

双边滤波算法的太赫兹共焦扫描图像去噪应用

杨永发 李琦

哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 由于共焦针孔的加入及现有太赫兹激光器输出不稳定,太赫兹共焦扫描显微成像所得图像的质量不高,将双边滤波算法应用于透射式太赫兹共焦扫描显微成像图像去噪复原,通过研究确定了适合于该情况的双边滤波参数,并且与中值滤波、均值滤波和开运算滤波的滤波性能进行比较,证明了双边滤波算法应用于透射式太赫兹共焦扫描显微成像图像去噪复原的可行性。

关键词 成像系统; 太赫兹; 透射式共焦扫描; 双边滤波; 图像去噪

中图分类号 TN29 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.121101

Application of Bilateral Filtering Algorithm on Terahertz Confocal Scanning Image Denoising

Yang Yongfa Li Qi

*National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150080, China*

Abstract Due to the addition of confocal pinholes and the unstable output of terahertz laser currently, the performance of terahertz confocal scanning microscopic imaging is not high. The bilateral filtering algorithm is applied to the image denoising of transmission type terahertz confocal scanning microscopic imaging. Through the experiment, the bilateral filtering parameters are calculated to fit this situation. Moreover, through the comparison of the filtering performance with median filtering, average filtering and open operation filtering, it is proved that the bilateral filtering algorithm is feasible to apply for image denoising of transmission type terahertz confocal scanning microscopic imaging.

Key words imaging systems; terahertz; transmission type confocal scanning; bilateral filtering; image denoising

OCIS codes 110.6795; 100.3008; 180.1790

1 引言

太赫兹共焦扫描显微成像,将太赫兹辐射^[1]与共焦扫描显微成像技术结合,能有效地发挥二者优势,理论上能够获得空间分辨率、对比度和清晰度均较高的图像。但是,由于共焦小孔的加入增大了成像系统的能量损耗,图像信噪比(SNR)降低,导致成像结果受噪声影响较大;并且由于现有太赫兹激光器的稳定性不高,当成像扫描过程时间较长时,激光器的功率漂移会导致扫描结果背景灰度分布不均匀^[2]。为了改善图像质量,可以使用数字图像去噪复原处理的手段来提高扫描图像质量。

双边滤波(BF)算法同时考虑像素的空间邻近度和灰度值相似度,可以在较好的保持目标边缘轮廓的前提下去除噪声^[3],已在许多领域中得到应用^[4-9],取得了较好的效果。而双边滤波参数的选择对双边滤波的效果影响很大,如何在无法获取原始干净图像的前提下找到最佳参数是去噪的关键^[10]。

基于 Matlab 语言和环境下将双边滤波算法应用于真实透射式太赫兹共焦扫描显微成像的图像去噪处理,通过实验分析,找到适合于该情况下的滤波参数,并且将滤波结果与中值滤波、开运算滤波的结果进行对比,初步研究了双边滤波算法用于太赫兹共焦扫描成像图像处理的可行性。

收稿日期: 2015-05-22; 收到修改稿日期: 2015-07-06; 网络出版日期: 2015-11-13

作者简介: 杨永发(1990—),男,硕士研究生,主要从事太赫兹技术方面的研究。E-mail: yangyongfa_sky2013@126.com

导师简介: 李琦(1963—),女,博士,教授,主要从事激光与太赫兹成像及图像处理等方面的研究。

E-mail: liqi2013@hit.edu.cn (通信联系人)

2 基本原理

双边滤波算法(BF)类似于高斯平滑滤波,也是由像素的加权平均来实现的^[11],与之不同的是,双边滤波同时考虑两个像素空间上的邻近关系和灰度值上的相似性。

令 I 代表原图像, S 代表图像中一个方形区域, q 是其中一个像素,则 S 中像素 p 经过双边滤波处理的结果表示为^[10]

$$B_f[I]_p = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in S} G_{\sigma_d}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(I_p - I_q) I_q, \quad (1)$$

