

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2016)09-1119-08

论文引用格式: Xie W, Zhou Y Q, You M. Improved guided image filtering integrated with gradient information [J]. Journal of Image and Graphics, 2016, 21(9): 1119-1126. [谢伟, 周玉钦, 游敏. 融合梯度信息的改进引导滤波[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(9): 1119-1126.] [DOI: 10.11834/jig.20160901]

融合梯度信息的改进引导滤波

谢伟, 周玉钦, 游敏

华中师范大学计算机学院, 武汉 430079

摘要: **目的** 为了有效消除引导滤波平滑图像后产生的光晕现象, 提出一种新型的融合梯度信息的改进引导滤波算法。**方法** 该算法借助引导图像的梯度信息来判断图像边缘位置, 并结合指数函数框架设计权重值来控制不同图像区域内的平滑倍数, 使改进后的引导滤波能够自适应地区分和强调边缘, 从而避免边缘附近由于过度模糊所引入的光晕现象。**结果** 与引导滤波算法相比, 本文算法能在保边平滑的同时较好地抑制光晕, 并在结构相似性 (SSIM) 评价和峰值信噪比 (PSNR) 评价中分别取得最高约 30% 和 15% 左右的质量提升。**结论** 本文算法具有较好的鲁棒性, 在图像平滑、图像细节增强、多曝光图像融合等多种图像处理相关应用中均有着良好的表现。

关键词: 保边平滑; 引导滤波; 梯度; 光晕; 参数自适应

Improved guided image filtering integrated with gradient information

Xie Wei, Zhou Yuqin, You Min

Computer School of Central China Normal University, Wuhan 430079, China

Abstract; Objective To eliminate halo artifacts produced by guided image filtering, this paper proposes a novel, improved, guided image filter that is integrated with gradient information. **Method** Our method uses gradient information of guidance images to determine edge positions, and designs the weight model based on an exponential function to control the smoothness of different image regions. It makes an improved guided image filter that adaptively finds edges and emphasizes them, thereby avoiding the halo introduced by excessive smooth near edges. **Result** Experiments show that our method can avoid halo artifacts during periods of edge-preserving smoothing, and respectively attains approximately 30% and 15% higher advancement for SSIM and PSNR, compared with the guided image filter. **Conclusion** Our method has greater robustness and performance in many computer vision and computer graphics applications such as image smoothing, detail enhancement, and multi-exposure fusion.

Key words: edge-preserving smoothing; guided image filter; gradient; halo; parameter self-adaption

收稿日期: 2015-11-03; 修回日期: 2016-04-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61501198, 41101425, 41201413); 湖北省自然科学基金面上项目 (2014CFB461); 武汉市青年科技晨光计划 (2014072704011248); 华中师范大学中央高校基本科研业务费项目 (CCNU14A05017)

第一作者简介: 谢伟 (1982—), 男, 副教授, 2010 年于武汉大学获通信与信息系统专业工学博士学位, 主要研究方向为图像处理、计算机视觉。E-mail: xw@mail.ccnu.edu.cn

Supported by: National Natural Science Foundation of China (61501198, 41101425, 41201413)

0 引言

保边平滑滤波是一种被广泛应用的提高图像质量的方法。该方法旨在平滑图像噪声和冗余信息的同时保留图像的边缘细节。经过多年的发展,具有保边平滑特点的滤波算法可以大致分为两类:

第1类为全局最优化滤波方法。较为典型的有1992年Rudin等人^[1]提出的非线性全变分算法、1997年Charbonnier等人^[2]提出的确定性边缘保持正则化算法和2008年Farbman等人^[3]提出的加权最小二乘滤波。此类算法能够在平滑图像的同时较好地保持边缘,并将平滑产生的模糊分散到整幅图像以削弱边缘附近出现的光晕现象,但是其运算复杂度过高,内存开销很大,并且会产生梯度反转现象。

