

基于加权引导滤波的水下图像增强算法^①

敖 珺, 孙宗凯, 马春波

(桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要:针对水下图像存在对比度低、噪声较多的问题,提出一种基于加权引导滤波的水下图像增强算法。该算法通过 CLAHE 方法增强图像对比度,并用 Canny 算子代替方差边缘检测法,实现对加权引导滤波器边缘权重的准确估计。通过加权引导滤波器对增强图像降噪,并对降噪图像的亮度和饱和度进行分块对比度增强。实验结果表明,该算法能够有效抑制图像噪声,提高增强图像的结构相似度,且增强后图像的对比度高,可视性好。

关键词:水下图像;图像增强;加权引导滤波;降噪

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 1673-808X(2016)02-0113-05

DOI:10.16725/j.cnki.cn45-1351/tn.2016.02.006

Underwater image enhancement algorithm based on weighted guided filter

AO Jun, SUN Zongkai, MA Chunbo

(School of Information and Communication Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to solve the problem of low contrast, large noise of underwater images, an underwater image enhancement algorithm based on weighted guided filter is proposed. The algorithm improves image contrast by CLAHE. Then the edge-aware weighting of weighted guided filter is accurately calculated by Canny algorithm instead of variance. The enhancement image is denoised with weighted guided filter and the saturation and value components of the denoised image are locally enhanced. The experimental results show that the image noises are suppressed effectively, the structural similarity of enhanced images is improved. Besides, the enhanced images have high contrast and good visibility.

Key words: underwater image; image enhancement; weighted guided filter; noise reduction

在水下环境中,由于水分子以及溶解的杂质对光线的吸收和散射作用,导致水下图像出现对比度低、噪声较大等严重的退化问题。这不仅降低了图像的整体视觉效果,而且给后续图像的自动处理和识别产生不利影响。因此,研究有效的水下图像增强算法具有重要意义。

近年来,水下图像增强方法主要分为模型法和非模型法。模型法利用光照物理模型估计图像的降质模式,根据估计的结果复原降质图像。非模型法不考虑水下光学成像机理和光照机理,直接根据降质图像的特征进行处理^[1]。杨爱萍等^[2]基于颜色失真去除和暗通道的水下图像复原,采用适用于水下图像的颜色失真去除方法还原图像颜色,并利用散射系数与波长的关系修正各通道的透射率,实现图像复原。Hi-

tam 等^[3]采用 CLAHE 算法分别在水下图像的 RGB 空间和 HSV 空间进行图像增强,并对增强结果进行融合,该算法计算效率高,但增强后噪声较大。张凯等^[4]将水体散射效应等效为环境光照的变化,通过水下彩色图像亮度通道下的多尺度 Retinex 算法处理,可减小水体散射效应,提高图像对比度,但该算法在图像的背景区域容易出现噪声。胡玉娟等^[5]通过均衡化和白平衡方法对图像进行处理,根据处理结果的显著图、照度图和色度图估计融合系数,并对图像进行融合,该算法可以取得较好的增强效果,但融合系数计算复杂,不适合实时处理。

针对以上问题,提出一种基于加权引导滤波的水下图像增强算法,在增强图像的对比度后,采用基于 Canny 算子修正的加权引导滤波器抑制图像噪声。

① 收稿日期: 2016-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(61167006);广西认知无线电与信息处理重点实验室主任基金(CRKL150106)

通信作者: 敖珺(1978—),女,广西桂林人,教授,博士,研究方向为通信信号处理、光通信。E-mail:guidian2016@126.com

引文格式: 敖珺,孙宗凯,马春波.基于加权引导滤波的水下图像增强算法[J].桂林电子科技大学学报,2016,36(2):113-117.

1 引导滤波器理论

引导滤波器是一种局部线性图像滤波器,具有平滑和边缘保持的特性,它能够像双边滤波器一样保持边缘平滑,并在边缘附近能够保持更多的细节^[6]。假定引导图像为 I ,输入图像为 p ,输出图像为 q ,其滤波线性转换模型为

$$q_i = a_k I_i + b_k, \forall i \in \omega_k. \quad (1)$$

其中: ω_k 是以像素点 k 为中心、 r 为半径的邻域; a_k 、 b_k 为窗口 ω_k 内的常量。对式(1)两边求梯度,得

$$\nabla q = a \nabla I. \quad (2)$$

由式(2)可知,当输入图像 I 有梯度时,输出 q 也有类似的梯度,因此,引导滤波具有边缘保持特性。求解滤波结果相当于最小化窗口 ω_k 内的损耗函数。损耗函数定义为

$$E(a_k + b_k) = \sum_{i \in \omega_k} ((a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \epsilon a_k^2). \quad (3)$$

