

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.09.004

局部平均显著梯度保边滤波算法

冯 策, 赵永嘉, 戴树岭

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 100191 北京)

摘要: 针对传统平均保边滤波算法中存在的光晕伪影现象, 提出一种显著图局部平均梯度的保边滤波算法. 利用显著图像边缘对比度突出的特点, 简化边缘区域和非边缘区域间的阈值设定工作, 并根据显著图的平均梯度自适应的平滑图像中的细节和噪声部分, 同时保持边缘清晰. 实验结果表明, 显著图局部平均梯度的保边滤波算法利用显著特性有效地避免了传统平均滤波算法中的光晕伪影现象. 相对于传统平均滤波算法, 在降噪、多尺度增强以及 HDR 方面都有较好的表现.

关键词: 保边滤波; 显著图; 光晕伪影; 引导滤波; 双边滤波

中图分类号: TP751.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)09-0019-05

An edge-preserving filter algorithm of local average saliency gradient

FENG Ce, ZHAO Yongjia, DAI Shuling

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, 100191 Beijing, China)

Abstract: To avoid the halo artifact in the traditional filters, a new edge-preserving filter based on local average saliency gradient was proposed. The criterion to determine whether or not a region should be smoothed is difficult to give, hence it will introduce the “halo” artifact along the edges by unwanted smoothing in an image. Our idea is motivate by the feature of saliency map that enhances the salient edges in an image. Using the feature, we simplify the work to determine whether or not a region should be smoothed, and smooth the image adaptively according to local average saliency gradient. We retain the region with high average saliency gradient, and smooth the region with low average saliency gradient. Experiments show that our method performs better than traditional edge-preserving filters in smoothing, multi-enhancement, and HDR while avoiding “halo”.

Keywords: edge-preserving filter; saliency map; halo; guided filter; bilateral filter

图像滤波是计算机视觉, 医学图像处理等图像工程领域中重要的预处理手段. 保持边缘的滤波是图像滤波研究领域里一个重要的目标. 理想的保持边缘滤波法, 一方面要平滑细节和噪声, 另一方面要保持图像重要的边缘信息.

近年来涌现出了许多优秀的保边滤波算法, 可将其分为两类. 1) 非平均滤波法. 最具代表性的为经典的中值滤波法^[1], 1992年 Rudin 等^[2]提出的 TV 滤波法采用了梯度的 $L1$ 范数作为正则化约束. 随后 2011年 Xu 等^[3]提出通过最小化 $L0$ 范数来平

滑图像, 实现了重要边缘保持. 2011年 Sylvain Paris 等^[4]提出一种基于局部拉普拉斯金字塔的保边缘图像滤波算法. 以上滤波法考虑了全局特征, 因此可避免光晕现象, 虽然效果比较理想, 但计算量比较大, 内存空间占用较高, 效率较低. 2) 平均滤波法. 比较有代表性的为各项异性混合^[5], 双边滤波^[6]等, 双边滤波是使用最为广泛的一种非线性滤波法, 其权重因子是距离和灰度权重的乘积. 2009年 Kartic 等^[7]提出了基于局部极值的保边滤波方法. 2010年 He 等^[8]提出了引导滤波法. 2013年 Gu 等^[9]提出了应用于图像多尺度分解的局部保边滤波法. 平均滤波法的计算量相对较小, 但缺点是在边缘区域会出现光晕现象.

本文提出的算法的主要目的是解决保边平均滤波法中的光晕问题, 高效滤波的同时避免光晕现象出现. 目前局部加权平均的保持边缘滤波算法存在如下问题: 无法明确约束边缘的取舍, 即无法明确设

收稿日期: 2014-06-20.

基金项目: 国家自然科学基金(50975010); 中央高校基本科研业务费专项资金(YWF-13-D2-HK-26); 北京市科委项目(Z111100074811001).

作者简介: 冯 策(1984—), 男, 博士研究生;
戴树岭(1966—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 冯 策, fengce1984@163.com.

