

方向邻域全变分图像去噪

龙辉^a, 何坤^a, 黎思敏^b, 周激流^a

(四川大学 a. 计算机学院; b. 电子信息学院, 成都 610065)

摘要: 为了弥补传统全变分(TV)算法忽略了图像边缘方向的不足,结合梯度幅度和方向提出了基于方向全变分的去噪算法。该算法运用图像梯度幅度将图像像素划分为边缘区域和非边缘区域,运用梯度方向对不同区域的像素选取不同的四邻域像素,针对不同邻域对传统TV算法进行离散分析,完成了图像的保边去噪。实验结果表明,结合边缘方向信息改进了传统TV算法的邻域选择方式,不仅更好地保留了图像边缘信息和重要细节,且提高了图像的PSNR和视觉效果。

关键词: 图像去噪; 全变分; Sobel算子; 边缘方向

中图分类号: TP394.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)07-2219-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.07.075

Image denoising on direction total variation

LONG Hui^a, HE Kun^a, LI Si-min^b, ZHOU Ji-liu^a

(a. School of Computer Science, b. Electronic Information Academy, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Traditional algorithms of total variation often neglect the images' edge direction. To remedy this defect, this paper proposed a new method of image denoising on direction total variation, combining gradient magnitude and orientation. It divided the image into edge regions and non-edge regions on edge gradient magnitude, and chose different four-neighborhood for different regions based on gradient magnitude, to various of the neighborhoods using analysis of variance. So it can preserves image edges during image denoising. Experimental results show that the proposed method combining edge direction information can improve the neighborhood selection strategy in traditional methods of total variation. It not only preserves edges and key details effectively, but also improves the PSNR and vision of denoising images.

Key words: image denoising; total variation(TV); Sobel operator; edge direction

0 引言

图像采集、传输以及保存的过程中均会受到噪声干扰,导致图像质量退化,给后续的特征提取和边缘检测带来不便。若噪声较大容易造成图像结构信息的误检或漏检,甚至会使人们对图像内容产生曲解、错解^[1]。因此在图像分析处理前需进行去噪处理^[2]。

传统滤波根据噪声和图像主要内容在频域上呈现不同的频谱特性,对图像进行点扩散(高斯平滑)^[3]处理。该类算法对平滑区处理效果较好,但噪声和边缘同属于高频信号,所以在去噪过程中会破坏图像的边缘特征,致使图像模糊^[4]。为了保护图像边缘信息,传统方法借助数学形态学对图像进行处理^[5],数学形态学以信号的几何特征为基础利用预先定义的结构元素匹配信号,从而实现提取信号、抑制噪声的目标^[6]。抑噪能力与结构元的尺寸有关,同时单一的结构元只能保留一种几何特性,其他特性则与噪声信息一起被滤除^[7]。

根据图像内容的能量集中性,将图像运用固定核函数和自适应核函数进行稀疏表示。其中固定核函数是将图像运用几个固定的函数进行线性表示^[8],噪声一般集中在高频系数,而

图像主要集中于中低频系数,根据图以及噪声在表示域中的分布特性,对系数运用阈值进行去噪处理^[9]。该算法去噪能力与阈值的选取有关:若阈值较小,噪声抑制能力较弱,边缘纹理信息损失较少;反之噪声抑制能力较强^[10],但边缘处存在伪Gibbs现象,为了克服Gibbs现象,BM3D去噪算法结合图像的空间邻域和像素邻域提高稀疏性^[11]。基于固定核函数表示的阈值去噪算法是建立在噪声方差已知的条件下,应用中噪声方差均是未知的,所有图像的内容不可能由几个固定函数实现稀疏表示。为了克服基于固定核函数的图像去噪算法的不足,根据图像内容自适应挖掘表征内容的核函数(PC分量),运用PC分量对噪声图像中的主要内容进行有效表示进而去除噪声分量。该方法抑噪和保边缘能力与PC分量的选择有关;而PC分量的选取只是方差意义下的最优选取而没有考虑图像的空间结构特征。

噪声使得图像像素变化程度比清晰图像大,传统TV算法根据图像结构信息建立 ℓ_1 范式逼近的去噪模型^[12]。该算法假设图像像素点均位于边缘上,以四邻域像素梯度幅度进行迭代去噪。由于该算法未考虑图像边缘的方向信息,导致图像平坦区域的噪声抑制不充分^[13],甚至出现虚假边缘,产生阶梯效