其中: p_i 为待滤波图像; ϵ 为规整化因子,用来防止系数 a_k 过大,也是调节滤波器滤波效果的重要参数。

对式(3)进行最小二乘法,可得

$$a_k = \frac{\frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} I_i p_i - \mu_k \bar{p}_k}{\sigma_k^2 + \epsilon}, \quad (4)$$

$$b_k = \bar{p}_k - a_k \mu_k. \quad (5)$$

其中: μ_k 和 σ_k^2 为局部窗口 ω_k 内引导图像 I 的灰度均值和方差; $|\omega|$ 为窗口内像素总数; \bar{p}_k 为输入图像 p 在窗口 ω_k 内的灰度均值。

图1为珊瑚鱼滤波。采用双边滤波和引导滤波进行对比,双边滤波器的空域和值域滤波系数分别为5、0.1,引导滤波器的规整化因子为0.01,半径为4。从图1可看出,引导滤波的图像细节清晰,背景光滑。采用Canny算子对滤波结果进行边缘检测,图2为珊瑚鱼滤波边缘。从图2可看出,引导滤波包含了更多的边缘细节。



图1 珊瑚鱼滤波

Fig. 1 Filtering of coral fish



图2 珊瑚鱼滤波边缘

Fig. 2 Filtering edge of coral fish

He等^[6]提出的引导滤波器中,所有的窗口均采用固定的规整化因子,并未考虑不同窗口内像素之间的纹理差异。因此,在图像边缘会因较大的规整化因子出现模糊,降低滤波效果。鉴于原始引导滤波器存在的问题,Li等^[7]提出加权引导滤波器,即结合局部窗口 ω_k 内的方差信息,自适应地调整规整化因子。根据局部窗口 ω_k 的方差定义,边缘权重为

$$W_G(p') = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N \frac{\sigma_G^2(p') + \gamma_\sigma}{\sigma_G^2(p) + \gamma_\sigma}. \quad (6)$$

其中: G 为引导图像; $\sigma_G^2(\cdot)$ 为像素点周围 3×3 邻域内的方差; γ_σ 为常量0.065 53; N 为引导图像的像素总数。式(3)的损耗函数变换为

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} ((a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \frac{\epsilon}{W_G(i)} a_k^2). \quad (7)$$

在引导图像的边缘,根据式(6)可知,邻域内方差大的像素点 p' 对应的边缘权重 $W_G(p')$ 越大,而像素点 p' 对应的规整化因子越小。因此,可以更好地保持图像边缘。

2 算法描述

由于水下图像对比度具有非统一性,采用全局直方图均衡化并不能获得满意的增强效果^[8]。本算法采用CLAHE方法增强图像局部对比度,并用加权引导滤波抑制图像噪声。

2.1 基于Canny算子的加权引导滤波器

Li等^[7]提出的边缘权重是基于窗口内的方差,但方差大的区域并不与边缘区域相互对应。通过边缘算子检测的图像边缘值来代替局部方差,可以实现对规整化因子的准确估计。

边缘是图像最基本的特征^[9],常用的边缘检测算子有Sobel算子、LOG算子和Canny算子等。Sobel算子计算复杂度低,但容易检测出伪边缘。LOG算子由于尺度因子无法自适应调整等原因,使得噪声对图像仍有较大影响。Canny算子是一阶传统微分中检测阶跃型边缘效果最好的算子之一^[10],具有较好的边缘检测性能。采用Canny算子检测图像边缘,且定义边缘权重为

$$\varphi(p) = \frac{1}{N} \sum_{p'=1}^N \frac{C(p) + \gamma}{C(p') + \gamma} \quad (8)$$

其中: $C(p)$ 为 p 点对应的 Canny 边缘值; N 为像素的总数; γ 与式(6)的 γ_σ 相同, 取值为 0.065 536。 $\varphi(p)$ 计算结果范围较大, 对求取后的 $\varphi(p)$ 范围进行限定,

$$\varphi(p) = 512 \times \frac{\varphi(p)}{\max(\varphi(p))} + 1, \quad (9)$$

其中 $\max(\cdot)$ 为最大值函数。式(9)将 $\varphi(p)$ 的值限定为 1~513, 避免了 $\varphi(p)$ 过大或过小对滤波结果造成影响。根据式(9)的边缘权重, 其对应损耗函数为

$$E(a_k + b_k) = \sum_{i \in w_k} ((a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \frac{\epsilon}{\varphi(i)} a_k^2). \quad (10)$$

