

# 图象模糊边缘检测的改进算法

周德龙 潘泉 张洪才

(西北工业大学自动控制系, 西安 710072)

**摘要** 图象的边缘检测技术是图象处理中最重要的内容之一, 且已在图象分析和识别领域中得到了广泛的应用. 针对图象边缘由模糊性引起的不确定性问题, 提出了一种图象模糊边缘检测的改进算法. 该算法是首先确定一个阈值参数, 然后根据此阈值参数来定义一个新的隶属函数, 从而将图象转化为等效的图象模糊特征平面, 通过在模糊特征平面上进行增强运算, 将其转换为空域图象, 最后再进行边缘提取, 同时还对具有多峰直方图分布图象的模糊边缘检测方法进行了推广. 仿真结果表明, 该算法是有效的.

**关键词** 图象增强 边缘检测 隶属函数 渡越点 模糊特征平面

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2001)04-0353-06

## An Improved Algorithm of Edge Detection Based on Fuzzy Sets

ZHOU De-long, PAN Quan, ZHANG Hong-cai

(Department of Automatic Control Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

**Abstract** Edge detection is one of the most important techniques in image processing, it is often used in the field of image analysis and image recognition for many applications. Pan and King firstly presented an algorithm of edge detection based on fuzzy sets, this algorithm has been found for many successful applications in the area of pattern recognition and medical image processing. In this paper, an improved algorithm of edge detection proposed by Pal and King is presented, and the approach of edge detection is also developed to be an automatic one. The steps of this approach can be summarized as follows: firstly, a threshold is selected in an image by using an automatic algorithm of thresholding; secondly, in order to extract the fuzzy property plane from the spatial domain, a new membership function based on the threshold is defined; thirdly, image enhancement is performed in the fuzzy domain by using fuzzy enhancement operator; then, the modified spatial domain is obtained; finally, the edge detection is executed using min or max operators. This algorithm is also extended to the edge detection of the multi-thresholds image. The effectiveness of the algorithm is experimentally demonstrated.

**Keywords** Image enhancement, Edge detection, Membership function, Crossover point, Fuzzy property domain.

## 0 引言

众所周知, 由于物体的边缘是由灰度不连续性所反映的, 因此经典的边缘提取方法主要是考察图象的每个象素, 其在某个邻域内的灰度变化, 即根据边缘邻近一阶或二阶方向导数变化规律, 利用简单的方法来检测边缘.

近年来, 人们对基于模糊的边缘检测技术也进行了研究<sup>[1, 2]</sup>, 如 Pal 和 King<sup>[3]</sup>提出的模糊边缘检测方法就能有效地达到将物体从背景中分离出来, 并

在模式识别和医疗图象处理中获得了良好的应用, 因此基于模糊的边缘检测技术是一种值得重视的研究方向. 模糊集合理论之所以能够成功地应用于图象处理领域, 并表现出优于传统方法的处理效果, 其根本原因在于: 图象所具有的不确定性往往是由模糊性引起的.

由于一般的边缘检测技术, 对图象中各区域象素灰度对比度大的边缘提取效果良好, 而对对比度较小的边缘, 其检测效果则不理想, 或根本无法检测出来, 因此, 在边缘检测之前需对图象的不同区域进

行增强运算,以拉开两个区域之间的对比度,保证能大幅度地提高模糊图象边缘检测的质量.

## 1 模糊特征平面

在进行模糊边缘检测时,首先是将待处理的图象映射为一个模糊矩阵,因为从模糊集的概念来看,一幅具有  $L$  个灰度级的  $M \times N$  元图象,可以看作为一个模糊集,集内的每一个元素均具有相对于某个特定灰度级的隶属函数,因此该模糊集又称为图象等效模糊集,也即图象的模糊特征平面,对应的模糊矩阵记为  $I$ ,有

$$I = \bigcup_{m=1}^M \bigcup_{n=1}^N \frac{\mu_{mn}}{X_{mn}} \quad (1)$$

矩阵中的元  $\mu_{mn}/X_{mn}$  表示图象象素  $(m, n)$  灰度级  $X_{mn}$  相对于某个特定灰度级  $X_K$  的隶属度,通常取  $X_K$  为最大灰度级  $X_{\max}$ .

