CIE-Lab 空间的彩色图像混合去噪

余 博，郭 雷，钱晓亮，赵天云，程 塬

（西北工业大学 自动化学院，陕西 西安 710072）

摘 要： 针对彩色图像中的混合噪声提出一种 CIE-Lab 颜色空间的混合去噪算法。双边滤波对高斯噪声具有不错的抑制效果，然而其固有不足是不能处理脉冲噪声，文章采取逆向思维方法将这种不足用于彩色图像脉冲噪声的识别，并仅对识别出的脉冲噪声点在 CIE-Lab 空间采用概率密度极值滤波方法进行滤除，对剩余高斯噪声仍利用双边滤波算法处理。文中算法采用双边滤波这种非线性滤波算法处理高斯噪声同时仅对识别出的脉冲噪声点进行概率密度极值滤波，因此该算法具有保留图像边缘特征的特性。最后仿真实验表明，CIE-Lab 空间的混合滤波算法能够有效滤除高斯噪声和脉冲噪声，相比其他彩色图像噪声处理方法，该方法更为优越。

关 键 词： CIE-Lab 颜色空间，彩色图像，脉冲噪声，双边滤波

中图分类号： TP391.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000-2758(2012)06-0941-05

彩色图像包含有丰富的边缘、纹理等细节信息，因此对彩色图像进行滤波处理，一方面要滤除噪声，另一方面要尽可能保持色调和边缘等细节特征。彩色图像降噪处理中，不同类型的噪声通常有不同的滤波方法，而图像在生成、传输和编、解码处理中常会产生高斯噪声和脉冲噪声组成的混合噪声，因此研究彩色图像的混合滤波更具有实际意义。本文重点研究能够保持色调和保留边缘特征的彩色图像混合滤波方法。

双边滤波(BF)作为一种典型的非线性滤波器得到广泛应用[1]，相比各向异性扩散[2]等其它非线性方法，双边滤波具有简单非迭代的特点。文献[3]提出一种改进的双边滤波算法，该算法能够更加合理地设置亮度方差，较为理想的平衡滤除噪声和保留边缘特征之间的矛盾，但其仅能处理高斯噪声，对含有脉冲噪声的混合噪声无能为力；文献[4]提出一种能够处理混合噪声的非线性滤波器，该方法滤除混合噪声效果明显，但该方法主要针对红外图像，其标量的中值滤波并不适用于彩色图像。文献[5]对彩色图像的各种矢量中值滤波进行了总结，其中距离方向滤波器(DDF)和混合方向滤波(HDF)等能够处理彩色图像中的混合噪声，但这些方法都是对整幅图像进行滤波，容易造成图像模糊。本文提出一种 CIE-Lab 空间的混合滤波算法，该算法利用 BF 算法能够滤除高斯噪声但保留脉冲噪声的特点，将脉冲噪声点进行分离，采用概率密度极值滤波算法代替矢量中值滤波算法，避免了矢量中值运算中对矢量方向和矢量距离权值的选择。本文混合滤波器在 CIE-Lab 空间仅对双边滤波不能处理的脉冲噪声进行概率密度极值滤波，对高斯噪声仍采用非线性的双边滤波算法，所以本文算法在滤除噪声的基础上能够更好地保留图像边缘和细节特征，同时还可以避免彩色图像滤波时产生新的颜色。

1 CIE-lab 空间的双边滤波

在灰度图像滤波运算中，求和、平均等运算结果仍然是灰度值，而对于彩色图像，2 个像素点进行求和、平均等操作有可能出现与 2 个计算像素点不同的颜色，即所谓新的颜色点。比如对蓝色和红色求平均后可能会得到粉色或者紫色，因此对于彩色图像的滤波处理，不仅要考虑边缘和细节特征的模糊同时也要避免奇怪颜色(新颜色)的产生。CIE-Lab

收稿日期： 2011-12-10 **基金项目：** 国家自然科学基金(61273362)资助

作者简介： 余 博(1980—)，西北工业大学博士研究生，主要从事图像处理、模式识别、目标跟踪的研究。

彩色空间的双边滤波算法(LabBF)可以克服这种缺点,LabBF能够有效结合Lab空间3个通道的颜色信息来保留图像边缘和细节特征,并且不带来新的颜色。文中采用国际照明委员会于1976年推出的CIE-Lab颜色空间,其中L代表亮度,a和b一起表示色度,在这个颜色空间中任意两点(颜色)的距离可以均匀地表示它们之间的色差。与RGB颜色空间相比,Lab颜色空间具有感知上的均匀性,与人们对颜色的感知非常接近。因此,在CIE-Lab空间上的双边滤波是一种接近人类自然的滤波模型,仅对在感知上近似的颜色进行平均运算,对感知上较为重要的边缘和细节特征进行保留。这样的滤波方式是建立在人眼观测物体的基础上的,因此滤波结果更符合人眼观测特点,同时CIE-Lab空间进行双边滤波处理不会产生新的颜色,所以对于彩色图像LabBF是一种较为理想的滤波方式。

