

基于模糊熵的自适应图像多层次模糊增强算法

王保平^{1,2}, 刘升虎¹, 范九伦³, 谢维信⁴

(1. 西安石油大学电子工程学院, 西安 710065; 2. 西安电子科技大学电子工程学院, 西安 710071;
3. 西安邮电学院信控系, 西安 710061; 4. 深圳大学信息工程学院, 深圳 518060)

摘 要: 该文对图像模糊增强算法中的非线性变换进行了较深入的研究, 发现了其存在的问题, 例如变换的强度较小, 运算速度较慢, 丢失部分灰度信息等缺点. 提出了一种新的模糊增强变换算子, 该变换算子不但克服了上述缺点, 而且具有封闭性、变换强度可调性以及移植性好等优点. 并将该算子成功地引入到多层次图像模糊增强算法中, 取得了较好的效果; 另外, 该文针对以往算法需要人工介入设置阈值参数方可进行图像增强的缺点, 通过模糊熵的引入, 新算法可以自动地选取最佳的阈值参数而不需人为的介入, 因而成功的解决了这一难题; 最后, 将新的多层次模糊增强算法应用于图像边缘检测中, 取得了优于现有模糊增强方法的效果.

关键词: 图像增强; 边缘检测; 隶属度函数

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 04-0730-05

An Adaptive Multi-level Image Fuzzy Enhancement Algorithm Based on Fuzzy Entropy

WANG Bao-ping^{1,2}, Liu Shenghu¹, FAN Jiu-lun³, XIE Wei-xin⁴

(1. School of Electronics Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;
2. School of Electronics Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;
3. Department of Information and Control, Xi'an Institute of Post and Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710061, China;
4. Institute of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract: The no-linearity transform in image enhancement was researched deeply in the paper, its drawbacks were found. Then, an novel image fuzzy enhancement arithmetic operators was proposed, the arithmetic operators not only overcome the drawbacks of the old no-linearity transform, but also has close-character, adjusting-character and transplantable-character to other enhancement arithmetic. In addition, through quoting fuzzy entropy, make the select of threshold value in image enhancement have a certainty purpose. We use our new algorithm to extract image edges, with better result than that of now-available image fuzzy enhancement method.

Key words: image enhancement; edge detection; membership function

1 引言

图像增强是图像处理的一个重要分支, 根据 Pratt^[1]的理论, 它的定义可表达为: “图像增强是用来提高图像的视觉效果, 或将图像转换成适于人眼、机器分析的形式的一门技术.” 一般地, 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, 而模糊集理论在分析诸如判断、感知及辨识等人类系统的各种行为时是一种有效的工具, 因而模糊集理论正被越来越广泛地引入到图像增强算法^[2~6, 8]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)将图像分为两个区域, 对这两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图像的增强效果较好, 但对灰度层次较多图像的增强效果较差.

一般地, 人们会对多个不同灰度层次的边缘感兴趣, 因此, 需要同时增强图像中不同灰度层次的边缘信息. 基于上述, 文献[7]在文献[8]的基础上, 推广了单层次模糊增强算法, 提出了一种多层次模糊增强算法, 取得了较好的效果. 但该算法也存在不足之处: (1) 该算法对各层次阈值参数的选取是随机的、盲目的, 因而无法体现实际图像的层次信息. 而且该算法需要人工介入预先设置阈值参数后, 才可运行, 这就限制了其应用. (2) 该算法使增强图像的灰度值产生分段压缩集中的现象, 导致灰度信息的损失及图像层次感较差, 影响图像的视觉效果. (3) 由于该算法采用的模糊增强变换函数的形式固定且变换强度较弱, 其必须经过数次迭代才能达到预期的目的, 故该算法的运算速度较慢. 针对上述方法的不足, 本文提出了一种新的模糊增强方法, 取得了较好的效果.

