

# 自适应模糊边缘减宽增强算法

董鸿燕 沈振康

(国防科技大学 ATR 重点实验室, 长沙 410073)

**摘要** 针对形态边缘减宽增强算法的不足,提出了一种自适应模糊边缘减宽增强算法。它对非边缘区采用局部均值滤波来抑制噪声;对于边缘区域,根据梯度方向及当前点在斜坡边缘的位置,自适应的采用边缘方向均值、边缘梯度方向的高灰度均值和低灰度均值来代替当前像素灰度值,从而缩短斜坡边缘的宽度来达到增强图像边缘的目的。采用模糊策略决策,推理合成得到增强结果,在增强的同时,抑制噪声。实验结果表明,该算法能有效地增强边缘并平滑噪声,明显地改善视觉效果。

**关键词** 模糊 边缘减宽 斜坡边缘 边缘增强

中图法分类号:TP391 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2009)02-0255-05

## An Adaptive Algorithm of Fuzzy Edge Width Reduction

DONG Hong-yan, SHEN Zhen-kang

(ATR laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

**Abstract** The shortcoming of morphological edge enhancement algorithm has been discussed. Based on that, an adaptive edge width reduction enhancement fuzzy algorithm is presented. It uses local gray mean filter to smooth noise in the non-edge areas. In edge areas, it adaptively uses the gray means of edge direction, the means of high gray and low gray in gradient direction to replace the current pixel gray to reach the purpose of reducing ramp edge width. Membership functions are introduced to describe the degree of whether the dot is in the edge area or in the homogeneous area. Fuzzy strategy has been used to control the enhancement. Results of experiments show that this method enhances the ramp edges while reducing the noise.

**Keywords** fuzzy, edge width reduction, ramp edge, edge, enhancement

## 1 引言

实际应用中,很多图像中目标的边缘并不是表现为理想的阶跃边缘形式,它们的边界在不同程度上被“模糊”,呈现为具有一定斜率的斜坡形式。通常,目标的边界还包含一定程度的噪声。例如,红外图像、卫星云图或医疗图像系统的 X 光图等。如何在增强模糊边缘的同时,抑制各种噪声的影响,是设计边缘增强算子的关键。

过去已经提出了很多不同的方法<sup>[1-7]</sup>。直方图

均衡方法<sup>[1]</sup>,模糊非线性增强方法<sup>[2,3]</sup>,反锐化掩模方法,基于各向异性扩散的偏微分方程保持边缘增强算法<sup>[4]</sup>,基于小波域的增强方法等。传统的边缘锐化方法主要是提高边缘两侧的灰度差,然而边缘的宽度并没有得到改善。这些方法对于低对比度的窄的边缘(弱的阶跃边缘)有效。对于宽度较大的斜坡边缘,仅仅提高对比度不能取得很好的锐化效果。Schavemaker 等<sup>[5]</sup>在 2000 年提出一种基于形态学的锐化边缘方法,这种方法通过减小边缘梯度方向的宽度,把斜坡边缘向阶跃边缘转换,取得了较好的边缘增强效果。

基金项目:武器装备预研基金项目(NO9140A21040306KG0195)

收稿日期:2007-07-09;改回日期:2007-07-31

第一作者简介:董鸿燕(1978 ~ ),女。国防科技大学信息与通信工程专业博士研究生。主要从事图像处理、自动目标检测与识别等方面的研究工作。E-mail:hydong@nudt.edu.cn

本文通过区分边缘和非边缘区域,采用模糊策略,计算梯度方向高灰度均值和低灰度均值,实现在减小斜坡边缘宽度的同时并抑制噪声。

## 2 形态学边缘减宽增强<sup>[5]</sup>

形态学是图像处理中的一个有力工具,其基本的操作是腐蚀和膨胀。

用结构元素  $b$  对函数  $f$  进行的灰度膨胀  $f_d$  定义为

$$f_d(i, j) = \max \{ f(i-x, j-y) + b(x, y) \mid (i-x), (j-y) \in D_f; (x, y) \in D_b \} \quad (1)$$

灰度腐蚀  $f_c$  定义为

$$f_c(i, j) = \min \{ f(i+x, j+y) - b(x, y) \mid (i+x), (j+y) \in D_f; (x, y) \in D_b \} \quad (2)$$

这里,  $D_f$  和  $D_b$  分别是  $f$  和  $b$  的定义域。

形态学锐化方法的基本原理<sup>[4]</sup>是结合形态学腐蚀与膨胀两种运算,选取一定结构元素,先对图像每点分别做腐蚀与膨胀运算,然后在得到的灰度中选取离原灰度最近的值。若距离相等,就保持图像灰度不变。