式中 W_p 是一个归一化因子^[10],

$$W_p = \sum_{q \in S} G_{\sigma_d}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(I_p - I_q), \quad (2)$$

(1)式为归一化加权平均式,式中 G_{σ_d} 是一个空间的距离函数,若 q 距离考察点 p 越远,则其值越小; G_{σ_r} 是一个灰度值范围函数,若 q 灰度值与 I_p 相差越大,则其值越小。一般情况下,二者都取参数是欧氏距离的高斯函数,定义为^[10]

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{\sigma_d} = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{d(p, q)}{\sigma_d} \right]^2 \right\} \\ G_{\sigma_r} = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{\delta[I(p) - I(q)]}{\sigma_r} \right]^2 \right\} \end{array} \right. \quad (3)$$

式中 $d(p, q)$ 、 $\delta[I(p) - I(q)]$ 分别是两个像素点 p 和 q 之间的空间欧氏距离和灰度值差。

参数 σ_r 和 σ_d 是标准差,用以衡量图像 I 的去噪程度,二者都是基于高斯函数的标准差,决定了双边滤波算法的滤波性能。由于双边滤波算法公式中的两个高斯函数是乘积关系,那么只要当其中一个函数的标准差接近于零时(也就是 σ_r 或 σ_d 为 0 时),结果中就会出现不平滑的现象。据文献[12]报道, σ_r 的变化比 σ_d 更能影响图像的细节,在改变图像的噪声水平方面更加重要。因此,参数 σ_r 和 σ_d 的取值对双边滤波的效果影响很大。

文献[13]提出, σ_r 与图像中的噪声标准差 σ_n 大致存在线性关系 $\sigma_r = 1.95\sigma_n$,由于 σ_d 对去噪影响不大,取 $\sigma_d = 2$ 左右时,可以得到最佳结果。但是在噪声很小的情况下,依据该线性关系并不能得到最佳去噪效果。目前,针对不同的图像以及不同程度的噪声,仍要通过实验来确定其最佳滤波参数。

在图像质量客观评价中,应用信噪比进行分析,其数学定义为

$$f_{\text{SNR}} = \frac{\mu}{\sigma}, \quad (4)$$

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^M f(i)}{M}, \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M [f(i) - \mu]^2}{M}}, \quad (5)$$

式中 μ 和 σ 分别是所计算的像素数为 M 的图像 f 的灰度均值和标准差, $f(i)$ 表示图像的第 i 个像素对应的灰度值。

为检验本文方法的边缘保持程度,使用 Canny 算子进行边缘检测。相比于其他边缘检测算子,该算子在每一点处计算局部梯度 $g = [G_x^2 + G_y^2]^{1/2}$ 和边缘方向 $\alpha(x, y) = \arctan(G_y/G_x)$,其中, G_x 和 G_y 分别是在 x 和 y 方向上的一阶导数。这将导致图像出现脊,然后算法追踪所有脊的顶部,将所有不在脊顶的像素灰度值设为零,最后在输出中给出一条细线。该过程使用阈值 T_1 和 T_2 ($T_1 < T_2$) 做阈值处理,像素值大于 T_2 的像素称强边缘像素, T_1 和 T_2 之间的称弱边缘像素。该算法通过将弱边缘集成到强边缘,完成边缘连接。