## 2 模糊边缘检测算法的改进与分析

### 2.1 算法的提出

实际问题中常用的隶属函数形式是所谓标准 S 型函数和  $\pi$  型函数,其中, S 型函数是一种从 0 到 1 的单调增长函数;  $\pi$  型函数是指“中间高两边低”的函数,它也可以用 S 型函数定义,而且这两种函数相应的渡越点位置、带宽 ( $\pi$  型) 和隶属函数曲线的对称性是不变的,而由 Pal 和 King 所定义的隶属函数形式不仅能近似地用来表示分段光滑的 S 型函数和  $\pi$  型函数,并且其相应的渡越点位置、带宽 ( $\pi$  型函数) 和隶属函数曲线的对称性均由其模糊因子 ( $F_d$ 、 $F_e$ ) 所决定,也就是说,这样定义的隶属函数,其相应的渡越点位置、带宽和隶属函数曲线的对称性是可以进行调整的.由此可见,Pal 和 King 所定义的是一种很有实用价值的隶属函数形式.

通过分析以前的一些模糊边缘检测方法(如 Pal 和 King 方法)可知,在图象的模糊特征平面中,矩阵的元  $\mu_{mn}/X_{mn}$  均定义为图象象素  $(m, n)$  灰度级  $X_{mn}$  相对于最大灰度级  $X_{\max}$  的隶属度.由于受这种定义方法的限制,因此在算法中的模糊增强部分,必然会出现原图象中本应增强的灰度级部分没有得到足够的增强,而不应增强的灰度级部分却得到了很大的增强,很显然,这将会影响到下一步的边缘检测,从而使检测达不到原来期望的效果.

针对这种隶属函数定义的不足,本文提出了如

下的方法进行改进,即首先采用图象分割中的阈值选取方法(本文中采用 Otsu<sup>[4]</sup>方法)来确定阈值参数  $X_T$ ,显然,  $X_T$  将整个图象的直方图分为低灰度和高灰度两个部分,对于具有典型双峰分布的直方图来说,它们则分别对应目标和背景这两部分,然后再根据参数  $X_T$ ,而不是根据最大灰度级  $X_{\max}$  来定义新的隶属函数形式.由此可见,本文算法是在阈值  $X_T$  的两边,即低灰度区域和高灰度区域(目标和背景)分别通过模糊增强运算来检测边缘的,即在低灰度区域主要进行衰减运算,从而使属于该区域的大部分象素的灰度值更低,而在高灰度区域则主要进行增强运算,从而使属于该区域的大部分象素的灰度值更高.这样,经过模糊增强后,图象的各区域之间层次比较清楚,而且边缘两侧的灰度对比增强,其提取的边缘信息也就更加精细.

整个算法过程如下:

(1) 根据 Otsu 选取阈值的方法来确定阈值参数  $X_T$ .显然,对于具有双峰分布的直方图,其阈值参数  $X_T$  将位于双峰之间的谷底附近;而对于多峰直方图的多阈值选取也可用 Otsu 方法来实现(见文献[4]),当然也可用其他方法来实现<sup>[5,6]</sup>多阈值的选取,但这些阈值显然应在直方图各峰之间的谷底附近.

(2) 定义新的隶属函数为

$$\mu_{mn} = \alpha(X_{mn}) = \begin{cases} \left[ 1 + \frac{X_T - X_{mn}}{F_{d1}} \right]^{F_e} & X_{mn} \leq X_T \\ \left[ 1 + \frac{X_{mn} - X_T}{F_{d2}} \right]^{F_e} & X_{mn} > X_T \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $m = 1, 2, 3, \dots, M$ ;  $n = 1, 2, \dots, N$ , 而参数  $F_{d1}$  和  $F_{d2}$  称作指数型模糊因子,  $F_e$  称作倒数型模糊因子,它们均为正数,而且这些模糊因子取值将直接影响到模糊性的大小,即所取值决定了  $\mu_{mn}$  的曲线形状,在实际工作中通常取  $F_e$  为 2,并且输入的空域图象在此经过  $G$  变换,即得到与模糊特征平面对应的矩阵.