收稿日期: 2012-09-21; 修回日期: 2012-11-09

作者简介: 龙辉(1989-),女,四川成都人,硕士研究生,主要研究方向为数字图像处理(lh_25_daidai@126.com);何坤(1972-),男,四川巴中人,副教授,主要研究方向为模式识别、数字图像处理、图像水印;黎思敏(1991-),女,重庆潼南人,硕士研究生,主要研究方向为数字图像处理;周激流(1963-),男,四川成都人,教授,博导,主要研究方向为图像处理、人脸识别、无线网络、分数阶微积分、计算机智能。

应。为了继承 TV 算法的保边性弥补其不足^[14], 本文结合像素梯度幅度和方向信息提出了基于方向全变分的去噪算法。首先根据图像边缘形成的光学原理分析图像梯度幅度和方向; 其次根据边缘的梯度幅度将图像划分为边缘区域和非边缘区域^[15,16], 对于边缘区域根据梯度方向选取靠近边缘的四邻域像素, 对于非边缘区域选取空间四邻域像素; 最后结合四邻域像素梯度分析图像 TV 的迭代函数。实验结果表明, 本文算法对图像边缘具有保边性, 平坦区残余噪声较小且消除了伪边缘, 提高了图像的 PSNR 和视觉效果, 但其对图像中小的边缘和纹理误作为噪声而去除。

1 方向邻域的提取

由图像边缘形成的光学原理可知, 图像边缘是灰度不连续的结果。本文根据灰度值突变引起图像边缘, 运用空间梯度幅度 $|\nabla I(x,y)|$ 描述像素变化快慢:

$$|\nabla I(x,y)| = \sqrt{\left[\frac{\partial I(x,y)}{\partial x}\right]^2 + \left[\frac{\partial I(x,y)}{\partial y}\right]^2} \quad (1)$$

为了抑制噪声对图像梯度幅度(式(1))的影响, 本文运用 Sobel 边缘检测算子计算图像梯度。该梯度算子具有对局部平滑的性质, 在一定程度上抑制了噪声对梯度的影响, 其模板为

$$S_g = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

图像在水平和垂直方向的梯度分别为

$$\begin{cases} \frac{\partial I(x,y)}{\partial x} = S_g * I(x,y) \\ \frac{\partial I(x,y)}{\partial y} = S_g^T * I(x,y) \end{cases} \quad (3)$$

图像边缘点为局部梯度最大值点, 本文基于这一性质依据非最大值抑制原理来确定像素点是否位于边缘上。对于非边缘的像素点其空间四邻域变化缓慢, 相关性较大, 本文选取空间四邻域线性表示该像素值。边缘上相邻像素变化不大, 为了在去除噪声过程中保护边缘像素的突变性, 对于边缘上的像素点根据边缘邻域像素点进行线性表示。为了提取边缘上的像素邻域, 图像边缘上相邻像素点具有边缘方向变化缓慢(角点除外)的性质, 利用梯度方向提取边缘上的像素邻域, 梯度方向为

$$\theta(x,y) = \arctan\left(\frac{\partial I(x,y)}{\partial y} / \frac{\partial I(x,y)}{\partial x}\right) \quad (4)$$

本文将边缘方向分为四个区域(八个方向), 像素点的边缘方向与其梯度方向垂直, 如图 1 所示。

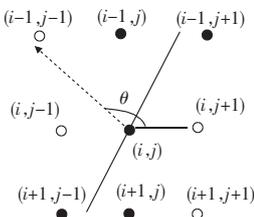


图 1 边缘方向及邻域

设 O 点在边缘上, 该点的方向邻域取决于梯度方向, 方向邻域用 $S_{i,j}$ 表示:

