

水下光学成像清晰化方法研究

李庆武^{1,2} 束代群¹ 周 妍¹ 盛惠兴¹ 霍冠英^{1,3}

¹ 河海大学物联网工程学院, 江苏 常州 213022
² 常州市传感网与环境感知重点实验室, 江苏 常州 213022
³ 南通河海大学海洋与近海工程研究院, 江苏 南通 226019

摘要 在水下环境中,光的散射和衰减导致水下光学成像质量严重下降,图像对比度低、颜色失真。提出了一种基于暗原色和白平衡相结合的新方法来提高水下光学成像的图像质量,达到使水下光学成像清晰化的目的。根据水下成像特点,建立水下光学成像模型,采用暗原色算法对图像进行去模糊,并依据白平衡理论对去模糊后的图像进行颜色校正,提高水下彩色图像的质量。实验表明,提出的方法能够有效去除由光的散射引起的模糊,增强水下图像的可见度和恢复水下图像的颜色平衡,明显提高图像的清晰度和颜色的保真度。

关键词 图像处理;水下彩色图像;暗原色;白平衡;图像清晰化

中图分类号 TP301.6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.s110001

Study on the Underwater Optical image Clarity Enhancing

Li Qingwu^{1,2} Shu Daiqun¹ Zhou Yan¹ Sheng Huixing¹ Huo Guanying^{1,3}

¹ College of Internet of Things Engineering, Hohai University, Changzhou, Jiangsu 213022, China

² Changzhou Key Laboratory of Sensor Networks and Environmental Sensing, Changzhou, Jiangsu 213022, China

³ Nantong Hohai University Marine and Offshore Engineering Research Institute, Nantong, Jiangsu 226019, China

Abstract Low contrast and color change are caused by scattering and attenuation of the light in the underwater environment. The method integrated dark channel prior and white balance for underwater color image enhancement is presented. According to the characteristics of underwater imaging, underwater optical imaging model is established. The optimized and improved dark channel prior algorithm is used for image deblurring, and then color correction on the restored image based on the white balance theory is performed. The quality of underwater color image is improved. The experiments show that the proposed method can effectively remove the blur caused by the scattering of light, enhances the visibility of underwater images and restores color balance of the underwater image. The clarity and color fidelity of underwater color images are improved significantly.

Key words image processing; underwater color image; dark channel prior; white balance; image clarity enhancing

OCIS codes 100.2980; 110.0113; 100.3010

1 引 言

近年来,随着水下环境感知需求的增加与计算机图像处理技术的发展,水下图像日益成为人们研究的热点。然而,与空中成像受大气干扰和光学系统限制等影响所导致的图像模糊不同^[1-4],水下光学成像受水下光的散射和衰减等影响很大,往往出现图像光照不均匀、对比度降低、颜色失真等问题,

直接限制和影响了各种水下视觉系统的应用^[5-6]。因此,水下光学成像清晰化方法的研究价值很大。

目前水下光学成像清晰化方法主要分为两大类:一类是对光的散射作用进行补偿处理的方法。此类方法可以提高水下图像的对比度和可见度,以及修复由波长衰减引起的图像模糊等。文献[7]使用极化滤波器解决水下环境的后向散射问题,从而

收稿日期: 2014-01-15; 收到修改稿日期: 2014-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(60972101,41306089)、江苏省科技支撑计划(BE2012096)、南通市科技计划(BK2012025)

作者简介: 李庆武(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事图像处理方面的研究。E-mail: li_qingwu@163.com

补偿图像可见度,达到复原图像的效果。文献[8]运用图像去模糊的方法来提高水下图像的清晰度;另一类是对水下图像进行颜色校正处理的方法。此类方法重在处理水下图像颜色变化问题。文献[9]分别在红绿蓝(RGB)空间和色调亮度饱和度(HIS)空间使用直方图均衡化来平衡图像的亮度分布。文献[10]根据直方图分布提出了一种手动调控的颜色校正方法,达到增强图像的效果。

