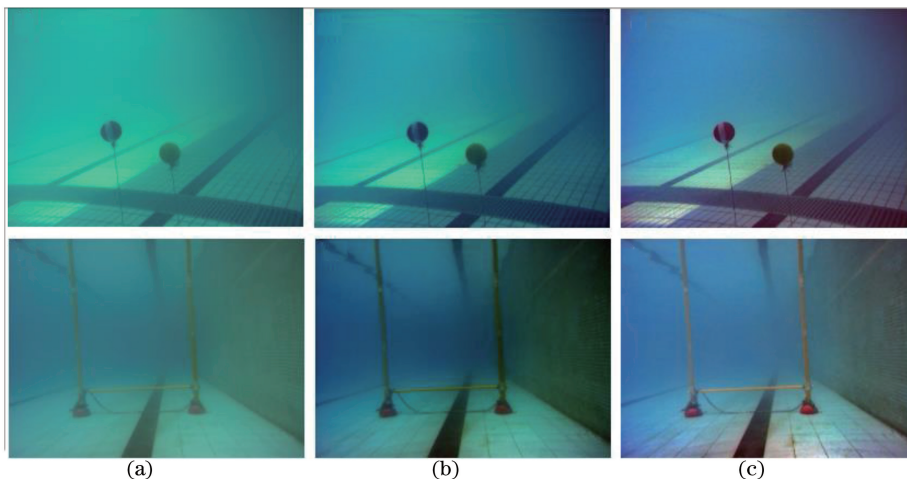


图 6 原图及光照均匀且充分的图像复原结果。(a)原图;(b)采用文献[4]方法;(c)采用所提方法

Fig. 6 Original image and image restoration results with uniform and adequate illumination.

(a) Original image; (b) using method in Ref. [4]; (c) using proposed method

图 8 为光照不均匀的图像,此类图像本身对比度较高,亮度不均匀,过曝处会影响全局背景光的估计。从复原效果上来看,用文献[4]中的算法复原的图像对比度高于所提算法。但从视觉效果上来看,所提算法较好地复原了原场景的红色和黄色。综合来说,所提算法优于文献[4]中的算法。

在普通计算机[配置为 Intel(R) Core(TM) i7-6500U CPU @ 2.50 GHz (4 CPUs)]上用 Matlab (R2011a)运行所提算法及文献[4]中的算法,得到不同成像条件下多种分辨率图像的时间开销,如图 9 所示。由图可见,所提算法使用了导向滤波代替软抠图,提高了算法速度,在时间效率上大大优于文献[4]中的算法,即使分辨率为 406 pixel × 546 pixel,处理速度也没有超过 0.8 s。

为进一步说明所提算法的有效性,将所提算法

与其他水下图像复原算法进行比较。用于比较的文献并未提供原代码及相机所处水深及焦距信息,也未提及计算时间,因此本文大致估计了对比文献中相机的相关参数,且只与对比文献作复原效果上的比较,不作运行时间上的比较。

图 10 为采用不同方法进行图像复原的结果。由图可见,所提算法复原的视觉效果优于文献[17],且与文献[18]相当。从客观评价的三个指标来看,所提算法在色偏矫正、对比度增强上分别优于文献[17] 36.0%和 15.8%;熵的值提高了 3.70%。复原图像的对比度和熵都高于文献[18]。在红框部分,不管是从珊瑚色彩的恢复效果还是从水中岩石斑纹的清晰度来看,所提算法都优于文献[18]。表 2 为所提算法与文献[17]、[18]中算法的客观评价结果对比。

