

引用格式: 霍光尧, 佃松宜, 武伟让, 等. 基于暗通道先验和自适应颜色校正的水下图像处理[J]. 电光与控制, 2019, 26(11): 70-74. HUO G Y, DIAN S Y, WU W R, et al. Underwater image processing based on dark channel prior and adaptive color correction[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(11): 70-74.

基于暗通道先验和自适应颜色校正的水下图像处理

霍光尧¹, 佃松宜¹, 武伟让², 余桐², 李森¹

(1. 四川大学电气信息学院, 成都 610065; 2. 苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004)

摘要: 研究了基于暗通道先验和自适应颜色校正的密闭空间下的水下图像处理。针对传统水下图像去雾方法对光照强度不均的密闭空间内的图像处理效果不佳以及色彩失真问题, 利用暗通道原理对水下图像进行去雾后, 引入自适应红通道补偿参数, 改善红光缺失现象; 结合渐晕模型对水下图像亮度通道进行校正, 降低光强对图像成像质量的影响。所提方法在真实的密闭水下环境中进行测试, 实验结果表明, 相比于传统去雾算法, 所提方法可以在有效改善图像亮度的同时还原图像色彩。

关键词: 水下图像处理; 暗通道; 自适应参数; 渐晕模型; 亮度补偿; 去雾; 密闭空间

中图分类号: O213.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-637X.2019.11.015

Underwater Image Processing Based on Dark Channel Prior and Adaptive Color Correction

HUO Guang-yao¹, DIAN Song-yi¹, WU Wei-rang², YU Tong², LI Miao¹

(1. College of Electrical and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou 215004, China)

Abstract: This paper studies underwater image processing in closed space based on dark channel prior and adaptive color correction. For the problems of poor image processing effect and color distortion of traditional underwater image dehazing methods in closed space with uneven illumination intensity, this paper introduces adaptive red channel compensation parameters to avoid the phenomenon of red light loss after dehazing the underwater image by using dark channel principle, and uses the vignetting model to improve the brightness of underwater image. The channel is calibrated to reduce the influence of light intensity on image quality. The proposed method is tested in a real sealed underwater environment. The experimental results show that, compared with traditional dehazing algorithms, the proposed method can effectively improve the brightness of the image while restoring the color of the image.

Key words: underwater image processing; dark channel; adaptive parameter; vignetting model; illumination compensation; dehazing; closed space

0 引言

水下图像受传播光的衰减影响导致可见度低, 光传播随距离和深度呈指数衰减, 主要是由于吸收和散射效应。吸收实质上减少了光能, 而散射导致光方向的变化, 这种现象在密闭空间内尤为明显^[1]。光的随

机衰减是产生雾状外观的主要原因, 而从介质沿视线散射回来的光使场景对比度显著降低。由于悬浮颗粒散射中的后向散射导致图像模糊, 物体表面的原有颜色被遮盖, 物体局部区域辨认不清。

水下图像增强方法一般分为两种: 增强方法和复原方法^[2]。增强方法主要有以 Retinex 方法为代表的去雾算法^[3-8]; 复原方法是指使水下图像恢复到图像降质之前的状态, 该方法依赖于具体的模型, 主要有以暗通道先验^[9]为代表的去雾算法。例如 WEN 等结合光衰减特性, 考虑蓝绿两通道信息求取暗通道, 并估计红通道透射率^[10]; LI 等采用空气暗原色先验求取水下图像透射率, 根据物体颜色和图像背景光透射率进行

收稿日期: 2018-11-30

修回日期: 2019-01-02

基金项目: 国家自然科学基金(61703291); 四川省科技厅应用基础计划(2016JY0085)

作者简介: 霍光尧(1992—), 男, 河北廊坊人, 硕士生, 研究方向为计算机视觉、图像处理与应用。

自适应优化^[11];BERMAN 等利用蓝红和蓝绿色衰减比,自适应估计水下透射率,还原水下色彩^[12];WANG 等利用卷积神经网络和基于白平衡的颜色偏差消除策略消除水下色彩失真现象^[13]。上述算法一定程度上改善水下图像质量,但在密闭空间内光照强度不均的情况下,上述算法表现不佳,使其应用范围受到限制。

