

基于暗原色先验模型的水下图像增强算法

李社蕾¹, 李海涛², 崔聪颖¹

(1. 三亚学院 信息与智能工程学院, 海南 三亚 572022;
2. 92961 部队, 海南 三亚 572021)

摘要:针对在水下环境中,由于光的散射和衰减导致的图像对比度低、颜色失真等问题,提出了一种暗原色先验模型和基于统计方法的颜色校正算法相结合的图像增强新方法。该方法根据水下彩色图像成像模型,首先利用暗原色先验算法对水下彩色图像进行去模糊处理,并针对大水深情况下获取水下图像时因使用人工照明而造成水下彩色图像亮度不均匀问题,对暗原色先验模型中背景光强度 A 值的估计方法进行改进;然后利用统计方法对水下彩色图像的 R、G 和 B 三个颜色通道分别进行颜色校正,从而实现了水下图像色彩的整体校正。实验结果表明,该方法有效增强了水下彩色图像的对比度和亮度,消除了由于光的散射而造成的图像模糊,使水下彩色图像具有更好的可视性。

关键词:水下图像;颜色校正;图像增强;暗原色先验;图像处理

中图分类号:TP391.4

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2018)10-0070-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2018.10.014

Underwater Image Enhancement Algorithm Based on Dark Channel Prior Model

LI She-lei¹, LI Hai-tao², CUI Cong-ying¹

(1. School of Information & Intelligence Engineering, Sanya University, Sanya 572022, China;
2. The 92961 Unit of PLA, Sanya 572021, China)

Abstract: Aiming at the problem of low image contrast and color distortion in the underwater environment caused by scattering and attenuation of light, we propose a novel method of image enhancement based on the combination of a dark channel priori model and a color correction algorithm based on statistical method. According to the imaging model of underwater color image, firstly the dark channel prior algorithm is used to de-blur the image, and for the uneven brightness of underwater color image caused by artificial lighting in deep water, the estimation method of the background light intensity A in the dark channel priori model is improved. Then the color correction of the three color channels, namely R, G and B, are respectively carried out by statistical method, thus realizing the overall correction of underwater image color. The experiment shows that the proposed method can effectively enhance the contrast and brightness of underwater color images and eliminate the image blurring caused by light scattering, which makes the underwater color images have better visibility.

Key words: underwater image; color correction; image enhancement; dark channel prior; image processing

0 引言

神秘的水下世界包含丰富的资源,作为水下探测的重要手段,数字图像处理可以直观地反映水下场景^[1-4]。由于水下成像过程中水体吸收和散射的影响以及不同波长的光的变化衰减导致水下图像的退化,使得水下图像出现画质模糊,对比度低、颜色失真等问题。因此水下图像增强和恢复的研究具有很重要的意义,单个水下图像的增强和恢复已成为研究热点。2009年,何凯明博士^[5]提出了基于暗通道先验理论的

图像去雾算法,取得了非常好的去雾效果;2014年,文献[1]利用基于暗通道先验理论的图像去雾算法对图像进行去模糊,然后引入白平衡的方法对水下图像颜色进行校正;2015年, Galdran 等^[6]对暗通道先验模型进行变形,提出了自动红通道水下图像复原方法,并通过引入图像的饱和度信息来去除人造光源的影响,取得了一定的复原效果。2016年,文献[7]提出了 G 和 B 两个通道利用类似暗原色先验的方法进行去雾,然后对 R 通道通过白平衡的方法进行颜色校正,取得了

收稿日期:2017-11-21

修回日期:2018-03-22

网络出版时间:2018-05-28

基金项目:海南省自然科学基金项目(20166234);海南省高等学校科学研究项目(Hnky2017-57);三亚市院地合作项目(2015YD47)

作者简介:李社蕾(1979-),女,硕士,副教授,研究方向为智能算法、数字图像处理。

网络出版地址: <http://jns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20180525.1603.048.html>