(3) 对图象进行模糊增强.这种模糊增强就是在图象的模糊特征平面上对  $\mu_{mn}$  进行非线性变换,其结果是增大(当  $\mu_{mn} > 0.5$ )或减小(当  $\mu_{mn} \leq 0.5$ )  $\mu_{mn}$  的值.本文选用如下增强算子

$$\mu'_{mn} = T_r(\mu_{mn}) = T_r(T_r^{-1}(\mu_{mn})), r = 1, 2, \dots \quad (3)$$

其中,

$$T_r(\mu_{mn}) = \begin{cases} \alpha(\mu_{mn})^r & 0 \leq \mu_{mn} \leq 0.5 \\ 1 - \alpha(1 - \mu_{mn})^r & 0.5 < \mu_{mn} \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

式(3)的  $T(\cdot)$  变换关系如图 1 所示.

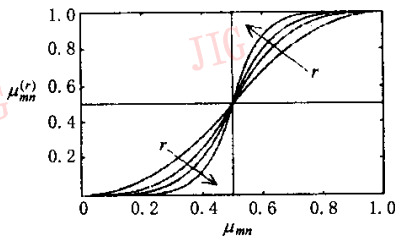


图 1  $T(\cdot)$  变换

(4)对已增强的模糊特征  $(\mu'_{mn})$  进行  $G^{-1}$  逆变换,即得到已增强的空域图象.其逆变换  $(G^{-1})$  方式定义为

$$X'_{mn} = G^{-1}(\mu'_{mn}) = \begin{cases} X_T - F_{d1}[(\mu'_{mn})^{-1/F_e} - 1] & X_{mn} \leq X_T \\ X_T + F_{d2}[(\mu'_{mn})^{-1/F_e} - 1] & X_{mn} > X_T \end{cases} \quad (5)$$

(5)对增强后的空域图象进行平滑运算,以减少噪声对下一步提取边缘的影响,而进行平滑处理的方法有散焦法、极大极小规则、邻域平均法等,本文采用的是邻域平均法.

$$X'_{mn} = \frac{1}{4} \sum_{\Omega} X_{ij} \quad (i, j) \neq (m, n) \quad (i, j) \in \Omega \quad (6)$$

$\Omega$  取为以坐标  $(m, n)$  为中心的 4 邻域.

(6)提取边缘,使用 Nakagawa 和 Rosenfeld 提出的“min”或“max”算子.定义图象的边缘矩阵为

$$E_{\text{edge}} = [X''_{mn}]_{M \times N} \quad (7)$$

式中

$$X''_{mn} = |X_{mn} - \min\{X_{ij}\}|, \quad (i, j) \in Q \quad (8)$$

$Q$  可以取为以坐标  $(m, n)$  为中心的  $3 \times 3$  窗口.

上述整个模糊边缘检测算法过程可用图 2 来表示.

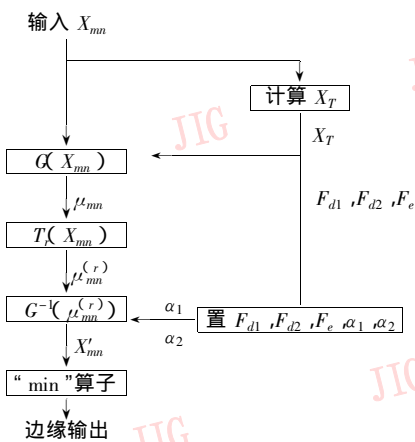


图 2 模糊边缘检测过程

## 2.2 算法分析

在式(2)中,当  $\mu_{mn} = G(X_c) = 0.5$  时,则  $X_c$  为

渡越点.显然,在此可以得到一个在目标区域,而另一个在背景区域的两个渡越点  $X_{c1}$ 、 $X_{c2}$ ,并且有

$$\mu_{mn} = \begin{cases} \left(1 + \frac{X_T - X_{c1}}{F_{d1}}\right)^{-F_e} = 0.5 & X_{c1} < X_T \\ \left(1 + \frac{X_{c2} - X_T}{F_{d2}}\right)^{-F_e} = 0.5 & X_{c2} > X_T \end{cases} \quad (9)$$