对于密闭空间内水下目标物体成像,挑战性体现在腔体内水质问题导致成像模糊和色彩失真,以及空间限制导致的光照强度不均^[14]。因此,本文结合光照在水下传输的特性,提出一种基于暗通道先验和自适应颜色校正的水下图像处理方法,对大气光成分取逆,并结合透射率和深度信息,引入自适应色彩校正参数,能够快速有效地改善水雾和色彩失真问题,提升色彩对比度;并结合渐晕模型,对亮度通道 V 进行处理,改善光照不均导致的图像质量问题。

1 水下图像成像模型

入射光线到达目标物体之前,会受到水下杂质影响形成散射,在到成像设备过程中,会经历不同程度的散射和折射。根据介质和场景之间复杂的相互作用,JAFFE 提出了水下图像光学成像模型,文献[15]将该模型分为 3 部分:1) 直接光分量 $I_d(x,y)$;2) 前向散射分量 $I_f(x,y)$;3) 后向散射分量 $I_b(x,y)$,即

$$Org(x,y) = I_d(x,y) + I_f(x,y) + I_b(x,y) \quad (1)$$

密闭空间水下光学成像系统接收光的组成部分如图 1 所示。

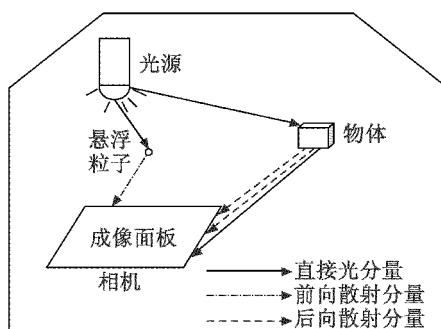


图 1 密闭空间水下光学成像系统接收光示意图

Fig. 1 Schematic diagram of light receiving of underwater optical imaging system in a closed space

直接光分量 $I_d(x,y)$ 为入射光经过物体表面后,由介质散射和吸收后,到达成像设备的部分,可表示为

$$I_d(x,y) = J(x,y)t(x,y) \quad (2)$$

式中: $J(x,y)$ 为 (x,y) 像素坐标下的待恢复图像; $t(x,y)$ 为介质透射率,假设介质是均匀的,则 $t(x,y)$ 可表示为

$$t(x,y) = e^{-\beta d(x,y)} \quad 0 \leq t(x,y) \leq 1 \quad (3)$$

式中: β 为水中的散射系数; $d(x,y)$ 为观测物体到成像设备的距离。

前向散射分量 $I_f(x,y)$ 为物体反射光经过小角度散射后形成的光,相机与水下目标物体距离较小时,前向散射分量可以忽略不计。

后向散射分量 $I_b(x,y)$ 是入射光经过水中悬浮颗粒多次散射后进入成像设备的部分,该成分不包含观测物体信息,只与光源和介质有关。后向散射容易造成图像的对比度低、颜色暗等,可表示为

$$I_b(x,y) = A(1 - e^{-\beta d(x,y)}) \quad (4)$$

式中: A 为全球大气光成分。

将式(2)~式(4)代入式(1)得到水下图像光学成像模型为

$$Org(x,y) = J(x,y)e^{-\beta d(x,y)} + IA(1 - e^{-\beta d(x,y)}) \quad (5)$$

2 本文算法

对于密闭空间水下图像红光缺失问题和光照强度不均导致图像亮度失衡的问题,本文给出相关算法对红通道补偿,改善颜色失真;结合渐晕模型校正亮度通道,改善光照不均导致的图像质量问题。

2.1 基于暗通道水下图像复原

根据文献[9]中的暗通道先验可得

$$J^{dark}(x,y) = \min_{c \in \{R,G,B\}} \left(\min_{(x,y) \in \Omega(x,y)} (J^c(x,y)) \right) \rightarrow 0 \quad (6)$$

