

DOI:10.16136/j.joel.2022.08.0705

基于亮度校正与多空间转换的水下图像增强

杨亚绒, 李恒*, 赵磊, 王海瑞

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 由于水体环境中光的吸收与散射, 导致采集的水下图像存在颜色失真、亮度不均、对比度低等缺点。针对以上缺点, 提出了基于亮度校正与多空间转换的水下图像增强方法。首先采用色彩平衡算法对退化图像进行颜色校正; 然后将色彩校正的图像从红-绿-蓝 (red-green-blue, RGB) 空间转换为色调-饱和度-亮度 (hue-saturation-value, HSV) 空间, 用构造出新的二维伽马函数处理 V 通道, 再转回 RGB 空间; 最后对颜色校正图像和亮度校正图像进行加权融合, 并将融合图像从 RGB 空间转换为 LAB 空间, 用限制对比度自适应直方图均衡化算法处理 L 通道, 再转回 RGB 空间, 便得到最终的增强图像。为验证本文算法的有效性, 采用主观视觉效果和 3 种客观指标进行验证。结果表明, 本文算法能够有效地校正图像亮度, 提高图像清晰度。

关键词: 色彩平衡; 二维伽马函数; 加权融合; 限制对比度自适应直方图均衡化

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)08-0815-09

Underwater image enhancement based on brightness correction and multi-space transformation

YANG Yarong, LI Heng*, ZHAO Lei, WANG Hairui

(Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: Due to the absorption and scattering of light in the water environment, the collected underwater image has the defects of color distortion, blurred details, uneven illumination and poor contrast. Therefore, an underwater image enhancement method based on brightness correction and multi-space transformation is proposed to resolve this defect. Firstly, color balance algorithm is used to correct the color of degraded images. Secondly, the color corrected image is converted from red-green-blue (RGB) space to hue-saturation-value (HSV) space, the V channel is processed by the constructed two-dimensional function, and then transferred back to RGB space. Finally, the weighted fusion of color balance image and brightness correction image are carried out, and the fusion image is converted from RGB space to LAB space. The L channel is processed by the contrast-limited adaptive histogram equalization algorithm, and then transferred back to RGB space to obtain the final enhanced image. In order to verify the effectiveness of the algorithm in this paper, subjective visual effects and three objective indicators are used for verification. The results show that this algorithm can effectively correct image brightness and improve image clarity.

Key words: color balance; two-dimensional gamma function; weighted fusion; contrast limited adaptive histogram equalization

1 引言

海洋、湖泊和河流蕴藏着巨大的自然资源, 这些资源的开发与利用已成为世界经济和技术竞争的焦点。捕获的水下图像是获得水下信息的关

键, 可见水下成像技术的不断发展在资源勘探、目标检测、水下救援等领域具有重要意义。然而, 由于水体环境复杂多变, 水体中的水分子、水体中含有的各种物质对光的选择性吸收, 导致捕获的水下图像颜色失真^[1]; 水体中的藻类、泥沙以及微生

* E-mail: LIHENG@kust.edu.cn

收稿日期: 2021-10-12 修订日期: 2021-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(61863016)和地区科学基金(61263023)资助项目

物等悬浮颗粒对光的散射,导致捕获的水下图像雾化模糊;水体中的物体受自然光照射或人工照明的不均,导致捕获的水下图像亮度受损。这些退化的图像给后续的图像分割、目标检测与跟踪带来不便,因此如何获得优质的水下图像成为一个重要问题。

目前,图像复原和增强是水下图像清晰化的主要方法^[2]。前者建立了水下成像退化模型,对退化图像根据此模型进行逆求解,以获得复原图像;而后者不需要退化模型,根据实际需求丰富图像中的有用信息,获得视觉效果最佳的增强图像,主要分为基于直方图均衡化、Retinex、图像融合的方法。图像复原方法有 PENG 等^[3]提出了一种基于图像模糊与光吸收来估计水下场景深度(image blurriness and light absorption, IBLA)的方法,该算法虽然使用于各种水下图像,但获得的增强图像边缘轮廓信息不够清晰。SONG 等^[4]提出了一种基于水下光衰减先验来估计水下场景深度(underwater light attenuation prior, ULAP)的方法,该算法提高了对比度,但处理深蓝色图像的效果并不好,反而加重了图像颜色的失真现象。图像增强方法有 IQBAL 等^[5]提出了一种无监督模型对低质量图像进行颜色校正(underwater colour model, UCM)的方法,该算法可以有效地去除偏蓝色,但边缘细节不清晰。ANCUTI 等^[6]提出了基于色彩平衡与融合的水下图像增强(color balance and fusion, CBF)方法,该算法可以提高图像整体的对比度和边缘清晰度,但也存在图像色彩还原度不够的缺点。HUANG 等^[7]提出基于自适应参数获取相对全局直方图拉伸的浅水图像增强(relative global histogram stretching, RGHS)方法,该算法虽然增强了图像信息熵,引入了较小噪声,但图像整体偏亮。

