

基于邻域信息的多层次图像模糊算法

程丹松¹, 刘晓芳², 金野¹, 崔淑梅², 刘家峰¹

(1. 哈尔滨工业大学 计算机科学与技术学院, 150001 哈尔滨, cdsinhit@hit.edu.cn;

2. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院 150001 哈尔滨)

摘要: 为了提高图像识别的准确率,提出了一种基于模糊理论的多层次图像增强算法. 首先利用图像的统计特性对图像进行初步模糊划分,然后采用非线性连续阶梯状隶属度函数对图像进行模糊化,最后通过利用邻域特征自适应调节增强系数,对各模糊子集进行非线性增强处理以实现局部特征增强. 通过与经典方法进行实验比较,显示出该增强算法能够在保存同质区内主要纹理特征的同时增强区域之间的对比度,增强了图像层次感,尤其对于医学图像,能改善图像质量,有助于提高医生临床诊断的有效性.

关键词: 模糊理论; 图像增强; 多层次; 相似邻域

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)07-0085-05

Multi-level image fuzzy enhancement based on neighborhood

CHENG Dan-song¹, LIU Xiao-fang², JIN Ye¹, CUI Shu-mei², LIU Jia-feng¹

(1. School of Computer Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China, cdsinhit@hit.edu.cn;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

Abstract: A multi-level grayscale-image enhancement method based on fuzzy technique is proposed to improve the contrast between homogeneous areas while saving textures. Nonlinear continuous stepped function based on statistical properties of the image is applied as membership function in fuzzy processing. The nonlinear enhancement is implemented by combining enhancement on each fuzzy sets. Comparing with classical methods, the results show that the image has higher contrast, enhance fine detail of image feature without enhancement, and it is better to representing the medical image processing,

Key words: fuzzy logic; image enhancement; multi-level; similar neighbor

在现实生活中任何种类的图像归根结底是由人眼来观看的,一个优良的图像系统应与人的视觉机理有良好的匹配,因此人们希望使用一种能够描述人的视觉特性的模型和方法来对图像进行处理,而模糊集理论可以很好的分析人类系统的各种行为,因而模糊集理论被越来越广泛地应用到图像分割算法^[1-5]中,并取得了较好的效果.但这些算法大都属于单层次的模糊增强算法,即用

某一个灰度值(阈值参数)将图像分为2个区域,对这2个区域的灰度值进行增加对比度处理,而区域的分界点处的灰度值(即阈值参数)一般保持不变.实验表明,单层次模糊增强算法对灰度层次较少的图像增强效果较好,但对灰度层次较多的图像增强效果较差.

文献[6]提出一种基于模糊熵的多层次增强算法,该算法针对图像多个阈值随机选取的缺点,将熵的概念引入到图像阈值参数的选择,兼顾图像中不同灰度层次的边缘信息,减小了算法随机性和主观性,使增强后的图像层次更加分明,效果优于单层次模糊增强算法,但该算法使增强后的图像在灰度值上产生分段压缩的现象,导致灰度信息的损失,使图像的层次感差,影响了图像的视觉效果,且该算法的运算速度较慢.针对上述方

收稿日期: 2010-05-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51077020); 国家博士后科学基金资助项目(20100480998); 哈尔滨科技人才创新基金资助项目(2008RFQXS037, 2009RFQXS032); 哈尔滨工业大学科研创新基金资助项目(HIT.NSRIF.2009159).

作者简介: 程丹松(1972—),男,讲师;
崔淑梅(1964—),女,教授,博士生导师.

法的不足,本文提出了一种新的多层次模糊增强方法.在增强的过程中,将邻域信息引入图像的隶属度函数,首先利用非线性变换算子把图像映射到模糊域,同时利用邻域状态控制增强力度,达到增强对比度和平滑噪声的双重目标.其次利用图像统计特性对图像进行模糊划分,进而将算法推广为多层次模糊增强.最后通过对各模糊子集的增强处理来实现图像的多层次增强,在改善图像的整体视觉效果同时,又恰当地增强了图像局部对比度,进而强化了边缘及轮廓信息,突出目标区域的内部细节.