该方法可表示为

$$f_{\text{MorphEnh}} = \begin{cases} f_c & f < \frac{f_d + f_c}{2} \\ f_d & f > \frac{f_d + f_c}{2} \\ f & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

当像素点在斜坡底部时,由于  $f$  大于  $(f_d + f_c)/2$ ,以  $f_c$  代替  $f$ ,使边缘向下拉;当像素点在斜坡顶部时,由于  $f$  大于  $(f_d + f_c)/2$ ,以  $f_d$  代替  $f$ ,使边缘向上拉。通过减小边缘的宽度使得斜坡边界变得陡峭。

## 3 自适应模糊边缘减宽增强

形态边缘减宽增强方法对非噪声模糊图像的边缘减宽增强取得了比较好的效果。但对于噪声图像,边缘减宽增强效果较差,而且更加增强了噪声。究其原因,是由于:

(1) 噪声的影响使得灰度膨胀运算取邻域中最大值时可能取到噪声点,同样,灰度腐蚀运算取邻域中最小点,也可能取到噪声点,达不到准确减少边缘宽度的目的。

(2) 没有区分边缘与平坦区,对噪声没有采取

抑制措施,使得噪声同时也得到了增强。

(3) 形态学结构元素不能根据边缘自动调整。

本文为了减少噪声的影响,不直接采用膨胀和腐蚀,取邻域窗口内的最大值和最小值。而是根据梯度方向,自适应地采用边缘梯度方向的高灰度均值和低灰度均值来代替膨胀和腐蚀结果,并区分图像中的边缘区域和平坦区域,采用模糊策略,得到增强结果。在增强的同时抑制噪声,取得了较好的结果。

### 3.1 边缘减宽增强原理

为了在增强边缘的同时,能有效地去除噪声,处理过程分成对边缘区和非边缘区两种情况进行:

$$I_{\text{mean}}(i, j) = \text{mean}(I(i+m, j+n), i, j \in [-1, 1]) \quad (4)$$

(2) 对于边缘区,进行边缘减宽增强:

① 计算像素的梯度得到图像的梯度幅值图  $g_{\text{Mag}}$ , 梯度相位图  $g_{\text{Angle}}$ ;

②  $[-\pi, \pi]$  之间分成 8 个区域,  $[-\frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{8})$ ,  $[\frac{\pi}{8}, \frac{3\pi}{8})$ ,  $[\frac{3\pi}{8}, \frac{5\pi}{8})$ ,  $[\frac{5\pi}{8}, \frac{7\pi}{8})$ ,  $[-\frac{3\pi}{8}, -\frac{\pi}{8})$ ,  $[-\frac{5\pi}{8}, -\frac{3\pi}{8})$ ,  $[-\frac{7\pi}{8}, -\frac{5\pi}{8})$ ,  $[-\pi, -\frac{7\pi}{8}) \cup [\frac{7\pi}{8}, \pi]$ , 如图 1 所示。

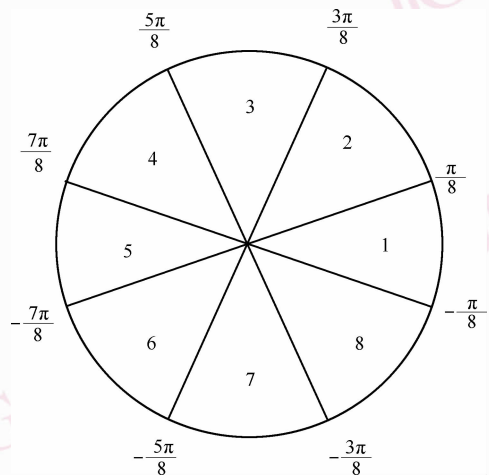


图 1 梯度方向的 8 个区域  
Fig. 1 8 zones in gradient direction

③ 当当前像素点的梯度落在包含坐标轴的 4 个区间——1、3、5、7 之内时,当前点的边缘方向均值  $I_m(i, j)$ 、梯度方向高灰度均值  $I_h(i, j)$  和低灰度均值  $I_l(i, j)$ , 分别由当前点的沿边缘方向的均值, 梯度方向邻域点沿边缘方向的均值以及梯度反方向邻域点

沿边缘方向的均值得到。参考图2的邻域标号图,以区域1为例:

$i-1, j-1$	$i-1, j$	$i-1, j+1$
$i, j-1$	$i, j$	$i, j+1$
$i+1, j-1$	$i+1, j$	$i+1, j+1$