由此可得

$$\begin{pmatrix} F_{d1} \\ F_{d2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{X_T - X_{c1}}{2^{1/F_e} - 1} \\ \frac{X_{c2} - X_T}{2^{1/F_e} - 1} \end{pmatrix} \quad (10)$$

显然,指数型模糊因子参数  $F_{d1}$  和  $F_{d2}$  由  $X_T$ 、 $X_{c1}$ 、 $X_{c2}$  和  $F_e$  所决定.由于  $X_T$  不改变曲线的基本形状,而只影响曲线的位置,所以当置定  $X_{c1}$ 、 $X_{c2}$  和  $F_e$  时,就可以得到  $\mu_{mn}$  和  $X_{mn}$  的关系曲线,当  $F_e = 2$  时,  $\mu_{mn}$  和  $X_{mn}$  的关系曲线如图 3 所示.

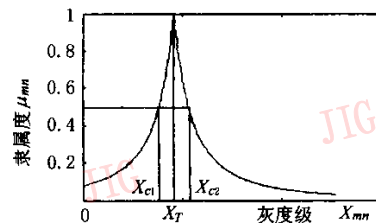


图 3  $\mu_{mn}$  和  $X_{mn}$  的关系曲线

仔细观察图 3 中  $0 \leq X_{mn} \leq X_T$  这一区域,即可以知道,当  $X_{mn} = 0$  时,  $\mu_{mn}$  为最小,记该最小值为  $\alpha_1$ ,并且由式(2)即可得

$$\alpha_1 = \left(1 + \frac{X_T}{F_{d1}}\right)^{-F_e} \quad (11)$$

再将式(10)代入式(11)即得

$$\alpha_1 = \left[1 + (2^{1/F_e} - 1) \frac{X_T}{X_T - X_{c1}}\right]^{-F_e} \quad (12)$$

同理,假设图象的最大灰度级为  $X_{\max}$ ,则在  $X_T \leq X_{mn} \leq X_{\max}$  这一区域,当  $X_{mn} = X_{\max}$  时,  $\mu'_{mn}$  为最小,记该最小值为  $\alpha_2$ .由式(2)得

$$\alpha_2 = \left(1 + \frac{X_{\max} - X_T}{F_{d2}}\right)^{-F_e} \quad (13)$$

将式(10)代入式(13)即得

$$\alpha_2 = \left[1 + (2^{1/F_e} - 1) \frac{X_{\max} - X_T}{X_{c2} - X_T}\right]^{-F_e} \quad (14)$$

通过分析式(12)和式(14),可知  $\alpha_1 > 0$  和  $\alpha_2 > 0$ ,因而,经过  $T(\cdot)$  变换后,会出现  $\mu'_{mn} < \alpha_1$  和  $\mu'_{mn} < \alpha_2$  这两种情况,此时,  $G^{-1}(\cdot)$  逆变换无解.为此,只能对  $\mu'_{mn} < \alpha_1$  和  $\mu'_{mn} < \alpha_2$  的情况分别硬性规

定为  $\mu'_{mn} = \alpha_1$  和  $\mu'_{mn} = \alpha_2$ , 从而造成在增强后的图象  $f'$  中, 原图象  $f$  中有些低灰度值被硬性切削为 0, 有些高灰度值被硬性切削为  $X_{\max}$ , 因而在原图象  $f$  中损失了部分灰度信息, 边缘检测质量也随之受到了影响. 为了尽量减少这种不利影响, 算法中指数型模糊因子  $F_{d1}$  和  $F_{d2}$  的选择, 必须保证使  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  为足够小的值; 另一方面, 由式(10)、(12)、(14)可知, 一旦  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  确定,  $F_{d1}$  和  $F_{d2}$  也随之确定.

