

基于局部自适应拉升窗的复合图像增强算法

李 成 鞠 明 毕 笃 彦 刘 波

(空军工程大学工程学院信号与信息处理实验室, 陕西 西安 710038)

摘要 针对含有低亮度低对比度区域的图像, 提出基于局部自适应拉升窗(LASW)的复合图像增强算法。通过研究目前一系列基于局部操作的空域图像增强算法, 提出全局和局部操作结合的总体思路; 首先使用高提升拉普拉斯(Laplacian)反锐化掩模(UM)增强以获得较多的隐藏细节和边缘信息, 然后构造局部自适应拉升窗大幅增强低对比度图像细节, 同时使用自适应滤波器进行掩模平滑操作; 最后根据局部增强结果进行全局修正。仿真实验表明, 在绝对误差、图像熵等评价指标下, 该算法使低对比度图像尤其当含有低亮度微弱局部信息时, 获得了较好的增强效果。

关键词 图像处理; 图像增强; 局部自适应拉升窗; 反锐化掩模; 直方图均衡

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092910.2756

Composite Image Contrast Enhancement Algorithm Based on Local Adaptive Stretching Window

Li Cheng Ju Ming Bi Duyan Liu Bo

(Signal & Information Processing Laboratory, Engineering College of Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

Abstract Images suffering from poor luminance and contrast need enhancement before further processing or analysis. An algorithm based on local adaptive stretching window (LASW) technique is proposed. Since spatial contrast enhancement techniques by local manipulations show the pros and cons, the method combined with local and global manipulations is much more reasonable. Firstly, the high boost Laplacian unsharp mask (UM) operator is conducted for more hiding and edged information, then the LASW is operated on low contrast regions to develop details, and a locally adaptive filter is used to smooth the image further. At last, the global contrast adjustment is made after local manipulations. Experimental results show the good performance of the proposed algorithm with measure rules of enhancement by absolute mean brightness error and entropy, especially in the case of weak and low-contrast information in the image.

Key words image processing; image enhancement; local adaptive stretching window (LASW); unsharp mask (UM); histogram equalization (HE)

1 引 言

图像增强是图像预处理的重要环节, 虽然它并不会增加图像数据中的先验信息量, 但可以综合选择特征的动态范围和锐化程度两方面, 从而使感兴趣的特征更容易地被检测或识别^[1]。

目前诸多传感器系统在成像时由于种种原因没

有充分达到设备的最大亮度范围, 导致生成的图像往往存在低亮度低对比度区域(含有感兴趣目标和细节), 严重影响了图像的主观效果。所以针对此类图像, 能够提升低对比度区域清晰度和提高图像判读精度的增强方法一直是研究的热点^[2,3]。

图像增强方法基本上可分为空域处理和频域处

收稿日期: 2009-01-13; 收到修改稿日期: 2009-03-24

基金项目: 国家 863 计划(2007AA701121)资助课题。

作者简介: 李 成(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事图像处理与模式识别方面的研究。E-mail: ecm_li@163.com

导师简介: 毕笃彦(1962—)男, 教授, 博士生导师, 主要从事图象处理与模式识别方面的研究。

理两类。空域处理是在原图像上直接进行数据处理,基于直方图操作的算法如直方图均衡(HE)是广泛采用的技术。但 HE 等基础方法是对图像整体操作,实际中往往一幅图像的不同部分可能有不同的图像质量,例如部分有阴影带时需要基于邻域的局部方法来处理。自适应直方图均衡(AHE),对比度限制自适应直方图均衡(CLAHE),优化递归运算的 CLAHE 算法和基于人眼最小可辨差的导引自适应直方图均衡(JGACE),都是基于局部操作更深入的探讨,但 AHE 往往存在较严重的过冲,而在其改进算法中局部操作的参数选择和控制也存在困难。根据 AHE 的发展思路,局部直方图规范化^[4]也有发展。同时在使用直方图统计方面,文献^[5]分析了一种基于局部统计(LS)的增强方法,文献^[6]提出了梯度处理与统计处理相结合的图像增强技术,虽然在增强性能和噪声放大方面存在不足,但是局部统计量是形成算法自适应的关键,其提供了较好的案例。而频域增强算法多基于小波及后续发展的多种 X-let 变换^[7~9],但频域算法对于较大尺寸图像在处理速度上难以保证;Sos S. Agaian 等^[10]学者研究了空频域结合的增强方案,提供了复合的思路;基于 Retinex 理论的增强策略在美国航空航天局(NASA)实验室的推动下也有很多成果,但诸如多尺度色彩修复 Retinex 理论(MSRCR)的方法往往存在伪影和光晕现象^[11]。