双边滤波(BF)由Tomasi和Manduchi于1998年提出[6],BF结合空域信息和颜色信息并进行非线性组合以处理邻域像素值[7],在CIE-Lab彩色空间中,双边滤波能够同时结合该空间3个分量,这种结合建立在CIE-Lab彩色空间的Euclidean距离之上,并且根据CIE-Lab彩色空间(L,a,b)分量值有效保留边缘和细节特征,而不带来新的颜色。CIE-Lab颜色空间的双边滤波定义如下

$$\hat{f}(q) = \frac{1}{w_H}\sum_{p\in\Omega} w_s(p)\, w_r(p)\, I(p) \tag{1}$$

式中,$\hat{f}$为滤波后的图像,w_H为归一化参数,Ω表示像素点q处的邻域范围,$w_s(p)$为p点空间域权值,$w_r(p)$为p点CIE-LAB颜色域权值,$I(p)$为彩色图像I在p点像素值,(1)式中

$$w_s(p) = \exp\left[-\frac{\|p-q\|}{2\sigma_s^2}\right] \tag{2}$$

$$w_r(p) = \exp\cdot\left[-\frac{\|L_p-L_q\| + \|a_p-a_q\| + \|b_p-b_q\|}{2\sigma_r^2}\right] \tag{3}$$

$$w_H = \sum_{p\in\Omega} w_s(p)\, w_r(p) \tag{4}$$

$$I = f + n \tag{5}$$

式中σ_s和σ_r分别为空间方差和颜色方差,(3)式中L_p、a_p、b_p和L_q、a_q、b_q分别为p和q点在CIE-Lab空间的3个分量。(5)式f为原始图像,n为加性噪声,I是噪声图像。

2 彩色图像双边滤波分析及算法设计

LabBF在保留图像边缘的同时能够很好滤除彩色图像中的高斯噪声,但其却对脉冲噪声无能为力。对于彩色图像中的高斯-脉冲混合噪声,LabBF会将高斯噪声滤除而把脉冲噪声保留下来,因此双边滤波存在滤除高斯噪声却不能滤除脉冲噪声的不足。但是逆向思考双边滤波这种不足,既然能够在滤除高斯噪声的基础上保留脉冲噪声,则可以将这种不足进行利用,在含有高斯-脉冲混合噪声的彩色图像中,利用双边滤波这种特性将高斯噪声和脉冲噪声进行分离,仅对分离出来的脉冲噪声进行有针对性的处理,而不需要对整幅图像进行脉冲噪声滤波,这样的方式可以减少图像模糊。这种方法相比开关矢量中值滤波方法,并不利用像素点固定的色度和亮度门限值判断脉冲噪声,而是将双边滤波不能处理的脉冲噪声(脉冲和椒盐噪声)进行识别,适用性更广。该算法对于混合噪声中的高斯噪声采用具有保留边缘特性的双边滤波算法进行处理,仅将分离出来的脉冲噪声点进行处理而不需对整幅图像进行去脉冲处理,因此这种算法具有保留边缘和细节特征的特性。

LabBF算法不能滤除脉冲噪声是由于引入颜色域权值w_r造成的,颜色域权值w_r作为对空间域权值w_s的限定,目的是使边缘和纹理区域由于和中心像素差别较大而取较小的权值,从而保留边缘信息,本文根据双边滤波颜色域权值的特点设置一种像素间的相似度,并以该相似度为基础将双边滤波不能滤除的强噪声点进行标记。

对于彩色图像中的像素点(x,y),$N_{xy}(R)$表示该像素点的像素区间,即

$$N_{xy}(R) = \{(x,y) \mid |x-i| \leqslant R, |y-i| \leqslant R\} \tag{6}$$

式中,$R(R\geqslant 0, R\in Z)$表示邻域范围。

对像素区间为$N_{xy}(R)$的像素点(x,y),其邻域像素记作为$B_{xy}(R)$,有

$$B_{xy}(R) = \{(i,j) \mid (i,j) \in (N_{xy}(R) - N_{xy}(0))\} \tag{7}$$

定义像素点(x,y)和其边界的相似度为$Bil_{xy}(R)$

$$Bil_{xy}(R) = \frac{\sum_{(i,j)\in B_{xy}(R)} \exp\left[-\frac{\|I(i,j)-I(x,y)\|}{2\sigma_u^2}\right]}{|B_{xy}(R)|} \tag{8}$$