$$S_{i,j} = \begin{cases} \{(i,j-1), (i,j+1)\}, & \text{当 } \theta(i,j) = 0 \\ \{(i-1,j-1), (i-1,j), (i+1,j), (i+1,j+1)\}, & \text{当 } 0 < \theta(i,j) < \frac{\pi}{4} \\ \{(i-1,j+1), (i+1,j-1)\}, & \text{当 } \theta(i,j) = \frac{\pi}{4} \\ \{(i-1,j-1), (i,j-1), (i,j+1), (i+1,j+1)\}, & \text{当 } \frac{\pi}{4} < \theta(i,j) < \frac{\pi}{2} \\ \{(i-1,j), (i-1,j)\}, & \text{当 } \theta(i,j) = \frac{\pi}{2} \\ \{(i-1,j+1), (i,j+1), (i,j-1), (i+1,j-1)\}, & \text{当 } \frac{\pi}{2} < \theta(i,j) < \frac{3\pi}{4} \\ \{(i-1,j-1), (i+1,j+1)\}, & \text{当 } \theta(i,j) = \frac{3\pi}{4} \\ \{(i-1,j), (i-1,j+1), (i+1,j+1), (i+1,j)\}, & \text{当 } \frac{3\pi}{4} < \theta(i,j) < \pi \end{cases} \quad (5)$$

对于边缘像素点的邻域, 尽量选择靠近边缘像素, 让边缘点沿着图像边缘的方向进行平滑, 从而能在去噪过程中保护边缘信息。

2 方向邻域全变分去噪

图像去噪是图像分析处理中非常基础且重要的组成部分, 而去噪的同时常伴随丢失一些重要的边缘细节信息。边缘是表征图像内容的一个重要特征, 因此进行图像去噪时应尽量保留图像的边缘特征。令 $I(x)$ 为原始清晰图像信号, $I^0(x)$ 为被噪声污染的图像信号, 即

$$I^0(x) = I(x) + n(x) \quad (6)$$

其中: $n(x)$ 为零均值方差为 σ^2 的随机噪声, 噪声加剧了图像像素的变化程度, 导致了图像整体梯度变化比清晰图像大。为了消除噪声并保护边缘, 传统 TV 算法根据结构信息建立 ℓ_1 范式逼近去噪模型:

$$I(x) = \arg \min_I \left\{ \iint_{\Omega} |\nabla I(x)| d\Omega \right\} \quad (7)$$

结合噪声统计特性, 求解具有目标函数(式(7))的极值, 引入拉格朗日乘子 λ , 定义一个新的能量泛函 $F[I(x), \lambda]$:

$$F[I(x), \lambda] = \iint_{\Omega} |\nabla_x I(x)| + \frac{\lambda(I(x) - I^0(x))^2}{2} d\Omega \quad (8)$$

运用下降算法分析能量泛函, 得到欧拉-拉格朗日方程为

$$-\nabla \cdot \left(\frac{\nabla I}{|\nabla I|} \right) + \lambda(I - I^0) = 0 \quad (9)$$

根据像素邻域, 分析像素点 α 及方向邻域 S 的式(9)迭代数值计算为

$$I_{\alpha} = \frac{\sum_{\beta \in S} \left(\frac{1}{|\nabla I|_{\beta}} + \frac{1}{|\nabla I|_{\alpha}} \right) I_{\beta} + \lambda I^0_{\alpha}}{\lambda + \sum_{\beta \in S} \left(\frac{1}{|\nabla I|_{\beta}} + \frac{1}{|\nabla I|_{\alpha}} \right)} \quad (10)$$

噪声图像中包含了图像结构信息, 式(10)中运用了噪声图像 I^0_{α} 的像素值, 同时像素邻域为方向邻域, 使得图像中边缘不会模糊。当满足式(11)停止迭代。

$$\sum |I^{(n)}(i,j) - I^{(n-1)}(i,j)| \leq 2\% \sum |I^{(n)}(i,j)| \quad (11)$$

本文提出的方向邻域全变分图像去噪, 使得图边缘像素沿着边缘方向进行扩散, 而非边缘像素则沿着空间四邻域进行扩散。其具体处理过程如下:

- a) 根据式(1)~(4)计算各个像素点梯度幅值和方向。
- b) 通过非最大值抑制原理判断每个像素点是否为边缘点: 若是边缘点, 则通过梯度方向角的垂线方向得到边缘方向, 选取方向邻域; 若为非边缘点, 则以空间四邻域作为方向邻域。
- c) 借助式(10)计算扩散后的像素值。
- d) 重复步骤 a)~c), 直到满足式(11)的终止条件。