为了更好地保持图像的边缘细节, 对修正前的规整化因子取值 0.01。

图 3 为珊瑚鱼边缘权重。从图 3 可看出, 本算法边缘权重表示的图像边缘清晰, 亮度均匀, 而方差对应的边缘权重亮度分布不均匀。

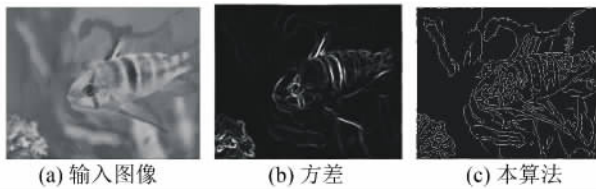


图 3 珊瑚鱼边缘权重

Fig. 3 Edge-aware weighting of coral fish

图 4 为珊瑚鱼局部滤波, 输入图像是图 3(a)的一部分。从图 4 可看出, 本算法滤波结果可以保持更多细节。采用 Canny 算子对滤波结果进行边缘检测, 图 5 为珊瑚鱼滤波边缘。从图 5 可看出, 本算法边缘检测包含更多的边缘细节。

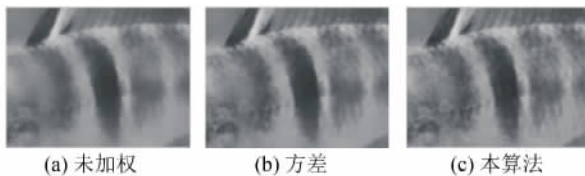


图 4 珊瑚鱼局部滤波

Fig. 4 Local filtering of coral fish

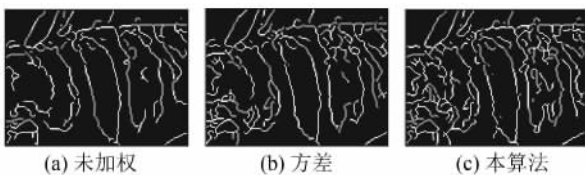


图 5 珊瑚鱼局部滤波边缘

Fig. 5 Local filtering edge of coral fish

2.2 亮度和饱和度增强

加权引导滤波降噪后, 图像的亮度和饱和度会降低。为了得到更好的增强效果, 在降噪图像的 HSV 空间对亮度和饱和度进行增强。此外, 图像降噪后, 图像整体对比度较高, 采用全局对比度增强并不能取得较好的增强效果。因此, 将亮度和饱和度分成 16 等块, 对每一子块进行对比度增强。其中, 亮度子块 i 增强为:

$$H_i = \min(1, h_i + \frac{h_i - l_i}{2}), \quad (11)$$

$$L_i = \max(0, l_i - \frac{h_i - l_i}{2}), \quad (12)$$

$$P'_i = (P_i - l_i) \frac{H_i - L_i}{h_i - l_i} + L_i. \quad (13)$$

其中: h_i 、 l_i 、 P_i 分别为子块区域 i 内亮度的最大值、最小值和当前值; $\max(\cdot)$ 和 $\min(\cdot)$ 分别为最大值和最小值函数; P'_i 为拉伸后的子块亮度值。饱和度拉伸和亮度拉伸相同。采用双线性插值消除图像块状效应。

图 6 为珊瑚鱼加权引导滤波。从图 6 可看出, 图像的滤波边缘较为丰富, 但图像亮度偏低。图 7 为珊瑚鱼局部增强, 其增强后在珊瑚鱼背上具有更多的纹理细节, 而背景区域更加平滑, 同时亮度较高。

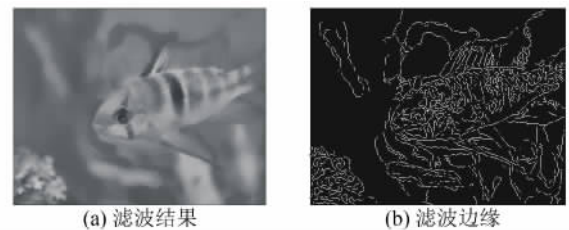


图 6 珊瑚鱼加权引导滤波

Fig. 6 Weighted guided filtering of coral fish

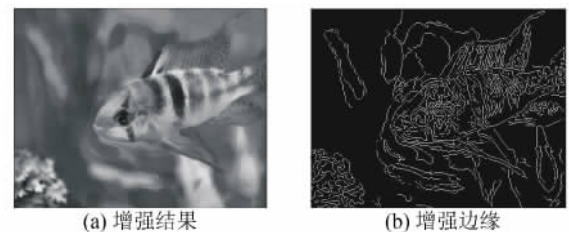


图 7 珊瑚鱼局部增强

Fig. 7 Local enhancement of coral fish

2.3 实现步骤

本算法实现步骤如下:

1)通过 CLAHE 方法增强图像对比度。

2)根据 Canny 算子检测的图像边缘计算边缘权重,并通过式(10)得到损耗函数。

3)采用加权引导滤波器对增强图像进行滤波降噪。

4)在降噪图像的 HSV 空间,对亮度和饱和度进行分块增强,并用双线性插值消除图像块状效应。

3 实验结果与分析

实验选用的 Matlab 版本为 R2010a,PC 处理器为 3.6 GHz Intel(R) Core(TM) i3-4160,内存为 4 GB,操作系统为 Windows 7 旗舰版。

实验选取了一组比较典型的水下退化图像作为增强的对象,图像大小是 450 px×350 px。图 8~10 为本算法与文献[3-4]处理结果,表 1 为不同算法处理结果对比。

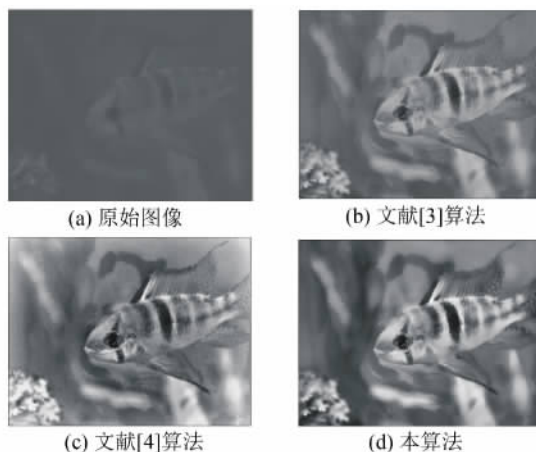


图 8 珊瑚鱼增强结果

Fig. 8 Enhancement of coral fish

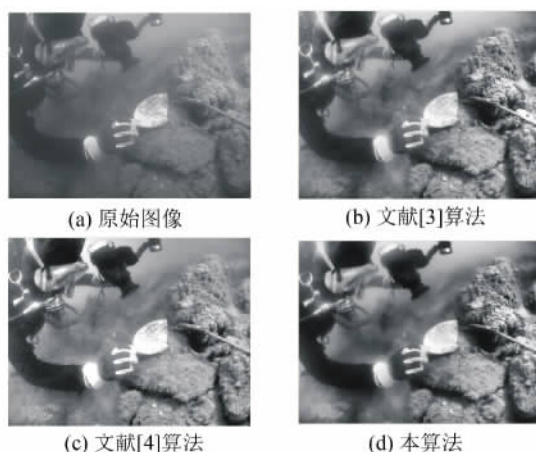


图 9 水下考古增强结果

Fig. 9 Enhancement of underwater archeological

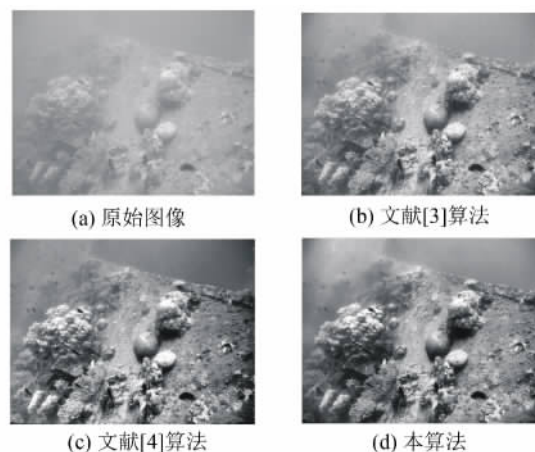


图 10 水下沉船增强结果

Fig. 10 Enhancement of underwater shipwreck

表 1 不同算法处理结果对比

Tab. 1 Results contrast of different algorithms

实验 图片	算法	信息熵	结构 相似度	清晰度	时间/s
图 9(a)	文献[3]	4.64	0.571	109	0.21
	文献[4]	7.41	0.465	256	1.28
	本算法	7.30	0.635	176	0.59
图 10(a)	文献[3]	7.72	0.694	492	0.17
	文献[4]	7.62	0.713	464	1.19
	本算法	7.84	0.737	511	0.58
图 11(a)	文献[3]	7.24	0.636	608	0.18
	文献[4]	7.61	0.579	1173	1.23
	本算法	7.72	0.746	1007	0.57