式中: $c \in \{R,G,B\}$ 表示图像三原色通道; $\Omega(x,y)$ 为以像素点 (x,y) 为中心的邻域,通常取大小为 15×15 的滤波窗口。

水下图像形成过程与空气中的含雾图像生成过程相似^[16],理论上可以利用含雾图像复原方法去除水下图像散射分量。与空气介质不同,在水介质中红光最先衰减完,但由于目标物体处在密闭空间内,无外界自然光且照明设施均在水下,因此在求取水下暗原色通道时采用红蓝绿三颜色通道来降低图像暗原色通道,对式(6)中的 R,G,B 通道中的最小颜色分量进行最小滤波,可以得到^[15]

$$\min_{c \in \{R,G,B\}} \left(\min_{(x,y) \in \Omega(x,y)} (Org^c(x,y)) \right) = \min_{c \in \{R,G,B\}} \left(\min_{(x,y) \in \Omega(x,y)} (J^c(x,y)) \right) e^{-\beta d(x,y)} + IA(1 - e^{-\beta d(x,y)}) \quad (7)$$

全球大气光成分 A 选取暗通道最高强度值,即

$$A = \max(J^{dark}(x,y)) \quad (8)$$

假设局部区域 $\Omega(x,y)$ 中的 $t(x,y)$ 不变,根据暗通道先验理论,可以得到透射率

$$t(x,y) = 1 - \min_{c \in \{R,G,B\}} \left(\min_{(x,y) \in \Omega(x,y)} \left(\frac{Org^c(x,y)}{A} \right) \right) \quad (9)$$

水下复原图为

$$J(x,y) = \frac{Org^c(x,y) - A}{\max(t(x,y), t_0)} + A \quad (10)$$

2.2 颜色校正

由于场景光强随距离呈指数衰减,而大气光强则随距离指数递增,这可以近似地认为到达线偏振成像系统的光波偏振态主要由大气光造成的^[17]。大气光的选取最为关键,它直接影响到图像传输率的求取,进而影响图像的复原效果。

对于水下图像,红光的衰减要比蓝色和绿色的衰减大,且距离越大其衰减程度越高。因此,为避免由于衰减导致直接选取最亮像素点作为大气光成分而在颜色上出现较大误差,选择对大气光成分取逆,其逆为

$$A_{invc} = 255 - A_c \quad (11)$$

由于深度的增加,红光衰减得越来越快,因此结合式(3)和图像深度信息,设定红通道自适应调节系数为

$$\tilde{\omega}_r = 1 + \frac{\bar{t}}{t_{\max}(x, y)} \quad (12)$$

式中: \bar{t} 为图像的平均透射率; $t_{\max}(x, y)$ 为图像透射率最大值。即当 $c = R$ 时,

$$J_R(x, y) = \tilde{\omega}_r \frac{Org^c(x, y) - A_{invR}}{\max(t_c(x, y), t_0)} + A_{invR} \quad (13)$$

因此可以得到密闭空间内水下深度相机复原图

$$J_c(x, y) = \tilde{\omega}_c \frac{Org^c(x, y) - A_{invc}}{\max(t_c(x, y), t_0)} + A_{invc} \quad (14)$$

式中: $invc \in \{invR, invG, invB\}$,当 $c = \{G, B\}$ 时, $\tilde{\omega}_c = 1$ 。

为了验证红通道补偿算法的有效性,和文献[12-13]图像色彩还原算法进行比较,比较结果如图2所示。可以看出,图2b红色通道过补偿,导致整体图像偏红;而图2c对比度较高,导致图像呈现蓝绿色,红光补偿不足,本文算法通过自适应调节系数,调节水下红光缺失现象。