1 非线性模糊化算子

在应用模糊理论处理图像时,图像模糊化的首要任务就是需要找到1个合适的隶属函数.本文采用非线性算子作为隶属度函数对图像进行模糊化.设: $I = [g(i, j)]_{M \times N}$ 为 $M \times N$ 的图像,其灰度级为 $L, G = \{0, 1, \dots, L-1\}$ 为所有灰度值的集合, $D = \{(i, j) \mid i = 0, 1, \dots, M-1; j = 0, 1, \dots, N-1\}$ 为图像中所有像素的集合, $g(i, j) \in G$ 为坐标 (i, j) 处像素的灰度值,图像中灰度值为 k 的像素集合表示为 $D_k = \{(i, j) : g(i, j) = k, k \in G\}$,其元素个数表示为 $n_k, h_k = n_k / (M \times N), k = 0, 1, \dots, L-1$ 为灰度值为 k 的像素数目占图像总像素数目的百分比, $H = \{h_0, h_1, \dots, h_{L-1}\}$ 为图像的直方图.则 $\prod_L = \{D_0, D_1, \dots, D_{L-1}\}$ 就是集合 D 的1个基于概率分布的划分,其概率分布为: $p_k = P(D_k) = h_k, k = 0, 1, \dots, L-1$ 为 $M \times N$ 的图像可划分为 L 个模糊子集,第 i 个模糊子集 A 对应的灰度级为 L_i ,定义灰度值为 g_{ij} 的像素对 A 的隶属度为

$$\mu_{L_i}(g_{ij}, L_{i-1}, y_i, L_i) = \begin{cases} 0, & \text{if } g_{ij} \leq L_{i-1}; \\ \frac{(g_{ij} - L_{i-1})^2}{(y_i - L_{i-1})(L_i - L_{i-1})}, & \text{if } L_{i-1} < g_{ij} \leq y_i; \\ 1 - \frac{(g_{ij} - L_i)^2}{(L_i - L_{i-1})(L_i - y_i)}, & \text{if } y_i < g_{ij} < L_i; \\ 1, & \text{if } g_{ij} \geq L_i. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, L$.

隶属度值 $\mu_{L_i}(g_{ij}, L_{i-1}, y_i, L_i)$ 可简写为 $\mu_{L_i}(g_{ij})$.函数的形状由其参数值 y_i 以及 L_i 的值决定.当灰度值 $g_{ij} = L_i$ 时,隶属度值最大,为1,当灰度值向下偏离 L_i 越大,则隶属度值越低;当灰度值在2个灰度级 L_i 和 L_{i-1} 之间时,隶属度值决定

于 L_i 的隶属度函数.一个好的增强算法应该能够根据图像的统计特性,自动地采用适合其特点的变换曲线进行图像增强.为此,本文先对图像直方图的统计特性进行合理的模糊划分,并根据图像的灰度值分布特点自适应的指导参数的选取,以达到图像自适应增强的目的.

2 基于图像统计特性的模糊划分

图像中的不同区域通常对应不同的灰度级范围,同质区内像素的灰度值相互接近,不同区域之间的灰度相差较大,对应直方图上出现一系列的峰和谷.直方图中的峰值和谷值在图像分割和增强中应用广泛,本文也是基于直方图对图像进行模糊划分.

与其他方法不同的是,本算法要先对图像进行预处理,将图像初步划分为边界区域和非边界区域.对非边界区域建立非边界直方图 HO ,找出所有峰值点对应的灰度级,用集合 $PH = \{ph_i, i = 0, 1, \dots, L\}$ 表示,例如在非边界区域直方图中有3个峰值点,其对应的灰度分别为 $k = 10, k = 120$ 和 $k = 220$,则 $PH = \{10, 120, 220\}$. PH 中的元素个数就是对整个图像进行模糊化的模糊子集数,则整个图像可以表示成模糊子集的集合.设 A 为其中的一个模糊子集, A 所对应的灰度等级为 ph_i . A 的隶属度函数的定义如式(1)所示.由上述分析可知,当 $g_{ij} = ph_i$ 时,元素对 A 子集的隶属度值最高,为1.

为了增大区域边界处的对比度,采用边界区域的统计数据确定式(1)中的 y_i .首先建立边界区域的边界直方图 HB ,选取 $[ph_{i-1} \ ph_i]$ 区间内 HB 的谷点值作为 y_i .