一种有效的水下彩色图像清晰化方法,需要将上述两种因素都要考虑在内。文献[5]提出了一种使用波长补偿和去模糊的方法来增强水下图像,该方法虽然可以去除由散射引起的模糊和在一定程度上恢复图像的颜色平衡,但是实验结果图明显偏黄色,运行效率低。文献[11]将经验模态分解和遗传算法应用于水下图像去模糊,然后对去模糊后的图像使用一种颜色校正算法来解决水下图像偏色的问题。此方法虽然取得不错的效果,但方法复杂,实用性差。

本文从暗原色先验算法用于雾天图像增强取得的良好效果^[12]得到启发,根据水下成像特点,建立水下光学成像模型,采用优化与改进的暗原色算法进行水下光学图像的去模糊,并依据白平衡理论对去模糊后的图像进行颜色校正,使水下彩色图像的清晰度和颜色的保真度得到明显提高。

2 水下光学成像模型

水下彩色图像对比度低、颜色失真主要是由于以下两个原因。1)由于水中大量微小悬浮颗粒如矿物质、浮游生物等的散射作用和水分子的吸收作用,所以在拍摄水下物体时,到达水下照相机的入射光衰减严重,从而导致水下彩色图像对比度低。2)水对光的吸收程度与单色光的波长有关,从而引起了水下图像的颜色失真^[5]。在水下环境下,单色光的波长越长,则此单色光衰减就越快。水对红色光和橙色光吸收最多;黄色光和绿色光次之,而对蓝色光吸收最少^[13],所以水下照相机拍摄出来的彩色图像通常偏蓝绿色;而且,随着光在水中传播距离和水深的不断增加,这种偏色现象就愈加严重。基于以上原因,水下拍摄的彩色图像呈现出模糊、对比度低、颜色失真等特点,图像中所含的许多特征都被覆盖或模糊,直接限制和影响各种水下视觉系统的应用。

根据光在水下环境传输的物理特性^[5],水下图像的数学模型可描述如下:

$$I^c(x, y) = J^c(x, y)t(x, y) +$$

$$A[1 - t(x, y)], c \in \{r, g, b\}, (1)$$

式中 (x, y) 为图像中像素的坐标位置, c 为RGB颜色空间的三个通道 R, G, B , $I^c(x, y)$ 为原始图像, $J^c(x, y)$ 为同一场景的清晰图像, A 为水下光强度值, $t(x, y)$ 为光线通过媒介透射到照相机过程中未被散射的部分,称为透射率^[14]。

根据水下图像的光学模型,以暗原色先验作为算法的约束条件,估算出水下光强度值 A 和透射率 t ,从而求解出复原后的水下图像 J ;然后对复原图像 J 进行图像的自动白平衡调整,达到去模糊、提高对比度和调整颜色的增强效果。

3 基于暗原色的水下彩色图像复原改进算法

暗原色理论认为:在绝大多数彩色图像的局部区域里,至少存在一些像素,其一个颜色通道的亮度值很低。将像素点3个通道的最小值称为区域的暗原色值^[12]。对一幅图像的暗原色的定义

$$J^{\text{dark}}(x, y) = \min_{c \in \{R, G, B\}} [\min_{(i, j) \in \Omega(x, y)} J^c(i, j)], (2)$$

式中 (i, j) 为像素的坐标位置, $\Omega(x, y)$ 是以 (x, y) 为中心的方形邻域窗口。观察得出除天空部分, J^{dark} 的强度总趋近于零。这个经验性规律即称为暗原色先验^[12]。