第2类为局部滤波方法。1990年Perona等人^[4]首次将热力场方法应用到图像处理中,提出了各向异性扩散法,算法通过考虑像素点与周围像素的关系来保留边缘。1998年Tomasi等人^[5]提出的双边滤波方法则同时考虑了图像值域和空间域,较好地保持了边缘细节。这两种算法均具有一定地保边平滑效果,但会在图像边缘附近出现梯度反转和光晕现象。此后出现了很多基于双边滤波^[5]的改进算法,如冯策等人^[6]提出的基于显著特性的保边算法,该算法结合显著图克服了光晕现象的产生。但由于算法中涉及的显著图生成方法只适用于彩色图像,因此该算法只能处理彩色图像,无法适用于灰度图像。He等人^[7]在2012年提出的引导滤波算法则通过定义局部线性模型实现了保边平滑特性,运算复杂度仅为 $O(N)$,并且成功地克服了双边滤波等方法的梯度反转问题。但和其他局部滤波方法一样,引导滤波无法避免光晕的引入。此后陆续出现了一些结合引导滤波的应用算法,如2014年郭德全等人^[8]提出的采用引导滤波的超声纹理补偿图像优化算法、於敏杰等人^[9]提出的基于暗原色及入射光假设的单幅图像去雾算法和Singh等人^[10]提出了结合引导滤波的多曝光图像融合技术。2015年Zheng等人^[11]在加权引导滤波中提出了一种基于局部方差的权值算法,一定程度上削弱了图像边缘处的光晕。同年9月,龙鹏等人^[12]基于局部方差权值法提出了LoG算子权值法对原始引导滤波算法做出改进,边缘保持特性得到了一定的提升。

针对引导滤波^[7]存在的问题及其改进现状,本

文提出了一种新型的融合梯度信息的改进引导滤波算法,算法结合引导图像的梯度域信息改进了引导滤波方法,在较好消除光晕的同时提升了引导滤波的保边平滑特性。

1 相关算法分析

1.1 引导滤波

引导滤波是一种基于局部线性模型的边缘保持算法,它利用引导图像指导滤波过程,将图像中任意像素点与其部分近邻像素点定义为线性关系,分别进行滤波处理,最终将所有局部滤波结果累加推出全局滤波结果,得到与输入图像结构相似的输出图像。

引导滤波认为一幅图像可以被分解为基础层和细节层两个部分,即

$$p = q + e \tag{1}$$

式中, p 为输入图像, q 为基础层,反映了图像的本质部分和边缘, e 为细节层,包含图像的纹理细节和噪声信息。算法最终的目的是得到与输入图像尽可能相似的基础层 q 。基于此,基础层 q 被定义为一个与引导图像 I 有关的线性模型,即

$$q_i = a_k I_i + b_k, \forall i \in \omega_k \tag{2}$$

式中, a_k 和 b_k 是引导图像在以像素点 k 为中心,半径为 r 的局部窗口 ω_k 内的线性系数。为了得到与输入图像 p 最接近的输出图像 q ,使用最小二乘法来拟合等式(2)中的线性关系,其代价函数为

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

ε 是一个用来防止 a_k 过大的正则化参数,其值由调用时人为指定。经计算,对应的 a_k 和 b_k 分别为

$$a_k = \frac{\frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} I_i p_i - \mu_k \bar{p}_k}{\sigma_k^2 + \varepsilon} \tag{4}$$

$$b_k = \bar{p}_k - a_k \mu_k \tag{5}$$

式中, μ_k 和 σ_k^2 分别是引导图像 I 在半径为 r ,中点为 k 的窗口 ω_k 内的均值和方差, $|\omega|$ 为窗口 ω_k 内元素总数, \bar{p}_k 为输入图像 p 在窗口 ω_k 内的均值。考虑到一个像素点 i 可同时被 $|\omega|$ 个窗口覆盖,于是对所有情况下的 q_i 取平均,最终得到

$$q_i = \bar{a}_k I_i + \bar{b}_k \tag{6}$$

显然, $\sum_{k|i \in \omega_k} a_k = \sum_{k \in \omega_k} a_k$, 则有 $\bar{a}_k = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_i} a_k, \bar{b}_k = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_i} b_k$ 。

对式(2)两边同时求梯度得到 $\nabla q_i = a_k \nabla I_i$, 不难发现, 引导滤波模型具备边缘保持特性, 且 a_k 决定了最终图像的梯度保持程度, 即 a_k 代表了图像边缘保持度。当 a_k 越小时, q_i 中的梯度信息越少, 图像边缘越模糊, 平滑力度越大; 当 a_k 越大时, q_i 中的梯度信息越多, 图像边缘越清晰, 平滑力度越小。在式(3)中 ε 是一个用来防止 a_k 过大的固定正则化参数, 由此可推出 ε 小于1。其中, ε 越小, 叠加平滑倍数越小; ε 越大, 叠加平滑倍数越大。因此, 引导滤波使用 a_k 和 ε 来共同决定输出图像的边缘保持度和平滑程度。但类似于其他局部滤波方法, 引导滤波往往会在图像边缘附近引入光晕。