2 本文算法

图像增强算法流程一般首先要根据图像特性合理选择需要增强的区域,其次是构建合适的增强策略。

2.1 算法流程

1) 算法普适性和可构造性要求全局与局部复合的增强策略

图像增强操作由于面临不同的目的,各种方法都有局限性,为了达到满意的结果,对给定的图像增强目标在一定复杂度的要求下合理应用多种互补和综合的复合增强技术,往往可以得到比单一方法更好的效果^[5],实际上这也符合系统论的观点。

全局操作可以根据直方图特点进行,易于强调和保护整体特征;而局部增强可以使动态范围增加,可以避免像素间生硬过渡,视觉效果较柔和,但是局部操作较易放大噪声。全局操作和局部操作有机结合可以互为补充。

2) 根据低亮度低对比度区域特性构造拉升窗
低亮度低对比度区域必须进行对比度的拉升和

细节信息的增强,但人眼对此区域噪声特别敏感,所以要兼顾增强与平滑,同时需要尽可能保持或进一步锐化原有高对比度区域。根据全局操作和局部操作结合的策略,有效的锐化操作可以保证全局增强的有效性。从现有众多算法看,在局部操作中处理低对比度区域必须针对不同情况构造自适应拉升窗函数。而空域局部增强算法将对对比度提升后,必须进一步操作来补充细节和调节增强程度,尤其是有针对性地进行降噪和平滑操作。

3) 本文算法流程

根据全局加局部的增强策略和低亮度低对比度区域图像的特点,本文图像增强算法流程如图 1 所示。

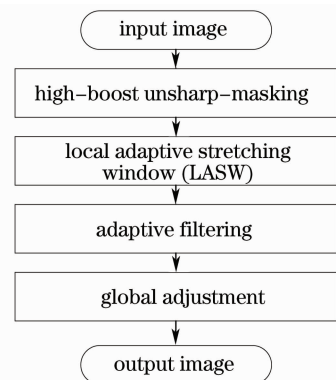


图 1 本文算法流程

Fig. 1 Flow chart of the proposed image enhancement algorithm

2.2 反锐化掩模增强

反锐化掩模(UM)^[12,13]是广泛采用的增强策略,其最早应用于摄影暗室,通过使用模糊的负片与正片卷合将图像模糊形式从原始图像中减去以得到清晰结果。UM 策略一般不体现所减去的模糊部分是怎么生成的,而通常直接进行锐化掩模操作,如选择拉普拉斯(Laplacian)掩模。为了保证全局细节的保持或进一步锐化,在局部自适应拉升操作之前,首先采用高提升 Laplacian 反锐化掩模来增强图像的隐藏细节和边缘信息:

$$\mathbf{x}_{\text{EN}}(i, j) = \mathbf{x}_0(i, j) + \mathbf{x}_{\text{UM}}(i, j), \quad (1)$$

$$\mathbf{x}_{\text{UM}}(i, j) = (-a/9) \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & (9-1/a) & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} * \mathbf{x}_0(i, j), \quad (2)$$

式中 $\mathbf{x}_{\text{EN}}(i, j)$ 为增强后图像, $\mathbf{x}_0(i, j)$ 为输入图像, $\mathbf{x}_{\text{UM}}(i, j)$ 为反锐化掩模输出的锐化图像,通过高提升 Laplacian 算子掩模操作得到, a 为增强因子。

2.3 局部自适应拉升窗

诸多文献针对低对比度图像增强,在线性拉升的基础上提出了非线性拉升窗函数,“S 形状”的窗函数应用较广,如文献[14]提出在局部使用“S 形状”窗函数拉升局部灰度值范围,同时更新局部均

值。但诸多窗函数构造并没有充分考虑局部特性,“S 形状”的函数的连接点在实验中要么被默认不提,要么被认定为恒定值。本文针对局部特性,构造了以下两个“S 形状”的窗函数,对应的拉升规则如下式所示

$$k_{o-iloc} = \begin{cases} \sqrt{k_t^2 - (k_t - k_{i-iloc})^2}, & k_{i-iloc} \leq k_t, \quad 0 \leq k_{LM} < k_{TA} \\ 255 - \sqrt{(255 - k_t)^2 - (k_{i-iloc} - k_t)^2}, & k_{i-iloc} > k_t, \quad 0 \leq k_{LM} < k_{TA} \end{cases} \quad (3)$$

$$k_{o-iloc} = \begin{cases} k_t - \sqrt{k_t^2 - k_{i-iloc}^2}, & k_{i-iloc} \leq k_t, \quad k_{TA} \leq k_{LM} \leq 255 \\ k_t + \sqrt{(255 - k_t)^2 - (255 - k_{i-iloc})^2}, & k_{i-iloc} > k_t, \quad k_{TA} \leq k_{LM} \leq 255 \end{cases} \quad (4)$$