一定的水下图像增强效果。2016 年,文献[8]在暗原色先验模型的基础上,利用直方图的统计特性估计水体光强,并在求透射率时,对暗通道进行双边滤波,利用灰度值的线性拉伸进行了颜色校正。该方法取得了良好的效果,但是易出现颜色过于艳丽、失真等情况。

在上述研究的基础上,文中提出了一种暗原色先验模型和基于统计方法的颜色校正算法相结合的图像增强新方法。根据水下彩色图像成像模型,首先利用暗原色先验算法对图像进行去模糊,针对下光照特点对背景光强度 A 的估计方法进行了改进;然后对分别对水下彩色图像的 R、G 和 B 三个通道利用统计的方法进行颜色校正。

1 暗原色先验模型去雾的原理

1.1 暗原色先验模型

暗原色先验(dark channel prior)指在绝大部分非天空的局部区域里,某些像素总会有至少一个颜色通道具有很低的值,即该区域光强度的最小值是个很小的数。这是何凯明博士统计了 5 000 多幅户外无雾图像特征得出的规律。暗通道一个数学定义表示为:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left[\min_{c \in (r, g, b)} J^c(y) \right] \quad (1)$$

其中, J^c 表示输入彩色图像 J 的每个颜色通道; $\Omega(x)$ 表示图像 J 中以像素 x 为中心的一个窗口; J^{dark} 表示 J 的暗通道,且暗颜色先验的理论指出:

$$J^{\text{dark}}(x) \rightarrow 0 \quad (2)$$

1.2 基于暗原色先验的去雾方法

(1) 大气散射理论模型。

根据 Mie 氏散射理论,Nayar 等^[9-11]总结出了大气散射理论模型。在计算机视觉和计算机图形领域,大气散射理论常用来描述图像的雾、霾等悬浮颗粒的干扰,可以简化为:

$$I(x) = J(x)t(x) + A[1 - t(x)] \quad (3)$$

其中, $I(x)$ 为原始输入图像(即有雾图像); $J(x)$ 为物体的反射光(即无雾图像); A 为全球大气光强度; $t(x)$ 为介质透射率。

在简化后的模型中,已知条件 $I(x)$, 图像去雾的目的是通过估计 A 和 $t(x)$, 求解 $J(x)$, 即得到去雾的清晰图像。式 3 可变形为:

$$\frac{I(x)}{A^c} = t(x) \frac{J^c(x)}{A^c} + 1 - t(x) \quad (4)$$

其中, $c \in (r, g, b)$, r, g, b 为三个颜色通道。

(2) 透射率的估计。

根据暗通道先验模型,假设在每个窗口内透射率 $t(x)$ 为常数,将其定义为 $\bar{t}(x)$, 并且 A 值已确定,然后对式 3 两边求最小值得到:

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left[\min_c \frac{I^c(y)}{A^c} \right] = \bar{t}(x) \min_{y \in \Omega(x)} \left[\min_c \frac{J^c(y)}{A^c} \right] + 1 - \bar{t}(x) \quad (5)$$

其中, J 是待求的无雾图像,由暗原色先验理论可得:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left[\min_{c \in (r, g, b)} J^c(y) \right] = 0 \quad (6)$$

则有:

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left[\min_{c \in (r, g, b)} \frac{J^c(y)}{A^c} \right] = 0 \quad (7)$$

将上式带入式 5,得到介质透射率 $\bar{t}(x)$ 的预估值:

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

在现实生活中,即使天气晴朗,空气中也存在一些颗粒,一定程度雾的存在让人类感到景深的存在,在式 8 中引入一个因子 $\omega \in [0, 1]$, 让图像保留一定程度的雾,则式 8 可修正为:

$$\bar{t}(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} \left[\min_c \frac{I^c(y)}{A^c} \right] \quad (9)$$

(3) 大气光强度值 A 的估计^[5]。

大气光强度值 A 的估计是借助于暗通道图像从原始有雾图像中获取,具体步骤如下:首先,从暗通道图中按照亮度的大小提取最亮的前 0.1% 像素,确定其所在位置;然后,在原始有雾图像 I 中寻找对应位置上具有最高亮度点的值,并将该值作为 A 的值。