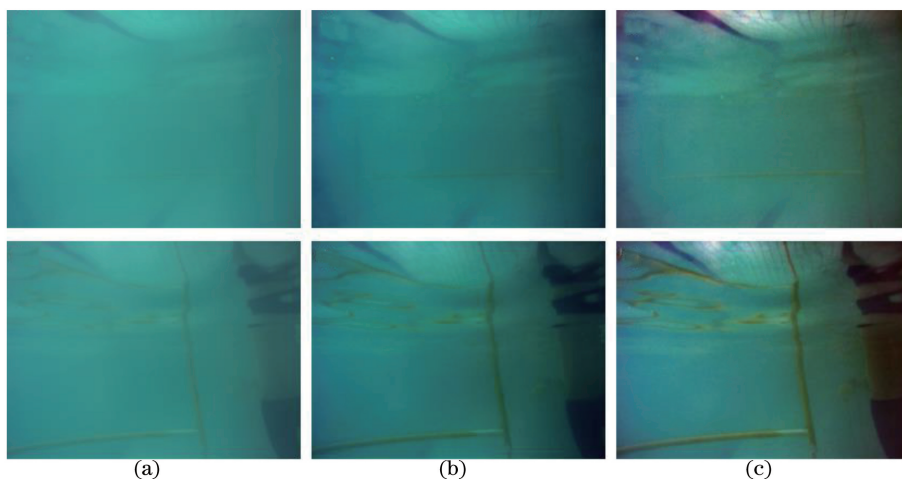


图 7 原图及光照均匀但稀少的图像复原结果。(a)原图;(b)采用文献[4]方法;(c)采用提出的方法

Fig. 7 Original image and image restoration results with uniform and scarcity illumination.

(a) Original image; (b) using method in Ref. [4]; (c) using proposed method

表 1 不同成像条件下所提方法与文献[4]中方法的客观评价结果对比

Table 1 Comparison of objective evaluation results obtained by proposed method and method in Ref. [4] in different imaging conditions

Imaging condition	Arithmetic	Color cast		Contrast ratio		Entropy	
		Up	Down	Up	Down	Up	Down
Uniform and adequate illumination	Original image	7.19	3.87	23.75	8.3	6.49	6.07
	Method in Ref. [4]	3.95	2.12	33.59	15.17	6.44	6.61
	Proposed method	1.52	1.43	55.08	35.73	6.67	6.7
Uniform and scarcity illumination	Original image	13.19	8.61	8.12	8.97	5.58	5.87
	Method in Ref. [4]	7.09	4.99	8.58	10.39	6.14	6.27
	Proposed method	2.73	1.62	13.23	17.32	6.26	6.56
Uneven illumination	Original image	8.24	4.41	22.88	31.15	6.49	6.41
	Method in Ref. [4]	4.36	3.56	34.30	46.43	6.74	6.53
	Proposed method	2.09	0.63	53.42	44.38	6.82	6.93

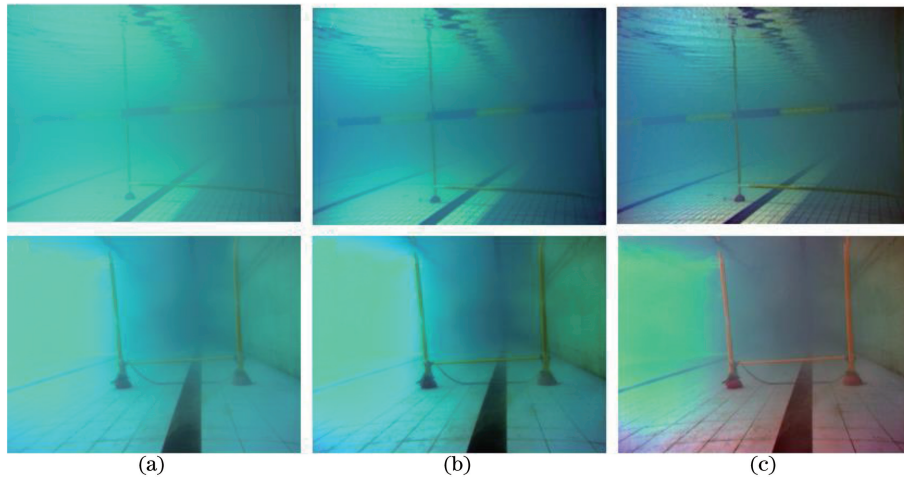


图 8 原图及光照不均的图像复原结果。(a)原图;(b)采用文献[4]的方法;(c)采用所提方法
 Fig. 8 Original image and image restoration results with uneven illumination.
 (a) Original image; (b) using method in Ref. [4]; (c) using proposed method