3 滤波参数分析及算法比较

3.1 双边滤波参数确定

原图像是经透射式太赫兹共焦扫描显微成像系统得到的背景抑制后的含噪图像,如图 1 所示。

基于图 1,利用(3)式得到 G_{σ_r} 及 G_{σ_d} ,同时通过循环语句计算(1)式和(2)式得到最终滤波结果,双边滤波

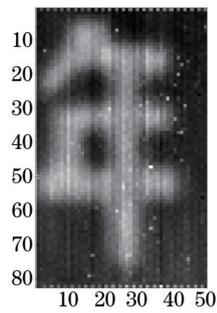


图1 原图像经过背景抑制后的结果

Fig.1 Result of original image after background suppression

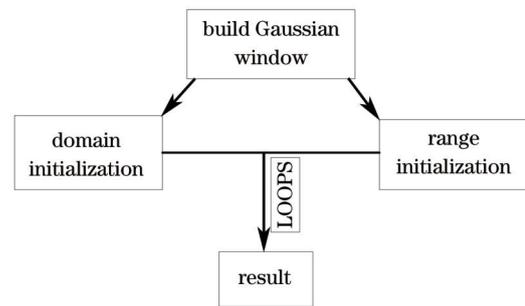


图2 双边滤波算法流程图

Fig.2 Flow block diagram of bilateral filtering algorithm

算法流程图如图2所示。

采用控制变量的手段,分别得到参数 σ_d 和 σ_r 的取值对双边滤波算法滤波性能的影响。

1) 参数 σ_d 对双边滤波算法滤波性能的影响。当 $\sigma_d = 1.8$ 时,将 σ_r 分别设为 0.3、0.5 和 0.7,对图1进行双边滤波,并且对滤波结果应用 Canny 算子进行边缘检测,所得结果如图3和图4所示。

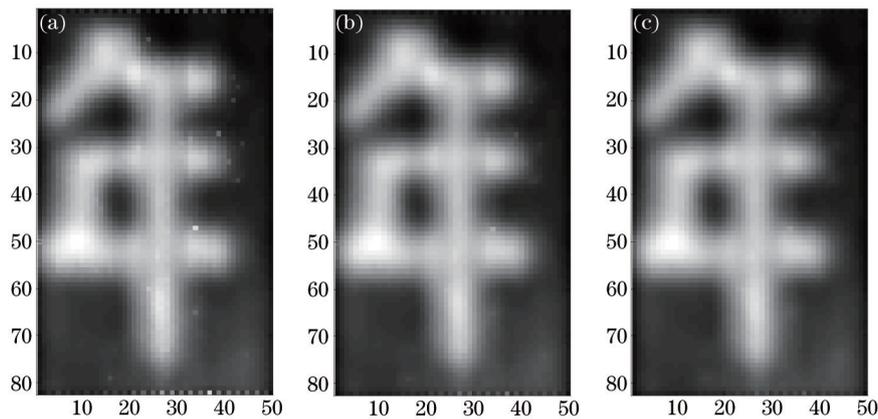
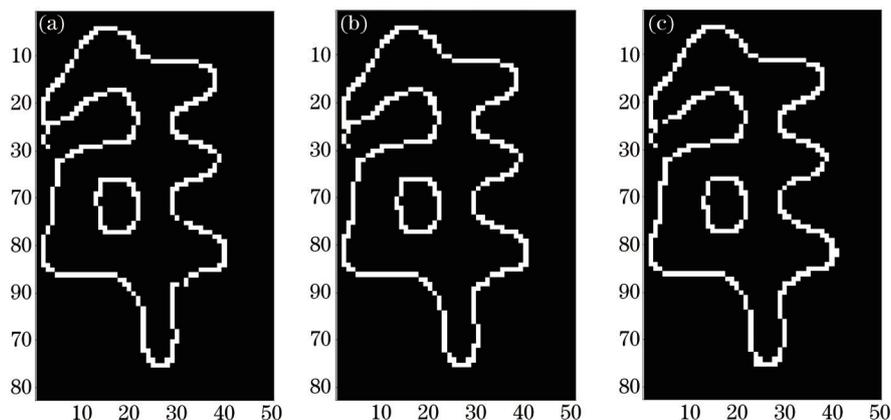
图3 $\sigma_d = 1.8$ 时滤波结果。(a) $\sigma_r = 0.3$; (b) $\sigma_r = 0.5$; (c) $\sigma_r = 0.7$ Fig.3 Filtering results when $\sigma_d = 1.8$. (a) $\sigma_r = 0.3$; (b) $\sigma_r = 0.5$; (c) $\sigma_r = 0.7$ 图4 图3的边缘检测结果。(a) $\sigma_r = 0.3$; (b) $\sigma_r = 0.5$; (c) $\sigma_r = 0.7$ Fig.4 Edge detection results of Fig.3. (a) $\sigma_r = 0.3$; (b) $\sigma_r = 0.5$; (c) $\sigma_r = 0.7$