1.2 LoG 边缘算子加权的改进引导滤波

文献[12]认为, 原始引导滤波产生光晕问题的原因在于该算法对整幅图像各个区域使用统一的线性模型和相同的正则项参数。为了解决引导滤波的光晕问题, 文献[12]提出了一种基于 LoG 边缘检测算子改进的加权自适应正则项因子。该方法向原始引导滤波算法的正则项参数 ε 的分母部分引入了一个权值 $T(i)$, 形如 $\varepsilon/T(i)$ 。

新的算法通过计算图像局部窗口内的 LoG 边缘算子来判断像素点处于平滑区域还是边缘区域, 并基于此计算权值 $T(i)$, 使得算法能够在保证平滑效果的同时突出边缘区域像素和平坦区域像素的差异。因此, 改进后的引导滤波算法能够实现对图像本身不同区域的纹理特性的自适应。

则式(3)变成

$$E = \sum_{i \in \omega_k} \left((a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \frac{\varepsilon}{T(i)} a_k^2 \right) \quad (7)$$

LoG 边缘算子权值基于 9×9 局部窗口和引导图像 I , 采用了局部方差加权引导滤波算法的框架, 通过使用 LoG 边缘算子替代局部方差, 改写权值。权值定义为

$$T(i) = \frac{1}{N} \sum_{i'=1}^N \frac{|LoG(i)| + \gamma}{|LoG(i')| + \gamma} \quad (8)$$

式中, $LoG(i)$ 是高斯拉普拉斯边缘检测算子, N 为像素总数, i 为局部窗口中心像素, i' 取遍图像中所有像素, γ 为随着图像最大值自适应变化的约束因子。由于在边缘处, LoG 算子具有较大的幅值, 因此权值 $T(i)$ 在边缘处总大于1, 在非边缘处则小于1。

由于 LoG 算子较局部方差而言, 更能与边缘区域相对应, 因此采用 LoG 算子的权值能够较好地调节正则化参数 ε , 使其对边缘保持度 a_k 产生一定的自适

应约束作用, 最终在实际应用中更好地保护边缘。

2 本文算法

2.1 算法思路

在引导滤波方法中, 一个像素点往往会被9个以上的窗口覆盖, 即一个像素点将得到9个以上的局部滤波结果后求平均得到其最终像素值。不难发现, 在不同的局部窗口间, 与之对应的平滑力度 a_k 各不相同, 一定程度上帮助区分了边缘局部区域和非边缘局部区域。但与之伴随的是, 对于所有区域内的局部窗口而言, 无论该窗口处于边缘局部区域还是非边缘局部区域, 固定统一的正则化参数 ε 对其各自的平滑力度 a_k 约束均相等, 即对所有像素点同时叠加的平滑倍数相同。这种策略在一定程度上能弥补部分区域平滑力度不足的问题, 但显然也会导致部分区域出现过平滑现象, 当过平滑现象出现在边缘区域时就造成了光晕。

LoG 边缘算子加权的改进引导滤波算法考虑到了这一点, 通过向引导滤波正则项引入权值来实现正则项的自适应化, 以此达到克服边缘区域的过平滑现象、削弱光晕的目的。在该算法中, 每个像素点的权值由其本身的 LoG 算子结果对图像中所有像素点的 LoG 算子结果的占比之和求平均得到, 一定程度上反映了图像边缘信息。但实际上, LoG 算子是二阶的边缘检测算子, 其所表现的已经是图像的边缘信息, 在此基础上再计算每个像素点的梯度占比并求平均并不能有效地帮助图像边缘信息放大, 反而会因为算法中使用了两次高斯滤波而削弱部分像素点的边缘特征。因此, LoG 边缘算子权值所携带的边缘信息实际上是有损的, 不能较为高效地强调真实边缘, 最终导致克服光晕的效果有限。

基于以上分析能够发现, 一个有效的引导滤波权值模型, 形如 $\varepsilon/\varphi(i)$, 需要解决两个问题。第一、该权值所借助的图像处理方法应该具备显著的边缘特性, 即能够准确地找出图像边缘。第二、在图像边缘处, 应叠加较小的平滑倍数, 即最终的正则项应较小, 则分母处的权值应较大; 在图像平坦区域, 应该叠加稍大的平滑倍数, 即最终的正则项应稍大, 则分母处的权值应较小。

在数字图像处理领域中, 大多数图像的边缘一般能借助计算图像梯度求得。求图像梯度实际上就是一个对图像求导的过程, 其结果反映了像素点灰

度的最大变化率及其方向,恰好能够准确地判别出图像边缘,具备显著的边缘特性。当使用简单的一阶差分方法来计算图像梯度时,若像素点处于图像边缘区域,则一定具有较大的梯度值;若像素点处于图像非边缘区域,则梯度值一定很小甚至接近于零。因此,可借助此方法来设计权值模型。

