

doi:10.3788/gzxb20184711.1101002

基于迭代直方图均衡化的常规光源水下 成像增强算法

王永鑫^{1,2}, 刁鸣¹, 韩闯²

(1 哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001)

(2 哈尔滨理工大学 测控技术与仪器黑龙江省高校重点实验室, 哈尔滨 150080)

摘 要:为了增强常规光源水下图像的视觉对比度,提高水下图像的图像质量,提出一种基于迭代直方图均衡化水下图像增强算法.首先通过 Retinex 模型将水下图像分解为细节层和光照层图像.然后推导出一个图像增强模型,该模型能够在保证韦伯对比度的前提下完成图像增强工作.接着提出一种基于迭代直方图的直方图均衡化算法对光照层图像进行对比度增强,并通过 S 形状函数对细节层图像进行对比度拉伸.最后,合并拉伸后的细节层图像和增强后的光照层图像,进而获得较佳的图像增强效果.实验结果表明,该算法能够有效地提升水下图像的视觉对比度,图像信息熵值及均值结构相似度高于其他算法,图像的视觉效果得到显著提高.

关键词:数字图像处理;水下图像增强;迭代直方图均衡化;Retinex 模型;韦伯对比度;S 形状函数

中图分类号:TP391.41

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)11-1101002-11

Underwater Image Enhancement Algorithm Based on Iterative Histogram Equalization with Conventional Light Source

WANG Yong-xin^{1,2}, DIAO Ming¹, HAN Chuang²

(1 School of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

(2 The Higher Educational Key Laboratory for Measuring & Control Technology and Instrumentations of Heilongjiang Province, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: To enhance visual contrast and image quality for underwater image with conventional light source, an image enhancement algorithm based on iterative histogram equalization is proposed. Firstly, underwater image is decomposed into detail layer image and illumination layer image through Retinex model, and an image enhancement model is derived to improve the contrast effect of image on the basic of Weber contrast constant. Then, an image enhancement algorithm based on iterative histogram equalization is proposed to enhance the contrast of illumination layer image, and S-shade function is employed to stretch the contrast of detail layer image. Finally, the stretched detail layer image and enhanced illumination layer image are mixed to derive the preferable enhanced underwater image. Experimental results show that the visual contrast of underwater image is enhanced validly by the proposed algorithms, and the entropy and mean structural similarity index are higher than other image enhancement algorithms. Meanwhile the visual effect is ascended observably.

Key words: Digital image processing; Underwater image enhancement; Retinex model; Weber contrast; Histogram equalization; S-shaded function

OCIS Codes: 100.2980; 100.2000; 100.2960

基金项目:国家自然科学基金(No. 61601149)和黑龙江省科学基金(No. QC2017074)资助

第一作者:王永鑫(1982-),男,助理研究员,博士研究生,主要研究方向为水下视觉目标探测与识别、嵌入式系统设计等. Email: 51269528@qq.com

导 师:刁鸣(1960-),男,教授,博士,主要研究方向为宽带信号检测、处理与识别、通信信号处理等. Email: diaoming@hrbeu.edu.cn

收稿日期:2018-08-11;录用日期:2018-11-12

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

随着海洋信息处理技术的发展,水下图像处理技术被广泛应用在目标检测、跟踪、定位及海洋探测领域,具有重要的价值^[1, 2]。

由于水体的能见度低且光在水中传输过程中极易产生强烈的吸收和散射效应,导致利用常规光源作为辅助照明措施的成像系统采集到的水下图像质量差,对比度较低,图像整体模糊不清^[3]。为了改善水下图像质量,近年来国内外学者提出了一些实用的水下图像增强方法。SHAMSUDDIN N B等^[4]利用基于直方图的灰度校正方法来提升水下图像的可视化,平衡图像色彩的对比以及照明问题。BHATIA S等^[5]提出一种将分段线性对比度增强和非线性变换相结合的图像增强方法,提高了图像清晰度。XU H等^[6]在分析图像直方图与对比度增强、白平衡之间关系的基础上,建立了一个将对对比度增强和白平衡相结合的广义均衡模型对水下图像进行增强。杨卫中等^[7]将水下图像分割成多个子块区域,中心像素的灰度值即为通过子块局部直方图均衡化得到的值,其他像素的灰度值由相邻中心像素的双线性插值计算而得。胡玉娟等^[8]提出一种基于图像融合技术的水下图像增强算法,该算法通过白平衡和全局对比度增强将原始水下图像分解为两张子图像,再对这两张子图像进行图像融合从而得到增强后的水下图像。

以上方法在一定程度上提高了水下图像的对比度,但是仍然存在两个主要问题有待进一步解决:1)图像增强过程中原始水下图像的细节如何得以保持;2)现有水下图像增强方法并未根据水下图像自身的特点,针对性地对图像进行增强。

本文提出一种基于迭代直方图均衡化的常规光源下水下图像增强算法。采用 Retinex 模型将水下图像分解为光照层和细节层,分别对光照层图像以及细节层图像进行图像增强,从而保证图像增强过程对细节的影响达到最小。作为对于 Retinex 模型的补充,提出一种能够保持韦伯对比度的图像增强模型用于弥补 Retinex 模型产生的细节损失。根据常规光源下水下图像的特点,将均值水下图像直方图划分为欠曝光和过曝光两部分,分别对其进行直方图均衡化,并重复这一过程直到算法收敛,进而获得一个适合于水下图像增强的全局灰阶映射函数,继而计算出增强后的水下图像。

1 算法原理

水体对于光信号的衰减造成水下成像过程中可见光分布不均匀,水下图像画面不同部分的明暗对比差异大。由于水体的无规则散射作用,水下成像呈现严重的雾化现象。因此水下图像增强技术最主要的任务是在提高对比度的同时,抑制图像的雾化、模糊效果,进而在显示设备上还原出清晰的水下环境。

作为一种经典、有效的去雾方法,Retinex 模型被广泛用于包括大气环境、陆地环境、空间环境的图像对比度增强以及图像去模糊领域中^[9]。通过将图像分解为对光照具有一定鲁棒性的细节层图像,从而解决光照不均匀以及图像雾化、模糊等问题。因此,采用 Retinex 模型作为基础模型从而克服由水体造成的图像质量变差问题。