定区分边缘区域和非边缘区域的阈值,例如双边滤波中灰度权重因子以及引导滤波中惩罚项的参数设置,当阈值设置过大时会导致边缘部分的模糊,因此会出现光晕伪影现象.而当阈值设置过小时会导致模糊程度不够,无法达到想要处理的效果.针对此问题,本文提出一种基于局部显著梯度的保边滤波法,利用显著图像边缘突出特点,尝试寻找一个明确的区域间阈值,来简化局部平均滤波算法中的参数设置.本文算法除了保持了传统局部保边滤波算法优点以外,还有效地避免了边缘区域的光晕现象.

1 基于频率域的显著图

显著图是一种模拟生物视觉注意机制的选择性模型,显著图直接反映了图像区域引起视觉注意的强弱程度.显著图是由视觉特殊性以及图像中的颜色、亮度、边缘等特征所决定的,计算机视觉领域利用数学模型模拟了人类视觉的注意力机制.显著特性估计目前是自适应压缩^[10],兴趣区域提取^[11],目标检测与识别^[12-13]任务中重要的步骤.

本文采用了基于频率域的显著性分析算法^[14],此算法比其他的显著图算法保存了更多的高频信息,尤其是边缘部分,这一点正是本文所关注的,而且该算法对噪声不敏感,如图1所示.该方法具有的特点:显著边缘突出,对噪声不敏感,输出完整分辨率的显著图,高效性.



(a) 原图像

(b) 显著图

图1 显著特性图

该算法是在 CIELab 的颜色空间上进行的计算.每个像素取 $[L, a, b]^T$ 向量,其中 L 为亮度; a 为通道包括从红色到绿色颜色值; b 为通道包括从黄色到蓝色颜色值.首先计算图像的平均灰度向量,并与原图像的高斯滤波结果作差得到每个像素的显著向量,最后计算其欧式距离并进行灰度拉伸得到显著图,具体算式为

$$S(x, y) = \| I_u - I_{\text{Gauss}}(x, y) \|. \quad (1)$$

其中: I_u 为图像 I 算术平均灰度向量, I_{Gauss} 为原始图像高斯模糊后的灰度结果, $S(x, y)$ 为图像 I 的显著值, $\| \cdot \|$ 表示欧式距离.

2 保边滤波的能量函数

保持边缘滤波法的目标是滤掉噪声的同时保持

边缘部分的清晰.对于“边缘区域”,尽可能的保持此区域信息,不平滑此区域,即此区域的 $P = I$. 而在其他“非边缘区域”(细节,噪声以及平坦部分),进行平滑处理.根据以上分析,图像滤波的能量函数为

$$E = \operatorname{argmin}_{a, b} \sum_{i \in \omega} ((I_i - P_i)^2 + J(P_i - \bar{v}_\omega)^2). \quad (2)$$

其中: P 为平滑后的图像, I 为输入图像, I_i 为位置 i 的像素, P_i 为位置 i 平滑后的像素, J 为平衡系数,用来平衡左右两项, ω 为 i 所在的局部窗口, \bar{v}_ω 为图像 P 在窗口 ω 的平均值.

由于 $|P_i - \bar{v}_\omega| = a_\omega |I_i - \bar{u}_\omega|$, 因此能量函数 E 变为

$$E = \operatorname{argmin}_{a, b} \sum_{i \in \omega} (I_i - P_i)^2 + J \sum_{i \in \omega} a_\omega^2 (I_i - \bar{u}_\omega)^2. \quad (3)$$

自适应系数 J 作用:如果 ω 窗口处于边缘区域,此时系数 J 很小且趋向于 0,使得 $P_i \approx I_i$, 保持了此区域信息;如果 ω 窗口处于非边缘区域,此区域包含了噪声和细节部分,此时系数 J 很大,主要起平滑作用.