图3为 $\sigma_d = 1.8$ 时的滤波结果,图4为图3经边缘检测后得到的结果。当 $\sigma_r = 0.5$ 时,边缘检测的两个阈值大小分别为 $T_1 = 0.2313$, $T_2 = 0.5871$ 。由表1分析可知,标准差 S 随着 σ_r 的增大而减小,意味着图像对比度在下降,这也可以从图3中主观观察得到,即图3中各图像目标的清晰程度随着 σ_r 的增大而减弱;同时,由表1得到,信噪比随着 σ_r 的增大而增大,意味着图像的去噪能力在增强,这也可以从图3中主观观察得到,即图3中各图像中噪声的污染程度随着 σ_r 的增大而减弱。

表1 σ_r 取不同值时的均值、标准差及信噪比Table 1 Comparisons of means, standard deviations and SNR when σ_r is changing

σ_r	Mean	Standard deviation	SNR
0.3	81.3044	44.5291	1.8259
0.5	81.2200	44.1515	1.8396
0.7	81.2327	44.0501	1.8441

通过比较,希望能在保证图像去噪效果的同时,得到更高的图像对比度,因此 $\sigma_r = 0.5$ 是最佳的取值。

2) 参数 σ_r 对双边滤波算法滤波性能的影响。当 $\sigma_r = 0.5$ 时,将 σ_d 分别设为 1.6、1.8 和 2.0,对图 1 进行双边滤波,并且对滤波结果应用 Canny 算子进行边缘检测,所得结果如图 5 和图 6 所示。

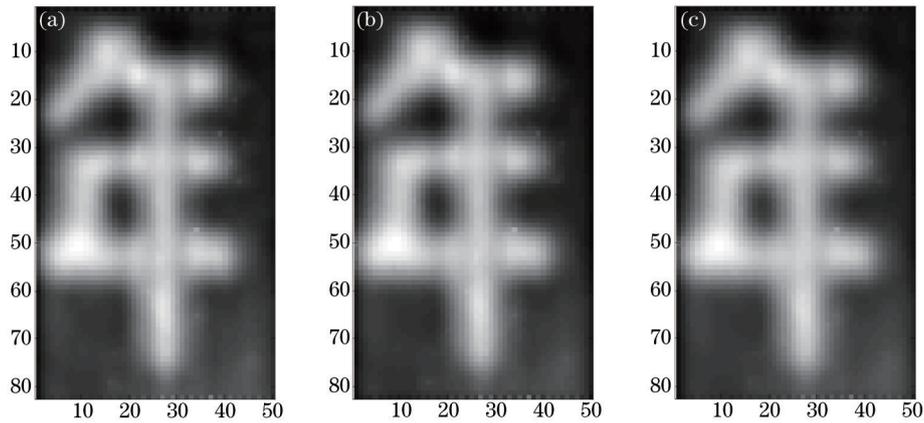
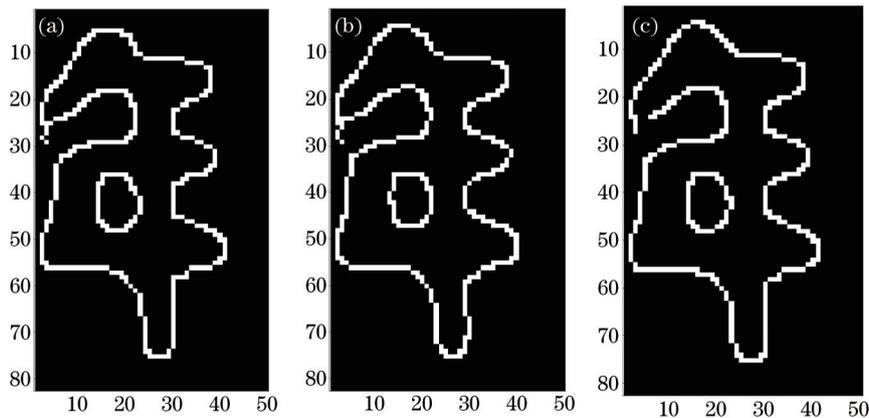
图5 $\sigma_r = 0.5$ 时滤波结果。(a) $\sigma_d = 1.6$; (b) $\sigma_d = 1.8$; (c) $\sigma_d = 2$ Fig.5 Filtering results when $\sigma_r = 0.5$. (a) $\sigma_d = 1.6$; (b) $\sigma_d = 1.8$; (c) $\sigma_d = 2$ 图6 图5的边缘检测结果。(a) $\sigma_d = 1.6$; (b) $\sigma_d = 1.8$; (c) $\sigma_d = 2$ Fig.6 Edge detection results of Fig.5. (a) $\sigma_d = 1.6$; (b) $\sigma_d = 1.8$; (c) $\sigma_d = 2$