由式(12)和(14)可以得到如下两个渡越点

$$X_{c1} = X_T \left[ 1 - \frac{2^{1/F_e} - 1}{\left(\frac{1}{\alpha_1}\right)^{1/F_e} - 1} \right] \quad (15)$$

$$X_{c2} = X_T + \frac{2^{1/F_e} - 1}{\left(\frac{1}{\alpha_2}\right)^{1/F_e} - 1} (X_{\max} - X_T) \quad (16)$$

分析图3和式(5)可知, 对于  $\mu_{mn} > 0.5$  的区域 ( $X_T$  两边), 由于增强作用, 象素的灰度级向  $X_T$  靠近. 对于  $\mu_{mn} < 0.5$ , 且  $X_{mn} < X_T$  的区域, 其象素灰度将受到减小. 而对于  $\mu_{mn} < 0.5$ , 且  $X_{mn} > X_T$  的区域, 象素灰度则得到增强. 为了使图象增强后的高灰度和低灰度区域之间层次更清楚, 就要对低灰度区域的象素进行衰减运算, 对高灰度区域的象素进行增强运算, 只有这样, 边缘检测质量才会得到根本的改善. 为了实现上述目的, 渡越点  $X_{c1}$  和  $X_{c2}$  都必须尽量靠近阈值  $X_T$  (见图3), 即当  $X_T - 1 < X_{c1} < X_T$  和  $X_T < X_{c2} < X_T + 1$  时, 都能满足上述条件. 若取  $X_{c1} = X_T - 0.5$  和  $X_{c2} = X_T + 0.5$  时,  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  分别为

$$\alpha'_1 = [1 + \chi 2^{1/F_e} - 1] X_T ]^{F_e} \quad (17)$$

$$\alpha'_2 = [1 + \chi 2^{1/F_e} - 1] (X_{\max} - X_T) ]^{F_e} \quad (18)$$

对于  $F_e$  的选择, 显然, 若  $F_e$  越大, 则图3中的曲线越陡, 因而在相同的增强次数下, 其增强效果更明显. 在本文中, 取  $F_e = 2$ .

另外, 从式(2)可知, 只要取  $X_T = X_{\max}$  时, 那么式(2)便成为 Pal 和 King 定义的隶属函数形式, 因此, Pal 和 King 定义的隶属函数形式只是式(2)的一个特例. 图4是模糊增强前后  $X_{mn}$  和  $X'_{mn}$  关系曲线

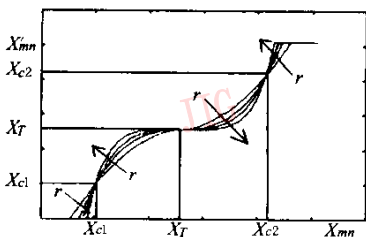


图4  $X_{mn}$  和  $X'_{mn}$  关系曲线 ( $r$  为增强次数)

图. 在模糊增强前后的  $X_{mn}$  和  $X'_{mn}$  关系曲线上, Pal 和 King 算法的  $X_{mn}$  和  $X'_{mn}$  关系曲线相当于图4中的  $X_T$  前面部分.