本文结合光在水中呈指数衰减特性,根据先去色偏,再均匀亮度,增强对比度的思路,提出基于亮度校正与多尺度空间转换的水下图像增强算法。主要工作概况:先对图像进行颜色校正,再把色彩校正的图像从红-绿-蓝(red-green-blue, RGB)颜色空间转换为色调-饱和度-亮度(hue-saturation-value, HSV)颜色空间得到输入图 1;然后使用构造的二维伽马函数对 V 通道进行处理,增强光线过弱区域的亮度值,降低光线过强区域的亮度值,再把亮度校正的图像转回 RGB 空间得到输入图 2;最后把得到的两个结果进行加权融合,并将融合图像从 RGB 空间转换为颜色-对立(luminosity-a and b represent opposite dimension of color, LAB)空间,采用限制对比度自适应直方图

均衡化算法对 L 通道处理,再转回 RGB 通道,获得最终的增强图像。

2 水下图像成像模型

由于水最先吸收波长较长的红光,其次是绿光,衰减速率最慢的是波长较短的蓝光,所以不同波长的光随水下场景深度的增加而不断衰减,因此捕获的水下图像绝大多数呈现蓝、绿色基调;再加上水下成像受拍摄距离、水的混浊程度、光照不均等因素的制约,光在水介质中的传播符合 Lambert-Beer 定律,表达式如下式:

$$t(x, a) = e^{-\beta d(x)}, \quad (1)$$

式中, β 表示光的衰减系数, $d(x)$ 表示拍照设备与目标物体间的距离, $t(x, a)$ 表示透射率。

根据 Jaffe-McGlamery 成像模型^[8], 拍照设备接收到的光分为直接分量、前向散射分量及后向散射分量,如图 1 所示。

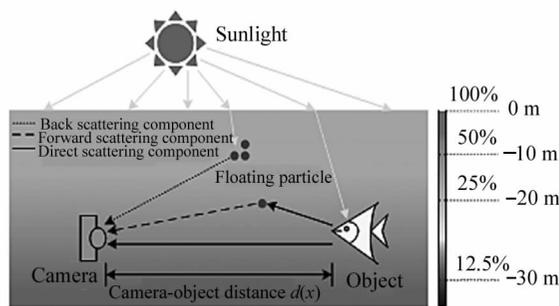


图 1 水下图像成像模型

Fig. 1 Underwater image imaging model

在实际场景拍摄过程中,由于拍照设备与目标物体无限接近,可以不计前向散射分量产生的影响,所以水下成像模型可以简化为:

$$I(x, a) = J(x, a)t(x, a) + B_{\infty}(a)[1 - t(x, a)], \quad (2)$$

式中, $I(x, a)$ 表示捕获的水下退化图像, $J(x, a)$ 表示增强后的水下清晰图像, $B_{\infty}(a)$ 表示背景光。

3 水下图像增强

根据人类视觉系统的敏感程度,人眼对亮度的感知相比于对色彩的感知更加敏感,所以亮度对于光照不均匀图像的校正尤为重要。目前,颜色空间应用最广泛的模型是 RGB 色彩模型,由于该模型中的 RGB 3 个颜色通道均与亮度相关,所以如果只改变亮度,则这 3 个通道都会随之变化,从而会引发校正后的图像出现颜色失真的现象。但由于 HSV 色彩模型与 LAB 空间模型比较贴合人眼视觉特性,再

加上这两种模型中的 HSV 与 LAB 中的 3 个分量相互独立,亮度分量与色彩信息无关,因此本文算法先对消除色偏的图像进行 HSV 转换,利用亮度分量 V 对光照不均匀的图像进行校正,再把校正后的图像

转回到 RGB 颜色模型;最后对融合后的图像进行 LAB 空间转换,对 L 分量进行限制对比度自适应直方图均衡化,再把对比度增强的图像转回 RGB 颜色模型。本文算法的具体流程图如图 2 所示。

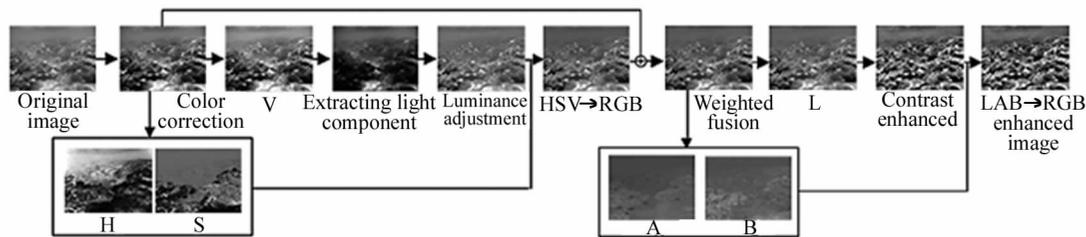


图 2 算法流程图

Fig. 2 Algorithm flow char

3.1 颜色校正

由于水体环境中不同波长的光具有不同的衰减速率,光能大量减少,导致采集的水下图像与真实场景之间存在严重的色彩偏差,针对这个问题,本文采用最简单的色彩平衡算法^[9]。该算法先将 RGB 颜色通道中的最大值即最亮像素点记为白色,最小值即最暗像素点记为黑色;然后把图像中其余部分的红绿蓝三通道进行对比度拉伸;最后对每个通道进行仿射变换以占据最大范围[0, 255]。由于部分图像的通道中存在最低像素点为 0、最高像素点为 255 的异常像素值,所以在进行仿射变换之前,适当地去掉图像中的最高像素值和最低像素值。