1.1 基于 Retinex 模型的水下图像分层方法

采用 Retinex 模型对水下图像进行分层的表达式为

$$R_i(x, y) = \log I_i(x, y) - \log [F(x, y) * I_i(x, y)] \quad (1)$$

式中, I 表示原始水下图像, F 表示具有高斯形状卷积核, R 表示细节层图像, 下角标 i 表示不同的颜色通道, $*$ 代表二维卷积运算, (x, y) 表示像素的平面坐标位置, $F(x, y) * I_i(x, y)$ 运算的结果即为光照层图像。根据式(1)可知细节层等价于图像的高频分量, 而高频分量通常包含目标的细节、纹理、边缘等有用信息, 图像的低频分量体现了场景的光照情况并决定了图像的对比度。

Retinex 模型最主要的缺点之一是难以保证色彩的恒常性^[10], 因此通过 RGB 转 HSV 变换将彩色图像转换为 HSV 格式数据, 单独对与色彩无关的 V 通道进行基于 Retinex 模型的分解运算, 从而保证算法对色彩的恒常性。令 V 表示经过 RGB 转 HSV 变换后得到的与色彩无关的明度通道数据。单独对 V 通道进行基于 Retinex 模型的分层运算公式为

$$R(x, y) = \log V(x, y) - \log [F(x, y) * V(x, y)] \quad (2)$$

式中, R 表示 V 对应的细节层图像.令 L 表示 V 通道对应的光照层图像, L 的表达式为

$$L(x,y)=F(x,y)*V(x,y) \quad (3)$$

为了在不模糊细节的同时提高水下图像的对比度,需要保持细节层图像 R 不变,单独对光照层 L 进行对比度增强.令 g 表示对比度增强函数,对比度增强后的光照层图像为

$$\hat{L}(x,y)=g[L(x,y)] \quad (4)$$

式中, \hat{L} 表示增强后的光照层图像.最终得到的增强水下图像是 Retinex 模型分解的逆过程,即增强后的 V 通道数据为

$$\hat{V}(x,y)=\exp[R(x,y)+\log\hat{L}(x,y)]=\exp[R(x,y)]\times\hat{L}(x,y) \quad (5)$$

式中 \hat{V} 是增强后的 V 通道数据.再将原始 H、S 通道以及增强后的 V 通道数据输入到 HSV 转 RGB 模块中,输出增强后的水下图像.

1.2 基于韦伯对比度保持的图像增强模型

虽然从理论上来说 Retinex 模型能够完全分离出水下图像的细节信息,但是在实际过程中,光照层图像仍然残存一部分细节信息^[11].作为对 Retinex 模型的补充,韦伯对比度同样反映了图像的细节特征^[12].因此,图像增强算法在增强整体对比度的同时,还需要保证增强后的光照层水下图像韦伯对比度与原始光照层水下图像保持一致.

韦伯对比度的表达式为

$$C(x,y)=\frac{L(x,y)-\bar{L}(x,y)}{\bar{L}(x,y)} \quad (6)$$

式中, $\bar{L}(x,y)$ 表示光照层水下图像以 (x,y) 为中心像素的局部灰度均值, $C(x,y)$ 表示像素 (x,y) 的韦伯对比度.令对 \bar{L} 进行全局对比度增强的函数为 f ,根据式(6)可知为了满足全局对比度与增强前后的韦伯对比度保持一致,有

$$\frac{L(x,y)-\bar{L}(x,y)}{\bar{L}(x,y)}=\frac{\hat{L}(x,y)-f[\bar{L}(x,y)]}{f[\bar{L}(x,y)]} \quad (7)$$

且式(7)恒成立.整理式(7)得到 \hat{L} 的表达式为

$$\hat{L}(x,y)=\frac{L(x,y)}{\bar{L}(x,y)}\times f[\bar{L}(x,y)] \quad (8)$$

式(8)表明只要提供增强函数 f ,就能够得到保持韦伯对比度的增强水下光照层图像 \hat{L} .

1.3 两段式直方图均衡化方法

根据式(8)可知,为了提升水下图像的明暗对比,需要给出一个有效的全局对比度增强函数 f .通常情况下,普通光源水下图像由亮度具有明显差异的两部分灰阶构成.根据这一特点可以采用大津法(OTSU)^[13]将光照层均值图像的直方图分割为欠曝光和过曝光两部分灰阶,再对这两部分灰阶分别进行直方图均衡化.

令 T_a 表示由 OTSU 方法计算出的灰度阈值,此时直方图被分割为两个子图的直方图 W_U 和 W_V . W_U 的灰度级范围为 $[0, T_a]$, W_V 的灰度级范围为 $[T_a, 255]$.定义 $P_U(\bar{L})$ 和 $P_V(\bar{L})$ 分别表示灰度 \bar{L} 在欠曝光和过曝光子直方图出现的概率, $P_U(\bar{L})$ 和 $P_V(\bar{L})$ 的计算方法分别为

$$P_U(\bar{L})=h(\bar{L})/N_U \quad \bar{L} \in [0, T_a] \quad (9)$$

$$P_V(\bar{L})=h(\bar{L})/N_V \quad \bar{L} \in [T_a, 255] \quad (10)$$

式中, $h(\bar{L})$ 表示灰度级 \bar{L} 出现的次数, N_U 和 N_V 分别代表欠曝光和过曝光像素数量.定义 $C_U(\bar{L})$ 和 $C_V(\bar{L})$ 分别表示欠曝光和过曝光子图的累计概率密度函数,即

$$C_U(\bar{L}) = \sum_{\bar{L}=0}^{T_a-1} P_U(\bar{L}) \quad (11)$$

$$C_V(\bar{L}) = \sum_{\bar{L}=T_a}^{255} P_V(\bar{L}) \quad (12)$$

用迭代式直方图均衡化算法对欠曝光、过曝光直方图进行直方图均衡化,欠曝光和过曝光直方图均衡化光照层均值图像计算方法为

$$f(\bar{L}) = \begin{cases} T_a \times C_U(\bar{L}) & \bar{L} \in [0, T_a) \\ T_a + C_V(\bar{L}) \times (255 - T_a) & \bar{L} \in [T_a, 255] \end{cases} \quad (13)$$

1.4 迭代式直方图均衡化方法

式(13)所示的分段变换函数易造成在分割点 T_a 附近的一阶导数不连续,导致在分段范围即 $[0, T_a)$ 和 $[T_a, 255]$ 的灰度变换尺度不一致.为了解决这一问题,用基于迭代直方图均衡化的常规光源下水下图像增强算法对两段式直方图均衡化进行多次迭代,从而实现变换函数的可导性.