3.1 暗原色值和水下光强度值的估算

根据暗原色理论,对水下彩色图像 I 的每一个像素点的RGB三通道值直接取最小亮度值操作,将此值近似作为其暗原色值,定义为

$$I^{\text{dark}}(x, y) = \min_c [I^c(x, y)], (3)$$

式中 c 代表彩色图像的三个通道, $\min_c [I^c(x, y)]$ 是取彩色图像 I 中每个像素点 R, G, B 3个颜色通道上的最小亮度值,即近似为暗原色值 $I^{\text{dark}}(x, y)$ 。

根据所求取的彩色图像 I 的暗原色值 $I^{\text{dark}}(x, y)$,确定图像 I 的水下光强度值 A 。暗原色通道值 $I^{\text{dark}}(x, y)$ 中的最大亮度值即为水下光强度值 A ,表达式为

$$A = \max [I^{\text{dark}}(x, y)]. (4)$$

3.2 水下图像的透射率的求取

假设在一个局部区域内透射率的值是不变的,根据水下图像的光学模型(1)式,对原始水下图像执行最小值计算,可得表达为

$$\min_{(i, j) \in \Omega} [I^c(i, j)] = \min_{(i, j) \in \Omega} [J^c(i, j)\hat{t}(x, y)] + A[1 - \hat{t}(x, y)], (5)$$

式中 Ω 是以 (x, y) 为中心的一个局部区域。一般 A 的值是正数,对(5)式两段除以 A 并取最小值,可得表达式为

$$\min_c \left\{ \min_{(i,j) \in \Omega} \left[\frac{I^c(i,j)}{A} \right] \right\} = \min_c \left\{ \min_{(i,j) \in \Omega} \left[\frac{J^c(i,j)}{A} \right] \hat{t}(x,y) \right\} + [1 - t(x,y)]. \quad (6)$$

根据暗原色先验规律, $\min_c \left\{ \min_{(x,y) \in \Omega} [J^c(i,j)] \right\}$ 近似为零,则(6)式的表达式变为

$$\min_c \left\{ \min_{(i,j) \in \Omega} \left[\frac{I^c(i,j)}{A} \right] \right\} = 1 - \hat{t}(x,y), \quad (7)$$

则求解透射率的表达式为

$$\hat{t}(x,y) = 1 - \min_c \left\{ \min_{(i,j) \in \Omega} \left[\frac{I^c(i,j)}{A} \right] \right\}, \quad (8)$$

式中将 $\min_c \left\{ \min_{(i,j) \in \Omega} [I^c(i,j)] \right\}$ 近似为 $\min_c [I^c(x,y)]$, 即为暗原色值 $I^{\text{dark}}(x,y)$, 则透射率的表达式为



图1 不同结果图对比。(a)源图像;(b)未使用中值滤波复原;(c)使用中值滤波复原

Fig. 1 Comparison of different results. (a) Source image; (b) not using median filter to restore; (c) using median filter to restore

从图1可以看出,图1(c)相比较图1(b)更好地保存了复原图像中颜色突变的部分,边缘更清晰。求取透射率 $t(x,y)$ 是采用带阈值的中值滤波器算法来计算的,而未采用计算复杂度高的数字抠图算法,提高了算法的运算效率。

3.3 水下图像的复原

根据水下成像模型,结合暗原色先验理论知识,估算出水下光强度值 A 和透射率值 $t(x,y)$,则可直接求得复原后的图像 J :

$$J^c(x,y) = \frac{I^c(x,y) - A}{\max[t(x,y), t_0]} + A, \quad (12)$$

式中 t_0 是为增强图像显示时的曝光度而设置的阈值,一般取值较小^[12],本文设置 t_0 为 0.1。

4 复原图像的颜色校正

通过对多幅水下彩色图像进行基于暗原色先验的复原实验发现,经过复原后的水下彩色图像整体偏暗,色彩信息偏蓝。图2(a)是一幅采用上述方法复原后的效果图,可以看出复原后的图像整体看上去不自然,色彩信息明显偏暗和偏蓝绿色。RGB颜色模型的二维平面像素分布图^[16]分别为红-绿平面、红-蓝平面和绿-蓝平面, R 、 G 、 B 分别代表彩色图像在每个通道的像素值。图2(b)~(d)是图2(a)