图2 邻域标号图

Fig. 2 Table map of neighbors

$$I_M(i, j) = [I(i-1, j) + I(i, j) + I(i+1, j)] / 3 \quad (5)$$

$$I_H(i, j) = [I(i-1, j+1) + I(i, j+1) + I(i+1, j+1)] / 3 \quad (6)$$

$$I_L(i, j) = [I(i-1, j-1) + I(i, j-1) + I(i+1, j-1)] / 3 \quad (7)$$

当当前像素点的梯度落在斜方向的4个区间——2、4、6、8之内时,当前点的边缘方向均值  $I_M(i, j)$ 、梯度方向高灰度均值  $I_H(i, j)$  和低灰度均值  $I_L(i, j)$ , 仍然分别由当前点的沿边缘方向的均值, 梯度方向邻域点的沿边缘方向均值以及梯度反方向邻域点的沿边缘方向均值得到。只不过在计算时, 考虑到邻域点到边缘方向线的距离。设4邻域点到当前点的距离为1, 4邻域点到通过边缘方向线的距离为  $\sqrt{2}/2$ , 其余邻域点到边缘方向线的距离为  $\sqrt{2}$ , 如图3所示。需要在取平均时用一个权值把距离归一化。以区域2为例, 得到  $I_M(i, j), I_H(i, j), I_L(i, j)$  如下:

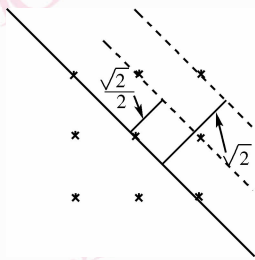


图3 45°方向高灰度点到边缘距离图

Fig. 3 Distance of dots with high grey to the edge in 45°direction

$$I_M(i, j) = [I(i-1, j-1) + I(i, j) + I(i+1, j+1)] / 3 \quad (8)$$

$$I_H(i, j) = I_M(i, j) + [\sqrt{2}(I(i-1, j) + I(i, j+1) - 2I_M(i, j)) + (I(i-1, j+1) - I_M(i, j)) / \sqrt{2}] / 3 \quad (9)$$

$$I_L(i, j) = I_M(i, j) + [\sqrt{2}(I(i, j-1) + I(i+1, j) - 2I_M(i, j)) + (I(i+1, j-1) - I_M(i, j)) / \sqrt{2}] / 3 \quad (10)$$

类似于形态减宽增强, 下面给出了1维边缘减宽增强示意图, 如图4所示, 当  $I_M(i, j) < [I_L(i, j) + I_H(i, j)] / 2$  时, 当前点处于斜坡边缘下部分, 令增强后灰度为邻域低灰度均值  $I_L(i, j)$ ; 当时  $I_M(i, j) > [I_L(i, j) + I_H(i, j)] / 2$  时, 当前点处于斜坡边缘上部分, 令增强后灰度为邻域高灰度均值  $I_H(i, j)$ , 从而达到减小边缘宽度的目的, 把斜坡边缘的宽度  $W$  减小到了  $w$ , 有利于进行边缘提取。

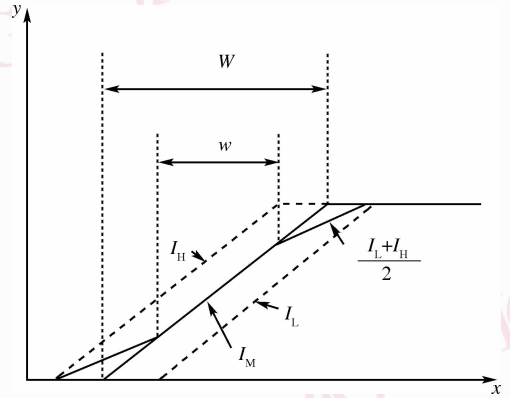


图4 边缘减宽原理示意图

Fig. 4 Representation to the edge width reduction

$$I_{\text{EdgeEnh}}(i, j) = \begin{cases} I_L(i, j) & I_M(i, j) < \frac{I_L(i, j) + I_H(i, j)}{2} \\ I_H(i, j) & I_M(i, j) > \frac{I_L(i, j) + I_H(i, j)}{2} \\ I_M(i, j) & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

可以看出, 如果再次进行上述操作, 斜坡接近平坦区域的两端都将被变成平坦区域, 而阶跃边缘不会受到操作的影响。因此, 有足够的理由相信经过有限次上述操作后, 斜坡边缘将变成阶跃边缘。