此外,理想的权值模型要求其在图像非边缘处时权值较小,在图像边缘处时权值较大。不难发现,此权值变化规律和指数函数的变化规律较为相近。因此可以将像素点的梯度信息作为底数,通过设计一个基于指数函数的权值模型来放大或抑制像素点的梯度信息,最终达到强调图像边缘、消除光晕的目的。

综上所述,为了解决引导滤波的光晕问题,本文使用一种全新的融合全局梯度信息的加权方法来改进引导滤波,记为 $\varphi(i)$ 。

2.2 算法实现

梯度是矢量,即其携带了多方向的像素点灰度突变信息,因此考虑对引导图像梯度场取绝对值,即

$$M_i = \left| \left[\frac{\partial I_i}{\partial x}, \frac{\partial I_i}{\partial y} \right]^T \right| \tag{9}$$

式中, I 为引导图像, (x, y) 为像素点 i 的坐标。

为了得到图像边缘区域,需要过滤掉梯度域中属于非边缘区域的较小梯度值。通过将 M_i 与阈值 t 进行比较来判定某个像素点是否处于引导图像的边缘区域。当 $M_i > t$ 时,认为像素点 i 处于边缘,当 $M_i \leq t$ 时,认为像素点 i 处于非边缘。具体阈值 t 定义为

$$t = 0.15 \times L \tag{10}$$

式中, L 为引导图像梯度场的变动范围。则阈值 t 能够自适应地对不同引导图像设定不同的阈值,增强了算法的鲁棒性。通过大量对比实验发现,当阈值中的倍数被设定为 0.15 时,最能接近引导图像的真实边缘分布情况。

为了使梯度域边缘信息得到更为合理的应用,向权值 $\varphi(i)$ 内部引入一个约束因子 $s(i)$ 作为权值模型的指数项。该约束因子能为权值 $\varphi(i)$ 树立一个约束边界,使它能准确地决策出对于不同区域应采取的不同加权行为。具体来说就是,当像素点处于边缘时,表现为对边缘信息敏感,放大边缘信息,当像素点处于非边缘区域时,表现为对边缘信息不敏感,抑制边缘信息增长。基于上述分析,权值 $\varphi(i)$ 定义为

$$\varphi(i) = (M_i - t)^{s(i)} \tag{11}$$

$$s(i) = -\operatorname{sgn}(M_i - t) \times \mu \times M_i \tag{12}$$

M_i 为点 i 的梯度绝对值, t 为区分边缘的阈值,则

$(M_i - t)$ 项代表 i 点的边缘信息。 $s(i)$ 为像素点 i 对应的约束因子,在 $s(i)$ 中, M_i 能根据当前像素点的灰度突变程度公正地决定该像素点边缘信息的放大力度,具体放大倍数 μ 由 $1/t$ 动态决定。显然,当像素点 i 属于边缘时, $s(i)$ 符号为负,此时边缘信息越显著则权值 $\varphi(i)$ 越大,表现为对边缘信息敏感;当像素点 i 不属于边缘时, $s(i)$ 符号为正,此时的权值 $\varphi(i)$ 非常小,表现为对边缘信息不敏感。

同时,为了避免权值计算结果出现复数,需对底数项取绝对值。由于非边缘处的 $(M_i - t)$ 值很小且为负数,若仅对底数项取绝对值,不会影响约束因子 $s(i)$ 对该像素点是否为边缘做出正确决策,权值 $\varphi(i)$ 结果依然合理。此外,由于权值 $\varphi(i)$ 位于正则项分母位置,为了防止被除数为零,向 $\varphi(i)$ 中引入常数项 β (一般取值为 4)。重写后的权值方法 $\varphi(i)$ 为

$$\varphi(i) = \beta + |M_i - t|^{s(i)} \tag{13}$$

$$s(i) = -\operatorname{sgn}(M_i - t) \times \mu \times M_i \tag{14}$$

图 1(a) 模拟了图像的灰度突变,在背景灰度值统一的情况下,以等差递增的方式设计了 10 次灰度突变,最终得到的权值曲线如图 1(b) 所示。通过观察能够发现,在图像边缘位置,当边灰度突变越强烈、图像边缘信息越显著时,权值 $\varphi(i)$ 越大。符合前述分析对权值规律的设想。