$$\hat{t}(x,y) = 1 - \frac{I^{\text{dark}}(x,y)}{A}. \quad (9)$$

事实上,为了使复原后的水下图像保持深度感,在计算透射率时需引入常数 ω ,如下式所示:

$$\hat{t}(x,y) = 1 - \omega \frac{I^{\text{dark}}(x,y)}{A}. \quad (10)$$

ω 是一个接近 1 的正常数,其值的大小根据水下图像的散射模糊程度进行调整。一般 ω 的范围在 0.7~0.9 之间。通过实验发现,在求解透射率的过程中,如果先使用中值滤波器^[15]对 $I^{\text{dark}}(x,y)$ 滤波,再代入最终求解透射率的表达式

$$t(x,y) = 1 - \omega \frac{\text{median}[I^{\text{dark}}(x,y)]}{A}, \quad (11)$$

会达到更好的复原效果。实验结果对比局部图如图1所示。

的二维像素分布图。

从图2的二维像素分布图中可以看出,图像红色分量明显偏少,蓝绿分量占大部分,所以大多数水下图像呈现出偏蓝绿色的特点。根据这个特点,采用自动白平衡算法来调整图像,提高图像的对比度,校正图像的色彩,改善图像质量。

采用动态阈值来检测一幅图像的白点,然后对图像进行白点调整。具体步骤如下:

1) 将图像 J 的 RGB 颜色空间转换为 $YCbCr$ 颜色空间,以便确定一个由一系列参考白点组成的接近白色区域;

2) 分别计算图像 J 在 $YCbCr$ 颜色空间中的 C_b 、 C_r 的平均值 M_b 、 M_r 和绝对均方差 D_b 、 D_r ;

3) 根据阈值条件(13)式和(14)式计算满足条件的接近白色区域的参考白点;

$$|C_b(i,j) - [M_b + D_b \times \text{sign}(M_b)]| < 1.5 \times D_b, \quad (13)$$

$$|C_r(i,j) - [1.5 \times M_r + D_r \times \text{sign}(M_r)]| < 1.5 \times D_r, \quad (14)$$