(4) 图像去雾。

根据式 4、式 9 以及 A 的值,可以求解 $J(x)$:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\bar{t}(x)} + A \quad (10)$$

其中,当 $t(x)$ 很小时,则 J 值偏大,导致图像整体向白场过渡。这里设置一个阈值 t_0 , 当 $t(x) < t_0$ 时,令 $t = t_0$, 式 10 可修正为:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max[\bar{t}(x), t_0]} + A \quad (11)$$

2 改进的暗原色先验模型水下图像增强算法

(1) 水成像理论模型。

2012 年,Chiang 等^[12]构建了水下成像模型,该模型和大气成像模型具有相似性,其本质区别在于光在水下传播时,不同频率的颜色分量具有不同的衰减率。在改进方法中,在颜色校正阶段处理该问题,水下成像模型定义为:

$$I_c(x) = J_c(x)t_c(x) + (1 - t_c(x))A_c \quad (12)$$

其中, $c \in (r, g, b)$, r, g, b 为三个颜色通道; $I_c(x)$ 为原始输入图像(即水下采集图像); $J_c(x)$ 为物体的反射光(即期待的水下清晰图像); A_c 为背景光强度; $t_c(x)$ 为介质透射率。

透射率的估计最终结果仍为:

$$\bar{t}(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} \left[\min_c \frac{I^c(y)}{A^c} \right] \quad (13)$$

(2) 水体光值的估计。

文献[5]借助于暗通道图像从原始有雾图像中获取背景光 A ，在水下由于没有自然光照射，获取水下图像大多需要使用人工照明，不能保证图片光照的均匀，就会造成图像亮度不均匀，在水下图片中靠近光源的部分要比远离光源的部分亮很多。假如使用原始暗原色方法中利用暗原色值中的最大值来作为背景光那么无疑这个数值要远大于整体的背景光数值，会造成估计的背景光过高，在复原图像时会造成强烈的过曝光现象，尤其是在浑浊区域这种曝光现象尤为严重^[8,13]。

针对这一现象，文献[8,14]采用物理模型的方法对背景光进行估计。由于在具体的水下环境中，很多时候物理参数获取困难，文中针对人工照明造成的图像亮度不均匀的现状，对文献[2]中的方法进行改进。对于图像中任一点，以该像素点为中心，选择一个窗口， $\text{WindowSize} = 2 * n + 1$ ；在暗通道图像的窗口中按照亮度的大小提取最亮的前 0.1% 像素，确定其所在位置；然后在原始有雾图像 I 中寻找对应位置上具有最高亮度点的值，并将该值作为该像素点的 A 值。对图像中每一点求其 A 值，构成水下背景光矩阵 A 。

(3) 图像去雾。

根据式 12、式 13 以及 A 的值，可以求解 $J(x)$ ：

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max[t(x), t_0]} + A \quad (14)$$

(4) 颜色校正。

由于光在水下传播时，不同频率的颜色分量具有不同的衰减率，下面对于用暗原色先验方法去雾后的图像 J 进行颜色校正，方法如下^[15]：

① 计算 J 图像各通道的平均值 J_{mean}^c 和标准差 J_{var}^c ；

② 计算 RGB 个通道的最大值和最小值，计算方法表示为：

$$\begin{cases} J_{\text{max}}^c = J_{\text{mean}}^c + \mu J_{\text{var}}^c \\ J_{\text{min}}^c = J_{\text{mean}}^c - \mu J_{\text{var}}^c \end{cases} \quad (15)$$

其中， $c \in (r, g, b)$ ， r, g, b 为三个颜色通道； μ 为参数，对图像进行动态控制，后续实验中取值为 2.5。

③ 计算颜色校正后的图像，公式如下：

$$J_{\text{CR}}^c = \frac{J^c - J_{\text{min}}^c}{J_{\text{max}}^c - J_{\text{min}}^c} \times 255 \quad (16)$$