3 图像的多层次模糊增强算法

给出具体的多层次增强算法的处理过程为:假设 L_1, L_2, \dots, L_k 为图像不同区域对应的灰度级,即图像的模糊子集对应的灰度级, B_1, B_2, \dots, B_{k-1} 为边缘区域对应的灰度级,其中 B_i 为 L_i 与 L_{i+1} 间的边缘灰度值.如果将整个图像映射为1个模糊集合,则其隶属度函数为

$$\mu(g_{ij}) = \cup_i \left(\frac{L_i}{\max(g_{ij})} + \frac{L_{i+1} - L_i}{\max(g_{ij})} \mu_{L_{i+1}} \right) \text{ if } L_i < g_{ij} < L_{i+1}, \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (2)$$

式中: \cup 为函数的分段组合, μ_{L_i} 由式(1)定义.即该隶属度函数是1个分段 S 函数,在 $[L_i, L_{i+1}]$ 区间内是1个 S 函数,决定该范围内的灰度等级的隶属度值.当灰度值 $g_{ij} = L_i$ 时,隶属度值为

$\mu_{L_i}(g_{ij}) = \frac{L_i}{\max(g_{ij})}$. 分段函数在 B_i 处增强了前后灰度级间的对比度,即,当灰度级 $g_{ij} < B_i$ 时,隶属度值向 μ_{L_i} 靠拢,当 $g_{ij} > B_i$ 时,隶属度值向 $\mu_{L_{i+1}}$ 靠拢.

在每段 S 函数上本文采用文献[8]的方法进行增强,并在该文献的基础上设计 1 个增强系数 δ_{mn} ,该系数可以根据图像本身的灰度分布自适应的调节增强程度,同时能够兼顾图像整体信息和局部特征.具体的算法为:

1) 利用幂函数对图像的对比度进行提高为

$$K'_{\mu(g_{ij})} = (K_{\mu(g_{ij})})^{\delta_{mn}}. \quad (3)$$

式中: δ_{mn} 为增强系数,它的值决定着图像灰度的增强幅度; δ_{mn} 为依据模糊信息熵 ρ_{mn} 来确定的.

根据幂函数的性质可知,当增强函数的值为 $\delta_{mn} > 1$ 时, $K'_{\mu(g_{ij})} > K_{\mu(g_{ij})}$,像素点 (m, n) 的灰度值在增强处理后变大,且 δ_{mn} 越小, $K'_{\mu(g_{ij})}$ 值的增大幅度越小;当增强系数的值为 $0 < \delta_{mn} < 1$ 时, $K'_{\mu(g_{ij})} < K_{\mu(g_{ij})}$,像素点 (m, n) 的灰度值在增强处理后变小,且 δ_{mn} 越大, $K'_{\mu(g_{ij})}$ 值的增大幅度越大.这样做的最终结果是图像灰度级的分布变宽了,即对比度变大了.

由模糊信息熵确定增强系数的基本思路:当像素点的模糊信息熵很小时,则意味着该点邻域中灰度值的变化趋势比较大,该点可能是图像的边缘,因此需要增强的幅度就应该变大,增强系数的取值就应该变小;相反地,如果该像素点的模糊信息熵很大时,则意味着该点邻域中的灰度值变化趋势比较平坦,该点不在图像的边缘区域,因此需要增强的幅度就应该变小,增强系数的取值就应该变大.而式(3)中 δ_{mn} 的作用是从整体上调节图像的增强幅度.表达式为

$$\delta_{mn} = \delta_{\min} + \frac{(\rho_{mn} - \rho_{\min})(\delta_{\max} - \delta_{\min})}{\rho_{\max} - \rho_{\min}}. \quad (4)$$

式中: $\delta_{\min} = \frac{c - a}{2(L_{\max} - L_{\min})}$; $\delta_{\max} = 1$; ρ_{\max} 和 ρ_{\min} 分别为该区域模糊信息熵的最大值和最小值. ρ_{mn} 的表达式为

$$\rho_{mn} = - \frac{\sum_{(i,j) \in W_{mn}} (\rho_{ij} \log_2 \rho_{ij})}{\log_2 (S_m S_n)}. \quad (5)$$

式中: $\rho_{ij} = \frac{\mu(x_{ij}) \sigma_{\mu(x_{ij})}}{\sum_{(u,v) \in W_{mn}} \mu(x_{ij}) \sigma_{\mu(x_{ij})}}$; S_m 和 S_n 分别为图像的宽和高(以像素为单位); W_{mn} 为区域的大小.

从 δ_{mn} 的定义可知,它的大小与给定图像的灰度级分布有关;当图像的灰度级分布相对较窄

时,则 $c - a$ 的值就较小,相应的, δ_{\min} 的值就较小;当图像的灰度级分布相对较宽时,则 $c - a$ 的值就较大,相应的, δ_{\min} 的值就较大.从而也就起到了调节图像增强幅度的作用.