### 3.2 模糊策略

对于实际的图像, 判断当前点是否为边缘, 首先, 它应该具有一定大小的梯度幅值。但是, 由于噪声干扰难以避免, 所以那些梯度幅值较大的点也很有可能是噪声点。此外, 处于同一模糊边缘上大多数点的梯度的方向变化较小, 比较一致。梯度方向值集中在某个值附近的概率较高, 而取其他值的概率较低。因此, 模糊边缘区域的边缘图像具有两个特征:

- (1) 模糊边缘梯度幅值较大;
- (2) 大多数边缘点的梯度方向出现在同一个角度范围内。

可以从这两个方面来判断边缘, 制定模糊策略。

## (1) 判断梯度幅值大小

根据各点的梯度  $g_{Mag}(i, j)$ , 得到图像的梯度直方图  $g_{Hist}(k)$ ,  $k \in [0, G_{max}]$ ,  $G_{max}$  为梯度的最大幅值。梯度越大, 属于边缘的概率越大。则就梯度幅值而言, 点  $(i, j)$  属于边缘的概率为

$$q(i, j) = \frac{\sum_{i=0}^{g_{Mag}(i, j)} g_{Hist}(i)}{S_{image}} \quad (12)$$

式中,  $S_{image}$  表示图像大小。

对当前点幅值定义如下隶属度函数:

$$\mu_0 = \begin{cases} 0 & q < 0.3 \\ 2.5(q - 0.3) & 0.3 \leq q < 0.7 \\ 1 & q \geq 0.7 \end{cases} \quad (13)$$

## (2) 判断当前点邻域梯度方向的一致性

计算当前点邻域梯度方向均值

$$\bar{g}_{Angle} = \text{mean}(g_{Angle}(i + m, j + n)) \\ i, j \in [-1, 1] \quad (14)$$

则当前点各邻域点梯度方向和  $\bar{g}_{Angle}$  之间的差值  $\hat{g}_{Angle}$  为

$$\hat{g}_{Angle}(m, n) = \text{abs}(g_{Angle}(i + m, j + n) - \bar{g}_{Angle}) \\ m, n \in [-1, 1] \quad (15)$$

在邻域窗内满足和平均梯度方向角度差值小于  $\pi/4$  的像素个数  $K$  表示为

$$K = \text{find}[\hat{g}_{Angle}(m, n) < \pi/4] \quad (16)$$

式中,  $\text{mean}(\cdot)$  是取均值,  $\text{abs}(\cdot)$  是取绝对值,  $\text{find}(\cdot)$  是找到满足条件的像素个数。定义隶属度函数:

$$\mu_1 = \begin{cases} 0 & K < 4 \\ (K - 4)/4 & 4 \leq K < 8 \\ 1 & K \geq 8 \end{cases} \quad (17)$$

算法中定义如下模糊规则:

(1) 如果  $\mu_0$  大, AND  $\mu_1$  大, 即梯度幅值大, 邻域像素的梯度相位一致, 那么当前像素是边缘的可能性很大, 采用边缘减宽增强;

(2) 如果  $\mu_0$  大, AND  $\mu_1$  小, 即梯度幅值大, 邻域像素的梯度相位不一致, 那么当前像素是边缘的可能性小, 有可能是噪声, 取邻域均值平滑噪声;

(3) 如果  $\mu_0$  小, AND  $\mu_1$  大, 梯度幅值小, 邻域像素的梯度相位一致, 那么当前像素是边缘的可能性小, 有可能是平坦区域, 取邻域均值;

(4) 如果  $\mu_0$  小, AND  $\mu_1$  小, 即梯度幅值小, 邻域像素的梯度相位不一致, 那么当前像素是边缘的可能性很小, 取邻域均值平滑噪声。

对于规则中“AND”的复合算子是取小运算。

$$\mu = \min(\mu_0, \mu_1) \quad (18)$$

模糊推理合成式(4)和式(11)得到的结果, 最后滤波输出为

$$I_{fuEnh} = (1 - \mu)I_{mean} + \mu I_{EdgeEnh} \quad (19)$$

## 4 实验结果与分析

图 5(a), 图 6(a) 分别为无噪声模糊的“Camaraman”图像, 模糊带噪“Peppers”图像, 图像大小都是  $256 \times 256$ 。图(b)分别是用形态边缘减宽增强后得到的图像, 图(c)分别是由基于各向异性扩散偏微分方程的方法<sup>[4]</sup>得到的增强结果( $K = 10$ , 迭代 20 次), 图(d)分别是本文的方法增强后得到的图像。