其中， J_{CR}^c 为最终的输出图像。

3 实验结果与分析

选取了 6 幅水下对比度低，整体偏色严重的图像进行实验，实验结果如图 1 所示。

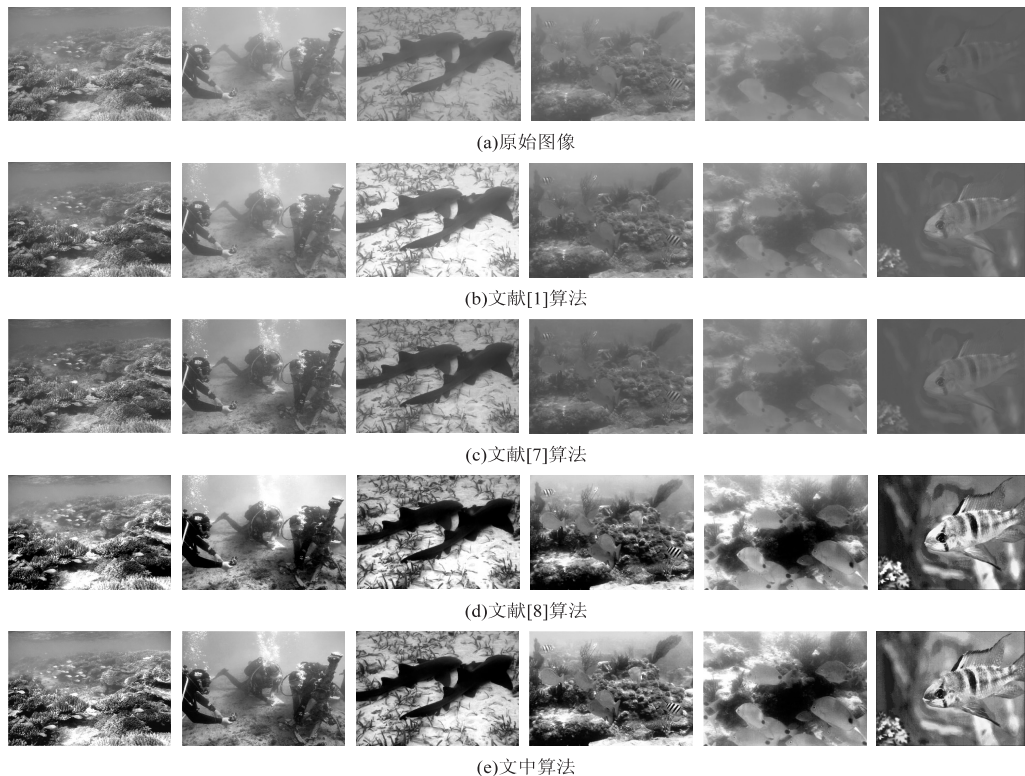


图 1 不同算法的图像增强效果比较

通过文中算法和其他针对水下图像对暗原色先验模型进行改进的算法的增强效果对比，可以看出四种方法对原始图像都有一定的增强效果。从直观上看，

文中算法和文献[8]算法优于文献[1]和文献[7]算法的增强效果，但文献[8]算法对图像 1、4、6 颜色过于艳丽，存在一定的颜色失真情况，对于图像 3、5 局部亮

度过高,不如文中算法的处理效果,但图像 2 的增强效果略优于文中算法。

表 1 增强后图像的性能指标比较

图像	算法	平均梯度	熵	标准差
图像 1	(b)	8.455 5	6.977 5	55.429 8
	(c)	9.126 9	6.974 3	41.506 5
	(d)	12.933 7	7.606 5	80.974 0
	(e)	13.051 9	7.554 9	65.120 2
图像 2	(b)	7.077 3	7.134 0	43.205 6
	(c)	6.101 0	7.180 2	42.342 2
	(d)	11.169 0	7.836 8	80.364 5
	(e)	12.526 7	7.779 7	62.978 8
图像 3	(b)	5.350 4	7.085 6	75.538 4
	(c)	4.795 9	7.403 2	52.273 9
	(d)	5.411 0	7.703 4	82.406 5
	(e)	5.577 7	7.835 2	78.455 7
图像 4	(b)	3.551 5	6.586 7	39.695 7
	(c)	2.300 9	6.127 8	31.309 4
	(d)	6.616 2	7.822 0	74.706 5
	(e)	8.071 3	7.834 7	75.383 2
图像 5	(b)	4.321 3	6.420 0	30.028 0
	(c)	1.982 5	6.053 4	26.834 4
	(d)	9.025 4	7.843 5	74.759 5
	(e)	9.212 1	7.867 5	70.871 9
图像 6	(b)	3.606 1	5.360 7	34.313 6
	(c)	4.068 6	5.204 0	32.679 0
	(d)	7.848 9	7.556 4	75.936 1
	(e)	8.822 9	7.457 1	70.110 2