图 5 为 $\sigma_r = 0.5$ 时的滤波结果,图 6 为图 5 经边缘检测后得到的结果。由表 2 分析可知,标准差 S 随着 σ_d 的增大而减小,意味着图像对比度在下降,这也可以从图 5 中主观观察得到,即图 5 中各图像目标的清晰程度随着 σ_d 的增大而减弱;同时,由表 2 得到,信噪比随着 σ_d 的增大而增大,意味着图像的去噪能力在增强,图 5 中各图像噪声的污染程度随着 σ_d 的增大而减弱。由图 6 可知,随着 σ_d 的增大,边缘检测结果也越来越差。

表2 σ_d 取不同值时的均值、标准差及信噪比Table 2 Comparisons of means, standard deviations and SNR when σ_d is changing

σ_d	Mean	Standard deviation	SNR
1.6	81.3237	44.8475	1.8134
1.8	81.2200	44.1515	1.8396
2.0	80.8683	43.7237	1.8495

因此,为得到更高的图像对比度, $\sigma_d = 1.8$ 是最佳的取值。综上所述, $\sigma_d = 1.8$, $\sigma_r = 0.5$ 为原图像的最佳

滤波参数。

3.2 双边滤波算法与其他传统算法的比较

为了表明双边滤波算法应用于透射式太赫兹共焦扫描显微成像图像处理的可行性,将滤波结果与传统去噪方法进行对比。

在实验中,双边滤波采用 $\sigma_d=1.8$ 和 $\sigma_r=0.5$ 为最佳滤波参数,中值滤波和均值滤波窗口大小均为 3×3 ,开运算滤波的结构元素为各元素皆为 1 的 3×3 矩阵。同样,所有滤波都是在背景抑制后进行的。所得滤波结果如图 7 所示,图 8 为图 7 的 Canny 边缘检测结果。