图 1 为水下图像 Rectangle.图 2 是对图像 Rectangle 进行两段式直方图均衡化(即 1 次迭代)对应的灰度映射函数曲线.

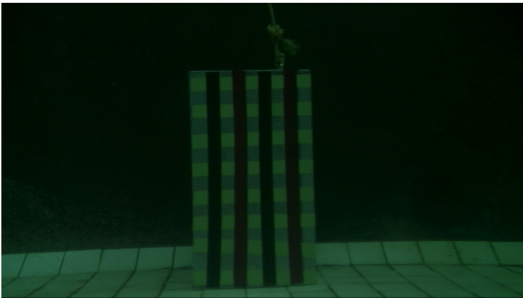


图 1 水下图像 Rectangle
Fig.1 The Rectangle underwater image

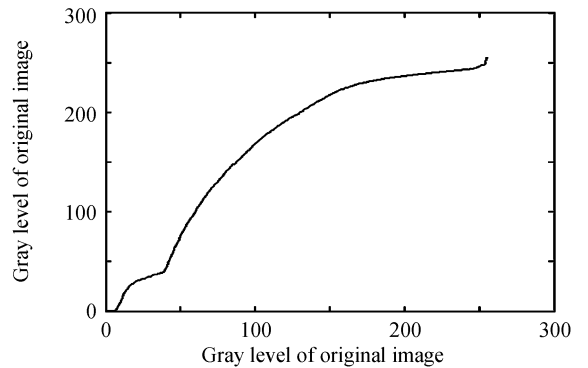


图 2 两段式直方图均衡化的灰阶映射曲线
Fig.2 Gray scale mapping curve of two independent histogram equalizations

从图 2 可知灰阶映射曲线在分段点(分割点 $T_a^{(1)} = 39$)附近产生了一个非可导点,该点导致增强图像灰度不连续、视觉差异性大等缺点.为了平滑整个灰阶映射曲线,采用多次迭代的方式,不断重复利用 OTSU 方法计算分割阈值以及两段式直方图均衡化过程直到算法收敛,得到理想的映射曲线.迭代过程如图 3 所示.

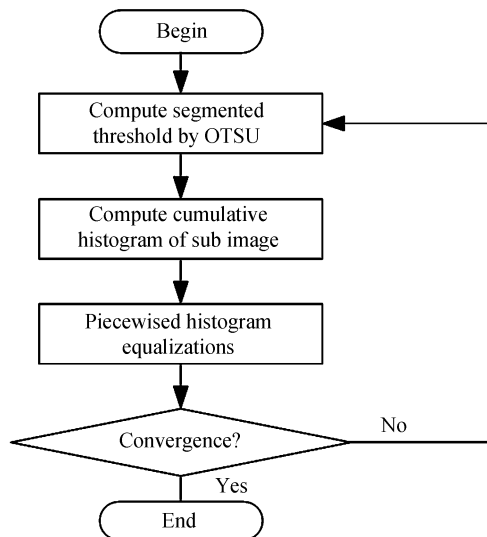


图 3 迭代式直方图均衡化算法流程
Fig.3 The flow chart for iterative histogram equalization

图 3 采用相邻迭代过程灰阶阈值差的绝对值作为判断收敛的条件,即

$$\Delta = |T_a^{(n)} - T_a^{(n-1)}| \quad (14)$$

式中, n 表示迭代次数, Δ 表示收敛条件. 当 $\Delta < \epsilon$ 时, 算法达到收敛. 迭代过程设置的极小值 $\epsilon = 0.01$. 迭代不同阶段计算出的映射关系如图 4 所示.