下面通过客观指标来分析图像的增强效果。选取平均梯度、信息熵和标准差作为评价指标。从表 1 的数据可以看出,文中算法增强后的图像的各项指标均优于文献[1]和文献[7]算法;与文献[8]算法相比,文中算法对图像 3~6 的平均梯度和熵值都高于文献[8]算法,标准差略低于文献[8]算法,对图像 1、2 的平均梯度高于文献[8]算法,但图像的熵值和标准差都低于文献[8]算法,说明文中算法在图像细节、信息量保留及清晰度方面优于文献[8]算法,增强后图像的对比度略低于文献[8]算法。从整体上来说,文中算法在去除图像模糊,平衡图像色彩方面有一定优势,使得处理后的图像看起来色彩明亮,清晰度高,光照均匀,更加符合人眼视觉特性。

4 结束语

根据雾天图像成像和水下成像的相似性和差异,针对水下图像偏色退化和照明不均匀等问题,提出了一种结合暗原色先验模型和基于统计方法的颜色校正算法的图像增强新方法。实验结果表明,该方法在去

除图像模糊、平衡图像色彩方面有一定优势,使得处理后的图像看起来更加符合人眼视觉特性,为水下图像预处理提供了借鉴和参考。

参考文献:

[1] 王子韬. 基于暗原色方法的水下图像增强[D]. 青岛:中国海洋大学,2014.

[2] 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):168-176.

[3] 陆慧敏,胡学龙,李玉洁,等. 基于引导图像滤波器的水下图像清晰化算法[J]. 扬州大学学报:自然科学版,2015,18(3):60-63.

[4] 尹芳,陈田田,吴锐,等. 一种结合暗通道先验和图像融合的水下图像复原算法[J]. 小型微型计算机系统,2017,38(11):2591-2596.

[5] HE Kaiming, SUN Jian, TANG Xiaoou. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341-2353.

[6] GALDRAN A, PARDO D, PICON A, et al. Automatic red-channel underwater image restoration[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2015, 26: 132-145.

[7] LI Chongyi, GUO Jichang, PANG Yanwei, et al. Single underwater image restoration by blue-green channels dehazing and red channel correction[C]//IEEE international conference on acoustics. Shanghai, China: IEEE, 2016: 1731-1735.

[8] 曹美,盛惠兴,李庆武,等. 基于暗原色先验模型的水下彩色图像增强算法[J]. 量子电子学报,2016,33(2):140-147.

[9] NAYAR S K, NARASIMHAN S G. Vision in bad weather[C]//Proceedings of the seventh IEEE international conference on computer vision. Korfu, Greece: IEEE, 1999: 820-827.

[10] 鞠铭烨,张登银. 基于先验知识与大气散射模型的图像增强算法[J]. 电子学报,2017,45(5):1218-1225.

[11] 王永虎. 基于大气散射模型的单幅图像去雾方法研究[D]. 长春:东北师范大学,2014.

[12] 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.

[13] 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.

[14] HE Kaiming, SUN Jian, TANG Xiaoou. Guided image filtering[C]//European conference on computer vision. Heraklion, Crete, Greece: Springer-Verlag, 2010: 1-14.

[15] FU Xueyang, ZHUANG Peixian, HUANG Yue, et al. A retinex-based enhancement approach for single underwater image[C]//Proceedings of IEEE international conference on image processing. Paris, France: IEEE, 2014: 4572-4576.