首先计算局部均值 k_{LM} ,当其小于全局阈值 k_{TA} 时,拉升窗采用(3)式,而当窗口中心像素值 k_{i-iloc} 与窗口内阈值 k_t 比较时,采用不同的函数;当局部均值大于全局阈值时,拉升窗采用(4)式,同理采用相

应函数。所以对应不同平均灰度的邻域,其分别可以看作低亮度像素的拉升窗[图 2(a)]和抑制窗[图 2(b)]。

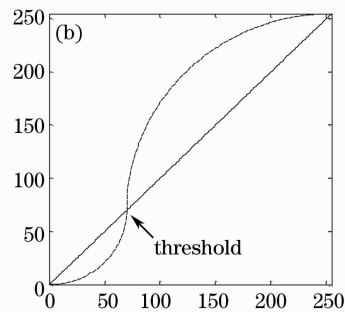
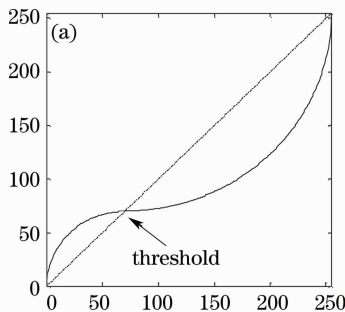


图 2 局部自适应拉升窗函数(LASW)

Fig.2 Local adaptive stretching window (LASW)

文献[14]使用了固定阈值的(b)窗来拉升局部的灰度范围和均值,目的之一是为了更好地降噪,但其对于低亮度低对比度图像并不适用,因为在低亮度低对比度区域会进一步当作噪声被滤除掉,即动态变化将变得更小。

实现自适应的不同亮度和对比度区域的增强,两个阈值的选取非常重要。全局阈值选取为全局均值,其值一般趋近于人眼灰阶分辨率较高的 127 附近的灰度区间,而为了实现邻域内根据局部统计特征自适应进行阈值确定,窗口内阈值取为局部均值。这样,构造的两重比较实际上就保证了不同对比度区域的自适应拉升。

2.4 自适应滤波器

由于局部拉升窗对低对比度的作用较强,之后需要自适应滤波器做局部降噪和平滑操作。注意到经典维纳滤波器优于通常线性滤波器,具有更好的选择性和保存图像边缘及高频细节信息的能力,根据二维维纳滤波器,构造了自适应滤波器

$$g(i, j) = \frac{\max(\sigma_{Local}^2 - \sigma_{Global}^2, 0)}{\sigma_{Local}^2}$$

$$[k_{iloc}(i, j) - \mu_{Local}] + \mu_{Local}, \quad (5)$$

其中 μ_{Local} , σ_{Local}^2 为局部均值和方差, σ_{Global}^2 为全局方差。

自适应滤波器根据图像的局部方差来调整滤波器输出,当局部方差大时滤波器的平滑效果较弱,而局部方差小时滤波器的平滑效果较强,这样容易在弥合局部效应的同时保证有平滑的输出。

2.5 全局修正

针对局部操作的局限性,在局部操作后使用伽马(Gamma)校正做全局修正,来进一步调整主观视觉的感受。Gamma 校正对于精确显示图像效果显著,幂次函数符合图像显示等规律。

2.6 增强效果的评价

图像增强效果评价需要兼具主观评价和客观指标评价两个方面,对于针对低亮度低对比度图像特点,主观评价即是对图像整体效果和低对比度区域细节显现的观察。客观指标采用以下两个评价函数

来分别衡量全局和局部的增强效果：

1) 绝对平均灰度误差 (AMBE)

依此衡量增强前后亮度的偏差,绝对平均灰度误差定义为 $|\mu_{EN} - \mu_O|$, μ_{EN} 和 μ_O 分别为增强前后灰度的均值。因为图像中原有较高对比度区域需尽可能保持原有对比度和增强细节,平均亮度变化较小,所以 AMBE 主要体现在低亮度低对比度区域灰度级的提升程度,显然亮度改变偏差适中为好。