本文定义 ω 窗口内

$$P_i = a_\omega I_i + b_\omega. \quad (4)$$

因此式(1)变为

$$E = \operatorname{argmin}_{a, b} \sum_{i \in \omega} (I_i - a_\omega I_i - b_\omega)^2 + J a_\omega^2 \sum_{i \in \omega} (I_i - \bar{u}_\omega)^2, \quad (5)$$

$$a_\omega = \frac{\sigma_\omega^2}{\sigma_\omega^2 + \frac{J}{|\omega|} \sum_{i \in \omega} (I_i - \bar{u}_\omega)^2}, \quad (6)$$

$$b_\omega = (1 - a_\omega) \bar{u}_\omega, \quad (7)$$

$$\bar{u}_\omega = \frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega} I_i. \quad (8)$$

将 a_ω 分子分母同除以 σ_ω^2 , 由于 $\frac{\sum_{i \in \omega} (I_i - \bar{u}_\omega)^2}{|\omega|} = \sigma_\omega^2$, 式(6)变为

$$a_\omega = \frac{1}{1 + J}. \quad (9)$$

包含像素 i 的窗口有 $|\omega|$ 个,因此不同的窗口 a_ω 和 b_ω 不同,计算出来的 P_i 也不同,这里对不同窗口的 P_i 作平均,同文献[8]的解法,求出最终值

$$\hat{P}_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega k} a_{\omega k} I_i + b_{\omega k}. \quad (10)$$

式中: k 为包含像素 i 窗口的索引号, $a_{\omega k}$ 、 $b_{\omega k}$ 分别为 k 窗口的 a_ω 和 b_ω 值, $|\omega|$ 为包含了像素 i 的窗口个数.

2.1 阈值分析

图像的局部平均梯度可以用来衡量图像细节的表达能, 而显著图像增强了显著边缘的对比度, 因此利用显著图像的局部平均梯度信息可以更为准确地表示图像局部区域复杂度的强弱, 即平均梯度高的是边缘区域, 而平均梯度低的是非边缘区域.

本文设定 $\nabla \bar{I}_k$ 为 k 窗口内的平均梯度信息, 并且设定阈值为 σ , 如图 2 所示, 当 $\nabla \bar{I}_k > \sigma$ 时, k 窗口属于边缘部分, 当 $\nabla \bar{I}_k < \sigma$ 时, k 窗口属于非边缘部分, 这里阈值 σ 设定为全部局部平均梯度的均值, 本文利用显著图的特点简化了 σ 的设定工作, 克服了人为设定阈值无法取最优的缺点, 具体算式为

$$\sigma = \frac{1}{|\omega|} \sum \bar{\nabla I}_\omega. \quad (11)$$

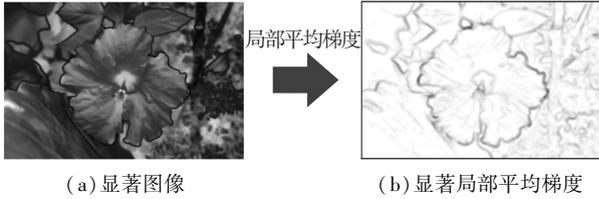


图 2 窗口半径为 6 的局部平均梯度

2.2 自适应参数

根据上节分析, 本文建立自适应 J 数学模型为

$$J = f(\nabla \bar{I}_k) = \begin{cases} 1 + \alpha (|\nabla \bar{I}_k - \sigma|)^\tau, & \nabla \bar{I}_k \leq \sigma; \\ 1 - (|\nabla \bar{I}_k - \sigma|)^\tau, & \nabla \bar{I}_k > \sigma. \end{cases} \quad (12)$$

式中: σ 为区分边缘区域和非边缘区域的阈值; α 为设定模糊调节系数, α 越大细节的模糊程度越大.

τ 取值比较结果如图 3 所示, $\tau = 0.1$ 时, 图像边缘略模糊, $\tau = 0.01$ 时, 平滑和保持部分过度生硬, $\tau = 0.05$ 时, 效果最佳, $\nabla \bar{I}_k$ 为 k 窗口的平均梯度信息. 由图 4 曲线可知, 当横坐标 $\nabla \bar{I}_k < \sigma$ 时, 进入非边缘区域, 随着横轴高频信息 $\nabla \bar{I}_k$ 的减小, $f(\nabla \bar{I}_k)$ 逐渐增大. 当 $\nabla \bar{I}_k > \sigma$ 时, 进入边缘区域, 并且随着高频信息 $\nabla \bar{I}_k$ 增大, $f(\nabla \bar{I}_k)$ 逐渐减小, 并趋向于 0.