白平衡算法和带色彩恢复的多尺度视网膜(multi-scale retinex with color restoration, MSRCR)增强算法是颜色校正的主要方法。常用的白平衡算法又包括动态阈值白平衡、完美反射以及灰度世界。图 3 为颜色校正对比结果,可以看出动

态阈值白平衡算法和灰度世界算法虽然可以去除色偏,但图像不够清晰;完美反射算法处理的图像整体较亮;MSRCR 算法处理后的图像色彩过度鲜艳且偏粉色;而色彩平衡算法能够较好地去除色偏,获得颜色饱和度最佳的自然色彩。

3.2 亮度校正

由于水体环境中光照较弱,需要借助人工光源以增强光照强度,导致捕获的水下图像存在亮暗不均的问题。针对这个问题,本节构造出一种亮度校正的二维伽马函数,增强图像中像素值过低的亮度,降低图像中像素值过高的亮度,以此获得亮度均匀的高质量图像。

3.2.1 基于暗通道与多尺度高斯滤波相结合的光照分量的提取

由于鱼、扇贝、珊瑚等海底动植物在自然光或者外界照明的条件下会产生阴影或投影^[10],而且颜色鲜艳或者较暗的物体表面总存在 RGB 3 通道中的其中一个通道值很低,所以水下环境与大气雾天相似。HE 等^[11]提出了暗通道理论,该理论是通过统计五千多张无雾图像的暗通道数据得出在绝大多数非天空的局部区域里,总存在至少一个颜色通道的像素值非常低。然而,由于水体环境中的红色通道衰减最快,所以不考虑红色通道,只考虑绿色通道和蓝色通道中各像素点处的最低亮度值,其表达式为:

$$J^{gb}(x, y) = \min_{c \in \{G, B\}} [\min_{(x, y) \in \Omega(x, y)} J^c(x, y)], \quad (3)$$

式中, $J^c(x, y)$ 表示彩色图像中 GB 两颜色通道中的任意一个通道; $\Omega(x, y)$ 表示以 (x, y) 为中心的领域处理窗口; $J^{gb}(x, y)$ 表示暗通道图像。

为了降低非均匀光照对图像质量的影响,需要准确地提取出场景中的光照分量。当前,提取光照分量的方法主要包括双边滤波法^[12]、引导滤波

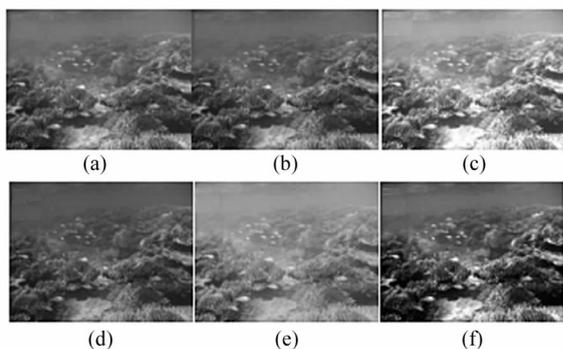


图 3 颜色校正对比结果:(a) 原图;

(b) 动态阈值白平衡;(c) 完美反射;

(d) 灰度世界;(e) MSRCR;(f) 色彩平衡

Fig. 3 Comparison results of color correction:

(a) Original image; (b) Dynamic threshold white balance;

(c) Perfect reflection; (d) Gray world;

(e) MSRCR; (f) Color balance

法^[13]、多尺度高斯滤波法等^[14]。双边滤波算法能够较好的保留边缘信息,但运算过程较复杂;引导滤波算法虽然具有良好的边缘保持平滑特性和低复杂性,但使用的局部线性模型不能很好地表示某些边缘附体中的图像,可能出现晕圈伪影。综合考虑,本文选取暗通道与多尺度高斯滤波相结合的算法提取光照分量,相比于传统的多尺度高斯函数,此算法不但可以有效地压缩图像动态范围,提高图像清晰度,且能快速准确的估计出光照分量。

传统的多尺度高斯滤波表达式为:

$$I^L(x,y) = \sum_{l=1}^3 \frac{1}{3} [F(x,y) k e^{-\frac{x^2+y^2}{a^l}}], \quad (4)$$

暗通道与多尺度高斯滤波相结合表达式为:

$$I^L(x,y) = J^{sb}(x,y) \sum_{l=1}^3 \frac{1}{3} [F(x,y) k e^{-\frac{x^2+y^2}{a^l}}], \quad (5)$$