2 单层次模糊增强算法及其缺陷

依照模糊集的概念, 一幅大小为 $M \times N$, 灰度级为 L 的图

像 X , 可以表示为一个 $M \times N$ 的模糊矩阵

$$X = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & \dots & N \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \dots \\ M \end{matrix} & \mu_{ij}/x_{ij} \end{matrix} \quad (1)$$

矩阵中各个元素 μ_{ij}/x_{ij} 表示图像中像素 (i, j) 的灰度 x_{ij} 相对于某个特定灰度级 x 的隶属度, 在经典的模糊增强算法^[2~4]中, Pal 和 King 采用的隶属函数为

$$\mu_{ij} = T(x_{ij}) = \left[1 + \frac{(L-1) - x_{ij}}{F_d} \right]^{-F_e} \quad (2)$$

其中参数 F_d 、 F_e 和 μ_{ij} 的形状有关, 可以通过渡越点确定, 文献^[3]给出了确定的方法, 一般取 $F_e = 2$. 得到 μ_{ij} 后, 对图像进行模糊增强处理, 采用如下变换:

$$\mu_{ij} = I_r(\mu_{ij}) = I_1(I_{r-1}(\mu_{ij})), \quad r=1, 2, \dots \quad (3)$$

$$I_1(\mu_{ij}) = \begin{cases} 2(\mu_{ij})^2, & 0 \leq \mu_{ij} \leq 0.5 \\ 1 - 2(1 - \mu_{ij})^2, & 0.5 < \mu_{ij} \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

第三步是对 μ_{ij} 进行逆变换, 得到经过模糊增强后的图像 X , X 中像素 (i, j) 的灰度值 x_{ij} 为:

$$x_{ij} = T^{-1}(\mu_{ij}) \quad (5)$$

其中 $T^{-1}(\cdot)$ 为式(2)中 $T(\cdot)$ 的逆运算.

在式(2)中, 设 $x_{ij} = X_c$ 时, $T(X_c) = 0.5$, 称 X_c 为渡越点.

则

$$T(X_c) = \left[1 + \frac{(L-1) - X_c}{F_d} \right]^{-F_e} = 0.5 \quad (6)$$

由此可得:

$$F_d = \frac{(L-1) - X_c}{2^{1/F_e} - 1} \quad (7)$$

参数 F_d 由 X_c 和 F_e 所决定, 设定 X_c 和 F_e , 就可得到 $\mu_{ij} \sim x_{ij}$ 曲线, 图 1 给出了 $F_e = 2$ 时 $\mu_{ij} \sim x_{ij}$ 曲线.

观察图 1 中 $0 \leq x_{ij} \leq X_c$ 这一区域, 当 $x_{ij} = 0$ 时 μ_{ij} 为最小, 记为, 由式(2)得

$$= [1 + (L-1)/F_d]^{-F_e} \quad (8)$$

结合式(7), 有

$$= \left[1 + (2^{1/F_e} - 1) \cdot \frac{L-1}{L-1-X_c} \right]^{-F_e} \quad (9)$$

当 $F_e = 2$ 时显然 > 0 .

经过式(3)的 $I_r(\cdot)$ 变换后, 会出现 $\mu_{ij} < 0$ 的情况, 此时 $T^{-1}(\cdot)$ 逆变换无解. 为解决这一问题, Pal 算法中对 $\mu_{ij} < 0$ 的情况硬性规定 $\mu_{ij} = 0$, 这样将会造成在增强后的图像 X 中, 原图像 x 中相当多的低灰度值被硬性切削为零, 从而损失了 x 中的部分灰度信息, 影响边缘检测质量. 注意到在经过 $T(\cdot)$ 变换后还要进行 $T^{-1}(\cdot)$ 逆变换, 且 $T(\cdot)$ 与 $T^{-1}(\cdot)$ 的函数复杂, 这就造成了算法的计算量较大.