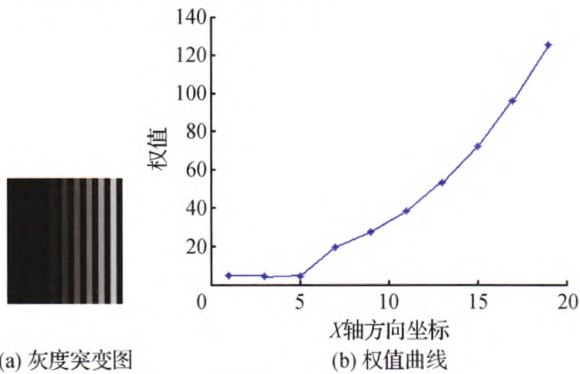


图 1 在不同灰度突变下的权值曲线
Fig. 1 The weight-line in different intensity Variation
((a) saltation gray scale; (b) weighted curve)

令引导图像为 I , 输入图像为 p , 结合权值在引导滤波的基础上进行改写, 则代价函数变为

$$E = \sum_{i \in \omega_k} \left((a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \frac{\varepsilon}{\varphi(i)} a_k^2 \right) \tag{15}$$

经计算得, 对应的 a_k 和 b_k 变为

$$a_k = \frac{\frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} I_i p_i - \mu_k \bar{p}_k}{\sigma_k^2 + \varepsilon / \varphi(i)} \tag{16}$$

$$b_k = \bar{p}_k - a_k \mu_k \tag{17}$$

则最终的输出图像为

$$q_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_i} a_k I_i + \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_i} b_k \quad (18)$$

图 2 直观地反映了使用不同滤波方法对一维输入信号进行滤波的效果对比。所有方法中的参数 r 和 ε 均分别被设置为 8 和 0.01。观察信号扫描线横坐标为 100 的边缘位置放大图能够发现,使用引导滤波对原信号进行滤波处理后,输出信号与原信号曲线相比出现了较为严重的偏离,产生了失真,造成了光晕现象。这主要是因为引导滤波不能准确地区分出边缘位置,在边缘处也保持了较大的平滑力度,从而导致边缘信息保持不足。使用 LoG 算子加权引导滤波处理后的效果较引导滤波而言有所改进,更为贴近原信号曲线,但仍有一定幅度的偏离,去除光晕效果有限。经本文算法处理后的信号曲线在边缘处明显更为贴近原始信号曲线,这表明本文算法能够较为高效地区分和保持边缘信息,从而能够在较大程度上消除传统引导滤波产生的光晕现象。

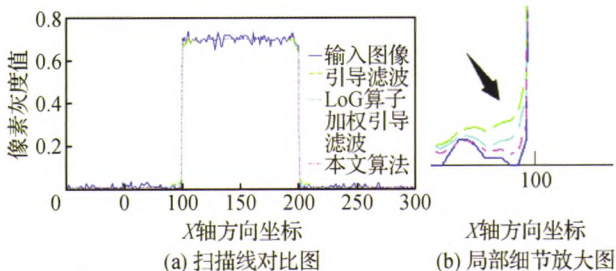


图 2 不同滤波方法时输入信号的扫描线对比图
($r=8, \varepsilon=0.01$)

Fig. 2 The contrasting results on scan-line of the input signals via different filters ($r=8, \varepsilon=0.01$) ((a) the contrasting results on scan-line; (b) detail with enlarged scale)

3 实验结果与分析

3.1 图像平滑

引导滤波方法能够在平滑图像噪声和冗余信息的同时保留图像边缘。本文算法继承了引导滤波的保边平滑特性,并在其基础上提升了对于图像边缘细节的保持能力。分别使用引导滤波、LoG 算子加权引导滤波和本文算法对图 3(a) 进行平滑效果的对比验证,得到对应的效果如图 3(b) — (d) 所示。通过观察能够发现,在同等参数下,图 3(b) 整体在平滑细节的同时,边缘信息丢失最多,边缘略为模糊。图 3(c) 较图 3(b) 而言稍有改进,边缘信息更为清晰。图 3(d) 较图 3(b) (c) 而言,边缘保持效果

均有较为显著的提升,能够较为清晰地观察到图像边缘处的绒毛信息被保留。显然,本文算法较引导滤波而言,能够更为准确地判断出像素点是否处于边缘区域,并控制不同区域的平滑倍数,最终避免了边缘处的模糊叠加。