图 3 τ 值不同时图像

图 3 τ 值不同时图像

本文提出的算法流程如图 5 所示, 首先计算原图像的显著特性, 然后算出显著图的局部平均梯度, 最后采用显著图局部平均梯度作为区域的约束标准, 实现图像的自适应滤波.

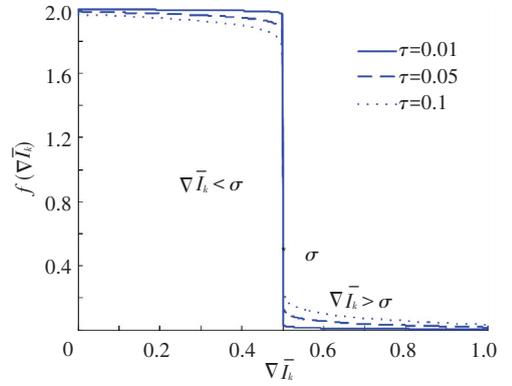


图 4 $\alpha=2$ 时 $f(\nabla \bar{I}_k)$

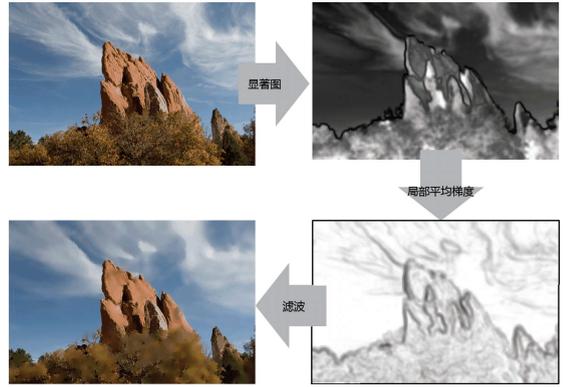


图 5 算法流程图

2.3 保边滤波原理分析

针对“边缘区域”, 局部窗口 $\nabla \bar{I}_k > \sigma, J \in (0, 1]$, 随着窗口内边缘信息复杂度增加, 窗口内平均梯度的逐渐增大, J 逐渐减小并趋向于 0, 此时式 (10) 中的 $a_{\omega k} \approx 1, b_{\omega k} \approx 0, P_i \approx I_i$, 保留了此区域信息, 实现保边特性.

针对“非边缘区域”: 局部窗口 $\nabla \bar{I}_\omega < \sigma, J \in [1, 1 + \alpha)$, 当 α 值设定很大时, $a_{\omega k} \approx 0, b_{\omega k} \approx \bar{q}_{\omega k}, P_i \approx \bar{q}_{\omega k}, \bar{q}_{\omega k}$ 为邻域的平均值, 此区域退化为均值滤波, 实现了细节和噪声的有效平滑.

2.4 一维信号分析

将一维信号进行分解, 基本层为滤波后的结果, 细节层为原始信号与基本层的差值, 图 6、7 分别为引导滤波和双边滤波, 由图 6、7 可见, 在 100、200 像素附近位置的细节层出现了光晕. 图 8 为本文算法, 图中在高频处没有出现光晕信息, 由此可见本文算法具有较好保边特性.

3 实验及其应用

本文算法设定滤波窗口半径为 6, 参数 $\tau =$

0.05, $\alpha = 5$, 将本文选取的比较有代表性的保边滤波法与本文算法进行比较, 包括非平均的保边滤波法(加权最小二乘)和平均的保边滤波算法(引导滤波, 局部极值, 双边滤波).