从实验中可以看出, 偏微分方程增强方法平滑效果较明显, 但对边缘模糊增强效果相对不明显, 经过实验发现, 参数的选取不当还会更加模糊边缘。扩散过程中, 弱的边缘也逐渐被平滑掉, 使得图像整体对比度降低。本文的方法在增强大区域的目标时, 和形态边缘减宽增强算法相差不大, 但是在细节较丰富区域, 如“Camaraman”中的照相机处, 增强效果不如形态边缘减宽增强, 如图 5(b)和(c)所示。这是由于本算法采用的是取梯度方向高灰度均值和



(a) 模糊图像

(b) 形态减宽增强结果

(c) 各向异性扩散增强结果

(d) 本文减宽增强结果

图 5 无噪 Cameraman 边缘减宽增强结果

Fig. 5 The enhance results to noiseless "Cameraman" picture

低灰度均值代替膨胀和腐蚀运算中的取最大值和最小值造成的,锐化效果不如形态边缘减宽增强。但是,在噪声图像中,如图6(b)和图6(c)所示可以看出,本算法明显的好于形态边缘减宽增强算法,和偏微分方程方法比较,在抑制噪声方面相差不大,但对模糊边缘的宽度减小效果更大。

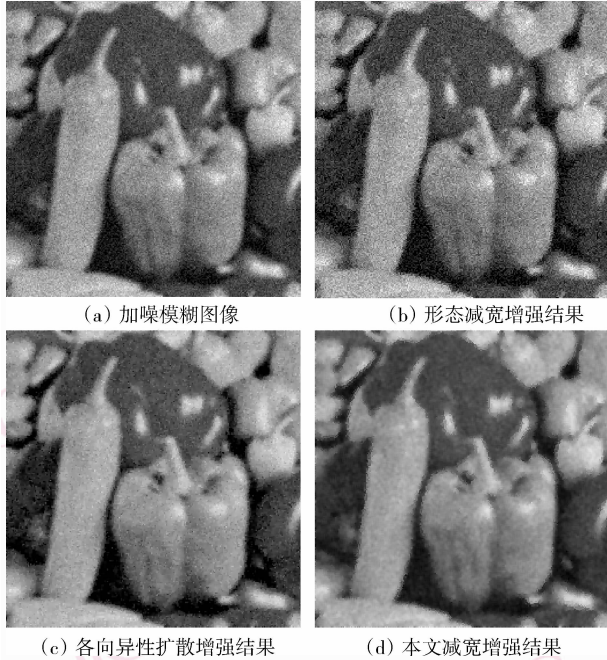


图6 有噪 Peppers 边缘减宽增强结果

Fig.6 The enhance results to noisy "Peppers" picture

## 5 结论

形态边缘减宽增强算法,抛弃了常用的通过增

加不同区域之间的对比来增强边缘的途径。通过减小斜坡边缘的宽度,逐渐把斜坡边缘变为阶跃边缘,使模糊图像变得清晰。本文分析了形态边缘减宽增强算法的不足之处,在此基础上提出了一种斜坡边缘的模糊减宽增强算法。由实验结果看出,本方法对无噪图像在细节部分增强效果不如形态边缘减宽增强算法,但对噪声图像,能在增强边缘的同时,抑制噪声,得到更好的视觉效果。

## 参考文献 (References)

- 1 Sun Ji-xiang. Image Processing [M]. Beijing: Science Press, 2004. [孙即祥. 图像处理 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.]
- 2 Pal S K, King R A. Image enhancement using smoothing with fuzzy sets [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1981, **11**(7): 494-501.
- 3 Wang Hui, Zhang Ji-hong. An algorithm of edge detection based on fuzzy enhancement of contrast among successive regions [J]. Acta Electronica Sinica, 2000, **28**(1): 45-47. [王晖, 张基宏. 图像边界检测的区域对比度模糊增强算法 [J]. 电子学报, 2000, **28**(1): 45-47.]
- 4 Perona P, Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. IEEE Transactions on PAMI, 1990, **12**(7): 629-639.
- 5 Leu J G. Edge sharpening through ramp width reduction [J]. Image and Vision Computing, 2000, **18**(6-7): 501-514.
- 6 Schavemaker J, Reinders M, Gerbrands J, et al. Image sharpening by morphological filtering [J]. Pattern Recognition, 2000, **33**(6): 997-1012.
- 7 Feng Guo-jin, Gu Guo-hua, Chen Qian. Edge enhancement of infrared image based on morphology [J]. Laser and Infrared, 2003, **33**(6): 453-454. [冯国进, 顾国华, 陈钱. 基于形态学的红外图像边缘增强 [J]. 激光与红外, 2003, **33**(6): 453-454.]