2) 图像熵 (Entropy)

图像熵即上述区域细节和对比度的增强程度,熵值大则说明细节丰富。

当然,客观值只能在一定程度上反映增强效果。在很多情况下,主观上偏重感兴趣区域时,不管是全局或局部的客观值归结到全局的一个统计平均值时会与增强目标存在偏差,这时则应以人眼观察为主要评价标准。

3 仿真实验

根据算法流程,首先针对文献[5]中典型的“SEM”图像在 Matlab2008a 中进行仿真实验,同时与其他增强方法如 HE,LS 等在主客观指标下进行比较。“SEM”是一幅钨丝的图像,图中间是亮度和对比度都较高的钨丝,而右侧是灰度值和对比度都较低的钨丝,不易辨识细节。

根据算法流程,采用 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 的邻域

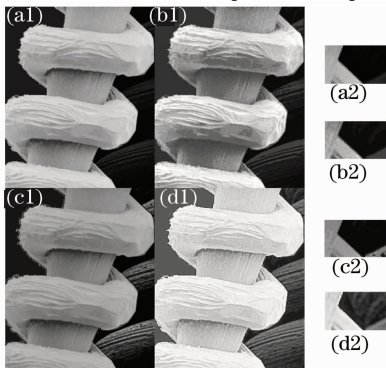


图 3 “SEM”图像增强结果。(a1)原始图像;(b1)HE 结果;(c1)LS 结果;(d1)LASW 结果。(a2)~(d2)为对应(a1)~(d1)中右上角(1:30,200:248)区域放大 3 倍后结果

Fig. 3 Results for "SEM" obtained by the conventional and the proposed methods. (a1) original image; (b1) histogram equalization; (c1) local statistics; (d1) LASW algorithm, (a2)~(d2) are the corresponding detailed results magnified by 3 times in the region (1:30,200:248) of (a1)~(d1)

窗,尤其通过弥补边界解决了空间滤波技术固有边界问题,高提升 Laplacian 掩模增强因子 $\alpha=0.05$;全局修正参数 $P_{\text{gamma}}=0.7$;算法仿真得到的结果和局部对应区域(1:30,200:248)放大图如图 3 所示。

从图 3 可知,采用 HE 方法,灰度等级比例更加平衡,中间的钨丝显示的更加光滑,但是其不可能兼顾低对比度的有效拉升和细节的保持。采用基于局部统计 LS 方法,由于其引入了线性增强因子,最终导致边缘引入了较大的噪声,且不能较好保持中间部分的对比度和亮度级别,同时以上两种方法对图像右上角区域内微弱局部信息的拉升几乎不起作用。而 LASW 算法在保证原始较高对比度区域纹理更加清晰的前提下,将处在阴影中的区域通过自适应拉升窗充分显示出来,同时较大程度抑制了边缘局部噪声。

将典型文献中设计的算法和仿真图像与 LASW 算法进行比较。图 4 中 LASW 算法对于“City”图像增强效果显然对比度拉升更充分,在阴影中的细节也更突出($P_{\text{gamma}}=0.7$);图 5 中在 Road 图像质量较差的情况下低亮度对比度区域得到很好的增强($P_{\text{gamma}}=0.7$);图 6 中“Tempete”图像增强效果对比可知,诸多花和背景山石的细节纹理更加细致锐化($P_{\text{gamma}}=1.2$);图 7 中“U2”飞机图像,LASW 算法在有较高灰度级的基础上尽可能保持了左机翼细节($P_{\text{gamma}}=1.2$)。由以上仿真结果可见 LASW 算法在总体策略的指导下和基础算法复合改进的基础上,达到了与众多算法相当甚至更好的增强效果。

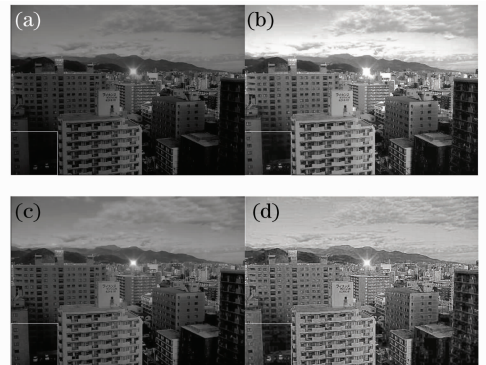


图 4 “City”图像增强效果对比。(a)原始图像;(b)直方图均衡结果;(c)文献[7]算法仿真结果;(d)基于 LASW 的结果

Fig. 4 Results for "City" obtained by the conventional and the proposed methods. (a)original image;(b) histogram equalization; (c) by algorithm in reference[7]; (d)LASW algorithm