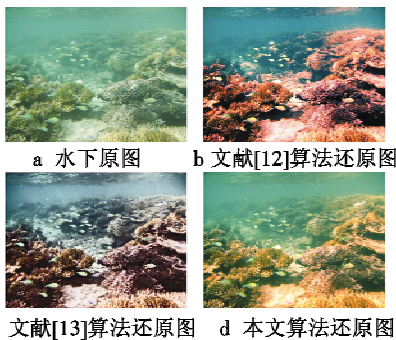


图 2 色彩校正算法比较结果图

Fig. 2 Comparing of color correction algorithms

2.3 亮度均衡

密闭空间水下环境中光源的位置摆放、光照强度等问题,一直是严重影响水下图像质量的因素,且随着景深增加,光强弱导致图像极易出现渐晕现象^[18]。渐晕可以理解为图像的阴影,将图像 RGB 通道转换为 HSV

通道,渐晕效果仅表现在亮度 V 通道上,对图像亮度通道利用渐晕模型进行校正后,转换为 RGB 通道,得到还原后效果图。

其中,RGB 转 V 通道公式可以表示为^[19]

$$V' = \frac{1}{\sqrt{3}}(R + G + B) \quad (15)$$

根据文献[18]中所述,利用一个简单的六阶参数函数来描述渐晕模型,可以写成

$$G(r) = 1 + ar^2 + br^4 + cr^6 \quad (16)$$

式中: r 是图像中心到每个像素的归一化半径。为了保证渐晕处理的快速性,选择模型的限制条件为^[11]

$$(c \geq 0) \wedge (b^2 - 4ac \leq 0) \quad (17)$$

因此,得到图像处理算式为

$$V_2(x, y) = G(r) V_1(x, y) \quad (18)$$

式中: $V_1(x, y)$ 为校正前的亮度图像; $V_2(x, y)$ 为校正后的亮度图像。

算法处理效果如图3所示。算法流程如图4所示。

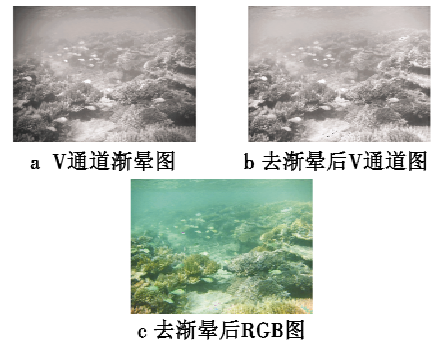


图 3 亮度通道去渐晕结果图

Fig. 3 Result of brightness channel de-vignetting

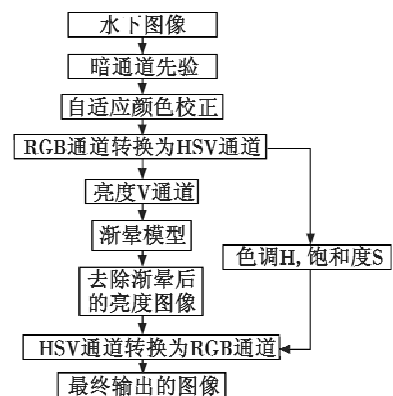


图 4 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of the algorithm

本文在色彩校正上引入大气光逆成分,削弱由光衰减导致选取大气光成分出现的较大误差。相比于文献[12]估计蓝红和蓝绿色衰减比及文献[13]利用 CNN 和基于白平衡的颜色偏差消除策略,本文引入自适应调节参数,在较好地修正色彩失真的同时,极大地简化了系统复杂度。

3 实验结果与分析

为了验证本文算法的有效性,与文献[12]和文献[13]算法进行对比分析,选取2组光照强度不同的图像进行处理,结果如图5、图6所示。第一组为光强不均且为弱光源图像,从图5结果可知,采用文献[12]算法处理第一组水下图像后,图像对比度有所提高,但是图像白平衡不好,出现过曝现象,并由于水下光强不均,导致校正后图像边缘出现明显的暗角;文献[13]算法处理第一组图片后,虽增加了图像对比度,但仍然出现过曝现象,且与文献[12]类似出现黑色边缘,影响图像整体视觉效果;本文算法相比于文献[12-13]算法,在色彩还原和亮度均衡上表现较好。