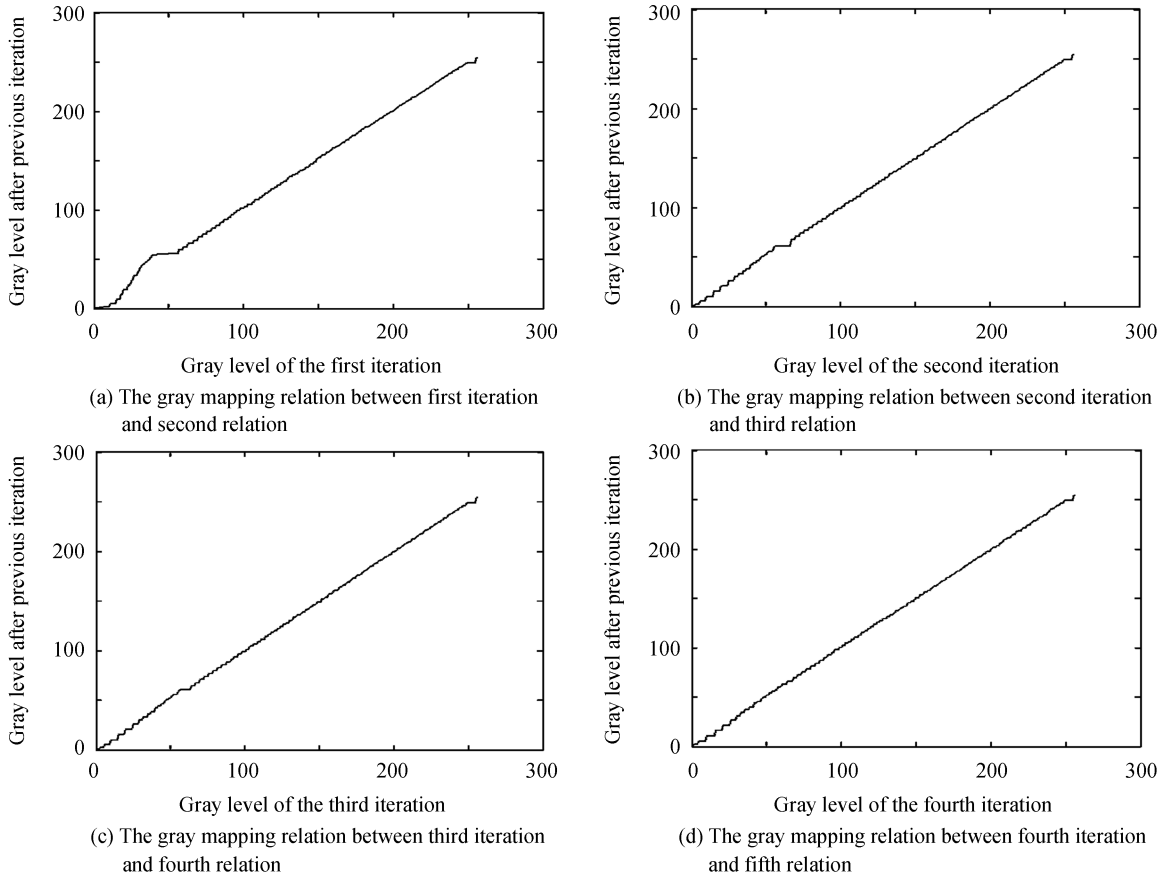


图 4 不同阶段的灰阶映射关系

Fig.4 The gray mapping relation for different phase

由图 4(a)可知灰阶映射曲线在分割点 $T_a^{(2)} = 57$ 附近,有一段数值几乎保持不变的水平区域,该区域即可用来平滑如图 1 所示的分割点附近非可导函数的曲线形状.图 4(b)中也存在类似形状的水平区域,此时水平区域位于 3 次迭代的分割点 $T_a^{(3)} = 61$ 附近.经过第 4 次迭代,水平区域的长度缩短.经过第 5 次迭代,人眼几乎分辨不出水平区域,收敛过程趋于稳定.

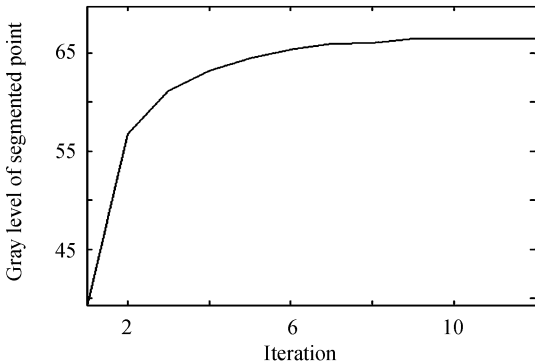


图 5 图像 Rectangle 在迭代过程中的灰度分割点
Fig.5 The breakpoint for implementing the process of iteration on Rectangle image

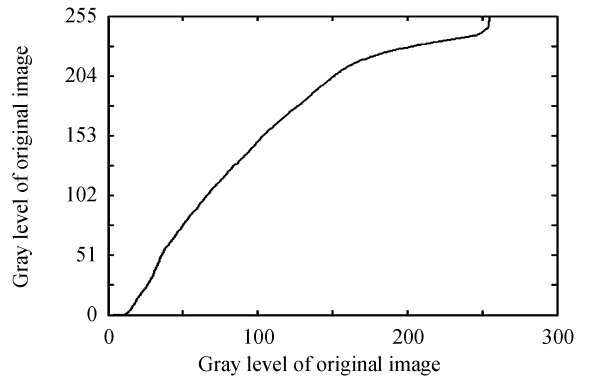


图 6 经过 9 次迭代后的总体灰阶映射曲线
Fig.6 The total gray mapping curve for ninth iteration

图 5 是经过 12 次迭代过程,每次迭代对应的分割点的灰度值.从图 5 可知经过 9 次迭代之后,分割点的灰度值基本维持在 $T_a^{(9)} = 66$ 附近,此时算法达到收敛,拟合出的灰阶映射曲线如图 6 所示.图 7(a)、(b) 分别对应于原始图像 Rectangle 的直方图以及增强图像的直方图,对比可知原始图像灰度多分布于低亮度区域,增强图像的灰度分布得到一定程度的拉伸且灰度主要分布于适于人眼观察的中等灰度区域.

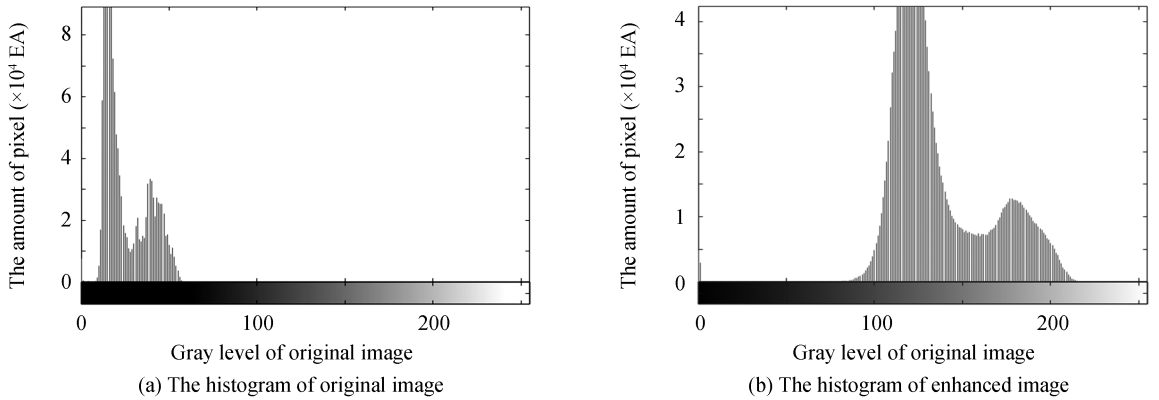


图 7 图像 Rectangle 的直方图
Fig.7 The histogram of Rectangle image

1.5 细节层图像增强方法

观察式(2)可知,对于某一个像素点来说,如果原始图像 V 与光照层图像 L 差异较大,即该点的亮度与周围环境光的亮度差异较大,则该像素点的细节度较大,反之亦然.因此,当细节层 R 的强度接近 0 时对应于具有较小细节的像素点,当 R 的强度远离 0 时对应于具有较大细节的像素点.