2) 根据平均隶属值 $\bar{\mu}_w$ 和修正对比率 $K'_{\mu(g_{ij})}$, 被修改的隶属值为

$$\mu'(g_{ij}) = \begin{cases} \frac{\mu_w(g_{ij})(1 + K'_{\mu(g_{ij})})}{(1 - K'_{\mu(g_{ij})})}, & \mu(g_{ij}) \geq \bar{\mu}_w(g_{ij}); \\ \frac{\mu_w(g_{ij})(1 - K'_{\mu(g_{ij})})}{(1 + K'_{\mu(g_{ij})})}, & \mu(g_{ij}) < \bar{\mu}_w(g_{ij}). \end{cases} \quad (6)$$

式中:如果 $\mu'(g_{ij}) > 1$,则令 $\mu'(g_{ij}) = 1$.

3) 将被修改的特征值从模糊域转换到灰度域为

$$g_{ij}' = g_{\min} + \frac{g_{\max} - g_{\min}}{L_{i+1} - L_i} \mu'(g_{ij}). \quad (7)$$

式中: g_{ij}' 为图像在 (i, j) 位置的灰度值; g_{\min} 和 g_{\max} 分别为所期望的最小和最大的灰度值.

根据上述讨论,如果图像的非边缘区域提取的灰度级只有 2 级 L_1 和 L_2 ,则多层次模糊增强算法实际上为单层次增强,也就是说单层次增强算法是多层次模糊增强算法的 1 个特例.

4 图像模糊增强的实验结果与分析法

4.1 医学图像模糊增强的实验结果

为了验证本方法对灰度级具有较大变化范围图像的增强效果,本文选取灰度分布层次较为复杂的医学超声图像进行增强效果的验证.图 1~2 比较了本文方法、基于模糊熵的多层次增强算法和 CLAHE 方法^[9]对原始图像进行增强后的结果,其中图 1,2 是乳腺疾病的超声图像.

在图 1 中,中部的肿块上有一些细小的钙化点,这是判断良恶性乳腺癌的重要依据之一,对于乳腺癌的确诊有着重要的意义.而在图 1(a)的原始图像中,这些钙化点非常模糊,时隐时现,很难确定其位置、大小、形状以及数目等信息,这样对乳腺癌的诊断很不利.而在图 1(b)中,经过本文方法处理后,这些钙化点簇得到了很好的增强,位置、大小、形状和数目都能确认,并且还抑止了噪声,图像中的乳腺腺体部分以及其他组织部分都没有过增强现象的发生.图 1(c)为通过 CLAHE 方法处理后的结果,肿块的内部的钙化点,以及肿块内部的组织特征出现过增强现象,这样对医生诊断有一定影响.而在图 1(d)基于模糊熵的多层次增强算法处理后的图像中,这些钙化点则不明

显,不容易给觉察出来.