其处理流程如图 2 所示。

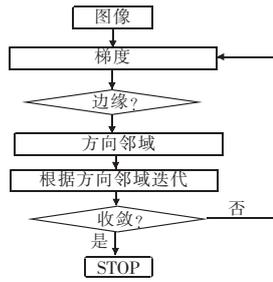


图 2 算法流程

本文算法通过迭代逼近原始无噪声图像,每次迭代后图像像素值发生变化,因此每次迭代后需重新计算梯度幅值和方向,更新方向邻域。随着迭代次数的增加,方向邻域更为准确,更接近真实图像。

3 实验结果分析

传统 TV 算法对像素点均以空间四邻域像素梯度幅度进行迭代去噪,忽略了边缘方向信息,导致图像平坦区域的噪声抑制不充分,甚至出现虚假边缘,对边缘造成一定程度的模糊。为了继承 TV 算法的优点弥补其不足,本文结合梯度幅度和方向提出了方向邻域全变分图像去噪算法。为了平衡平滑区域和保护图像边缘引进了参数 λ 。对含有高斯噪声的 Lena 图像 (PSNR = 19.36 dB) 运用不同 λ 处理的结果如图 3 所示:当 $\lambda = 1$ 时,PSNR 为 24.36 dB;随着参数 λ 的增大,边缘模糊程度减小,当 $\lambda = 2.5$ 时,PSNR 为 27.86 dB;如继续增大,边缘保护较好,但平滑区残余噪声也增大,使得 PSNR 降低,当 $\lambda = 4.0$ 时,PSNR 为 24.71 dB。从式(10)可知,参数 $\lambda = 0$ 时,由于未考虑噪声图像中的结构信息,本文算法过度平滑以致边缘严重模糊;相反当 $\lambda = \infty$ 时,本文算法将噪声误作为结构信息而加以保护。