为了增强图像的细节信息,需要拉伸较小的细节强度从而提高灰度平滑区域的可见度,保持具有较丰富细节区域的细节强度从而保持图像增强前后图像细节的视觉相似度.综上所述,采用 S 函数对细节层图像进行拉伸,从而增强图像的细节信息,其表达式为

$$R(x, y) = \frac{1}{1 + \exp[-R(x, y)]} \quad (15)$$

由于 S 函数的值域是 $[0, 1]$, 所以还需对经过式(15)拉伸后的细节层图像 R 进行平移、拉伸才能保证 R 的值域一致.对于图像 Rectangle 来说, S 函数如图 8 所示.

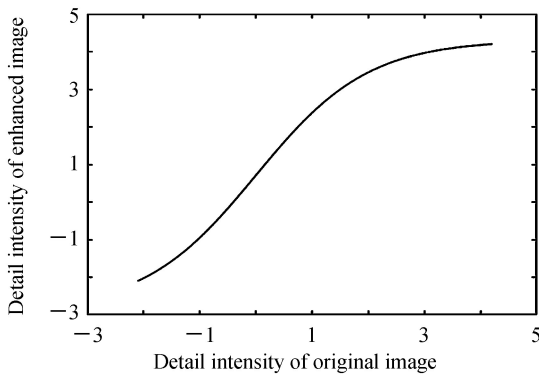


图 8 图像 Rectangle 标准 S 形映射曲线
Fig.8 The standard S-shade curve for Rectangle image

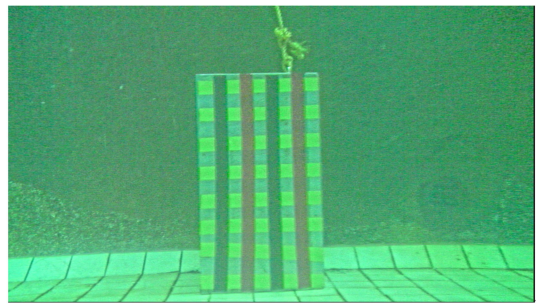


图 9 水下图像 Rectangle 的图像增强结果
Fig.9 The image enhanced result of Rectangle underwater image

由图 8 可知:原始细节层强度在 0 点附近的拉伸幅度最大(曲线坡度较陡),因此该曲线对于小细节的增强幅度较大;随着细节强度逐渐远离原点,细节强度拉伸幅度越来越小(曲线坡度越来越平缓),图像的细节增强幅度越来越小,直到达到最小值(-2.1)和最大值(4.2)为止.图 9 是图像 Rectangle 的增强图像结果.

1.6 算法结构

迭代式直方图均衡化算法是一种非线性方法,可以直接利用该方法对单通道灰度水下图像进行增强.对于彩色水下图像来说,如果通过非线性方法分别对 RGB 三通道进行灰阶变换,则增强图像的饱和度和色彩

度会产生失真现象.针对这一问题,基于迭代直方图均衡化的常规光源水下图像增强算法通过将 RGB 转换为 HSV 分离出与颜色无关的 V 通道,并单独对 V 通道进行增强.算法结构示意图如图 10 所示.

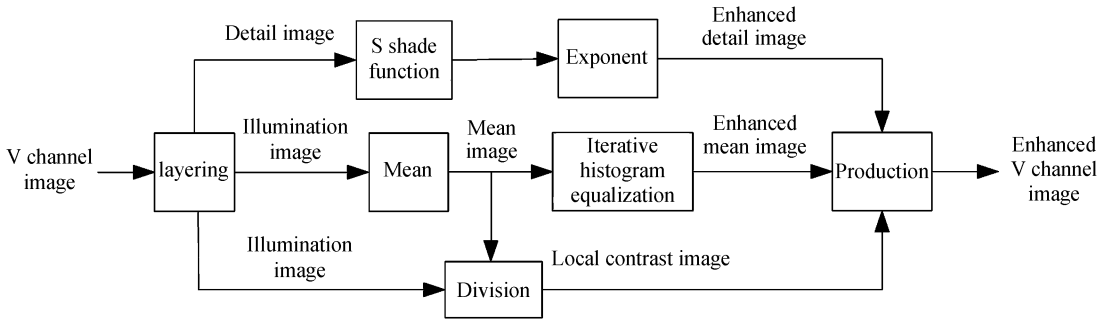


图 10 算法结构示意图

Fig.10 The schematic diagram of our algorithm

图 10 中,该算法首先对 V 通道的数据进行基于 Retinex 模型的图像分层运算,提取出光照层图像和细节层图像;对光照图像进行均值运算,再进行迭代直方图均衡方法,得到增强后的光照层图像;对细节层图像进行式(15)所示的 S 函数变换和式(5)所示的指数运算;将光照层均值图像与原始光照层图像做除法运算,得到光照层局部对比度图像;最后根据式(5)、(8)对被分离的细节层图像、增强后的光照层均值图像、以及光照层局部对比度图像进行逐项相乘,进而得到 V 通道增强图像.为了还原图像的色彩信息,还需将增强后的 V 通道数据与被分离的 H 通道和 S 通道数据进行 HSV 转 RGB 变换,继而得到最终的彩色增强图像.

基于迭代直方图均衡化的常规光源水下图像增强算法关键步骤及中间结果如图 11 所示.