4) 根据参考白点的平均值和整幅图像亮度的最大值,分别计算 R 、 G 、 B 三通道增益,其表达式为

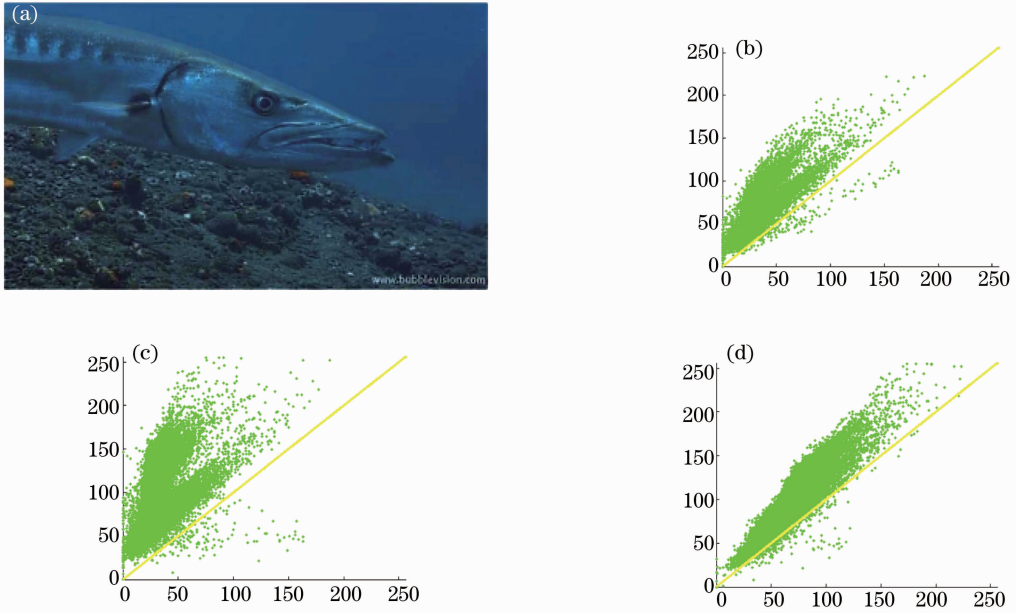


图 2 二维像素分布图。(a) 复原后的水下图像；(b) RG 分布图；(c) RB 分布图；(d) GB 分布图
 Fig. 2 Two-dimensional pixel distribution. (a) Restored underwater image; (b) RG distribution;
 (c) RB distribution; (d) GB distribution

$$R_{gain} = Y_{max} / R_{avew}, \quad (15)$$

$$G_{gain} = Y_{max} / R_{avew}, \quad (16)$$

$$B_{gain} = Y_{max} / R_{avew}, \quad (17)$$

式中 Y_{max} 是整幅图像像素的亮度最大值, R_{avew} 、 G_{avew} 、 B_{avew} 是图像总参考白点的 RGB 通道的均值;

5) 输出颜色校正后的图像, 即最终增强后的图像。

5 实验结果与分析

为了验证所提出的算法的有效性, 对水下彩色图像进行增强实验。图 3 和图 4 展示了水下图像采用方法与其他方法处理的对比结果图, 图 3(a) 和图 4(a) 是水下图像原图。图 3(b) 和图 4(b) 是对原图像色调饱和度和明度 (HSV) 颜色空间的 V 通道进行直方图均衡化后的图像。图 3(c)、图 4(c) 和图 3(d)、图 4(d) 是对原图像分别采用文献 [12] 和文献 [5] 算法处理后的效果图。图 3(e) 和图 4(e) 是该算法处理后的图像。

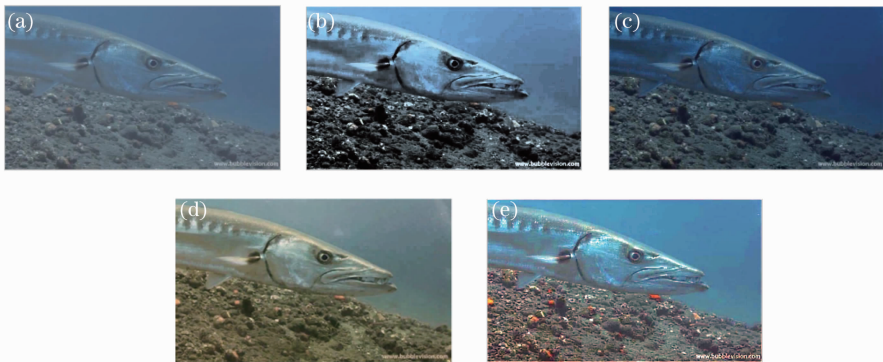


图 3 水下图像清晰化实验 1。(a) 原图；(b) 直方图均衡化；(c) 文献 [12] 算法；(d) 文献 [5] 算法；(e) 本文算法
 Fig. 3 Underwater optical image clarity enhancing experiment 1. (a) Original image; (b) histogram equalization;
 (c) reference [12] method; (d) reference [5] method; (e) proposed method