3 多层次模糊增强算法及缺陷

文献^[7]基于文献^[8]提出了一种多层次模糊增强算法, 该算法如下:

文献^[7]中采用的隶属度函数如下:

$$\mu_{ij} = T(x_{ij}) = \frac{x_{ij}}{L-1} \quad (2. a)$$

文献^[7]假设图像中待增强的边缘信息对应的灰度级分别为 x_1, x_2, \dots, x_J , 令 $x_0 = 0, x_{J+1} = L-1$. 它们相对于 $L-1$ 的隶属度分别为:

$$\mu_m = \frac{x_m}{L-1}, \quad m=0, 1, 2, \dots, J, J+1 \quad (10)$$

选取适当的隶属度 $\tilde{\mu}_m, \mu_m, \tilde{\mu}_m, \mu_{m+1}$ 其中, $(m=0, 1, 2, \dots, J)$, 当 $\mu_m < \mu_{ij} < \mu_{m+1}$ 时, 非线性的结果使 μ_{ij} 的值向 $\tilde{\mu}_m$ 靠拢. 非线性变换定义如下:

$$\mu_{ij} = I_r(\mu_{ij}) = I_1(I_{r-1}(\mu_{ij})), \quad r=1, 2, \dots \quad (3. a)$$

$$I_1(\mu_{ij}) = \begin{cases} \tilde{\mu}_m - \frac{(\tilde{\mu}_m - \mu_{ij})^2}{\tilde{\mu}_m - \mu_m}, & \mu_m \leq \mu_{ij} \leq \mu_{m+1} \\ \tilde{\mu}_m - \frac{(\tilde{\mu}_m - \mu_{ij})^2}{\tilde{\mu}_m - \mu_{m+1}}, & \mu_{m+1} < \mu_{ij} \leq \mu_m \end{cases} \quad (4. a)$$

其中, $\tilde{\mu}_m = \frac{\mu_m + \mu_{m+1}}{2}$ ($m=0, 1, 2, \dots, J$). 模糊增强图像 X 中像素 (i, j) 的灰度值 x_{ij} 为

$$x_{ij} = (L-1) \mu_{ij} \quad (5. a)$$

从上述可知, 文献^[7]提出的图像增强算法可以兼顾图像中不同灰度层次的边缘信息, 使增强后的图像的层次更加分明, 因而其图像增强的效果优于单层次算法的效果.

然而, 上述算法也存在着一些不足之处: (1) 边缘信息对应的灰度级 (x_1, x_2, \dots, x_J) 的选取是随机的, 缺乏理论依据, 因而可能达不到预期的效果. (2) 该算法会使图像灰度值过分集中且趋于一致, 其实质上导致了该区域图像灰度信息的丢失. (3) 由于式(4a)非线性变换的强度较小, 因而该算法的运算速度较慢.

为了克服这些缺点, 本文提出了一种基于广义模糊集合的图像多层次增强算法. 下面具体作以介绍.

4 图像边缘附近像素灰度信息的提取

本文通过模糊熵的引入, 利用模糊熵测度提取出图像边缘附近的灰度值信息, 求出图像中不同边缘的灰度值以此作为图像增强算法中选取各层次阈值参数的依据.

4.1 基于模糊熵的图像边缘测度

图像边缘点邻域内的灰度分布和非边缘点邻域内的灰度分布不同. 本文定义一种模糊熵测度来描述这种灰度分布特征.

在图像的灰度值矩阵中, 取一个大小为 $n \times n$, 中心在 (i, j) 的窗口 $W_n(i, j)$, 则在该窗口上, 可定义一个基于模糊熵^[9]的测度 $R(i, j)$ 为:

$$R(i, j) = \frac{1}{(n \times n)} \sum_{k=-\lfloor (n-1)/2 \rfloor}^{\lfloor (n-1)/2 \rfloor} H_m(u_m(x(i+k, j+l))) \quad (11)$$