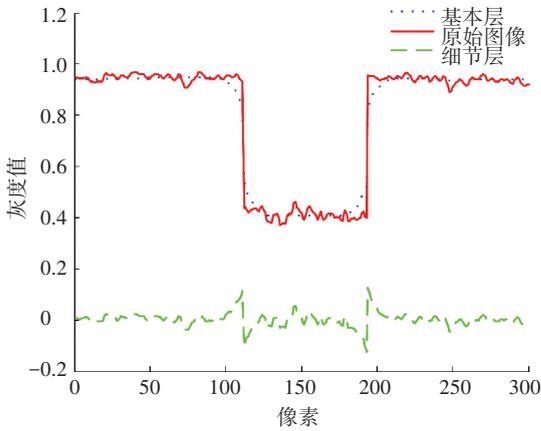


图 6 引导滤波

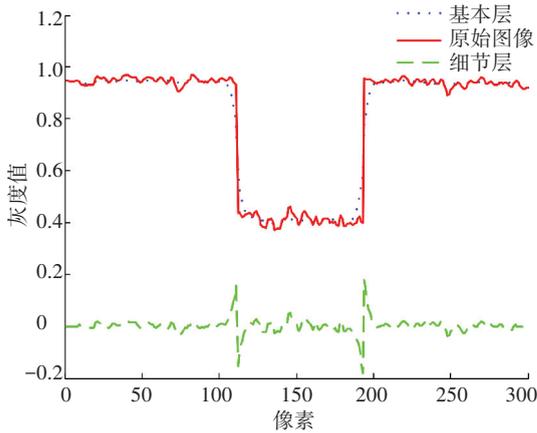


图 7 双边滤波

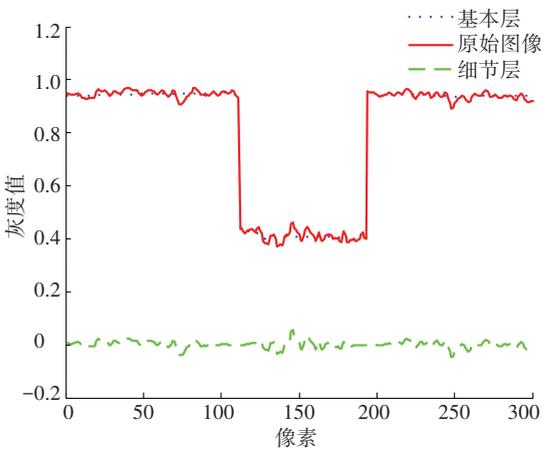


图 8 本文算法

3.1 图像降噪

从图 9 中可见, 平均滤波法(引导滤波, 双边滤波, 局部极值)会导致山峰边缘区域的模糊, 而本文算法则保持边缘清晰. 本文算法相比较于非平均滤波法(加权最小二乘), 保留了更多云彩信息, 对于云彩的滤波效果要更加出色, 而山峰内部的区域也更加分明.



图 9 不同方法的降噪结果比较

3.2 图像增强

多尺度图像增强就是利用滤波算法把图像分解成多个尺度层, 对不同尺度的细节层进行控制, 最后结合不同尺度的层次, 实现图像的有效增强. 实验过程中将算法迭代 4 次, 即得到 4 个细节层 d_1, d_2, d_3, d_4 和一个基本层 b_0 , 即

$$I = b_0 + 2d_4 + 2d_3 + 3d_2 + 3d_1. \quad (13)$$

图 10 所示的比较结果, 平均滤波法(引导滤波, 双边滤波, 局部极值)在山峰边缘处会导致光晕伪影, 而本文的算法处理的结果则不会出现. 本文算法相比较于非平均滤波法(加权最小二乘), 对于微小细节也给予了增强, 如云彩部分.