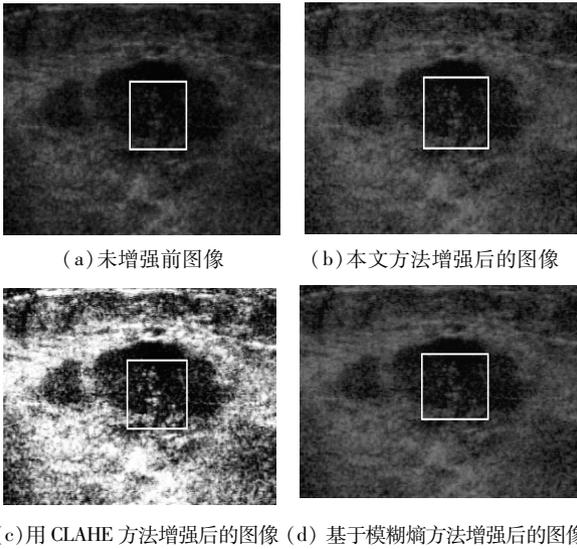


图 1 恶性乳腺疾病超声图像及增强后的结果

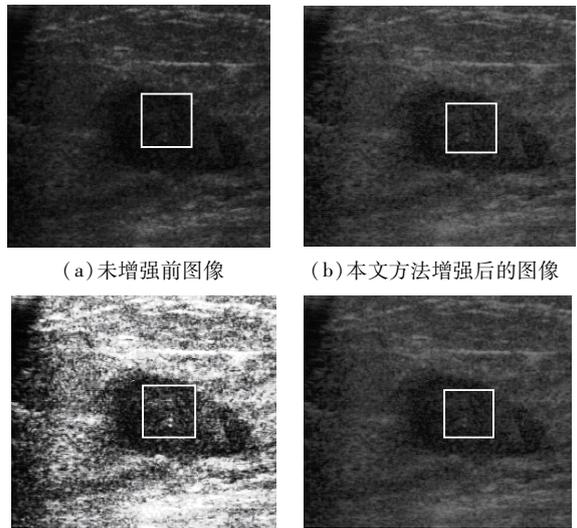


图 2 良性乳腺疾病超声图像及增强后的结果示例

从上述实验结果可以看出,本文的方法对实际超声图像增强的结果优于 CLAHE 方法和基于模糊熵的多层次增强算法,不仅增强了乳腺超声图像的对比度,使得肿块的边界清晰,而且对肿块内部的组织结构也有了很好的增强,同时还防止了过增强现象的发生,这些都大大提高了图像的质量,有利于医生的诊断.但是,从辅助诊断的角度看,虽然增强后的图像边界与原图像相比变得更清晰,但仍然属于较模糊的状态,尤其是噪声的存在会影响后续的处理,因此,图像去噪也是必不可少的.本文采用先去噪后模糊增强的方式对此类图像进行处理,在保证图像特征细节的同时,拉大目标区域与背景区域的距离.图 3 是各处理阶段的图像效果图及其对应的三维曲面(左侧为图像,右侧为相应的三维曲面).可以看出,原图像由于噪声的存在,曲面的局部起伏很大,区域边缘处

起伏变化较慢.经过本文的算法增强后的图像如图 3(b)所示,在区域内的部分伪边界被去除的同时,保留了较明显的异质区域,并且区域间的差异也被拉伸,边界被增强.图 3(c)为在去噪后的图像上利用本文方法进行增强的效果,图像对应的曲面明显变得平滑,局部已经没有了尖峰式的凸起,代之以丘状的平滑凸凹,而在区域边缘处变陡.

通过上述实验分析,可以看出本文方法将局部灰度拉伸到一个较大的动态范围,在提高了对比度的同时,背景和噪声未出现明显改变,抑制了图像背景的过增强,保留了图像的细节信息,图像可读性增强.即:在增强图像对比度的同时有效地保留了目标细节信息并抑制过度增强现象的出现,是一种有效的图像对比度增强方法.

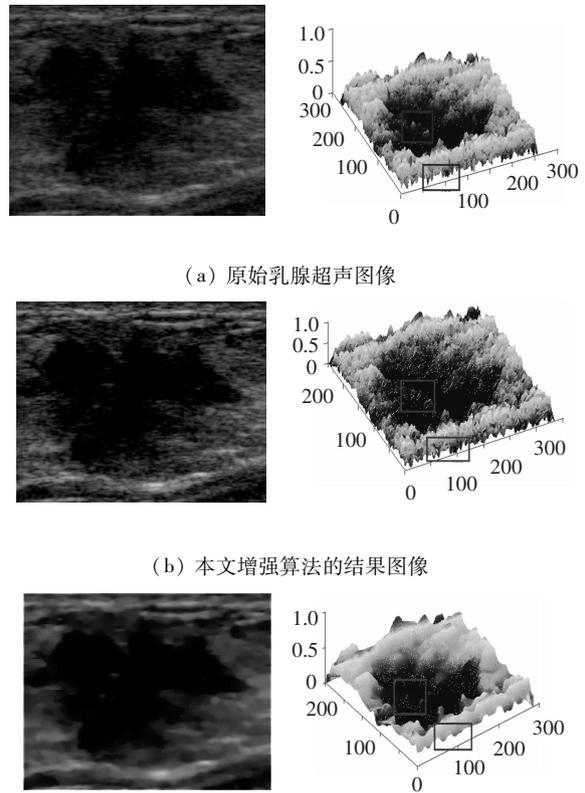


图 3 乳腺超声图像增强结果示例

4.2 算法的处理效果分析

为了对该算法有个清楚的定量的分析,把未增强的图像和增强后的图像分别展现给 1 组经验丰富的超声诊断医生,医生根据图像独立给出诊断结果.根据超声图像中肿块的特征,把诊断结果分为 5 类:良性、可能良性、可能良性或恶性、可能恶性和恶性.表 1~3 分别列出了根据未增强的图像的诊断结果、本方法增强后图像的诊断结果和李弼程方法增强后图像的诊断结果.