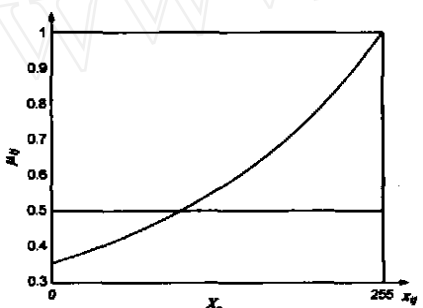


图 1 $\mu_{ij} \sim x_{ij}$ 曲线

在上式中,令 $m = x(i, j)$. 则当窗口中的其他灰度值和窗口中心 (i, j) 处的灰度值 $x(i, j)$ 相等或接近时,模糊熵 $R(i, j)$ 为零或较小;反之,模糊熵较大. 因此,当 (i, j) 点的像素处于平滑区时,窗口内区域的灰度值比较一致,其他灰度值均接近中心处的灰度值 $x(i, j)$, 则 $R(i, j)$ 较小;反之,当中心点 (i, j) 处于图像的边缘点时,窗口内区域的灰度值差异较大, $R(i, j)$ 较大.

4.2 增强算法中的各级灰度值的选取

该过程的步骤如下:

(1) 计算出图像中所有像素点的 $R(i, j)$ 值,组成一个图像边缘特征矩阵 $R = [R(i, j)]_{M \times N}$, 在矩阵中取一个阈值 T , 我们认为当 $R(i, j) > T$ 时,该像素点是图像的边缘点,否则,认为是非边缘点.

(2) 去掉那些非边缘点的像素.

(3) 对图像边缘点处的像素灰度值进行统计处理. 本文采用直方图的方法.

(4) 求出该直方图的各局部包络的极大值作为该增强算法中的各级灰度值.

文献[6]利用原图像直方图的谷点作为图像增强算法中选取各级灰度值的依据,该方法优于文献[7]的随机选取法. 但图像直方图的谷点是否就是图像边缘处的灰度值这个问题有待进一步的商榷. 为此,我们用实验来讨论之. 实验时,利用 lena 图像作为输入,实验结果如图 2 所示. 图 2(a)是用本小节的步骤(1)得到的该图像主要的边缘图. 图 2(b)是用步骤(3)得到的该边缘图像的直方图,从中可看出, lena 图像的主要边缘处像素的灰度值大约为 120. 图 2(c)是 lena 图像的直方图,按文献[6]方法得到主要边缘对应的灰度值 t_1 约为 50,很显然,此值和 lena 图像主要边缘对应的灰度值 120 不相等. 图 2(d)是用本文方法得到的 lena 图像边缘附近像素灰度值的直方图,按本文方法得到的两个主要的图像边缘处像素的灰度级 t_1 和 t_2 分别约为 65 和 120. 显然,其中之一正是图像的主要边缘对应的灰度值,所以本文方法是有效的.

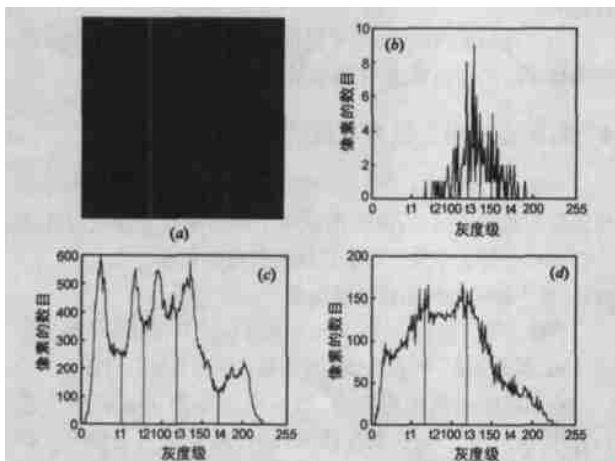


图 2 增强算法中各级灰度值的不同选取方法比较

5 基于广义模糊算子的图像多层次增强算法

文献[10]给出了广义模糊集和广义模糊算子的定义.

定义 1 论域 U 的广义模糊集合 A 表示为

$$A = \int_x \mu_A(x) / x \text{ 或 } A = \{(\mu_A(x), x \in U)\} \quad (12)$$

其中 $\mu_A(x) \in [-1, 1]$ 为 U 上 A 的广义隶属度函数.