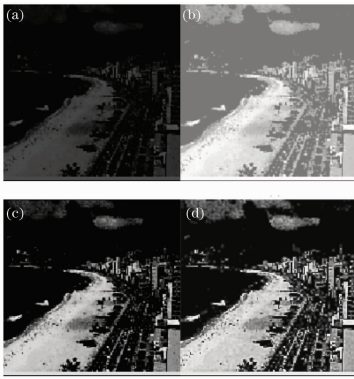


图 5 "Road"图像增强效果对比。(a)原始图像;(b)直方图均衡结果;(c)文献[2]算法仿真结果;(d)基于 LASW 的结果

Fig. 5 Results for "Road" obtained by the conventional and the proposed methods. (a) Original image; (b) histogram equalization; (c) by algorithm in reference[7]; (d) LASW algorithm

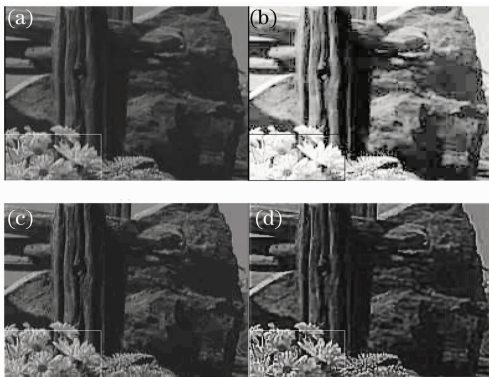


图 6 "Tempete"图像增强效果对比。(a)原始图像;(b)直方图均衡结果;(c)文献[13]算法仿真结果;(d)基于 LASW 的结果

Fig. 6 Results for "Tempete" obtained by the conventional and the proposed methods. (a) Original image; (b) histogram equalization; (c) by algorithm in reference[13]; (d) LASW algorithm

根据客观指标, LASW 方法与典型增强方法的比较见表 1, 可见 LASW 算法在整体亮度提升和局部细节锐化方面的优势。总体上, HE 保持了较大的亮度提升, 但存在明显过增强, 不能体现出局部特性。与众多已有算法相比, 对于图 3~图 5, LASW 算法较好地提升了整体亮度, 熵增也较明显, 而图 6, 图 7 虽然在客观指标上体现的不明显, 但 LASW 算法能够自适应地达到对感兴趣区域的增强。图 6 中的细节更为锐化体现为熵增, 而在图 7 中较好地突出了飞机轮廓及细节而抑制了海浪波纹(导致整幅图像熵降)。以上也说明了在评价图像增强算法时主观性评价标准的重要性。

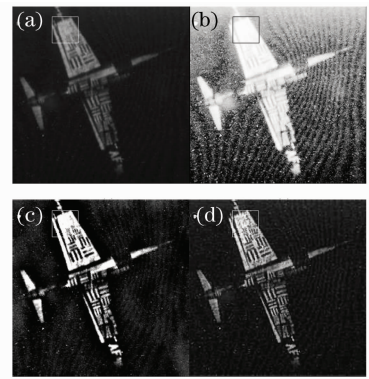


图 7 "U2"飞机图像增强效果对比。(a)原始图像;(b)直方图均衡结果;(c)文献[10]算法仿真结果;(d)基于 LASW 的结果

Fig. 7 Results for plane "U2" obtained by the conventional and the proposed methods. (a) Original image; (b) histogram equalization; (c) by algorithm in reference [10]; (d) LASW algorithm

表 1 客观指标值的衡量

Table 1 Evaluations of objective index value

Fig. 3 "SEM"	Original image	HE	LS	LASW algorithm
Mean	128.1151	128.5074	113.3131	177.4583
AMBE	0	0.3923	14.8019	49.3432
Entropy	6.5333	4.5510	3.7948	6.7689
Fig. 4 "City"	Original image	HE	By algorithm in Ref. [7]	LASW algorithm
Mean	66.3991	127.9060	83.3354	124.0094
AMBE	0	61.5069	16.9363	57.6103
Entropy	6.9723	5.8569	7.2450	7.3947
Fig. 5 "Road"	Original image	HE	By algorithm in Ref. [2]	LASW algorithm
Mean	18.4211	156.7279	56.9892	80.8350
AMBE	0	138.3069	38.5681	62.4139
Entropy	4.1706	3.4700	3.0589	3.7983
Fig. 6 "Tempete"	Original image	HE	By algorithm in Ref. [13]	LASW algorithm
Mean	71.1593	127.4599	70.8231	67.0355
AMBE	0	56.3006	0.3362	4.1238
Entropy	6.6044	5.6225	3.6954	6.9812
Fig. 7 "U2"	Original image	HE	By algorithm in Ref. [10]	LASW algorithm
Mean	32.8431	128.4082	38.4861	35.4414
AMBE	0	95.5651	5.6430	2.5983
Entropy	5.3404	4.7733	3.2617	2.9282