式中，$\| I(i,j) - I(x,y) \|$ 定义为 CIE-Lab 彩色空间的 Euclidean 距离，I 为含有噪声的图像，$I(i,j)$ 表示图像 I 在位置 (i,j) 的像素值，(8) 式中 σ_u 为反应色差的一个统计参数，该参数能决定着多大的色差是双边滤波不能滤除的脉冲噪声点，$| B_{xy}(R) |$ 为邻域内像素点数量，是一个归一化的参数。

设定脉冲噪声点的判定条件为:

1) $Bil_{xy}(R) < T_s$

2) $num\left(\exp\left[-\frac{\| I(i,j) - I(x,y) \|}{2\sigma_u^2}\right] < T_s\right) > T_r \quad (i,j) \in B_{xy}(R)$

T_s 和 T_r 为预设的阈值，$num\{\cdot\}$ 表示满足括号内条件的元素数。当中心像素点同时满足上述 2 个判定条件时，即认为该像素点为脉冲噪声点。判定条件中将 $I(i,j) - I(x,y) \geqslant \sigma_r$ 的点作为强噪声点，为了与双边滤波的色差一致，统计参数取 $\sigma_u = \sigma_r$，代入(8) 式有 $T_s = 0.607$。如果需要更加严格的判断强噪声点，可以增大 σ_u 并计算对应的 T_s。

条件 2) 是对中心像素点与邻域像素相似度的判断。脉冲噪声一般与邻域像素有较大差异，因此不仅要计算平均相似度，还需要与邻域像素进行比较。文中 T_r 为中心点和边界像素的差异阈值，经过大量实验验证，当 $T_r \geqslant | B_{xy}(R) | /2$ 时，都能较准确地判定强噪声点，本文取 $T_r = | B_{xy}(R) | /2$。

3　概率密度极值的彩色图像去噪

对于彩色图像中的脉冲噪声点不能采用灰度图像的中值滤波算法进行处理，这是因为对于具有 3 个分量的彩色图像，无法将其进行排序，如果对 3 个分量分别进行中值滤波，然后再合并产生新的彩色图像，这种方法没有利用彩色图像 3 个分量之间的内在联系，会产生新的与局部颜色不协调的颜色，而破坏图像的色调和边缘细节。因此在彩色图像中普遍采用矢量滤波算法，其中应用较为广泛的有矢量中值滤波器 VMF、矢量方向滤波器 BVDF、距离方向滤波器 DDF 和混合方向滤波 HDF 等[8]，VMF 采用 Euclidean 距离，它基于输入矢量的模最大可能估计; BVDF 基于角度距离，它来自于输入矢量方向的最大可能估计; DDF 是 VMF 和 BVDF 的综合，目的是既去除矢量模相差较大的像素又消除色调相差较大的噪声像素; HDF 先计算当前像素点的 VMF 和 BVDF，然后按照一定规则进行组合作为自己的输出。从其原理看上述方法都有局限性，VMF 仅能有效去除矢量模相差较大的噪声，VDF 仅能有效去除色调相差较大的像素，DDF 需要设定一个比例因子，HDF 理论上可以同时有效消除各种噪声，但是组合规则的建立是一个难点。本文采用基于概率密度极值的彩色图像滤波算法，该算法能避免 VMF、DDF 和 HDF 的局限性，也不需要设定比例因子和建立组合规则即可完成彩色图像脉冲噪声抑制。

Meanshift 算法[9] 的核心是根据概率密度梯度的方向进行均值漂移，通过迭代而达到局部概率密度极大值处，这里参考 meanshift 算法原理，但为了简化计算过程，避免迭代操作，仅计算滤波窗口内概率密度最大值并将其对应的颜色值与当前噪声点进行替换。这种方法在彩色图像处理中能够避免求和、平均等运算，仅将概率密度最大的颜色值与当前点进行替换，因此不会产生新的颜色，同时在大多数情况下，概率密度最大的颜色值与灰度图像的中值是一致的，因此该算法能部分代替中值滤波。