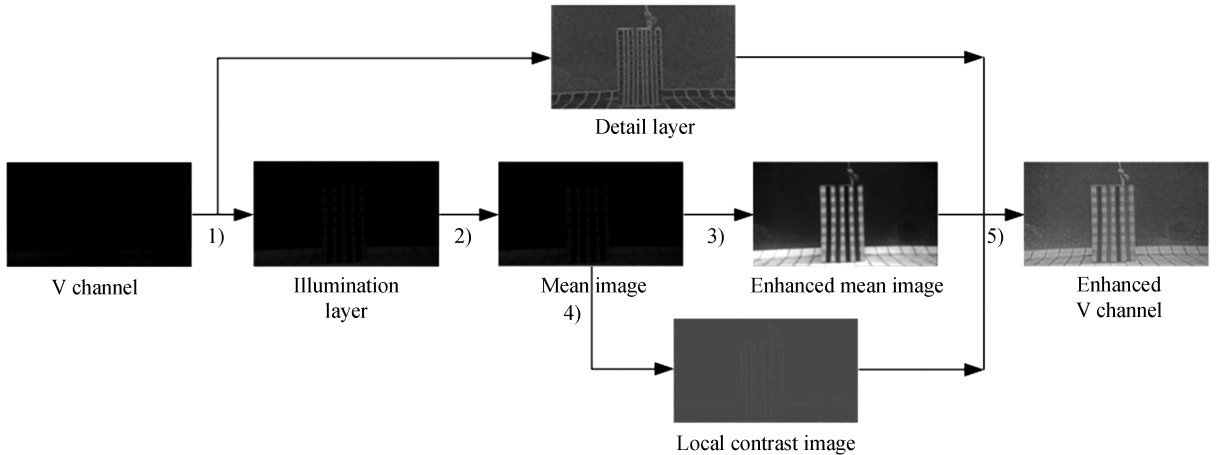


图 11 将本文算法应用于图像 Rectangle 所涉及的关键步骤及中间结果

Fig.11 The key step and intermediate result for implementing the proposed algorithm on Rectangle image

其中步骤 1) 对应式(2)所示的 Retinex 分层运算;步骤 2) 对光照层图像进行均值运算;步骤 3) 对应式(9)~(13)所示的两段式直方图均衡化算法;步骤 4) 对应式(6)所示的局部对比度图像计算方法;步骤 5) 对应式(5)、(8)所示的增强图像计算方法.

2 实验结果与分析

利用 Matlab R2016a 作为软件仿真平台,分别对两组具有代表性(第一组测试图像代表不同深度,第二组测试图像代表不同水质)的水下图像进行主观评价和客观验证.实验对比的图像增强算法包括:经典直方图均衡化方法^[14]、Bhatia 方法^[5]、Xu 方法^[6]、Singh 方法^[15]以及本文算法.

2.1 主观视觉对比

第一组选用的水下图像来自著名数字图像库 NCEI 中编号为 0162830 的水下图像库.为了验证各算法对于不同深度水下图像的图像增强效果,选用分别拍摄于水深 15 m、30 m、45 m、60 m 的图像,增强结果如图 12 所示.由原始图像可知,随着水深的增加原始图像的亮度和对比度不断下降,直到水深达到 60 m 图像

明亮程度最小,大多数的色阶分布于极小的区间之内,图像可视度较差.

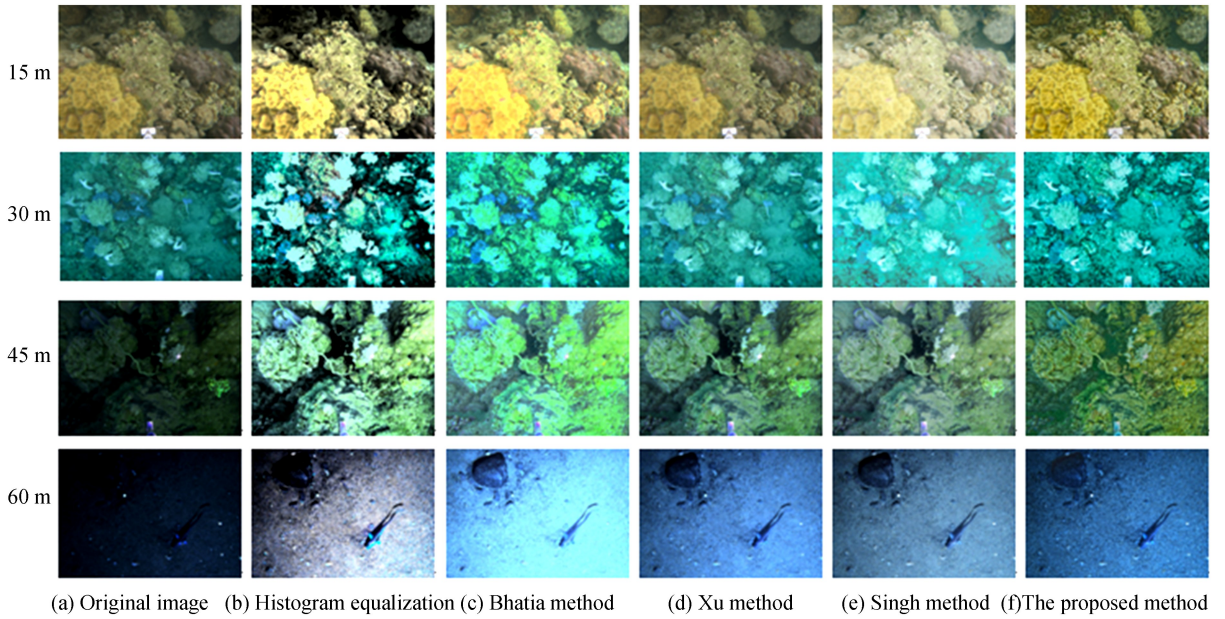


图 12 第一组水下图像的图像增强结果

Fig.12 The image enhanced results for the first group of underwater image

为了验证算法对于不同水质的水下图像的图像增强效果,第二组测试图像分别拍摄于人造水池、近岸、浅海三种类型的水下场景,增强结果如图 13 所示.由原始图像可知,人造水池图像水质较差,水体物质对于光线的吸收和散射作用导致图像的模糊度较高;由于受到海滩泥沙的影响,近岸水下图像以及浅海水下图像的模糊以及画面整体的雾化效果同样较为严重.