若 U 是由有限个元素构成的有限域,即 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 则广义模糊集合 A 是有限的,定义为

$$A = \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \dots + \frac{\mu_A(x_n)}{x_n} = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_A(x_i)}{x_i} \quad (13)$$

其中 $\mu_A(x_i)$ 称为元素 x_i 对于 A 的广义隶属度. 由上述定义显然可见,广义模糊集是对普通集合的一种扩充,即将普通模糊集的隶属度 $\mu_A(x) \in [0, 1]$ 扩充为广义模糊集的 $\mu_A(x) \in [-1, 1]$. 因此在图像处理的应用中广义模糊集有比普通模糊集更大的拉伸和变换范围.

定义 2 一个广义模糊算子 GFO, 它作用于广义模糊集 A 上可产生一个另一个广义模糊集 A , 即 $A = \text{GFO}(A)$. 本文中 GFO 算子定义为:

$$\mu_A(x) = \text{GFO}[\mu_A(x)] = \begin{cases} - [- ((r^{1/f} - 1) + r) \cdot \mu_A(x) - \mu_A(x)^2]^f, & -r \leq \mu_A(x) < 0 \\ [(r^{1/f} - 1) + r) \cdot \mu_A(x) - \mu_A(x)^2]^f, & 0 \leq \mu_A(x) \leq r \end{cases} \quad (14)$$

式中 r 和 f 为常数, 其范围是 $0 < r < 1$ 及 $0 < f$. 从上式可知,本文定义的广义模糊算子可以利用 f 值的大小调节 $\mu_A(x)$ 和 $\mu_A(x)$ 间的变化曲线,从而控制图像增强的程度. 另外,新的模糊算子具有封闭性,即在变换区间的两端变量和函数是相等的.

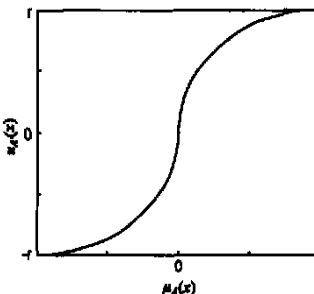


图 3 $\mu_A(x) \sim \mu_A(x)$ 曲线

图 3 给出了当 $f = 0.5$ 时的 $\mu_A(x) \sim \mu_A(x)$ 曲线.

性质 1 当 $-r \leq \mu_A(x) < 0$ 时, $\mu_A(x) \sim \mu_A(x)$

性质 2 当 $0 \leq \mu_A(x) \leq r$ 时, $\mu_A(x) \sim \mu_A(x)$

显然广义模糊算子通过降低 $-r \leq \mu_A(x) < 0$ 区域中 $\mu_A(x)$ 的值和增加 $0 \leq \mu_A(x) \leq r$ 区域中 $\mu_A(x)$ 的值,起到了增强两个区域之间对比度的作用.

与式(1)类似,图像 X 可以看作是一个广义模糊集,表示为矩阵:

$$X = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \mu_{ij} / x_{ij} \quad (15)$$

矩阵中每个元素 $\mu_{ij} / x_{ij} \in [-1, 1]$ 是广义模糊集的一项.

为克服式(2)求 μ_{ij} 的缺陷,本文采用文献[5]提出的一种升半梯形模糊分布来求 μ_{ij} , 即

$$\mu_{ij} = T(x_{ij}) = (x_{ij} - T) / (x_{\max} - T) \quad (16)$$

其中 T 为阈值参数, x_{\max} 是图像的最大灰度值. 显然式(16)中的 $\mu_A(x) \in [-1, 1]$, 故由此所产生的集合 $\mu = \{\mu_{ij}\}$ 符合本文广义隶属度的定义. 式(16)是一个简单线性函数,与式(2)相比,运算速度大为提高.

综上,给出基于 GFO 算子的图像增强方法如下:

步骤 1 通过式(16)将待处理的图像 x 从空域的灰度值 $X = \{x_{ij}\}$ 映射为与之对应的广义隶属度 $\mu = \{\mu_{ij}\}$.

步骤 2 利用式(14)定义的 GFO 算子对广义隶属度进行非线性变换,即 $\mu_{ij} = \text{GFO}(\mu_{ij})$.