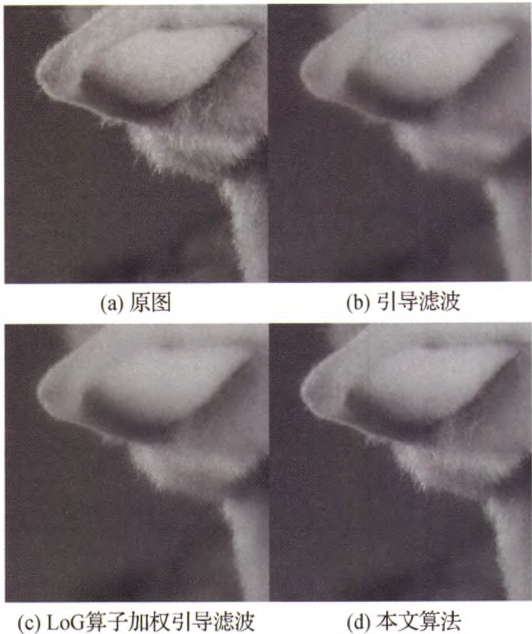


图 3 不同滤波方法的图像平滑效果对比 ($r=8, \varepsilon=0.01$)
Fig. 3 Comparison of smoothed images via different filters ($r=8, \varepsilon=0.01$) ((a) original image; (b) guided image filter; (c) weighted guided image filtering algorithm using Laplacian-of-Gaussian edge detector; (d) the proposed algorithm)

3.2 算法参数定量分析

由于在单次实验中,参数 r 和 ε 的变化较为固定单一,为了总结参数设置和保边平滑效果间的规律,考虑采用定量分析的方法进行批量对比实验,并使用结构相似性 (SSIM) 来客观评价图像质量。SSIM 是一种衡量两幅图像结构相似性的评价指标,输出范围为[0 1],取值越大代表其结构越相近,图像质量越好。

对图 3(a) 分别选取 $r=3, 8, 15$ 时 ε 不变和 $\varepsilon=0.01, 0.04, 0.1$ 时 r 不变的 6 种情况分别进行滤波效果统计。通过控制变量,能够较为直观地展现不同方法在不同参数下的性能。结果如图 4 所示,每一个数据点代表此种情况下,平滑后图像的 SSIM 评价。

不难看出,引导滤波的平滑效果随着局部窗口的变大和正则系数 ε 的增长呈现出了较为剧烈的图像质量消减,而 LoG 算子加权引导滤波在原引导滤波的基础上实现了小幅质量提升,但质量消减情况依然表现剧烈。经本文算法平滑得到的图像比经引

导滤波和经 LoG 算子加权引导滤波平滑得到的图像在结构相似性上更为接近原图,相较于原始引导滤波而言得到了更为明显的大幅质量提升。此外,从曲线图走势能够发现,本文算法相较于引导滤波

和 LoG 算子加权引导滤波而言有着更加宽广的参数选择区间。也就是说,本文算法具有一定的鲁棒性,能够在更为宽泛的参数区间中得到优于引导滤波的保边平滑效果且效果较为稳定。