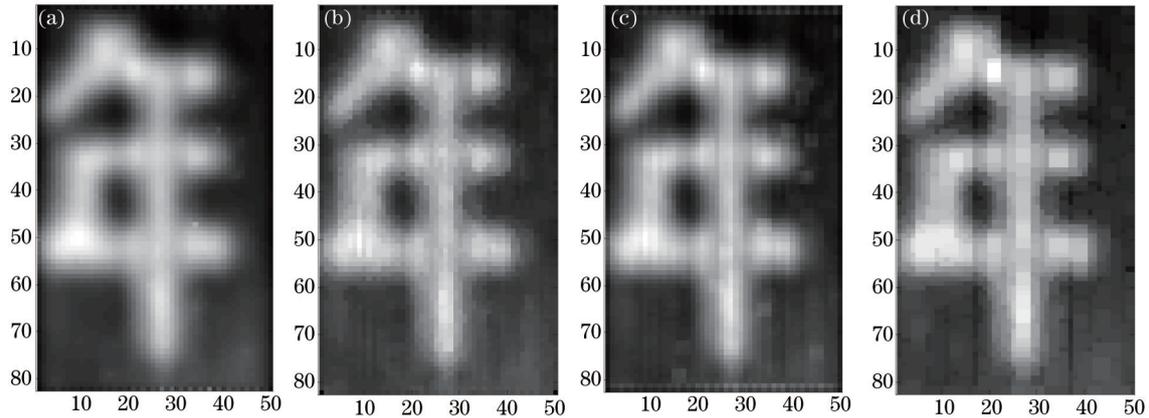


图 7 双边滤波算法与其他算法的比较。(a)双边滤波;(b)中值滤波;(c)均值滤波;(d)开运算滤波

Fig.7 Comparisons of BF method with other filtering methods. (a) BF; (b) median filtering; (c) average filtering; (d) open operation filtering

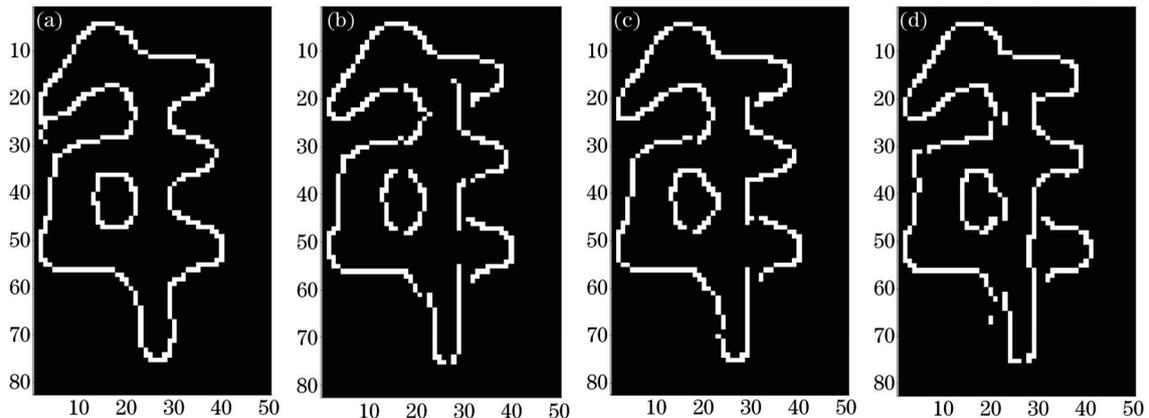


图 8 图 7 的边缘检测结果。(a)双边滤波;(b)中值滤波;(c)均值滤波;(d)开运算滤波

Fig.8 Edge detection results of Fig.7. (a) BF; (b) median filtering; (c) average filtering; (d) open operation filtering

利用(4)式可以得到四种算法滤波结果的均值、标准差和信噪比,比较各滤波算法的去噪性能,如表 3 所示。

表 3 四种算法滤波性能比较

Table 3 Filter performance comparisons of four methods

	Bilateral filter	Median filter	Average filter	Open operation filter
Mean	81.2200	81.2241	82.1173	75.8298
Standard deviation	44.1515	46.3392	46.1362	45.2281
SNR	1.8396	1.7528	1.7799	1.6766

从图 7 中可以看到,双边滤波算法的滤波效果明显优于上述其他算法,在目标清晰程度上,双边滤波、均值滤波、中值滤波及开运算滤波依次减弱。从图 8 可以观察到,双边滤波对图像细节的保持最好,并且从表 3 可知,双边滤波的信噪比在四种滤波算法中最高。比较双边滤波和作为高斯滤波特例的均值滤波结果可以看出,正是由于双边滤波同时考虑两个像素空间上的邻近关系和灰度值上的相似性,所以其去噪和边缘保持性能都较好于均值滤波。