步骤 3 通过式(16)的反函数,将 μ_{ij} 映射为二维空间域的灰度图像,得到经过模糊增强处理后的图像 X , X 中的像素 (i, j) 的灰度值为 x_{ij} 为

$$x_{ij} = T^{-1}(\mu_{ij}) = \mu_{ij} \cdot (x_{\max} - T) + T \quad (17)$$

以上讨论的是单层次模糊增强算法.我们很容易将其推广为多层次模糊增强算法,其过程如下:

$$\mu_{ij} = T(x_{ij}) = (x_{ij} - x) / (x_{\max} - x) \quad (2. b)$$

假设 x_1, x_2, \dots, x_J 等是边缘信息对应的灰度级,它们可以通过本文的算法提取出.详细过程如第四节所述.同时令 $x_0 = 0, x_{J+1} = x_{\max}$. 它们的隶属度分别为:

$$\mu_{ij}^m = (x_{ij} - x_m) / (x_{\max} - x_m), m = 0, 1, \dots, J, J+1 \quad (10 a)$$

选取适当 $\tilde{\mu}_{ij}^{(m-1)}$ 和 $\tilde{\mu}_{ij}^{(m+1)}$ 值 ($m = 1, 2, \dots, J, J+1$). 其中

$$\tilde{\mu}_{ij}^{(m-1)} = - \frac{(x_{m-1} + x_m) / 2 - x_m}{x_{\max} - x_m},$$

$$\tilde{\mu}_{ij}^{(m+1)} = \frac{(x_{m+1} + x_m) / 2 - x_m}{x_{\max} - x_m}.$$

并令, $\tilde{\mu}_{ij}^0 = \frac{x_m}{x_{\max} - x_m}, \tilde{\mu}_{ij}^{(J+1)} = \frac{255 - x_m}{x_{\max} - x_m}.$

则非线性变换可定义如下:

$$\mu_{ij} = \text{GFO}_r(\mu_{ij}) = \text{GFO}_1(\text{GFO}_{(r-1)}(\mu_{ij})), r = 1, 2, \dots \quad (3. b)$$

$$\begin{cases} \mu_{ij}^{(m)} = \text{GFO}_{(1)}[\mu_{ij}^{(m)}] = \\ - [- ((r_1^{(1/f-1)} + r_1) \cdot \mu_{ij}^{(m)} - (\mu_{ij}^{(m)})^2)]^f, & -r_1 \leq \mu_{ij}^{(m)} < 0 \\ [(r_2^{(1/f-1)} + r_1) \cdot \mu_{ij}^{(m)} - (\mu_{ij}^{(m)})^2]^f, & 0 \leq \mu_{ij}^{(m)} \leq r_2 \end{cases} \quad (4. b)$$

其中, $m = 1, \dots, J, r_1 = \tilde{\mu}_{ij}^{(m-1)}, r_2 = \tilde{\mu}_{ij}^{(m+1)}.$

增强图像 X 中的像素 (i, j) 的灰度级 x_{ij} 为

$$x_{ij} = T^{-1}(\mu_{ij}) = \mu_{ij} \cdot (x_{\max} - x_m) + x_m \quad (5. b)$$

从式(4. b)可知,本文算法的非线性变换的结果可以使灰度级附近的边缘得到锐化.即当 $(x_{m-1} + x_m) / 2 < x_{ij} < x_m$ 时,非线性变换的结果使 x_{ij} 偏离 x_m 值减小,并向灰度值为 $(x_{m-1} + x_m) / 2$ 靠拢,反过来,当 $x_m < x_{ij} < (x_{m+1} + x_m) / 2$ 时,非线性变换的结果使 x_{ij} 偏离 x_m 值增大,并向 $(x_{m+1} + x_m) / 2$ 靠拢.

6 实验结果及其分析

6.1 模糊增强变换的理论分析

图 4 是几种两层次模糊增强算法在图像增强前后灰度值间变换曲线的比较图,其两个阈值参数的灰度值分别选为 $T_1 = 38$ 和 $T_2 = 140$.图中曲线的横坐标是增强前的灰度值,纵坐标是增强后的灰度值.