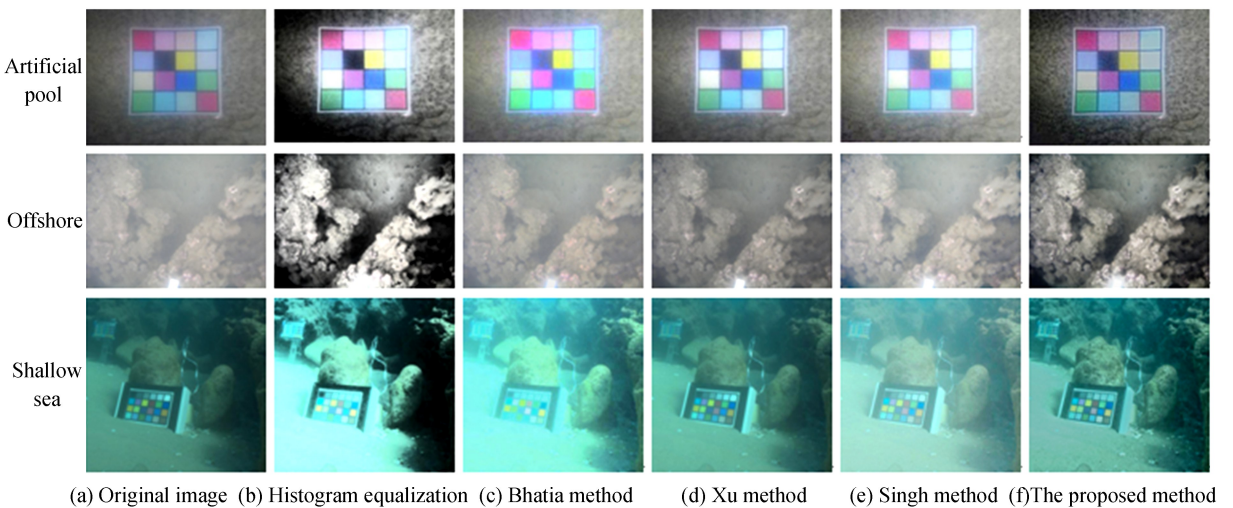


图 13 第二组水下图像的图像增强结果

Fig.13 The image enhanced results for the second group of underwater image

根据图 12、13 可知,经过不同算法处理后增强图像的对比度、清晰度都得到了不同程度的提高.直方图均衡化算法得到的增强图像出现对比度被过度增强的现象并丢失了许多图像细节,许多区域的灰阶凸起现象明显,灰阶的连续性较差.Bhatia 方法提高了图像的整体亮度,但增强图片的亮度过高,对于人眼的刺激性较强.Xu 方法对应的增强图像的清晰度较高,但是整体图像的对比度增强不显著,局部的细节不突出.Singh 方法得到的增强图像的对比度非常高,导致图像存在高光区域和亮度较低的阴影区域,这两部分影响了人眼主观视觉体验.相比之下,经本文算法增强后的图像对比度增强程度适中,增强图像的明暗对比易于人眼观察,图像的细节、纹理清晰,模糊程度较低,图像的主观视觉质量好于其他几种方法.

2.2 客观评价指标分析

利用信息熵和图像均值结构相似度(Mean Structural Similarity Index, MSSIM)对增强图像进行客观评价.由于增强图像与原始图像的亮度具有一定的差异性,因此参照文献[16]实验部分的做法调整亮度相似度的权重为 0.3,对比度相似度和结构相似度的权重保持不变(默认为 1).两组测试图像的信息熵和 MSSIM 值如分别表 1、2 所示.

表 1 信息熵
Table 1 Entropy of information

Algorithms	The first test underwater image				The second test underwater image		
	15 m	30 m	45 m	60 m	Artificial pool	Closed to seaside	Shallow sea
Original image	6.686	6.686	6.484	5.971	6.412	6.241	6.359
Histogram equalization	7.102	7.102	6.954	6.594	6.783	6.625	6.788
Bhatia	7.178	7.178	7.041	6.708	6.851	6.694	6.867
Xu	7.373	7.373	7.261	7.001	7.024	6.874	7.068
Singh	7.569	7.569	7.483	7.293	7.199	7.055	7.269
The proposed algorithm	7.811	7.811	7.756	7.655	7.415	7.278	7.519

表 2 均值结构相似度
Table 2 Mean structural similarity index

Algorithms	The first test underwater image				The second test underwater image		
	15 m	30 m	45 m	60 m	Artificial pool	Closed to seaside	Shallow sea
Histogram equalization	0.757	0.731	0.719	0.700	0.726	0.713	0.731
Bhatia	0.812	0.784	0.772	0.751	0.778	0.765	0.784
Xu	0.848	0.819	0.806	0.784	0.813	0.798	0.818
Singh	0.885	0.854	0.841	0.818	0.848	0.833	0.853
The proposed algorithm	0.957	0.924	0.909	0.885	0.917	0.901	0.923

从表 1 和表 2 可知本文算法生成的增强图像的信息熵和 MSSIM 高于其他算法,说明本文算法能够在最大限度地保持与原始图像相似度的前提下,提高图像信息量,增强图像可视化效果.

2.3 算法效率对比

随着迭代次数的增加迭代过程越接近收敛状态,增强图像越接近算法预期所能达到的效果,但是算法的运算时间也会逐渐增加,效率越来越低.为了保证增强图像的图像质量,提高算法的效率,采用式(14)所示阈值差的绝对值用于确定迭代过程是否收敛.图 14、15 分别是对水深为 15 m 的水下图像进行迭代对应的算法运行时间、阈值差的绝对值.

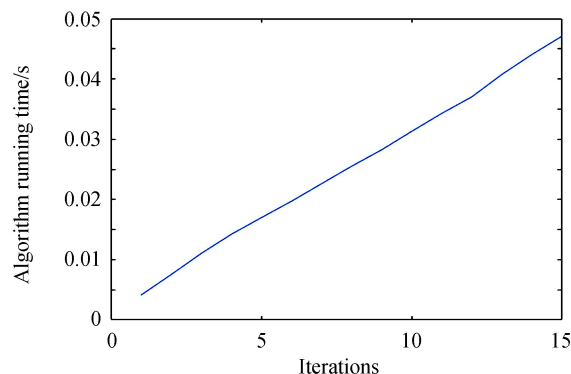


图 14 水深 15 m 图像迭代过程算法运行时间
Fig.14 Algorithm runtime for implementing iteration in 15 m depth of water

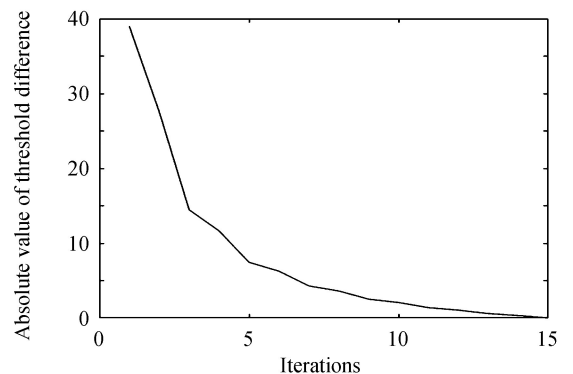


图 15 水深 15 m 图像迭代过程阈值差的绝对值
Fig.15 Absolute value of threshold difference of iteration in 15 m depth of water