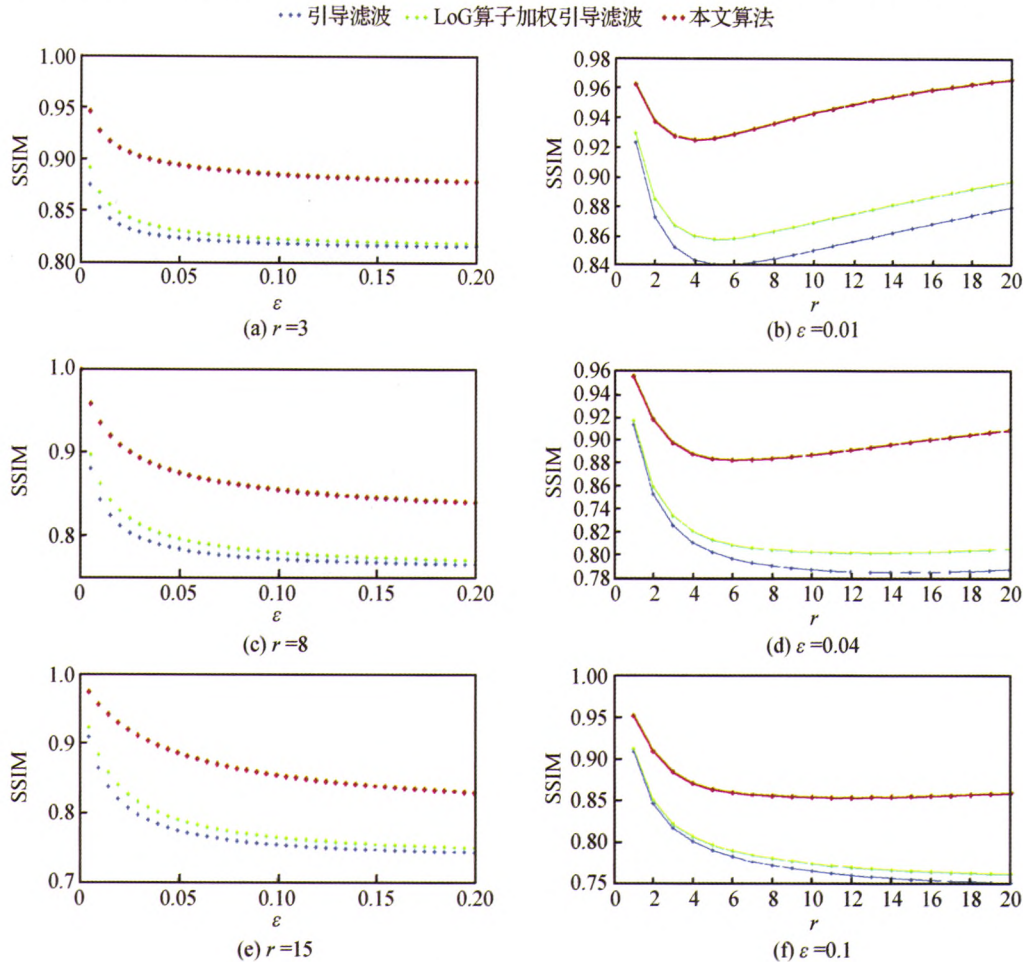


图 4 不同滤波方法的图像平滑效果 SSIM 曲线对比

Fig. 4 Correlation curves of smoothed images via different filters ((a) curve when r is 3; (b) curve when ϵ is 0.01; (c) curve when r is 8; (d) curve when ϵ is 0.04; (e) curve when r is 15; (f) curve when ϵ is 0.1)

3.3 图像细节增强

具有保边平滑特点的滤波方法在图像细节增强领域有着广泛地应用,增强后的图像往往具有更高的清晰度和更强的细节表达能力。原始的引导滤波算法使用固定化正则项,容易造成图像边缘处过模糊,使增强后的图像出现色彩失真和光晕现象。LoG 算子加权引导滤波基于局部 LoG 算子对引导滤波进行了改进,能在一定程度上削弱图像边缘处的光晕。分别使用引导滤波、LoG 算子加权引导滤波和本文算法对图 5(a) 进行图像细节增强对比实验,参数 r 和 ϵ 均分别被设置为 8 和 0.01,增强倍数均为 5 倍。通过观察图 5 能够发现,在第 1 组增强实验中,使用引导滤波增强的图 5(b) 在花朵边缘处出现了明显的光晕现象,且增强后的图像整体出现了色彩

失真的问题。使用 LoG 算子加权引导滤波增强的图 5(c) 对花朵边缘处的光晕和整体的色彩失真现象有一定的抑制和缓和作用,但效果不算显著。使用本文算法增强的图 5(d) 上则基本上没有出现这两个问题,且整体增强效果更加自然。在第 2 组增强实验中,使用引导滤波增强的图 5(b) 在小鸟周边出现了较为明显的蓝紫色光晕,使用 LoG 算子加权引导滤波增强的图 5(c) 中小鸟周边的光晕有一定程度的减弱,但仍能明显观察到。使用本文算法增强的图 5(d) 则没有出现这个问题,并且能够发现,小鸟身上的羽毛信息也得到了一定程度的增强。分别使用 SSIM 和峰值信噪比 (PSNR) 方法对两组实验图像进行质量评价,评价结果数值越大,代

表图像质量越好,具体客观评价值如表 1 所示。通过客观质量评价能够发现,使用本文算法得到的增强效果明显优于使用引导滤波和 LoG 算子加权引导滤波增强的图像。经多组实验统计发现,本文算法较引导滤波而言,能在 SSIM 方法中取得平均约 24%,最高约 30% 左右的质量提升,能在 PSNR 方法中取得平均约 11%,最高约 15% 左右的质量提升。

在程序运行的同时,分别记录不同方法的运行时间。本文实验所使用计算机的处理器为 i5-2410 M,所有实验均在 Windows 7 操作系统下,使用 Matlab 2011b 完成。经过对比能够发现,本文算法较引导滤波和 LoG 算子加权引导滤波而言,运行时间略有加长,但是仍在一个合理的时间增长范围内,具体程序运行时长如表 1 所示。



图 5 两组图像细节增强效果对比($r=8, \varepsilon=0.01$)

Fig. 5 Comparisons of two groups enhanced images via different filters ($r=8, \varepsilon=0.01$) ((a) original images; (b) guided image filter; (c) weighted guided image filtering algorithm using Laplacian-of-Gaussian edge detector; (d) the proposed algorithm)