式中, $F(x,y)$ 表示颜色校正图像; $I^L(x,y)$ 表示光照分量的估计值; a 表示尺度因子,取值为15、80、250; k 表示归一化恒常系数,要满足 $\iint k e^{-\frac{x^2+y^2}{a^2}} dx dy = 1$ 的条件;表示G和B两通道中的最小亮度值。

从图4可以看出,多尺度高斯滤波、本文算法都能有效的从场景中提取出光照分量,但其光照分量效果具有较大差异。对于光照突变较为明显的局部区域,使用多尺度高斯函数算法提取的光照分量不够准确。而本文算法较好地描述了光照变化,较好地保留了边缘特征,所以本文算法能够较准确的估算出图像的光照分量。

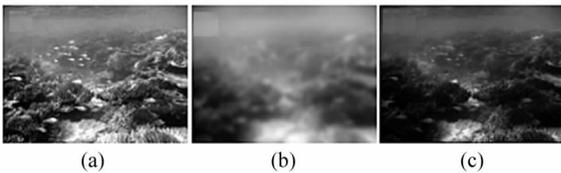


图4 光照分量对比结果:(a)亮度分量 v ;
(b)多尺度高斯滤波;(c)本文算法

Fig. 4 Illumination component comparison result:
(a) Luminance component v ;
(b) Multi-scale gaussian filter;
(c) Proposed method

3.2.2 基于二维伽马函数的亮度校正

针对光照不均的问题,本节根据提取的光照分量的分布特性,构造出一种新的二维伽马函数。LEE等^[15]提出了基于二维伽马函数的亮度校正表

达式:

$$I^{out}(x,y) = 255 \times \left(\frac{I(x,y)}{255} \right)^\gamma, \quad (6)$$

$$\gamma = \alpha \frac{128 - I^L(x,y)}{128},$$

式中, $I^{out}(x,y)$ 表示输出图像的亮度增强强度值; $I(x,y)$ 表示颜色校正图像的亮度; $I^L(x,y)$ 表示像素 (x,y) 处的光照分量值; γ 表示局部动态特征的亮度增强指数值; α 表示光照系数。通常, α 取值为0.5,但是对于借助人工照明采集的整体较暗或较亮图像的处理效果不佳。因此,设定光照因子为 ω 且 $\omega = \overline{I^L}(x,y)/255$ ^[16], $\overline{I^L}(x,y)$ 为光照分量 $I^L(x,y)$ 的平均值, $F(x,y)$ 为颜色校正图像,则改进后的二维伽马函数表达式为:

$$I^2(x,y) = 255 \times \left(\frac{I^1(x,y)}{255} \right)^\beta, \quad (7)$$

$$\beta = \omega \frac{\overline{I^L}(x,y) - I^L(x,y)}{I^L(x,y)},$$

式中, $I^2(x,y)$ 表示亮度校正的输出图像; I^1 表示经色彩平衡算法处理得到的颜色校正图像; $I^L(x,y)$ 表示像素点 (x,y) 处的光照分量值; β 表示局部动态特征的亮度增强指数值; ω 表示光照系数。

由于 $\overline{I^L}(x,y) \in [0, 255]$,所以 $\omega \in [0, 1]$ 。但是鉴于可以利用人工照明光源进行补充光照,所以几乎很少存在 $\overline{I^L}(x,y) = 0$ 或者 $\overline{I^L}(x,y) = 1$ 的情况,故一般情况下 $\omega \in (0, 1)$ 。大部分图像提取出的光照分量均值是在128上下波动,所以本文将值设为0.5。由 $\omega = \overline{I^L}(x,y)/255$ 可以看出每张图像使用实际算出的光照因子获得校正结果更准确,从式(7)可以得出图像亮度增强指数值 β 随图像光照分量的变化而变化,以实现非均匀光照图像亮度校正的目标。如果 $\overline{I^L}(x,y) = 128$,则颜色校正图像的亮度值经过新构造的二维伽马函数的校正处理,得到如图5所示的校正前后的输出亮度变化曲线图。从图5可以看出,如果输入图像在某像素 (x,y) 处的亮度值大于(小于)假设的整张图像光照分量均值128时,构造的二维伽马函数会降低(增强)该点像素的亮度值。当输入图像在像素点 (x',y') 处的亮度值为112,且在该像素点处取光照分量值为73,则使用本文算法校正后的输出图像在该像素点处的亮度值为138,显然提高了该像素点处光线过弱的亮度值;再当输入图像在像素点处的亮度值为112,且在该像素点处取光照分量值为137,则使用本文算法处理后的输出图像在该像素点处的亮度值为107,显然降低了该像素点处光线过暗的亮度值。

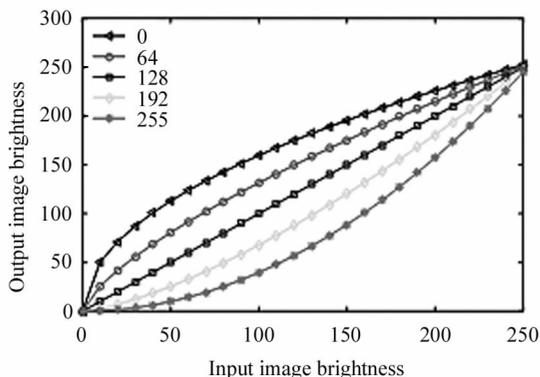


图 5 不同光照条件下二维伽马函数校正后图像的亮度变化曲线

Fig. 5 The brightness change curve of the image after 2D gamma function correction under different lighting conditions