图 4(a)是根据文献[7]中的式(2a)~(5a),并迭代 1 次而计算出的增强前后图像灰度值的变化曲线.从图中可知该方法的优点是未损失图像的灰度信息,未出现灰度值过调现象.其缺点是不但速度较慢,而且存在着对灰度值的压缩集中现

象.这从图 4(c) 中可看到,其中增强后的灰度值大部分集中在 $T_1 = (0 + T_1) / 2, T_2 = (T_2 + T_1) / 2$ 和 $T_3 = (T_2 + 255) / 2$ 三个灰度值处,事实上这也是一种灰度信息的损失现象.

图 4(b)是利用本文提出的多层次模糊增强算法对图像进行两层次增强,并迭代 1 次后的灰度值随原图像灰度值的变化曲线.从图 4(b)可知新方法不但具有文献[7]方法的优点外,而且没有出现文献[7]方法产生的灰度值压缩集中现象.另外,其运算速度较快.其经过 1 次迭代的变换曲线斜率在阈值参数 T_1 和 T_2 处的值大约等于文献[7]方法经过 3 次迭代的曲线在此处斜率,见图 4(c).说明其速度大约是文献[7]方法的 3 倍.

6.2 实验结果

用大量的图像对本文所提出的算法进行了仿真实验.现以 Cronkite 图为例,进行说明和比较.

Cronkite 图像的大小为 256×256 、灰度级为 256.实验时,先对图像进行增强,再对增强后的图

像进行边缘提取.本文采用模糊增强算法进行图像增强,使用文献[11]提出的“min”或“max”算子进行边缘提取.定义图像的边缘为矩阵

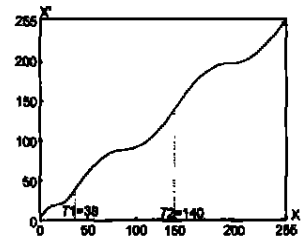
$$E_{\text{edges}} = [l_{mn}]_{M \times N} \quad (18)$$

$$l_{mn} = |x_{mn} - \min_Q \{x_{ij}\}|, (i, j) \in Q \quad (19)$$

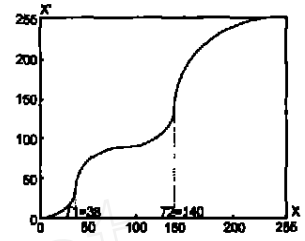
Q 为以 (m, n) 为中心的 3×3 的窗口. x_{mn} 为增强后图像在 (m, n) 处的灰度值.

实验结果如图 5 所示.图 5(a)为原图像,图 5(b)和图 5(c)是采用文献[8]方法(即单层次模糊增强)对图像进行增强处理后再进行边缘检测的结果,图 5(d)是采用文献[7]方法的结果,图 5(e)是采用本文方法的结果.

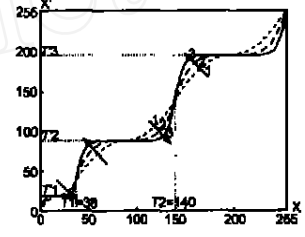
如图 5(b)所示,由于采用单层次模糊增强算法(并取 $T = 23$,迭代 3 次),增强了肩部的边缘信息,但抑制了脸部的边缘信息;反过来,如图 5(c)所示(取 $T = 140$,且迭代 3 次),增强了脸部的边缘信息,但抑制了肩部的边缘信息.如图 5(d)所示,由于采用两层次模糊增强(取 $T_1 = 23, T_2 = 140$,迭代 3 次,运行时间 $t = 81.18$ 秒),同时增强了肩部的边缘信息与脸部的边缘信息,能够检测出更多的细节边缘.如图 5(e)所示,采用的是本文提出的多层次模糊增强算法(只需迭代 1 次运行时间 $t = 30.88$ 秒),由于本文方法只需迭代 1 次,因而其速度