综上,双边滤波在主观和客观图像质量评价上均优于其他三种算法,因此,在透射式太赫兹共焦扫描显微成像图像处理中,应用双边滤波可以改善图像质量。

4 结 论

将双边滤波算法应用于透射式太赫兹共焦扫描显微成像图像去噪复原,通过实验确定了当双边滤波参数为 $\sigma_d = 1.8$, $\sigma_r = 0.5$ 时,信噪比由原来的 1.7159 提高到 1.8396,对原图像的滤波性能最佳,并且与中值滤波、均值滤波和开运算滤波的滤波性能进行了比较,结果显示双边滤波算法在主观和客观图像质量评价上均好于其他三种算法。

参 考 文 献

- 1 Zheng Xianhua, Wang Xinke, Sun Wenfeng, *et al.*. Developments and applications of the terahertz digital holography[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209003.
郑显华,王新柯,孙文峰,等.太赫兹数字全息术的研发与应用[J].中国激光,2014,41(2):0209003.
- 2 Li Qi, Yang Yongfa, Hu Jiaqi. A composite algorithm used for terahertz confocal scanning image restoration[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(1): 321-326.
李琦,杨永发,胡佳琦.一种用于太赫兹共焦扫描图像复原的复合算法[J].红外与激光工程,2015,44(1):321-326.
- 3 Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images[C]. Computer Vision, Sixth International Conference on IEEE, 1998: 839-846.
- 4 Qiu Yu, Tian Fengchun, Chen Jianjun, *et al.*. An improved denoising method for 4f optical system based on bilateral filter [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(2): 514-520.
邱宇,田逢春,陈建军,等.一种基于双边滤波的4f光学系统图像去噪方法[J].中国激光,2010,37(2):514-520.
- 5 Zhou Yuren, Geng Aihui, Wang Ying, *et al.*. Contrast enhanced fusion of infrared and visible images[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0909001.
周渝人,耿爱辉,王莹,等.基于对比度增强的红外与可见光图像融合[J].中国激光,2014,41(9):0909001.
- 6 Li Jincai, Huang Sixun, Peng Yuxing, *et al.*. A novel method to configure the parameters of the bilateral filtering for synthetic aperture radar images speckle reduction[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(11): 119501.
李金才,黄思训,彭宇行,等.一种用于合成孔径雷达图像相干斑抑制的双边滤波参数配置新方法[J].物理学报,2012,61(11):119501.
- 7 Cao Jianzhong, Zhou Zuofen, Tang Yao, *et al.*. Image denoising algorithm based on bilateral filtering and dual tree complex wavelet[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(9): 1712-1715.
曹剑中,周祚峰,唐垚,等.基于双边滤波和双树复小波的图像去噪算法[J].光子学报,2010,39(9):1712-1715.
- 8 He Ming, Wang Yadi, He Jing, *et al.*. Non-uniformity correction algorithm based on bilateral filter histogram equalization [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(10): 2620-2624.
贺明,王亚弟,贺菁,等.双边滤波直方图均衡的非均匀性校正算法[J].红外与激光工程,2013,42(10):2620-2624.
- 9 Zhang Chuang, Chi Jiannan, Zhang Zhaohui, *et al.*. Removing noise of color images based on edge detection and bilateral filter[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(8): 1776-1783.
张闯,迟健男,张朝晖,等.基于边缘检测与双边滤波的彩色图像去噪[J].电子学报,2010,38(8):1776-1783.
- 10 Wang Yuling. Study of Algorithm in Image Processing Based on the Bilateral Filter[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
王玉灵.基于双边滤波的图像处理算法研究[D].西安:西安电子科技大学,2010.
- 11 Aurich V, Weule J. Non-Linear Gaussian Filters Performing Edge Preserving Diffusion[M]. Heidelberg: Springer, 1995: 538-545.
- 12 Zhang M, Gunturk B. A new image denoising method based on the bilateral filter[C]. Acoustics, Speech and Signal Processing, International Conference on IEEE, 2008: 929-932.
- 13 Liu C, Freeman W T, Szeliski R, *et al.*. Noise estimation from a single image[C]. Computer Vision and Pattern Recognition, 2006 IEEE Computer Society Conference on, 2006, 1: 901-908.

栏目编辑: 苏 岑