图 3 不同 λ 的去噪结果

为了验证本文算法的有效性,对叠加不同高斯噪声的图像分别运用本文算法 ($\lambda = 2.5$)、传统 TV 算法、BM3D^[17,18] 和小

波阈值去噪进行去噪处理,其部分结果如图 4 所示,去噪后图像的 PSNR 如表 1 所示。

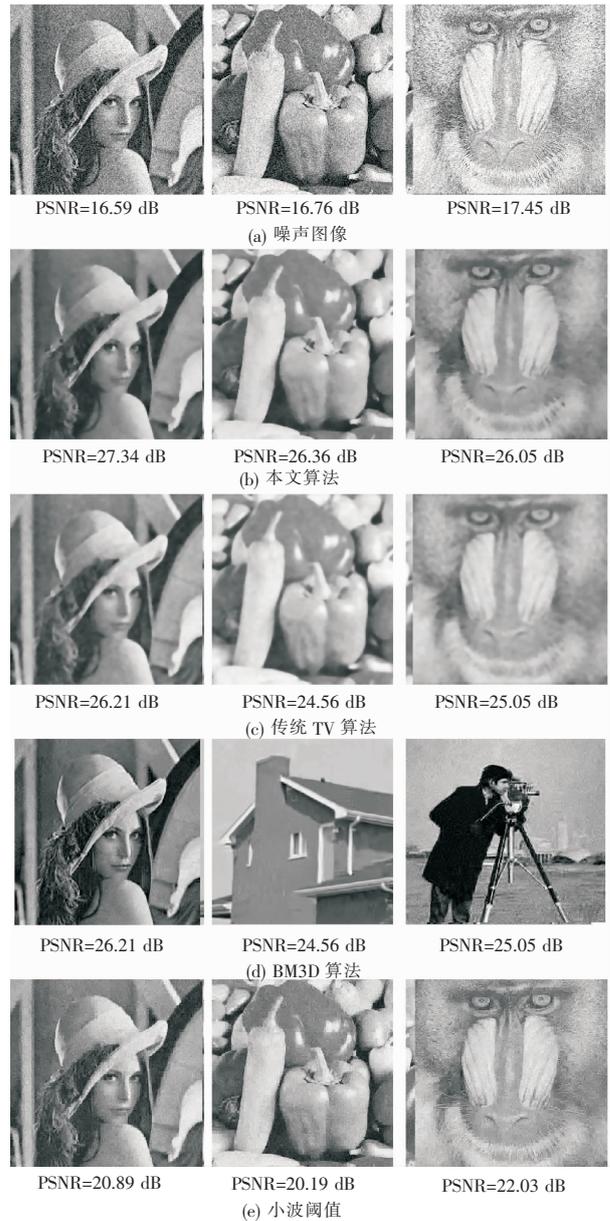


图 4 不同算法之比较

表 1 不同去噪算法的 PSNR

原始图像	含噪图像	去噪图像			
		本文算法	传统 TV	BM3D	小波阈值
Lena	20.19	28.37	27.94	28.53	24.07
	17.10	26.98	26.82	26.65	21.88
	14.34	25.42	23.78	25.81	18.12
	12.56	23.75	21.08	23.45	14.96
	10.69	21.82	20.56	21.21	13.82
peppers	12.95	24.27	22.85	22.38	15.83
	11.53	22.17	21.51	19.75	14.37
	10.75	19.76	17.23	17.37	13.34
	9.16	18.85	17.17	16.61	13.12
baboon	7.64	15.96	14.01	13.19	10.73
	18.01	26.45	26.09	24.78	22.67
	15.12	25.36	24.31	24.02	18.53
	11.56	20.37	20.72	19.17	16.17
	10.15	17.01	16.74	16.21	13.61
	9.15	16.07	14.72	13.87	12.38

从 PSNR 的角度来看,本文算法比 BM3D、传统 TV 算法和小波阈值都高。从视觉效果上看,TV 算法和 BM3D 具有保边性(如图 4(c) (d)所示),而小波阈值算法存在不同程度的边

缘模糊现象(如图4(e)所示)。传统的TV算法图像平滑区存在残余噪声;BM3D去噪后图像的边缘较模糊,算法降低了边缘区域的对比度。方向邻域全变分图像去噪算法在一定程度上减少了平滑区域的残余噪声,降低了边缘的模糊程度,处理后图像整体质量较高,较好地提高了图像的视觉效果,但对于纹理丰富的图像,该算法将图像中较小的边缘和细小纹理误作为噪声去除,因此处理后的纹理区域存在过度平滑现象(如图4(b)中的baboon图像)。

4 结束语

传统TV算法假设像素点均位于边缘上建立保边去噪模型,该算法对图像平坦区域的像素仍沿边缘方向扩散,导致噪声抑制不充分,甚至出现虚假边缘。为了继承TV算法的保边性,同时弥补其忽略图像边缘方向的不足,本文在全变分算法中引入方向邻域,使得边缘点沿着方向邻域进行扩散,改变了传统TV算法边缘点沿四邻域进行扩散的方式,使得沿边缘方向的平滑度最大,垂直边缘方向的平滑度最小。实验结果证明,方向邻域全变分图像去噪算法较为有效地解决了传统TV算法存在的弊端,有着更快的收敛效率,实现了去噪和保边的较好折中,提高了图像的PSNR和视觉效果。

参考文献:

- [1] AL-AMRI S S, KALYANKAR N V, KHAMITKAR S D A. Comparative study of removal noise from remote sensing image[J]. *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, 2010, 7(1): 32-36.
- [2] GU Xiao-feng, SHI Jin-xin, LI Jian-ping, et al. Application of wavelets analysis in image denoising[C]//Proc of International Conference on Apperceiving Computing and Intelligence Analysis. 2008:49-52.
- [3] 侯榆青,张欢,史晶,等.一种改进的全变分自适应图像去噪模型[J]. *西北大学学报*, 2008, 38(3):371-373.
- [4] LIU Wei, MA Zheng-ming. Wavelet image threshold denoising based on edge detection[C]//Proc of Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications. 2006:72-78.
- [5] 吕哲,王福利,常玉清.一种改进的数学形态学边缘检测算法[J]. *计算机工程*, 2008, 34(10):173-175.
- [6] 白相志,周付根.基于改进形态学算子的多尺度边缘检测[J]. *中国图象图形学报*, 2007, 12(9):1610-1613.
- [7] 徐东燕,付忠良,阮波.一种基于多结构元的弱对比度图像的边缘检测方法[J]. *计算机应用*, 2004, 24(6):108-110.
- [8] 王峰,张鸿宾.最优双核复合分类算法的构造[J]. *电子学报*, 2012, 40(2):260-265.
- [9] 张海英,李彦斌,潘永湘.一种基于图像边缘检测的小波阈值去噪方法[J]. *计算机应用*, 2006, 26(1):143-145.
- [10] 于焯,陆建华,郑君里.基于Hermite插值的彩色图像边缘检测技术[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2008, 48(4):553-557.
- [11] 孙伟峰,彭玉华.一种改进的非局部平均去噪方法[J]. *电子学报*, 2010, 38(4):923-928.
- [12] 牛和明,杜茜,张建勋.一种自适应全变分图像去噪算法[J]. *模式识别与人工智能*, 2011, 24(6):798-803.
- [13] 傅兴玉,尤红建,付琨.基于邻域均方连续差分的SAR图像边缘提取算法[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(5):1030-1037.
- [14] ZHENG Hong-wei, HELLWICH O. An edge-driven total variation approach to image deblurring and denoising[C]//Proc of the 1st International Conference on Innovative Computing, Information and Control. Washington DC:IEEE Computer Society, 2006:705-710.
- [15] 郑秀清,何坤,周激流.图像局部方向均值边缘检测算法[J]. *电子科技大学学报*, 2011, 40(5):759-764.
- [16] 康牧,许庆功,王宝树.一种Roberts自适应边缘检测方法[J]. *西安交通大学学报*, 2008, 42(10):1240-1245.
- [17] JI Ze-xuan, CHEN Qiang, SUN Quan-sen, et al. A moment-based no local-means algorithm for image denoising[J]. *Information Processing Letters*, 2009, 109(4):1238-1244.
- [18] DABOV K, FOI A, EGIAZARIAN K. Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2007, 16(8):2080-2095.
- [9] LULIO L C, TRONCO M L, PORTO A J V. JSEG-based image segmentation in computer vision for agricultural mobile robot navigation [C]//Proc of IEEE Computational Intelligence in Robotics and Automation. 2009:204-245.
- [10] 孙慧贤,张玉华,罗飞路.基于纹理特征的钢丝绳图像分割方法[J]. *光电工程*, 2009, 36(4):123-127.
- [11] 孟庆涛,龚声蓉,刘纯平,等.一种基于图的颜色纹理区域分割方法[J]. *中国图象图形学报*, 2009, 14(10):2092-2096.
- [12] PASCHOS G. Perceptually uniform color spaces for color texture analysis: an empirical evaluation[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2001, 10(6):932-937.
- [13] 刘丽,匡纲要.图像纹理特征提取方法综述[J]. *中国图象图形学报*, 2009, 14(4):622-635.
- [14] COVER T, THOMAS J. Information theoretic inequalities[J]. *IEEE Trans on Information Theory*, 1991, 37(6):1501-1518.
- [15] GONZALEZ R C, WOODS R E, EDDINS S L. Digital image processing using MATLAB[M]. New Jersey:Prentice Hall, 2003:348-356.
- [16] [http://www.eecs.berkeley.edu/Research/Projects/CS/vision/\[EB/OL\]](http://www.eecs.berkeley.edu/Research/Projects/CS/vision/[EB/OL]).
- [17] UNNIKRISSNAN R, PANTOFARU C, HEBERT M. Toward objective evaluation of image segmentation algorithms[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, 29(6):929-944.

(上接第2218页)

- [3] GRADY L, SCHWARTZ E L. Isoperimetric graph partitioning for image segmentation[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, 28(3):469-475.
- [4] HAN Shou-dong, TAO Wen-bing, WANG De-sheng, et al. Image segmentation based on GrabCut framework integrating multiscale nonlinear structure tensor[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2009, 18(10):2289-2302.
- [5] PENG Bo, ZHANG Lei, ZHANG D. Automatic image segmentation by dynamic region merging[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2011, 20(12):3592-3605.
- [6] YI Yu-feng, GAO Yang, LI Wen-na, et al. Improved random walker interactive image segmentation algorithm for texture image segmentation [C]//Proc of Control and Decision Conference (CCDC). 2011:4163-4166.
- [7] FELZENSZWALB P F, UTTENLOCHR D P. Efficient graph-based image segmentation[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 59(2):167-181.
- [8] KOMATI K S, SALLES E O T, FILHO M S. Fractal-JSEG: JSEG using an homogeneity measurement based on local fractal descriptor[C]//Proc of Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing. 2009:253-260.