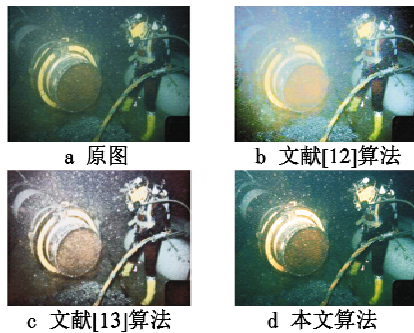


图5 第一组水下图像结果显示

Fig. 5 The results of the first group of underwater images

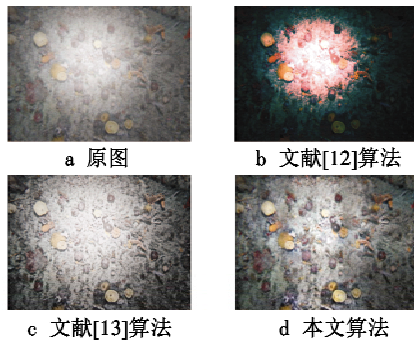


图6 第二组水下图像结果显示

Fig. 6 The results of the second group of underwater images

对于第二组光强极不均匀的图像来说,文献[12]算法处理图像会导致严重的图像黑暗化,图像过曝明显;文献[13]算法处理后的图像虽然亮度控制得较好,但是图像色彩严重失真;由本文算法得到的结果可以看出,亮度均衡的同时调节了色彩失真情况。

为了直观验证本文算法效果,实验采用图像信息熵^[20]和增强程度评价(UCIQE)^[21]作为水下图像客观评价指标对上述各方法进行定量评价。图像信息熵越大,图像包含信息越多;UCIQE值越大,表明颜色平衡、饱和度、清晰度、对比度等越佳,图像主观视觉效果越好。比较结果如表1所示。

表1 客观质量评价指标比较

Table 1 Comparison of value of objective quality evaluation indexes

	图像信息熵		UCIQE 值	
	第一组图像	第二组图像	第一组图像	第二组图像
原图	0.1459	7.1956	0.1459	7.2614
文献[12]算法	0.1785	7.6964	0.2746	6.9040
文献[13]算法	0.1855	7.6829	0.1472	7.5200
本文算法	0.2378	7.7229	0.1635	7.7135

为验证算法在实际场景中应用效果,在8 GiB的64位计算机上利用C++进行算法编码。实验场景为装满水的第9支撑板内,通过下放到模拟体内的爬壁小车身上的内窥镜对水下环境进行监控与检查,内窥镜采集回图像像素分辨率为640×480。图7为模拟体和爬壁小车的三维示意图。

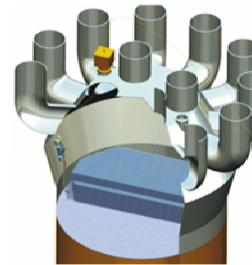


图7 第9支撑板与爬壁小车三维示意图

Fig. 7 Sketch map of the ninth supporting plate and wall climbing trolley

利用爬壁小车车身上的内窥镜对水下图像进行采样,其结果如图8所示。可以看出,水下原图由于杂质和灯光作用出现图像模糊、色彩不清晰等,经过本文算法复原后,图像模糊状态和色彩失真明显得到改善,光线上也得到了一定的校正,与文献[12-13]算法进行对比可看出,其视觉效果和颜色还原上弱于本文算法。

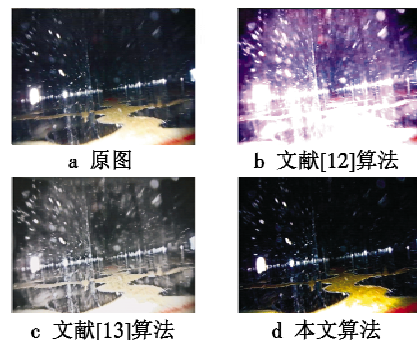


图8 真实场景下算法测试实验结果图

Fig. 8 Algorithm test results in real scene

4 结论

基于暗通道先验得到的水下复原图像纹理信息较丰富,但校正后图像红光缺失导致色彩失真,且复原图

像对光照不均情况较为敏感,而利用自适应红通道补偿参数可以有效改善红光缺失现象。并且结合渐晕模型对水下图像进行去渐晕处理,在平衡亮度的同时,削弱光照不均导致的图像细节丢失现象。实验结果表明,本文算法应用在实际水下场景中,能够提高图像清晰度和还原水下色彩,同时改善图像亮度不均情况。