3.1 主观评价

从图 8~图 10 的图像增强结果可以看出,文献[3]和文献[4]都显著提高了图像对比度,但在图像背景区域都有较明显的噪声,而本算法能够解决图像的噪声问题,同时又保持较高的对比度。在图 8 中,本算法的对比度和图像信噪比都较高,并且背景区域平滑,而文献[3]算法的左下角珊瑚区域亮度过大,造成细节模糊。在图 9 中,文献[4]在潜泳人员手臂处都有较多的噪声,而本算法噪声较少。在图 10 中,文献[3]整体对比度较高,但其在海水区域有更多的噪声,可视性较差。

3.2 客观评价

本算法选用信息熵、结构相似度 SSIM^[11] 和清晰度作为客观评价标准。结构相似度 SSIM 是性能高

于峰值信噪比的降噪评价标准,其取值范围为0~1, SSIM 指标越大说明算法降噪性能越好。清晰度客观反应图像的纹理特征和微小的细节反差,定义为

$$Q = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N ((x(i+1, j) - x(i, j))^2 + (x(i, j+1) - x(i, j))^2) \quad (14)$$

从表1可以看出,本算法增强图像的 SSIM 指标最高,而且信息熵、清晰度都高于文献[3],但是文献[3]的运行时间最短。在图9、图10中,文献[4]具有较高的信息熵,但其结构相似度要比本算法低。此外,在图9、图11中,文献[4]具有较高的清晰度,但运行时间长。

4 结束语

在分析方差检测的加权引导滤波器的基础上,对比常用的边缘算子,采用基于 Canny 算子的加权引导滤波器对 CLAHE 方法增强后的水下图像进行降噪,并在 HSV 空间对降噪图像的亮度和饱和度进行分块对比度增强,解决了水下图像对比度低和噪声较多的问题。通过对多组水下降质图像增强效果的对比分析,本算法增强后的图像对比度较高,且图像的背景区域具有更好的平滑度。此外,结合客观图像质量评价数据,表明本算法具有较高的结构相似度,并且信息熵和清晰度较大,算法的执行效率较高。

参考文献:

- [1] 李庆忠,李长顺,王中琦. 基于小波变换的水下降质图像复原算法[J]. 计算机工程, 2011, 37(22): 202-206.
- [2] 杨爱萍,邓佳,王建,等. 基于颜色失真去除与暗通道先验的水下图像复原[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(11): 2541-2547.
- [3] HITAM M S, YUSSOF W, AWALLUDIN E A. Mixture contrast limited adaptive histogram equalization for underwater image enhancement[C]//International Conference on Computer Applications Technology. Sousse, Tunisia; IEEE Press, 2013: 1-5.
- [4] 张凯,金伟其,袁溯,等. 水下彩色图像的亮度通道多尺度 Retinex 增强算法[J]. 红外技术, 2011, 33(11): 630-634.
- [5] 胡玉娟,曹风云. 基于图像融合的水下彩色图像增强方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2013, 36(8): 948-953.
- [6] HE K, SUN J, TANG X. Guided image filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [7] LI Zhengguo, ZHENG Jinghong, ZHU Zijian, et al. Weighted guided image filtering[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(1): 120-129.
- [8] ARNOLD B A, MALKASSE J P, KERVEN G. A pre-processing framework for automatic underwater images denosing[C]//Proceedings of the European Conference on Propagation and Systems, 2015(3): 15-18.
- [9] 任毅斌,王子嫣,于吉红,等. 数字图像中边缘检测算法综合研究[J]. 计算机与信息技术, 2007(8): 23-26.
- [10] 管宏蕊,丁辉. 图像边缘检测经典算法研究概述[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2009(增刊1): 66-69.
- [11] WANG Z, BOVIK A, SHEIKH H. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.
- [12] SAHU P, GUPTA N, SHARMA N. A survey on underwater image enhancement techniques[J]. International Journal of Computer Applications, 2014, 87(13): 19-23.
- [13] 张新龙,汪荣贵,张璇,等. 雾天图像增强计算模型和算法[J]. 中国图像图形学报, 2011, 16(8): 1359-1368.

编辑:梁王欢