在 RGB 空间中 2 个像素点(2 种颜色) 之间的距离与对 2 种颜色色差的感知是高度非均匀的，直接在 RGB 颜色空间中进行概率密度估计容易造成很小的颜色距离而带来很大色差，CIE-Lab 空间相比 RGB 空间其空间色度为均匀分布，为了减少概率密度计算量，对 CIE-Lab 进行空间重新量化，可以根据不同要求仅计算亮度空间 L 分量或者 2 个色彩空间 a 和 b 分量的概率密度，应用更加灵活，因此本文概率密度估计在 CIE-Lab 颜色空间进行。

设 $\{x_i^* \mid i = 1,2,3,\cdots,n\}$ 为待滤波像素邻域内像素，中心位置为 x_0，其概率密度表示为 $\hat{q} = \{\hat{q}_{(L_i,a_i,b_i)}\}$，$(L,a,b)$ 为 CIE-Lab 空间的 3 个分量。则在局部邻域内特征值 (L_i,a_i,b_i) 出现的概率密度估计为

$$\hat{q}_{(L_i,a_i,b_i)} = C\sum_{i=1}^{n} k\left(\left\|\frac{x_i^* - x_0}{h}\right\|^2\right) \cdot \delta\left[b(x_{L_i}^*) - L_i\right]\delta\left[b(x_{a_i}^*) - a_i\right]\delta\left[b(x_{b_i}^*) - b_i\right] \tag{9}$$

式中，n 为目标的像素数，$k(\cdot)$ 为核函数，该核函数的作用是为各点加权，离中心点越远，其权值越小，核函数在利用概率密度估计进行滤波时使得离中心点越近的点占的比重越大，这样的处理会更加鲁棒，x_i^* 是第 i 个像素的坐标，h 为核函数带宽，δ 是 Kronecker delta 函数，$\delta[b(x_i) - L_i]$ 用来判断像素

点 x 的在 L 分量中的特征值是否为 L_i，$b(x_i^*)$ 为将 x_i^* 处像素对应彩色直方图中的索引，C 是归一化系数，其中

$$C = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} k\left(\left\|\frac{x_i^* - x_0}{h}\right\|^2\right)} \tag{10}$$

在滤波窗口内，每种颜色的像素在颜色空间中的分布都有一个密度最大的点，将密度最大的点与当前点进行替换即完成概率密度极值滤波算法。即在点 (x,y) 处，概率密度估计滤波器的平滑结果为

$$P_{(x,y)} = \max(\hat{q}) \tag{11}$$

概率密度极值滤波算法的本质意义是如果用一个颜色来描述一个区域或者一个像素点的邻域，那么将这个区域内拥有的最多像素值来描述该邻域。

4 仿真实验

为了验证本算法的有效性，对 peppers 彩色原图添加均值为 0，σ_n 为 0.05 的高斯噪声和密度为 0.02 的脉冲噪声，分别采用 VFM、BVDF、DDF、HDF、LabBF 和本文算法对含有混合噪声的 peppers 图像进行滤波处理，本文算法滤波结果分别与 VFM、BVDF、DDF、HDF、LabBF 算法处理结果进行对比。本文利用尖峰信噪比 PSNR 对各算法滤波结果进行客观对比，对于彩色图像 PSNR 定义如(12)式[7]

$$\mathrm{PSNR} = 10\log_{10} \cdot \left(\frac{255^2}{\frac{1}{3HW}\sum_{i=1}^{H}\sum_{j=1}^{W} \|\hat{f}(i,j) - f(i,j)\|_2^2}\right)\mathrm{dB} \tag{12}$$

式中 $\hat{f}(i,j)$ 为滤波后图像，$f(i,j)$ 为原始图像，H 和 W 是图像的高和宽。在 peppers 彩色图像分别叠加 σ 为 0.01 ~ 0.10 高斯噪声以及密度为 0.01 ~ 0.05 脉冲噪声，图 1 为统计出的各算法滤波结果 PSNR 曲线。

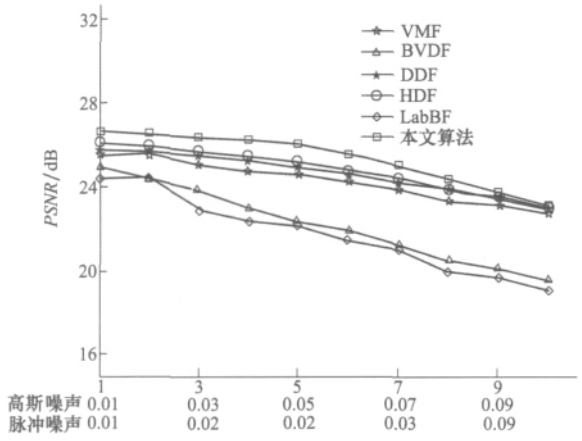


图 1 各算法 PSNR 图

由于 LabBF 不能处理脉冲噪声，所以在各个点 PSNR 值最低，HDF 将 VMF 和 BVDF 结果组合进行输出，因此相比 VMF 和 BVDF 性能较好，本文算法由于采用双边滤波这种非线性滤波方法，同时仅对检测出的脉冲噪声进行识别，图像损失最少，算法性能最佳。