图 6 为改进前后亮度校正对比结果,其中的彩色图是将亮度校正图、颜色校正的色调分量图和饱和度分量图从 HSV 空间转换为 RGB 空间的图像。从图 6 可以看出,该算法不但可以有效地提高输入图像中亮度过低的暗区域像素值,也可以适度地降低输入图像中亮度过高的亮区域像素值,从而获得亮度均匀的校正图像。

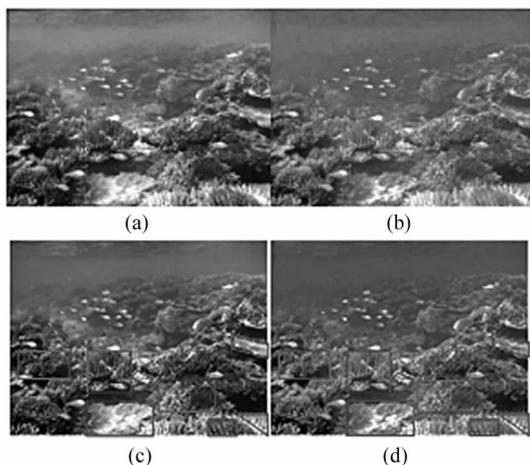


图 6 改进前后亮度校正结果:(a) 改进前亮度校正前灰度图;(b) 改进后亮度校正灰度图;(c) 改进前亮度校正彩色图;(d) 改进后亮度校正彩色图

Fig. 6 Brightness correction results before and after improvement:(a) The gray image of the brightness correction before the improvement;(b) The gray image of the brightness correction after the improvement;(c) The color image of the brightness correction before the improvement;(d) The color image of the brightness correction after the improvement

3.3 加权融合与限制对比度自适应直方图均衡化

把处理后的两张输入图像进行线性加权融合,其表达为:

$$I^0(x,y) = aI^1(x,y) + bI^2(x,y), \quad (8)$$

式中, $I^0(x,y)$ 表示最终的增强图像; $I^1(x,y)$ 表示颜色校正图像; $I^2(x,y)$ 表示亮度校正;图像 a, b 表示控制系数,且 $a+b=1$,经过实验,当 $a=0.2, b=0.8$ 时,所得融合图像的效果最佳。

由于加权融合一般会减弱图像的细节信息,为了提高图像对比度,本文将融合后的图像从 RGB 空间转换为 LAB 空间,并对 L 通道采用限制对比度自适应直方图均衡化(contrast limited adaptive histogram equalization, CLAHE)算法进行处理,最后再转回 RGB 空间。CLAHE 算法是在自适应直方图均衡化(adaptive histogram equalization, AHE)的基础上改进而来,其核心是使用固定阈值限幅的方法来抑制局部区域过度增强,不但解决了 AHE 算法引入的噪声过度放大和块效应问题,而且也增强了图像细节信息。

图 7 为对比度增强实验结果图,可以看出经拉普拉斯算法和对数变换算法处理后的图像整体偏暗,对比度没有得到明显改善,这两种算法更适用于低对比度和低灰度值的图像增强;未改进算法得到的对比度增强图像局部区域过亮;而本文算法适当地提高了图像对比度。

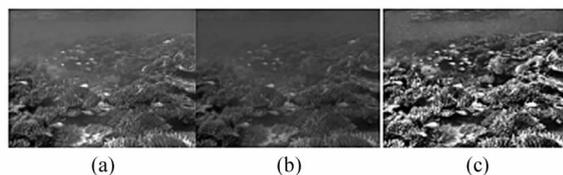


图 7 对比度增强结果:(a) 拉普拉斯算法;(b) 对数变换;(c) 本文算法

Fig. 7 Contrast enhancement results:(a) Laplace algorithm;(b) Log transformation;(c) Proposed method

4 实验结果与分析

本文实验采用大连理工大学-獐子岛联合实验室拍摄的数据集以及其他论文中常用的图像数据。为了检验本文算法的可行性,选取了 6 组光在水体中衰减程度不同的图像进行处理,并与 IBLA^[3]、ULAP^[4]、UCM^[5]、RGHS^[7]、CBF^[6]算法的主、客观评价进行了对比研究。

4.1 主观评价

本文算法与其他参考文献的实验对比结果如图8所示。从图8可以看出,经IBLA算法和ULAP算法处理后的Image1、Image4仍然存在颜色失真的现象;经UCM算法处理后的六张图像轻微泛黄;经

RGHS算法处理后的Image3和Image5虽然对比度得到了提高,但局部区域过暗;经CBF算法处理后的图像虽然有效的去除了偏色现象,但图像中的色彩还原度较弱。相比而言,从图8可以看出:本文算法不但能够有效地解决颜色失真,而且能够获得亮度