表 1 图 5 中滤波结果的客观质量评价
Table 1 Performance Comparison of Fig. 5

图像组别	评价指标	颜色通道	引导滤波	LoG 算子	本文算法
第 1 组	SSIM	R	0.736 9	0.752 3	0.836 4
		G	0.566 4	0.602 0	0.784 8
		B	0.429 7	0.451 0	0.630 8
	PSNR/dB	R	69.978 1	70.847 1	75.120 5
		G	67.134 6	68.219 9	73.602 5
		B	67.997 7	68.915 4	73.385 6
	运行时间/s		3.097 8	3.654 3	4.435 0
第 2 组	SSIM	R	0.760 2	0.794 3	0.901 7
		G	0.737 9	0.773 1	0.892 8
		B	0.660 0	0.691 0	0.814 4
	PSNR/dB	R	67.598 2	69.755 8	76.709 1
		G	67.444 3	69.451 6	76.209 9
		B	67.598 2	69.568 4	75.857 6
	运行时间/s		0.150 7	0.168 4	0.192 4

4 结 论

本文提出了一种新型的融合梯度信息的改进引导滤波算法,通过向引导滤波正则项引入权值成功地克服了引导滤波原本会遭遇的光晕问题。本文算法首先根据梯度域确定和区分出图像的边缘区域,然后结合约束因子形成约束条件,抑制非边缘信息增长,鼓励边缘信息放大,最后形成一个兼具鲁棒性和有效性的正则项权值。经实验验证表明,本文算法能够向不同边缘区域赋予不同的平滑力度,以此来保证边缘周围不会产生模糊堆积,最终避免光晕的产生。对比引导滤波,LoG 算子加权引导滤波和本文算法的滤波性能能够发现,本文算法在视觉效果和客观评价指标方面都有着更为优秀的表现,并能广泛应用于众多图像处理领域。因此,本文算法成功地克服了引导滤波的光晕问题,最终实现了一种有效的融合梯度信息的改进引导滤波算法。

参考文献 (References)

- [1] Rudin L I, Osher S, Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1992, 60(1-4): 259-268. [DOI: 10.1016/0167-2789(92)90242-F]
- [2] Charbonnier P, Blanc-Feraud L, Aubert G, et al. Deterministic edge-preserving regularization in computed imaging[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(2): 298-311. [DOI: 10.1109/83.551699]
- [3] Farberman Z, Fattal R, Lischinski D, et al. Edge-preserving decompositions for multi-scale tone and detail manipulation[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 15-19. [DOI: 10.1145/1399504.1360666]
- [4] Perona P, Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, 12(7): 629-639. [DOI: 10.1109/34.56205]
- [5] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images[C]//*Proceedings of the Sixth International Conference on Computer Vision*. Bombay: IEEE, 1998: 839-846. [DOI: 10.1109/ICCV.1998.710815]
- [6] Feng C, Dai S L, Zhao S H. Edge-preserving filtering based on saliency map[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 41(4): 669-674. [冯策, 戴树岭, 赵帅和. 基于显著特性的保持边缘滤波算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(4): 669-674.] [DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2014.0309]
- [7] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(6): 1397-1409. [DOI: 10.1109/TPAMI.2012.213]
- [8] Guo D Q, Yang H Y, Liu D Q. Optimization of ultrasonic imaging in texture compensation using guided filter[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2014, 26(1): 40-46. [郭德全, 杨红雨, 刘东权. 采用引导滤波的超声纹理补偿图像优化[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(1): 40-46.]
- [9] Yu M J, Zhang H F. Single-image dehazing based on dark channel and incident light assumption[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2014, 19(12): 1812-1819. [於敏杰, 张浩峰. 基于暗原色及入射光假设的单幅图像去雾[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(12): 1812-1819.] [DOI: 10.11834/jig.20141213]
- [10] Singh H, Kumar V, Bhooshan S. A novel approach for detail-enhanced exposure fusion using guided filter[J]. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014(2): 1661-1667. [DOI: 10.1155/2014/659217]
- [11] Li Z G, Zheng J H, Zhu Z J, et al. Weighted guided image filtering[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(1): 120-129. [DOI: 10.1109/TIP.2014.2371234]
- [12] Long P, Lu H X. Weighted guided image filtering algorithm using Laplacian-of-Gaussian edge detector[J]. *Journal of Computer Applications*, 2015, 35(9): 2661-2665. [龙鹏, 鲁华祥. LoG 边缘算子改进的加权引导滤波算法[J]. 计算机应用, 2015, 35(9): 2661-2665.] [DOI: 10.11772/j.issn.1001-9081.2015.09.2661]