5 结 论

普通双边滤波对高斯噪声具有不错的抑制效果，然而其固有不足是不能处理脉冲噪声。本文采取逆向思维方法，将不能处理脉冲噪声的不足加以利用，使其用于识别彩色图像中的脉冲噪声，从而提出的一种 CIE-Lab 空间彩色图像混合滤波算法，该算法弥补了双边滤波在处理脉冲噪声的不足，可以抑制各种类型的点状噪声和由其组成的混合噪声，且并不降低双边滤波保留边缘和细节特征的性能。最后仿真实验表明本文算法相比其它彩色图像处理算法性能更为优越。

参考文献:

[1] Fleishman S, Drori I, et al. Bilateral Mesh Denoising. ACM Trans on Graphics, 2003, 22(3): 950-953

[2] Yu Jinhua, Wang Yuanyuan, Shen Yuzhong. Noise Reduction and Edge Detection via Kernel Anisotropic Diffusion. Pattern Recognition Letters, 2008, 10(29): 1496-1503

[3] 张志强，王万玉. 一种改进的双边滤波算法. 中国图形图像学报, 2009, 14(3): 443-447
Zhang Zhiqiang, Wang Wanyu. A Modified Bilateral Filtering Algorithm. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(3): 443-447 (in Chinese)

[4] 刘潮东,史忠科. 各向异性扩散-中值滤波在红外图像处理中的应用. 弹箭与制导学报, 2006, 26(3): 198-200
Liu Chaodong, Shi Zhongke. Anisotropic Diffusion-Median Filter for Infrared Image. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 26(3): 198-200 (in Chinese)

[5] 金良海,姚行中,李德华. 彩色图像矢量滤波技术综述. 中国图象图形学报,2009,14(2): 243-254
Jin Lianghai, Yao Xingzhong, Li Dehua. A Survey on Color Image Vector Filtering Technique. Journal of Image and Graphics, 2009,14(2): 243-254 (in Chinese)

[6] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral Filtering for Gray and Color Images. Proceedings of the International Conference on Computer Vision, Bombay, India, 1998, 7-7

[7] Paris S, Kornprobst P, Tumblin J, Durand F. A Gentle Introduction to Bilateral Filtering and Its Applications. ACM Siggraph 2007 Courses, California, USA, 2007

[8] 金良海,李德华. 一种基于空间距离加权的自适应矢量中值滤波器. 中国图象图形学报, 2007,12(6): 970-976
Jin Lianghai, Li Dehua. An Adaptive Spatial Distance-Weighted Vector Median Filter. Journal of Image and Graphics, 2007,12(6): 970-976 (in Chinese)

[9] Comaniciu D, Meer P. Mean Shift: a Robust Approach toward Feature Space Analysis. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(5): 603-619

An Effective De-Noising Algorithm in CIE-Lab Color Space Using Hybrid Filtering

Yu Bo, Guo Lei, Qian Xiaoliang, Zhao Tianyun, Cheng Gong
(Department of Automatic Control, Northwestern Polytechnical University, Xi´an 710072, China)

Abstract: Bilateral filtering is effective for suppressing Gaussian noise but cannot filter out impulse noise. So we propose a de-noising algorithm mentioned in the title, which we believe is effective for suppressing both Gaussian noise and impulse noise. Sections 1 through 3 explain our de-noising algorithm and their core consists of: the bilateral filter has a good effect for suppressing the Gaussian noise but not for impulse noise; the recognized impulsive noise points are suppressed by the filtering based on the maximum of probability density and the remaining Gaussian noise points are still suppressed by bilateral filter; since the bilateral filter is nonlinear and only the recognized impulse noise points are filtered out differently, our algorithm can retain most of the edge features. The simulation results, presented in Fig. 1, and their analysis demonstrate the superiority of our method in suppressing the mixed noises, which consist of Gaussian noise and impulse noise, compared with the other de-noising methods of color image.

Key words: algorithms, color image processing, computer simulation, computer vision, design, probability; bilateral filtering, CIE-Lab space, impulse noise