表1 原图像的超声诊断及病理结果 例

病理 诊断	超声诊断					合计
	良性	可能 良性	可能 或恶性	可能 恶性	恶性	
良性	30	6	12	6	6	60
恶性	4	4	6	12	30	56

表2 本方法增强后图像的超声诊断及病理结果 例

病理 诊断	超声诊断					合计
	良性	可能 良性	可能 或恶性	可能 恶性	恶性	
良性	39	6	11	3	1	60
恶性	2	2	3	8	41	56

表3 文献[6]的方法增强后图像的超声诊断及病理结果 例

病理 诊断	超声诊断					合计
	良性	可能 良性	可能 或恶性	可能 恶性	恶性	
良性	38	6	10	3	3	60
恶性	2	2	5	8	39	56

另一方面本文采用临床诊断上通常采用的正确率、敏感性和特异性来作为诊断的总体指标^[10]进行验证,计算公式为

$$ac = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}, \quad (8)$$

$$se = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (9)$$

$$sp = \frac{TN}{TN + FP}, \quad (10)$$

式中: ac 为正确率; se 为敏感性; sp 为特异性; TP 为真正阳性的病例数; TN 为真正阴性的病例数; FP 为假阳性的病例数; FN 为假阴性的病例数。

表4显示了增强前后诊断指标的对比结果。从表4中的数据可以看出,采用增强图像的一组医生其诊断正确率、敏感性和特异性均有所提高。

表4 增强前后诊断指标的对比 %

分组	诊断指标		
	正确率	敏感性	特异性
采用原始 图像组	78.9	75.8	82.1
采用增强 图像组	89.7	82.8	86.4

5 结 论

1) 将邻域信息引入图像的隶属度函数,利用

非线性变换算子把图像映射到模糊域,利用邻域信息控制增强力度,达到增强对比度和平滑噪声的双重目标;

2) 利用图像统计特性对图像进行模糊划分,通过对各模糊子集的增强处理来实现图像的多层次增强,进而在保护图像主要纹理特征的基础上提高不同灰度级区域间的对比度;

3) 采用先去噪后模糊增强的方式对此类图像进行进一步处理,在保证图像的特征细节的同时,拉大目标区域与背景区域的距离,使目标(病灶)区域变得更加清晰。通过与经典方法和对临床病例图像的实验进行比较,增强处理后的目标(病变)区域,如医学图像中的肿块、钙化点和内部回声等都得到增强,同时抑制过增强现象的出现。

参 考 文 献:

[1] PALS K, KING R A. On edge detection of X-Ray images using Fuzzy sets[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1983, 5(1): 69-77.

[2] ZHANG Daode, ZHAN Bisheng, YANG Guangyou, et al. An improved edge detection algorithm based on image Fuzzy enhancement [C]//Proceedings of 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Application. Washington, DC: IEEE, 2009: 2412-2415.

[3] WU Jinbo, YIN Zhouping, XIONG Youlun. The fast multi-level Fuzzy edge detection of blurry images[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2007, 14 (5): 344-347.

[4] 王晖, 张基宏. 图像边缘检测的区域对比度模糊增强算法[J]. 电子学报, 2000, 28 (1): 45-47.

[5] 周德龙, 潘泉, 张洪才. 图像模糊边缘检测的改进算法 A 辑[J]. 中国图像图形学报, 2001, 6A(4): 353-358.

[6] 李弼程, 郭志刚, 文超. 图像的多层次模糊增强与边缘提取[J]. 模糊系统与数学, 2000, 14(4): 77-83.

[7] 程丹松, 刘晓芳, 唐降龙, 等. 基于邻域激励脉冲耦合神经网络的图像分割技术[J]. 华中科技大学学报, 2009, 37(5): 33-37.

[8] 程丹松, 黄剑华, 于志国, 等. 一种基于模糊理论的医学图像增强方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(3): 435-437.

[9] REZA A M. Realization of the contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) for real-time image enhancement [J]. Journal of VLSI signal Processing, 2004, 38(1): 35-44.

[10] UDUPA J K, LEBLANC V R, SCHMIDT H, et al. Methodology for evaluating image segmentation algorithms[J]. Proc SPIE, 2002(2): 266-277.

(编辑 张 红)