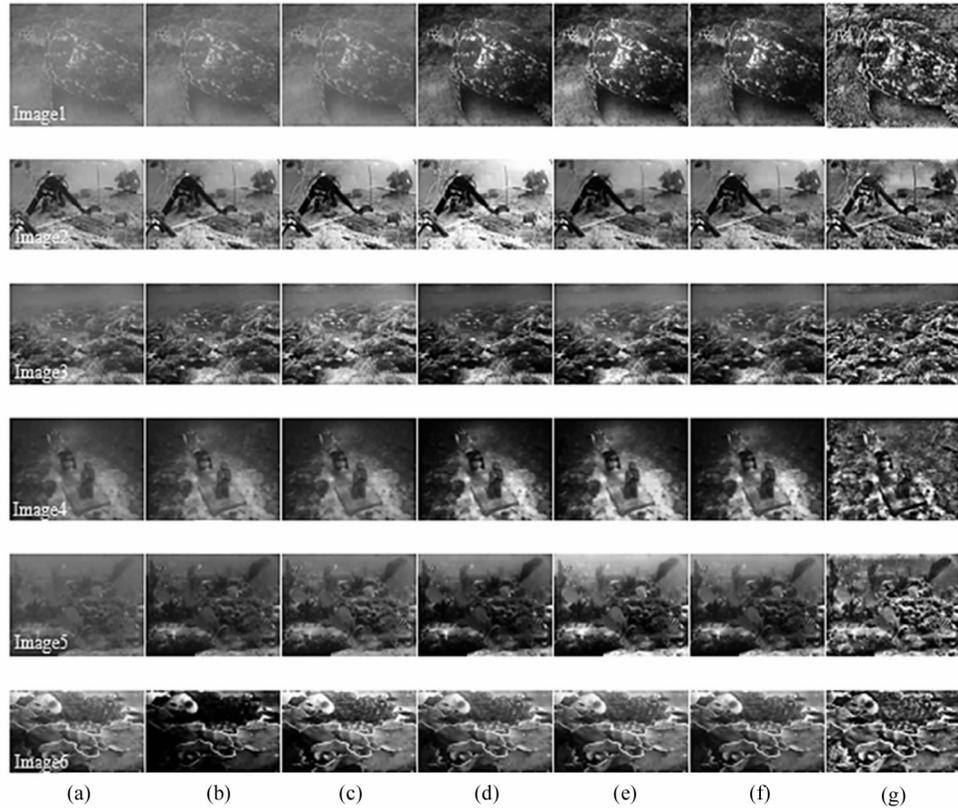


图8 各算法实验结果对比:(a)原图;(b)IBLA;(c)ULAP;(d)UCM;(e)RGHS;(f)CBF;(g)本文算法
 Fig.8 Comparison of experimental results of various algorithms:(a)Original image;(b)IBLA;
 (c)ULAP;(d)UCM;(e)RGHS;(f)CBF;(g)Proposed method

均匀、对比度增强的高质量图像。

4.2 客观评价

由于视觉效果受人们主观意识的影响,为了进一步验证实验效果,本节使用水下彩色图像质量评价(underwater color image quality evaluation, UCIQE)^[17]、信息熵(information entropy, EN)、峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR)3种性能指标对各算法处理得到的结果进行评估。UCIQE是综合性评价指标,可以反映一幅图像的整体质量。通常,UCIQE越高,说明图像质量越好。信息熵反映一幅图像的信息丰富程度,EN越大,说明图像包含的信息越多。峰值信噪比反映一幅图像颜色失真的程度,PSNR越大,说明图像的保真度良好。各算法的实验指标测评值与指标平均值如表1和表2所示。

由表1中的数据可知,Image2和Image6分别经IBLA算法和ULAP算法处理后的图像UCIQM值最高,结合主观视觉效果,Image2还存在颜色失真,Image6的左下区域较暗;经RGHS算法处理后的Image5的PSNR最高,但从图中可以看出局部区域偏暗;而从表2中的数据可以看出,本文算法得到的UCIQM、EN、PSNR的平均值分别为0.468、7.779、21.068,均高于其他算法。结合主客观评价,表明本文算法能够有效地消除色偏、均匀亮度,提高图像清晰度。

4.3 应用测试

为了进一步分析验证本文算法的可应用性,采用具有对图像旋转、平移、缩放等特征不变的SIFT(scale invariant feature transform)算子。该算法对原图以及经本文算法处理的图像进行特征匹配,应