4 结 论

针对含有低亮度低对比度区域的图像, 依据融

合多种方法的全局操作与局部操作结合的思路, 提出主要依靠局部自适应拉升窗来进行低亮度低对比度区域增强的复合方法。尤其针对图像特性, 提出自适应拉升窗必要性要求和具体构造方法, 算法和思路, 可操作性强。仿真结果和评价指标值显示 LASW 算法是一种有效的灰度图像增强方法, 也容易通过彩色空间转换扩展到彩色图像对比度增强, 但基于局部操作部分边缘仍有过增强效应, 噪声有所扩散。随着反锐化掩模研究的深入和人类视觉特性的引入可以更好地解决低亮度低对比度图像存在的拉升对比度和抑制噪声的固有矛盾, 以获得更好的增强效果。

参 考 文 献

- 1 V. V. Starovotiv, D. I. Samal, D. V. Briiliuk. Image enhancement for face recognition[C]. *International Conference on Iconics, St. Peterburg, Russia*, 2003: 100~102
- 2 Naglaa Yehya Hassan, Norio Aakamatsu. Contrast enhancement technique of dark blurred image [J]. *International J. Computer Science and Network Security*, 2006, **6**(2): 223~226
- 3 Li Qi, Yao Rui, Shan Jixin *et al.*. A preliminary study on THz imaging and image enhancement based on thermal imager[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 275~277
李 琦, 姚 睿, 单纪鑫等. 基于热像仪的太赫兹成像及图像增强初步研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s2): 275~277
- 4 Iyad Jafar, Hao Ying. A new method for image contrast enhancement based on automatic specification of local histograms [J]. *International J. Computer Science and Network Security*, 2007, **7**(7): 1~10
- 5 R. C. Gonzalez, R. E. Woods. *Digital Image Processing*, 2nd ed. [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2002, 82~84
- 6 J. K. Kim, J. M. Park, K. S. Song. Adaptive mammographic image enhancement using first derivative and local statistics [J]. *IEEE Trans. on Medical Imaging*, 1987, **16**(5): 495~502
- 7 Ding Xiao, Jun Ohya. Contrast enhancement of color images based on wavelet transform and Human visual system [C]. *International Conference on Graphics and Visualization in Engineering, Florida, USA*, 2007, **1**: 58~63
- 8 Shi Dan, Li Qingwu, Ni Xue *et al.*. Infrared image nonlinear enhancement algorithm based on contourlet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 342~346
石 丹, 李庆武, 倪 雪等. 基于 Contourlet 变换的红外图像非线性增强算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 342~346
- 9 Qin Hanlin, Zhou Huixin, Liu Shangqian *et al.*. Nonlinear enhancement algorithm for infrared image based on second generation wavelet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 353~356
秦翰林, 周慧鑫, 刘上乾等. 基于二代小波变换的红外图像非线性增强算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 353~356
- 10 Sos S. Agaian, Blair Silver, Karen A. Panetta. Transform coefficient histogram-based image enhancement algorithms using contrast entropy [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2007, **16**(3): 741~758
- 11 Ni Guoqiang, Xiao Manjun, Hu Hongqing *et al.*. New progress and prospect of realistic image rendition based on visual characteristics [J]. *Chinse J. Lasers*, 2007, **34**(4): 451~460
倪国强, 肖蔓君, 胡宏清等. 基于视觉特性的真实影像再现技术进展及展望[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 451~460
- 12 G. Ramponi. A cubic unsharp masking technique for contrast enhancement [J]. *Signal Processing*, 1998, **67**: 211~222
- 13 T. Arici, Y. Altunbasak. Image local contrast enhancement using adaptive non-linear filters [J]. *IEEE International Conference on Image Processing*, 2006, **6**: 100~105
- 14 Zeyun Yu, Chandrajit Bajaj. A fast and adaptive method for image contrast enhancement [J]. *IEEE International Conference on Image Processing*, 2004, 1001~1004