参 考 文 献

- [1] FU X Y, ZHUANG P X, HUANG Y, et al. A retinex-based enhancing approach for single underwater image [C]// IEEE International Conference on Image Processing, 2014:4572-4576.
- [2] 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.
- [3] FU Q T, JUNG C, XU K Q. Retinex-based perceptual contrast enhancement in images using luminance adaptation [C]//International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE, 2017:1363-1367.
- [4] ZHANG S, WANG T, DONG J Y, et al. Underwater image enhancement via extended multi-scale retinex [J]. Neurocomputing, 2017, 245 : 1-9.
- [5] 吴振宇,姚洪利,杜少军.一种自适应的雾天降质图像清晰化方法研究 [J]. 电光与控制, 2010, 17 (8) : 52-56.
- [6] WANG M, BAI H L. Underwater image contrast enhancement by homomorphic filtering [J]. Applied Science & Technology, 2003, 33 (2) : 144-154.
- [7] SRIVIDHYA K, RAMYA M M. Performance analysis of pre-processing filters for underwater images [C]//International Conference on Robotics, Automation, Control and Embedded Systems, IEEE, 2015:1-7.
- [8] PARK S, YU S, KIM M, et al. Dual autoencoder network for retinex-based low-light image enhancement [J]. IEEE Access, 2018, 6 : 22084-22093.
- [9] HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior [C]//Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE, 2009:1956-1963.
- [10] WEN H C, TIAN Y H, HUANG T J, et al. Single underwater image enhancement with a new optical model [C]//IEEE International Symposium on Circuits and Systems, IEEE, 2013:753-756.
- [11] LI X, YANG Z X, SHANG M, et al. Underwater image enhancement via dark channel prior and luminance adjustment [C]//Oceans, Shanghai: IEEE, 2016:1-5.
- [12] BERMAN D, TREIBITZ T, AVIDAN S. Diving into hazelines: color restoration of underwater images [C]//British Machine Vision Conference (BMVC), 2017:102-113.
- [13] WANG P 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] 王乐,纪竟,邓彦松.基于图像分割的水下管道检测机器人设计 [J]. 机器人技术与应用, 2017 (4) : 41-44.
- [15] 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.
- [16] ANCUTI C, ANCUTI C O, HABER T, et al. Enhancing underwater images and videos by fusion [C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2012: 81-88.
- [17] CHEN Z H, ZHANG D X, XU Y, et al. Research of polarized image defogging technique based on dark channel priori and guided filtering [J]. Procedia Computer Science, 2018, 131 : 289-294.
- [18] LOPEZFUENTES L, OLIVER G, MASSANET S, et al. Revisiting image vignetting correction by constrained minimization of log-intensity entropy [C]//International Work-Conference on Artificial and Natural Neural Networks, Palma de Mallorca, Spain, 2015:450-463.
- [19] 李一兵,付强,叶方,等.基于 HSV 色彩空间结合 Retinex 的水下图像增强方法: 中国, 102930512A [P]. 2013-04-26.
- [20] 谢昊伶,彭国华,王凡,等.基于背景光估计与暗通道先验的水下图像复原 [J]. 光学学报, 2018, 38 (1) : 18-27.
- [21] YANG M, SOWMYA A. An underwater color image quality evaluation metric [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24 (12) : 6062-6071.
- (上接第 10 页)
- [10] 臧守明,白媛,马秀荣,等.一种改进的嵌套阵列波束形成算法 [J]. 计算机仿真, 2016, 33 (10) : 221-225.
- [11] 杨杰,廖桂生,李军.稳健的二级嵌套阵列自适应波束形成算法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2015, 42 (6) : 35-42.
- [12] 任世杰,杨小冈,齐乃新.一种基于局部特征索引结构的目标跟踪方法 [J]. 电光与控制, 2018, 25 (12) : 1-8.