用测试结果如图 9 所示。

表 1 水下图像质量指标测评值
Tab. 1 Evaluation value of underwater images quality indexes

Image name	Algorithm	UCIQE	EN	PSNR
Image1	Original image	0.328	5.622	12.047
	IBLA	0.399	6.254	12.935
	ULAP	0.353	6.132	12.613
	UCM	0.428	7.336	14.584
	RGHS	0.455	7.588	16.924
	CBF	0.474	7.465	15.410
	Proposed method	0.517	7.813	21.810
Image2	Original image	0.379	7.230	15.744
	IBLA	0.470	7.564	17.955
	ULAP	0.389	7.752	17.311
	UCM	0.459	7.574	13.350
	RGHS	0.465	7.553	18.923
	CBF	0.374	7.660	18.464
	Proposed method	0.439	7.861	23.776
Image3	Original image	0.333	6.822	14.588
	IBLA	0.363	7.253	15.747
	ULAP	0.411	7.447	16.665
	UCM	0.460	7.448	15.413
	RGHS	0.437	7.508	17.578
	CBF	0.400	7.369	16.520
	Proposed method	0.467	7.731	19.443
Image4	Original image	0.338	6.756	13.389
	IBLA	0.402	7.194	15.385
	ULAP	0.398	7.201	13.992
	UCM	0.467	7.694	14.873
	RGHS	0.459	7.692	16.123
	CBF	0.424	7.618	15.945
	Proposed method	0.456	7.688	18.507
Image5	Original image	0.247	6.236	13.023
	IBLA	0.422	7.127	13.731
	ULAP	0.433	7.264	16.078
	UCM	0.443	7.545	14.750
	RGHS	0.426	7.702	23.017
	CBF	0.420	7.586	17.920
	Proposed method	0.473	7.752	20.449
Image6	Original image	0.402	7.514	18.390
	IBLA	0.421	6.660	10.220
	ULAP	0.474	7.795	24.155
	UCM	0.445	7.711	20.021
	RGHS	0.470	7.728	20.289
	CBF	0.400	7.696	20.330
	Proposed method	0.453	7.826	22.225

表 2 水下图像质量指标平均值

Tab. 2 Average value of underwater image quality indexes

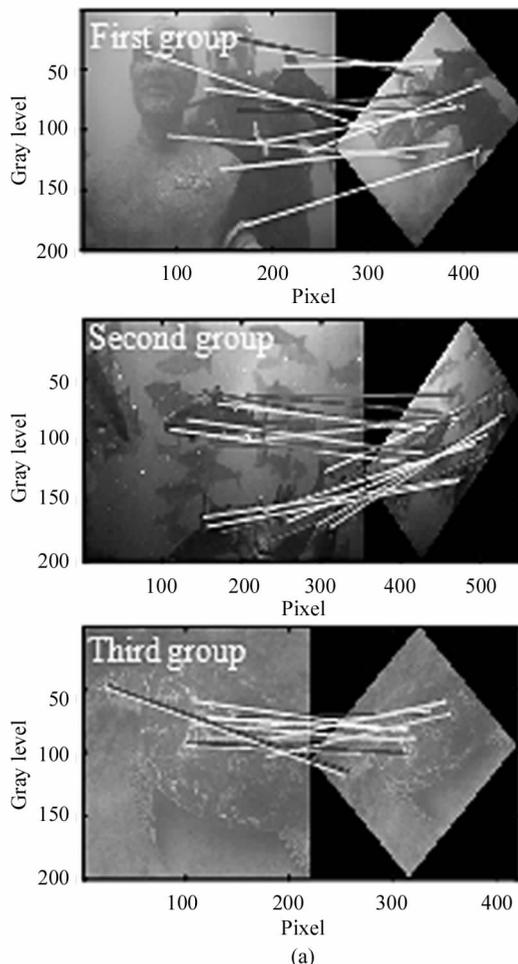
Algorithm	Aver-UCIQE	Aver-EN	Aver-PSNR
Original image	0.338	6.697	14.530
IBLA	0.413	7.009	14.329
ULAP	0.410	7.265	16.802
UCM	0.450	7.551	15.499
RGHS	0.452	7.645	18.809
CBF	0.415	7.566	17.432
Proposed method	0.468	7.779	21.068

根据表 3 特征点匹配数量对比结果,可以看出经本文算法处理后的图像能匹配较多的特征点,所以经本文算法处理的图像亮度更均匀、纹理细节更清晰,同时也验证了本文算法处理后的图像在后续的特征提取中具有良好的应用效果。

表 3 特征点匹配数量对比结果

Tab. 3 Number of feature points matching contrast result

Test image	Original image	Proposed method
First group	14	89
Second group	25	130
Third group	14	202