### 3 多阈值图象模糊边缘检测方法

现将本文方法推广到直方图分布不止有一个谷点 (也即有多于两个的峰点) 的图象的边缘检测问题. 显然此时所选择的阈值要多于一个, 各阈值将分别对应于直方图上谷点的位置. 假设所得  $n$  个阈值分别为  $X_{T1}, X_{T2}, \dots, X_{Tn}$ , 则这  $n$  个阈值将直方图分为  $n+1$  个不同的区域. 设这  $n+1$  个不同区域的中点分别为  $X_1, X_2, \dots, X_n, X_{n+1}$ , 则由这  $n+1$  个中点所划分的  $n$  个区间为  $[X_1, X_2], [X_2 + 1, X_3], \dots, [X_n + 1, X_{n+1}]$ , 再将第一个和最后一个区间分别扩大到最小灰度级 0 和最大灰度级  $X_{\max}$  为止, 然后即可在这  $n$  个不同的区间  $[0, X_2], [X_2 + 1, X_3], \dots, [X_{n-1} + 1, X_n], [X_n + 1, X_{\max}]$  上采用本文前面的算法来分别进行模糊增强运算, 最后再采用边缘检测算子进行边缘提取.

### 4 仿真结果与结论

由于 Pratt<sup>[7]</sup> 品质因素 (figure of merit) 是一种具有代表性的客观评价边缘检测结果的指标, 也是一种较全面的评价参数, 因而本文选用 Pratt 品质因素来客观地评价边缘检测的性能, 同时采用 Vertical 标准图来进行测试, 所加噪声和信噪比 (SNR) 的定义见文献[7], 边缘检测的具体评价结果见图5、图6, 图中横坐标为信噪比 (SNR), 纵坐标为 Pratt 品质因素  $f$ , 实线为与本文方法对应的 Pratt 品质因素曲线, 点画线为与 Pal 和 King 方法对应的 Pratt 品质因素曲线. 由仿真结果可见, 当  $r \leq 2$  时 ( $r$  为增强次数), 本文方法的检测效果并不明显; 当  $r > 2$  时, 与本文方法对应的 Pratt 品质因素曲线均具有如图6所示的大致形状, 可见当  $r > 2$  时, 本文方法比 Pal 和 King 方法有更好的抗噪能力; 另外, 仿真结果还表明, 当  $r$  逐渐增大时, 这两种方法的 Pratt 品质因素曲线将渐渐趋于一致, 这与实际情况是相符的, 因为随着  $r$  的增大, 被增强的两个区域之间越来越趋近于图象二值化的效果.

最后本文用红外图 House 和 Lena 图进行了仿真实验, 仿真结果见图7~图14 (图中  $r$  值为增强次数,  $F_e = 2$ , 未标明  $r$  值的取3). 由图7~图14可见,

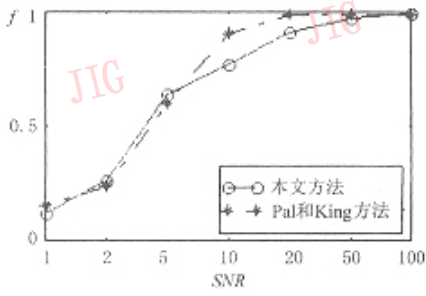


图 5  $r=1$  时的评价结果

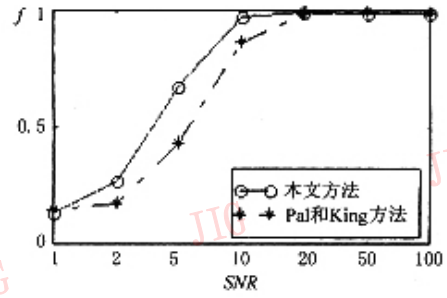


图 6  $r=3$  时的评价结果

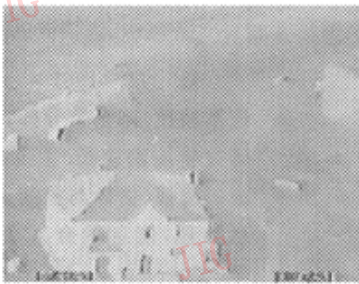


图 7 House 原图

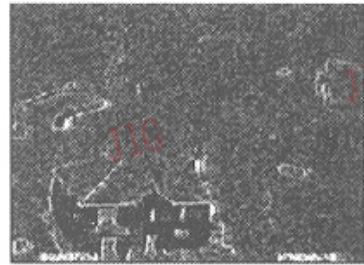


图 8 无增强时的边缘图( $r=0$ )