(a) 文献 [7]方法(两层)迭代 1 次的结果



(b) 新方法(两层)迭代 1 次($\rho=0.5$)的结果



(c) 文献 [7]方法(两层)迭代 3 次的结果

图 4 几种两层次模糊增强算法在图像增强前后灰度值间变化曲线的比较



较快.又由于新方法能够自动检测到图像各边缘对应的灰度值,并用其作为多层次模糊增强算法中各层次阈值参数的选取依据,因而其图像增强效果较佳.例如其不但检测的边缘更加准确(图 5(e)的头发轮廓较之图 5(d)更逼真),而且漏检情况也有所改善,检测出了耳部的轮廓,检测出了左上部分的下边缘及上部的边缘等.最后,需要指出的是前几种方法均需进行人为介入,必需预先设定阈值参数后才能对图像进行增强处理,这样就限制了其在实际问题中的应用.而本文提出的新方法克服了上述方法的不足,不需进行人为的干预,图像增强的过程可以自动完成.

7 结论

本文提出了一种基于模糊熵的自适应图像多层次增强算法,该方法通过模糊熵的引入,提取出了边缘信息对应的灰度级,克服了以往算法在选取阈值参数时的盲目性,而且该选取过程可以自动完成,不需进行人为的介入,因而本文的算法具有一定的自适应性和实用性.另外,针对现有模糊增强算法中的核心问题,即非线性变换的缺陷,提出了一种新的模糊增强变换函数,该变换函数不但克服了现有非线性变换的缺点,而且具有封闭性和变换强度可调性.实验表明,该算法不但能够同时增强图像中不同层次的边缘信息,而且使增强后图像的灰度值更加均衡,视觉效果更好.

参考文献:

- [1] W K Pratt. Digital image processing [C]. 2nd Edition. New York, USA: Wiley Interscience. 1991. 188 - 198.
- [2] S K Pal, R A King. On edge detection of X-Ray images using fuzzy sets [J]. IEEE Trans Patt Anal and Machine Intell, 1983, PAMI-5 (1) : 69 - 77.

- [3] S K Pal, R A King. Image enhancement using fuzzy sets [J]. Electron Lett, 1980, 16 (9) : 376 - 378.
- [4] S K Pal, R A King. Image enhancement using smoothing with fuzzy sets [J]. IEEE Trans Syst Man Cybern, 1981, 11 (7) : 494 - 501.
- [5] 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.
WANG Hui, ZHANG Jilong. An algorithm of edge detection based on fuzzy enhancement of contrast among successive regions [J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28 (1) : 45 - 47.
- [6] 周德龙,潘泉,张洪才.图像模糊边缘检测的改进算法 [J]. 中国图像图形学报, 2001, 6A (4) : 353 - 358.
- [7] 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.
- [8] 郭桂蓉,等.模糊模式识别 [M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1992.
- [9] 王保平,范九伦,谢维信.基于模糊熵的多值图像恢复方法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2004, 31 (2) : 57 - 61.
- [10] 陈武凡.彩色图像边缘检测的新算法.中国科学 (A 辑), 1995, 25 (2) : 219 - 224.
- [11] k R Castleman. Digital image processing [C]. Salt Lake City, USA: Prentice-Hall International Inc, 1996. 88 - 99.

作者简介:



王保平 男, 1964 年出生于陕西西安, 1993 年在湖北大学获得硕士学位, 现为西安电子科技大学信号和信息处理专业的博士研究生, 主要研究方向为模糊信息处理, 模式识别和图像处理.
E-mail: wbp1uo@sina.com.cn



刘升虎 男, 1970 年出生于陕西合阳, 1996 年在石油大学获得硕士学位, 现在西安石油大学电子工程学院工作, 主要从事模式识别和图像处理等方面的研究.

范九伦 男, 1964 出生于陕西西安, 博士后, 西安邮电学院教授, 西安电子科技大学博士生导师, 主要研究兴趣为不确定性推理, 模糊模式识别和图像处理, 智能信息处理.

谢维信 男, 1941 年出生于广东花县, 深圳大学校长, 博士生导师, 主要研究方向为模糊集理论, 模糊信息处理, 智能信息处理, 模式识别.