根据图 14、15 可知,随着迭代次数的增加,算法运行时间不断增加,即算法的效率越来越低;阈值差的绝对值越来越低,即增强图像的相似度越来越高.直到迭代次数达到 15,此时阈值差的绝对值小于 0.01,说明图像的灰度变化非常小.虽然可以继续执行迭代,但是图像的差别非常小,人眼已无法分辨这一微小亮度的差异.因此,迭代过程选用 $\epsilon=0.01$ 这一极小的值作为收敛条件既可以保证算法的效率,又可以保证增强图像的图像质量.表 3 是对两组测试图像进行图像增强过程的算法运行时间对比结果.

由于直方图均衡化算法原理简单、复杂度较低,因此效率最高,但是其主、客观效果远低于另外四种算法,因此该方法的实用性不高.对于另外四种算法来说,本文算法的运行时间最短,因此效率高于其他三种算法.

表 3 算法运行时间对比(单位:s)
Table 3 Comparison of algorithmic running time (unit: s)

Algorithms	The first test underwater image				The second test underwater image		
	15 m	30 m	45 m	60 m	Artificial pool	Closed to seaside	Shallow sea
Histogram equalization	0.022	0.025	0.019	0.012	0.009	0.021	0.017
Bhatia	0.166	0.188	0.143	0.091	0.067	0.158	0.128
Xu	0.212	0.241	0.183	0.116	0.086	0.202	0.164
Singh	0.246	0.279	0.212	0.134	0.101	0.235	0.190
The proposed algorithm	0.136	0.154	0.117	0.074	0.055	0.130	0.105

3 结论

本文提出一种基于迭代直方图均衡化的常规光源下水下图像增强算法.该算法通过保持韦伯对比度的图像增强模型并结合 Retinex 模型来保证增强图像的细节特征.通过两段式直方图均衡化方法,对光照层均值水下图像的欠曝光和过曝光区域分别进行图像直方图均衡化.对这一过程进行多次迭代直到灰度分段阈值小于预设的极小值,从而得到一个理想的灰阶映射曲线,继而得到图像增强结果.选取了两组不同深度与不同水质的水下图像进行实验对比,主观视觉以及客观评价系数验证了本文算法的图像增强性能和算法运行效率均高于传统的水下图像增强算法.

参考文献

- [1] KAUR M, SINGH N. Image enhancement of low exposure underwater images using contrast correction[J]. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 2016, 7(6): 13-17.
- [2] LU H, LI Y, ZHANG Y, et al. Underwater optical image processing: a comprehensive review[J]. *Mobile Networks & Applications*, 2017, 22(5): 1204-1211.
- [3] AKILA C, VARATHARAJAN R. Color fidelity and visibility enhancement of underwater image de-hazing by enhanced fuzzy intensification operator[J]. *Multimedia Tools & Applications*, 2017, 77(4): 1-14.
- [4] SHAMSUDDIN N B, AHMAD W F B W, BAHARUDIN BB, et al. Image enhancement of underwater habitat using color correction based on histogram[J]. *Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag Berlin*, 2011: 289-299.
- [5] BHATIA S, GOVINDAN V K. Combined linear and nonlinear image enhancement [J]. *International Journal of Computer Science & Information Technologies*, 2014, 5(3): 3370-3372.
- [6] XU H, ZHAI G, WU X, et al. Generalized equalization model for image enhancement [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2013, 16(1): 68-82.
- [7] YANG Wei-zhong, XU Yin-li, QIAO Xi, et al. Method for image intensification of underwater sea cucumber based on contrast limited adaptive histogram equalization[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(6): 197-203.
- 杨卫中, 徐银丽, 乔曦, 等. 基于对比度受限直方图均衡化的水下海参图像增强方法[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(6): 197-203.
- [8] HU Yu-juan, CAO Feng-yun. Underwater color image enhancement method based on image fusion[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2013, 36(8): 948-953.
- 胡玉娟, 曹风云. 基于图像融合的水下彩色图像的增强方法[J]. *合肥工业大学学报: 自然科学版*, 2013, 36(8): 948-953.
- [9] HU X, GAO X, WANG H. A novel Retinex algorithm and its application to fog-degraded image enhancement[J]. *Sensors & Transducers*, 2014, 175(7): 138-143.

- [10] ZHANG S, WANG T, DONG J, *et al.* Underwater image enhancement via extended multi-scale Retinex [J]. *Neurocomputing*, 2017, 245.
- [11] PETRO A B, SBERT C, MOREL J M. Multiscale retinex [J]. *Image Processing on Line*, 2014; 71-88.
- [12] ZHOU Z, SANG N, HU X. Global brightness and local contrast adaptive enhancement for low illumination color image [J]. *Optik- International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, **125**(6): 1795-1799.
- [13] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics*, 2007, **9**(1): 62-66.
- [14] BEDI SS, KHANDELWAL R. Various image enhancement techniques - a critical review [J]. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 2013, **2**(3): 267-274.
- [15] SINGH K, KAPOOR R. Image enhancement via median-mean based sub-image-clipped histogram equalization [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, **125**(17): 4646-4651.
- [16] XI Zhi-hong, ZHAO Lan-fei, ZHANG Chi, *et al.* Tone mapping based on variational model in gradient domain [J]. *Journal on Communications*, 2015, **36**(1): 1-8.
- 席志红, 赵蓝飞, 张驰, 等. 基于变分模型的梯度域色阶映射算法 [J]. 通信学报, 2015, 36(1): 1-8.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61601149), Heilongjiang Natural Science Foundation (No. QC2017074)

引用格式: WANG Yong-xin, DIAO Ming, HAN Chuang. Underwater Image Enhancement Algorithm Based on Iterative Histogram Equalization with Conventional Light Source [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(11): 1101002

王永鑫, 刁鸣, 韩闯. 基于迭代直方图均衡化的常规光源水下成像增强算法 [J]. 光子学报, 2018, **47**(11): 1101002