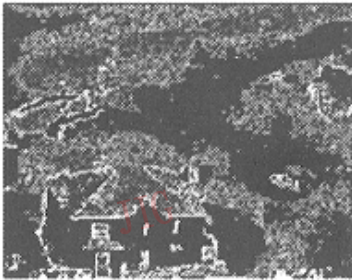


图 9 本文方法的检测值

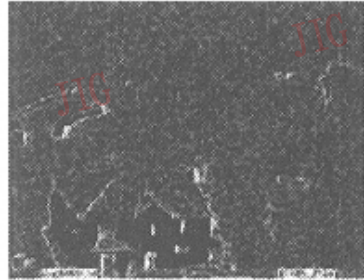


图 10 Pal 和 King 方法的检测结果



图 11 Lena 原图

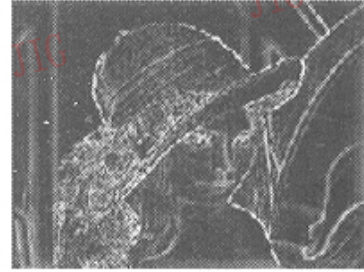


图 12 无增强时的边缘图( $r=0$ )

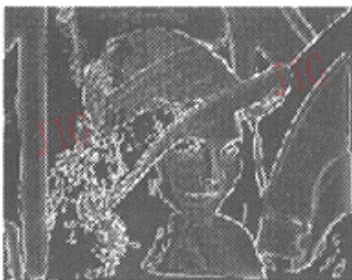


图 13 本文方法的检测结果



图 14 Pal 和 King 方法的检测结果

采用本文算法检测到的边缘图(图9,图13)效果要比未增强的边缘图和使用 Pal 和 King 方法提取的边缘更好.对于迭代次数  $r$  的选择,仿真结果表明,当  $r \geq 4$  时,对边缘检测的质量提高不大,有时反而会造成细节边缘消失;而取  $r = 1$  时,则模糊增强不够充分,边缘不够清晰;使用本文方法时,以选取  $r = 2$  或  $r = 3$  比较合适.

本文提出了一种图象模糊边缘检测的改进算法,算法分析结果表明,模糊增强后,不仅各区域之间层次将更加清楚,而且边缘两侧的灰度对比度增强,仿真结果也显示该算法提取的边缘信息更加精细.

### 参 考 文 献

- 1 郭桂容. 模糊模式识别. 长沙:国防科技大学出版社,1993.
- 2 郭宗祥. 模糊信息处理基础. 成都:成都电讯工程学院出版社,1989.
- 3 Pal S K, King R A. On edge detection of X-ray images using fuzzy sets. IEEE Trans. Patt. Anal. and Machine Intell. 1983 5(1):6977.
- 4 Otsu N. A threshold selection method from gray level histograms. IEEE Trans. Syst. Man Cybernet. 1979 9(1):6266.
- 5 Sahoo P K, Soltanti S, Wong A K C *et al.* A survey of the thresholding techniques, Comp. Vision graphics Image Process. 1988 41:233260.
- 6 Pal N R, Pal S K. A review of image segmentation techniques, Pattern Recognition, 1993 26(9):12771294.
- 7 Abdou I E, Pratt W K. Quantitative design and evaluation of enhancement/thresholding edge detectors, Proc. IEEE, 1979 67(5):753763.

周德龙 1966年生,1989年获学士学位,1997年获西北工业大学硕士学位,现为西北工业大学自控系博士研究生.研究方向为图象处理、模式识别等.已发表学术论文12篇.

潘 泉 1961年生,西北工业大学自控系教授,博士生导师,现任西北工业大学研究生院副院长.主要研究方向有动态系统的建模、估计与控制,智能控制与智能信息处理,信息融合,C<sup>3</sup>I,图象与信号处理等.

张洪才 1938年生,西北工业大学自控系教授,博士生导师.主要研究方向有非线性估计与控制、系统辨识、故障诊断与容错控制、目标跟踪、模式识别等.