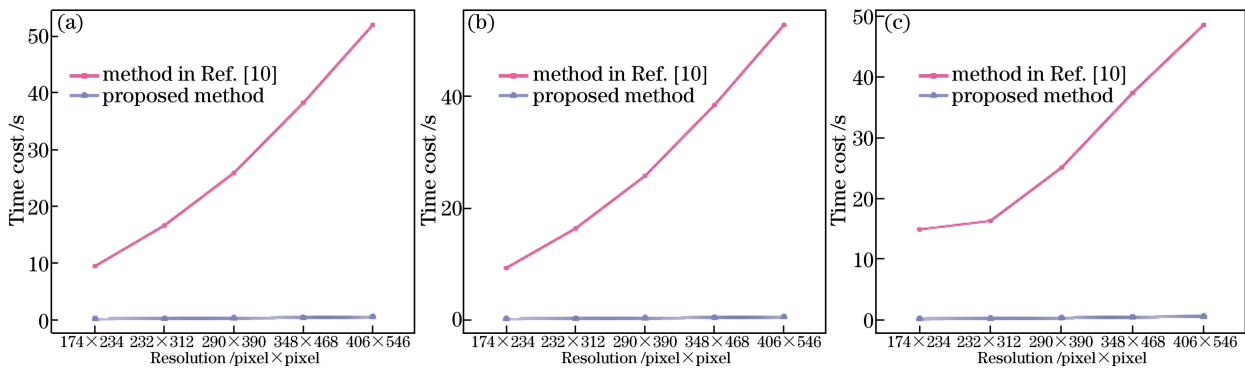


图 9 不同成像条件下多种分辨率图像的时间开销。(a)光照均匀且充分;(b)光照均匀但稀缺;(c)光照不均
 Fig. 9 Time cost with several resolution images in different imaging conditions.
 (a) Uniform and adequate illumination; (b) uniform and scarcity illumination;
 (c) uneven illumination

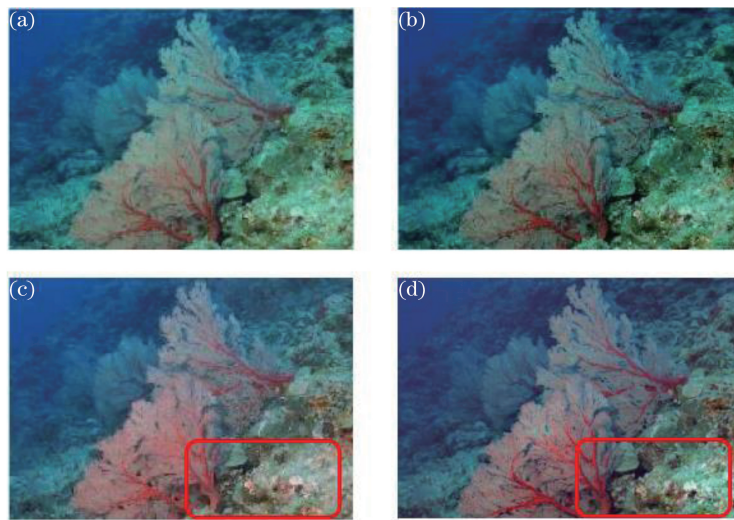


图 10 原图及不同算法的图像复原结果。(a)原图;(b)文献[17]中的算法;(c)文献[18]中的算法;(d)所提方法
 Fig. 10 Original image and image restoration results with different algorithms.
 (a) Original image; (b) method in Ref. [17]; (c) method in Ref. [18]; (d) proposed method

表 2 所提算法与文献[17]、[18]中方法的客观评价结果对比
Table 2 Comparison of objective evaluation results obtained by proposed method and methods in Ref. [17] and Ref. [18]

Term	Color cast	Contrast ratio	Entropy
Original image	1.21	140	7.02
Method in Ref. [17]	1.23	160	6.86
Method in Ref. [18]	0.77	138	7.03
Proposed method	0.77	182	7.12

图 11 为不同方法的图像复原结果,将所提算法与文献[6]中的算法进行比较。从视觉效果上来看,采用文献[6]中的算法复原的图像色调仍然偏蓝;从客观质量评价方面来看,提出算法的三个指标均高于文献[6]。表 3 为所提方法与文献[6]中算法的客观评价结果对比。