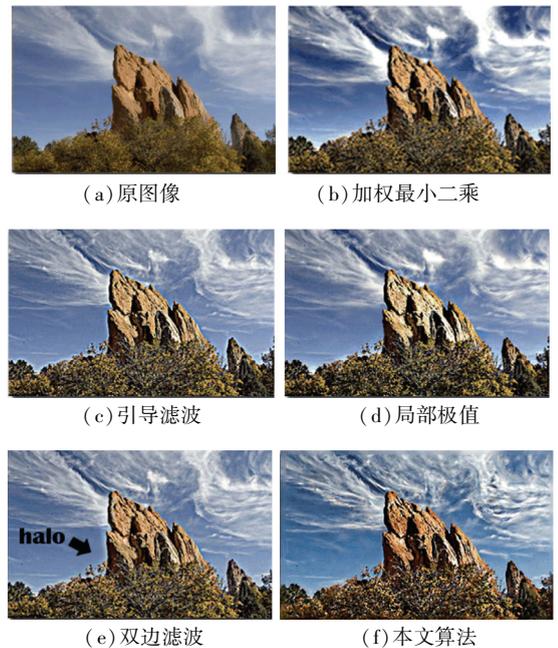


图 10 不同方法的增强结果比较

3.3 高动态范围图像压缩(HDR)

本文算法同样适用于HDR图像的色调映射,本文算法将图像分解后基本层进行对比度压缩,将细节放大后叠加到处理后的基本层上,如图11所示,本文算法合成的HDR图像整体明暗效果较好,细节信息丰富.



(a)原图像^[4]



(b)HDR效果

图11 HDR效果比较

4 结论

1)针对局部加权平均保边滤波法中存在的光晕问题,提出了显著局部平均梯度的保边滤波算法.

2)利用显著图增强边缘对比度的特点,采用了显著图局部窗口的平均梯度作为区域约束标准,实现自适应的平滑效果.

3)通过与经典保边滤波法进行比较,证实显著局部平均梯度的保边滤波算法在有效降噪和多尺度增强的同时,避免了光晕伪影的出现,并且在HDR方面也有较好表现.

参考文献

- [1] GONZALEZ R C. Digital image processing [M]. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education, 2009.
- [2] RUDIN L I, OSHER S, FATEMI E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms [J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 1992, 60(1): 259-268.

- [3] XU L, LU C, XU Y, et al. Image smoothing via L_0 gradient minimization [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2011, 30(6): 174.
- [4] PARIS S, HASINOFF S W, KAUTZ J. Local Laplacian filters: edge-aware image processing with a Laplacian pyramid [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2011, 30(4): 68.
- [5] PERONA P, MALIK J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 1990, 12(7): 629-639.
- [6] TOMASI C, MANDUCHI R. Bilateral filtering for gray and color images [C]//Computer Vision, 1998. Bombay: IEEE, 1998: 839-846.
- [7] SUBR K, SOLER C, DURAND F. Edge-preserving multi-scale image decomposition based on local extrema [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2009, 28(5): 147.
- [8] HE K, SUN J, TANG X. Guided image filtering [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [9] GU B, LI W, ZHU M, et al. Local edge-preserving multiscale decomposition for high dynamic range image tone mapping [J]. Image Processing, IEEE Transactions on, 2013, 22(1): 70-79.
- [10] CHRISTOPOULOS C, SKODRAS A, EBRAHIMI T. The JPEG2000 still image coding system: an overview [J]. Consumer Electronics, IEEE Transactions on, 2000, 46(4): 1103-1127.
- [11] HAN J, NGAN K N, LI M, et al. Unsupervised extraction of visual attention objects in color images [J]. Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on, 2006, 16(1): 141-145.
- [12] RUTISHAUSER U, WALTHER D, KOCH C, et al. Is bottom-up attention useful for object recognition? [C]//Computer Vision and Pattern Recognition, 2004 (CVPR 2004). Washington: IEEE, 2004:37.
- [13] 李志成, 秦世引, LAURENT I. 遥感图像的显著-概要特征提取与目标检测 [J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(6): 659-662.
- [14] ACHANTA R, HEMAMI S, ESTRADA F, et al. Frequency-tuned salient region detection [C]//Computer Vision and Pattern Recognition, 2009 (CVPR 2009). Miami: IEEE, 2009: 1597-1604.

(编辑 魏希柱)