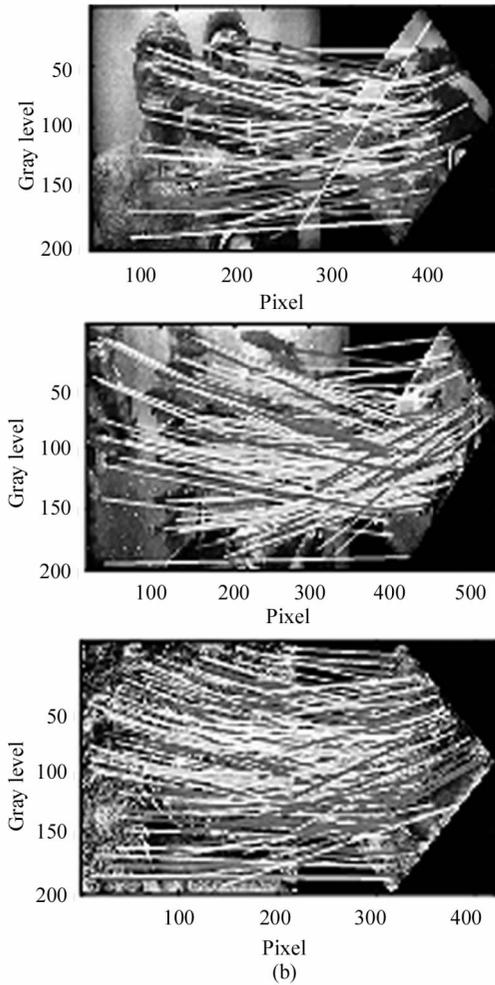


图9 应用测试图:(a)原始图像匹配结果;
(b)增强图像匹配结果

Fig. 9 Application test images:

(a) The original image matching result;
(b) The enhanced image matching result

5 结 论

由于光线不断衰减、水下环境恶劣以及成像设备不佳,导致采集的水下图像受非均匀光照的影响,存在颜色失真、亮度不均、对比度低等问题。针对以上问题,本文提出了基于亮度校正与多空间转换的水下图像增强算法,该算法能够有效地削弱光照不均匀对图像质量的影响。本文提出的亮度不均校正算法可以应用于成像设备,在图像采集的过程中可以对亮度不均匀区域进行校正,这样不但优化了成像设备,而且大大地缩减了对图像进行预处理的

参考文献:

[1] YANG A P, YANG B W, QU C, et al. Transmission fusion

and optimization for single underwater image restoration [J]. Journal of Tianjin University, 2019, 52 (10): 1033-1044.

杨爱萍,杨炳旺,曲畅,等.基于透射率融合与优化的水下图像复原[J].天津大学学报,2019,52(10):1033-1044.

[2] LI L, WANG H G, LIU X. Underwater image enhancement based on improved dark channel prior and color correction [J]. Acta Optics Sinica, 2017, 37 (12): 168-176.

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] PENG Y T, COSMAN P C. Underwater image restoration based on image blurriness and light absorption [J]. IEEE Trans Image Process, 2017, 26 (4): 1579-1594.

[4] SONG W, WANG Y, HUANG D, et al. A Rapid scene depth estimation model based on underwater light attenuation prior for underwater image restoration [C]//19th Pacific-Rim Conference on Multimedia, September 21-22, 2018, Hefei, China. Berlin: Springer, 2018: 678-688.

[5] IQBAL K, SALAM R A, AZAM O, et al. Underwater image enhancement using an integrated colour model [J]. International Journal of Computer Science, 2007, 34 (2): 239-244.

[6] ANCUTI C O, ANCUTI C, DE V C, et al. Color balance and fusion for underwater image enhancement. [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 27 (99): 379-393.

[7] HUANG D M, WANG Y, SONG W, et al. Shallow-water image enhancement using relative global histogram stretching based on adaptive parameter acquisition [J]. Multi-Media Modeling, 2018, 10704: 453-465.

[8] MCGLAMERY B L. A computer model for underwater camera systems [J]. Proc Spie, 1980, 208 (208): 221-231.

[9] 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, June 16-21, 2012, Providence, RI, USA. New York: IEEE, 2012: 81-88.

[10] WANG C, XUE X J, LI H, et al. Underwater image enhancement based on color correction and improved 2D gamma function [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2021, 35 (2): 171-178.

王聪,薛晓军,李恒,等.基于颜色校正和改进二维伽马函数的水下图像增强[J].电子测量与仪器学报,2021,35(2):171-178.

[11] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal u-

- sing dark channel prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [12] LI X R, PAN J, HE Y Q, et al. Bilateral filtering inspired locality preserving projections for hyperspectral images[J]. Neurocomputing, 2015, 164(21): 300-306.
- [13] HE K M, SUN J, TANG X O. Guided image filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [14] ZHOU W, PEI Y, BAO J, et al. Automatic optic disc location via adaptive multi-scale Gaussian filtering[C]//Eleventh International Conference on Graphics and Image Processing, December 26-28, 2019, Haikou, Hainan, China. China Society of Image and Graphics: Beijing, 2020.
- [15] LEE G, KANG B, LEE S, et al. A Space-variant luminance map based color image enhancement[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2010, 56(4): 2636-2643.
- [16] WANG D W, WANG J, XU Z J, et al. Adaptive correction algorithm for non-uniform illumination images[J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(6): 1383-1390.
- 王殿伟,王晶,许志杰,等.一种光照不均匀图像的自适应校正算法[J].系统工程与电子技术,2017,39(6): 1383-1390.
- [17] YANG M, SOWMYA A. An underwater color image quality evaluation metric[J]. IEEE transactions on image processing: a publication of the IEEE Signal Processing Society, 2015, 24(12): 6062-6071.

作者简介:

李恒 (1978-),男,硕士,高级实验师,硕士生导师,主要从事图像处理方面的研究.