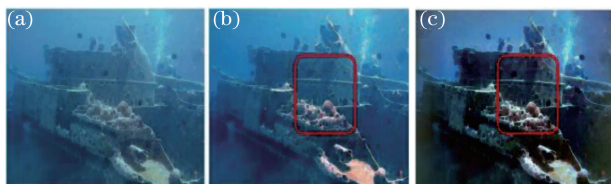


图 11 原图及不同方法的图像复原结果。

(a)原图; (b)文献[6]中的算法; (c)所提方法

Fig. 11 Original image and image restoration results with different methods. (a) Original image;

(b) method in Ref. [6]; (c) proposed method

表 3 所提方法与文献[6]中算法的客观评价结果对比

Table 3 Comparison of objective evaluation results obtained by proposed method and method in Ref. [6]

Term	Color cast	Contrast ratio	Entropy
Original image	4.38	184.73	4.38
Method in Ref. [6]	3.45	276.27	3.45
Proposed method	1.29	444.37	4.29

为了进一步说明所提算法的有效性,将所提算法与一些经典的图像增强算法进行了对比。待复原的图像采自水深为 1.7 m 的露天游泳池,相机焦距为 20 mm,复原效果如图 12 所示。表 4 为所提算

表 4 所提算法与不同图像增强算法的客观评价结果对比

Table 4 Comparison of objective evaluation results obtained by proposed algorithm and different image enhancement algorithms

Term	Color cast	Contrast ratio	Entropy
Original image	9.67	8.14	5.50
Multiscale Rtinex	0.17	21.18	5.76
MSRCR	0.16	429.33	7.46
Automatic white balance	2.10	5.05	5.49
CLAHE	4.69	98.44	6.10
Method in Ref. [4]	5.40	14.28	6.10
Method in Ref. [8]	8.47	11.25	5.70
Proposed method	1.59	69.27	6.62

法与不同图像增强算法的客观评价结果的对比。

从图 12 中可以看出,就视觉效果而言,所提算法和 MSRCR 算法的复原效果较有优势,但 MSRCR 算法恢复的图像边缘泛红,色彩略有失真;采用所提算法得到的复原图像中,黄绿两球的颜色鲜艳,黄杆细节清晰,色调恢复较好,总体视觉效果自然。此外,所提算法在客观评价方面虽不如 MSRCR 算法,但三个指标均优于其他算法。

6 结 论

依据自然光照条件下背景光的理论表达式,在提出的合理假设下结合暗通道先验原理估计出水体光学参数,并进一步利用海洋光学理论估计出 R、G、B 图像三个通道的背景光数值,最终通过逆求解复原水下图像。与以往的暗通道水下图像复原算法不同,所提算法在背景光计算上依赖其光学定义,计算得到的背景光数值更具可靠性。同时对 R、G、B 三个通道的透射率进行了修正,在一定程度上矫正了水下图像的色偏。大量实验结果表明所提算法在恢复场景物体原始颜色及去除背景散射方面有一定的优势。

给出的背景光理论表达式只针对自然光照,因此所提算法只适用于浅水区域的水下图像复原。在深水区域需要进行人工补偿光照,而自然光照几乎没有,背景光的理论计算式较自然光照有很大不同,在今后的研究中可以针对人工光照条件下的全局背景光计算式对所提算法进行改进,提出一种针对人工光照的水下图像复原算法。为了简化问题的求解,忽略了前向散射对成像造成的影响。实际上,随着物距的增加,前向散射对成像带来的影响也会逐渐增大。在未来的研究中可以结合图像盲复原算法进一步考虑去除或复原前向散射造成的影响,以进一步提高图像复原质量。