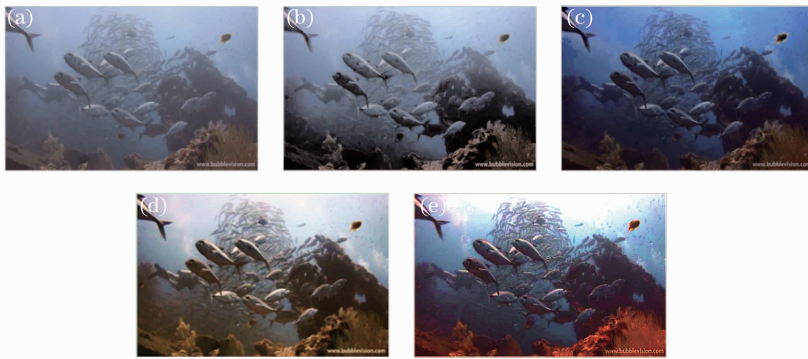


图4 水下图像清晰化实验1。(a) 原图;(b) 直方图均衡化;(c) 文献[12]算法;(d) 文献[5]算法;(e) 本文算法
Fig. 4 Underwater optical image clarity enhancing experiment 1. (a) Original image; (b) histogram equalization; (c) reference [12] method; (d) reference [5] method; (e) proposed method

从图3、图4的实验结果来看,各种方法均取得了一定的增强效果。图3(b)和图4(b)中,采用直方图均衡化方法虽然对图像的亮度进行了拉伸,但图像灰度变化较小,对比度过分增强,颜色明显失真。图3(c)和图4(c)中,采用文献[12]的算法虽然可以明显去除由光的散射引起的模糊,但是处理后的图像整体偏暗,并且偏色现象严重,算法效率低。图3(d)和图4(d)中,采用文献[5]中的算法虽然可以取得一些效果,但处理后的图像整体视觉效果偏黄,基本没有蓝色分量,引起图像失真,如海水的颜色,导致图像整体视觉感受不够自然。图3(e)和图4(e)中,所提出的方法不仅能够去除由光的散射引起的模糊,而且能够较好地修正图像颜色平衡,使处理后的图像看起来色彩明亮且边缘清晰。

为了进一步观察所提算法与其他算法的性能,实验还对各种算法用客观指标进行了评价。这里采用熵和清晰度对上述方法分别作评价。采用熵^[17]来衡量输出图像所包含的信息内容,其值越大,所含的图像信息越多,图像越清晰。采用平均梯度^[18]来衡量图像的清晰度。平均梯度是用相邻点的差分计算一个点的梯度值,其值越大,图像细节越多,清晰度越高。

表1给出了上述两幅水下彩色图像的熵值和平均梯度比较结果。从表1可以看出,所提算法的熵值和文献[5]接近,但平均梯度明显大于文献[5]方法。

通过对图像的主观和客观评价,可以发现所提出的方法可以有效地去除由光的散射引起的模糊,恢复图像的色彩平衡,改善彩色图像的对比度,提高图像的清晰度,符合人眼的视觉特性,验证了该方法的有效性。

表1 图像的熵值和平均梯度比较

Table 1 Comparison of entropy and average gradient among enhanced images

Image	Entropy	Average gradient
Fig. 3(a)	5.6054	4.8553
Fig. 3(b)	7.3978	14.7232
Fig. 3(c)	5.9338	6.4702
Fig. 3(d)	6.9704	7.4257
Fig. 3(e)	7.1422	18.6775
Fig. 4(a)	7.1044	4.1262
Fig. 4(b)	7.8261	6.9348
Fig. 4(c)	7.3164	5.6592
Fig. 4(d)	7.6400	8.3046
Fig. 4(e)	7.2851	10.3471

6 结 论

水下图像由于水下环境的复杂特性,呈现出对比度低、图像模糊和颜色失真等特点,所以对水下图像进行清晰化处理是一项至关重要的工作。提出了一种暗原色和白平衡相结合的水下彩色图像清晰化处理方法,为水下彩色图像的处理提供了一种新思路,该方法可以有效地克服复原后图像色调偏色和偏暗的缺陷,使最终处理后的效果图更具有实用价值。在后续的研究中,还需进一步深入研究不同水下环境对光学成像的影响机理,选取最佳参数,进一步提高水下图像的清晰化效果。

参 考 文 献

- Li Yongle, Lou Jingtao, Zhang Maojun, *et al.*. Image restoration for catadioptric defocus blur based on omni-total variation minimization [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0811006.
李永乐, 娄静涛, 张茂军, 等. 基于全向总变分最小化的折反射散焦模糊图像复原方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0811006.
- Yu Yuhua, Dong Wende, Xu Zhihai, *et al.*. Method for blurred image restoration based on hartmann-shack wavefront sensor [J].

- Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0828005.
- 余玉华, 董文德, 徐之海, 等. 基于哈特曼-夏克波前传感器的模糊图像复原方法[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0828005.
- 3 Yan Xuefei, Xu Tingfa, Bai Tingzhu. Varying-parameter tikhonov regularization image restoration [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(5): 051001.
- 阎雪飞, 许廷发, 白廷柱. 变参式 Tikhonov 正则化图像复原算法[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(5): 051001.
- 4 Shao Mingshen, Wang Qihua. Blurred image restoration based on frog leaping algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(2): 021003.
- 邵明省, 王其华. 基于蛙跳算法的模糊图像复原[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(2): 021003.
- 5 Y C John, C C Ying. Underwater image enhancement by wavelength compensation and dehazing [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(4): 1756–1769.
- 6 Sun Jianfeng, Liu Di, Ge Mingda, *et al.*. Image pre-processing algorithm of underwater target for streak tube imaging lidar [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0714001.
- 孙剑峰, 刘 迪, 葛明达, 等. 条纹管激光雷达水下目标图像预处理算法[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0714001.
- 7 Y S Yoav, K Nir. Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis [J]. IEEE J Oceanic Engineering, 2005, 30(3): 570–587.
- 8 C Liu, W Meng. Removal of water scattering [C]. Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology, 2010. 35–39.
- 9 I Kashif, A Rosalina, O Azam, *et al.*. Underwater image enhancement using an integrated color model [J]. International Journal of Computer Science, 2007, 34(2): 2–12.
- 10 B S Norsila, F B W A Wan, B Baharum, *et al.*. Image enhancement of underwater habitat using color correction based on histogram [C]. Proceedings of Second International Visual Informatics Conference, 2011. 289–299.
- 11 T C Aysun, E Sarp. Visual enhancement of underwater images using empirical mode decomposition [J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(1): 800–805.
- 12 K M He, J Sun, X O Tang. Single image haze removal using dark channel prior [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341–2353.
- 13 V Iuliu, D Carrick, R Daniela. Color-accurate underwater imaging using perceptual adaptive illumination [J]. Autonomous Robots, 2010, 31(2): 285–296.
- 14 Ji Xiaoqiang, Dai Ming, Sun Lina. Research on the image haze-removal algorithm based on the prior dark-channel [J]. J Optoelectronics•Laser, 2011, 22(6): 926–930.
- 嵇晓强, 戴 明, 孙丽娜, 等. 暗原色先验图像去雾算法研究 [J]. 光电子·激光, 2011, 22(6): 926–930.
- 15 P T Jean, H Nicolas. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [C]. Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision, 2009. 2201–2208.
- 16 J N M N Mohd, A M I Nor. Pixel distribution shifting color correction for digital color images [J]. Applied Soft Computing, 2012, 12(9): 1948–1962.
- 17 Lu Zongwei. Weighted sub-images for color image enhancement [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(8): 1057–1064.
- 吕宗伟. 子图像加权的彩色图像对比度增强算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(8): 1057–1064.
- 18 Chen Congping, Wang Jian, Zou Lei, *et al.*. Effective enhancement algorithm for low contrast underwater images [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(5): 567–571.
- 陈从平, 王 健, 邹 雷, 等. 一种有效的低对比度水下图像增强算法[J]. 激光与红外, 2012, 42(5): 567–571.

栏目编辑: 张浩佳