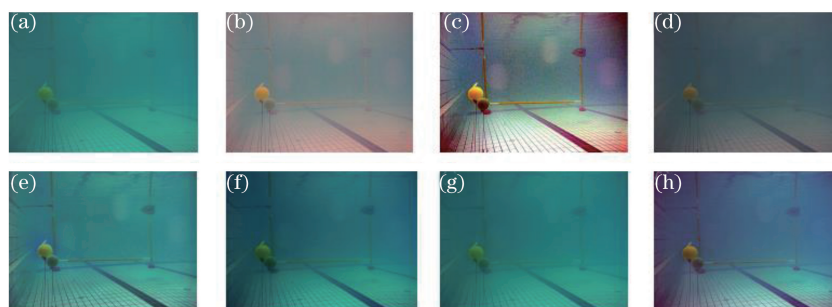


图 12 原图及不同算法的图像增强结果。(a)原图；(b)多尺度 Rtinex；(c) MSRCR；(d)自动白平衡；
(e) CLAHE；(f)文献[4]方法；(g)文献[8]方法；(h)提出方法

Fig. 12 Original image and image enhancement results with different algorithms.

(a) Original image; (b) multiscale Rtinex; (c) MSRCR; (d) automatic white balance;
(e) CLAHE; (f) method in Ref. [4]; (g) method in Ref. [8]; (h) proposed method

参 考 文 献

- [1] Schettini R, Corchs S. Underwater image processing: State of the art of restoration and image enhancement methods[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2010, 2010 (1): 746052.
- [2] Bongiorno D L, Bryson M, Williams S B. Dynamic spectral-based underwater colour correction[C]. Oceans, 2013: 13798909.
- [3] Wang G, Zheng B, Sun F F. Estimation-based approach for underwater image restoration[J]. Optics Letters, 2011, 36(13): 2384-2386.
- [4] He K M, Sun J, Tang X. Single image haze removal using Dark Channel Prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2010, 33 (12): 2341-2353.
- [5] Yang M, Ji Z. Underwater color image enhancement based on quaternion and fuzzy morphological sieves [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(7): 1601-1605.
- [6] Li Y, Lu H, Zhang L, *et al.* Real-time visualization system for deep-sea surveying[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, 2014: 437071.
- [7] Yang A P, Zhen J, Wang J, *et al.* Underwater image restoration based on color cast removal and dark channel prior[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(11): 2541-2547. 杨爱萍, 郑佳, 王建, 等. 基于颜色失真去除与暗通道先验的水下图像复原[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(11): 2541-2547.
- [8] Zhao X, Jin T, Qu S. Deriving inherent optical properties from background color and underwater image enhancement[J]. Ocean Engineering, 2015, 94(2): 163-172.
- [9] Wozniak B, Dera J. Light absorption in sea water [M]. New York: Springer, 2007.
- [10] Mcglamery B L. A computer model for underwater camera systems[C]. Ocean Optics VI. International Society for Optics and Photonics, 1980: 221-231.
- [11] Dai S B, Xu W, Pu Y J, *et al.* Remote sensing image defogging based on dark channel prior[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0328002. 代书博, 徐伟, 朴永杰, 等. 基于暗原色先验的遥感图像去雾方法[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0328002.
- [12] Lu H, Li Y, Xu X, *et al.* Underwater image enhancement method using weighted guided trigonometric filtering and artificial light correction [J]. Journal of Visual Communication & Image Representation, 2016, 38: 504-516.
- [13] Smith R C, Baker K S. Optical properties of the clearest natural waters (200-800 nm) [J]. Applied Optics, 1981, 20(2): 177-184.
- [14] Li F, Wu J, Wang Y, *et al.* A color cast detection algorithm of robust performance[C]. IEEE Fifth International Conference on Advanced Computational Intelligence, 2012: 662-664.
- [15] Narasimhan S G, Nayar S K. Vision and the atmosphere[J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 48(3): 233-254.
- [16] Jr G R, Arnone R A, Martinolich P M. Spectral dependence of the scattering coefficient in case 1 and case 2 waters[J]. Applied Optics, 1999, 38(12): 2377-2383.
- [17] Xiao C, Gan J. Fast image dehazing using guided joint bilateral filter[J]. Visual Computer, 2012, 28 (6/7/8): 713-721.
- [18] Bekaert P, Haber T, Ancuti C O, *et al.* Enhancing underwater images and videos by fusion[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2012: 81-88.