

模糊迭代边缘检测器¹

蔡 靖 刘 峰 丁润涛

(天津大学电子信息工程学院 天津 300072)

摘 要 该文主要研究了受不同噪声污染图像的边缘提取问题,提出了一种基于模糊理论边缘检测算法。该算法将滤波窗内的像素看成模糊集,根据其不同的隶属度将窗内像素分成两个子集,在两个子集内进行模糊均值迭代运算,然后将收敛后的两个值通过差分运算来提取边缘。计算机模拟表明,此种方法对于高斯噪声、脉冲噪声及混合噪声都有较好的抑制能力。

关键词 边缘检测,模糊隶属度函数,高斯噪声,脉冲噪声

中图分类号 TN911.73

1 引 言

边缘检测^[1]是图像处理和模式识别中的重要课题,它广泛地应用在图像分割、目标自动识别、遥感、医学图像分析等领域。在军事对抗和某些工业生产场合,由于环境条件差,获取的图像往往受到多种噪声源的污染,且信噪比较低。Marr-Hildreth 算子是一种性能很好的边缘检测算法,其对高斯噪声的抑制效果很好,但当图像混有脉冲噪声时,效果就不能令人满意。对于混有脉冲噪声图像的边缘检测一般采用非线性方法,如非线性预滤波或形态学边缘检测^[2]等。但是大多数非线性方法对脉冲噪声效果较好而对高斯噪声的抑制能力较差。因此对于混合噪声污染的图像总的效果并不很理想。

自从 1965 年美国控制论学者扎德教授提出模糊论以来,模糊理论在各个领域都有充分的应用。特别是近年来,模糊理论在图像处理方面的应用日益增多^[3,4]。本文提出了一种基于模糊理论^[5,6]的边缘检测算法,该算法是将窗内像素集合看成为模糊集合,不同元素对于集合中心有不同的隶属度。当窗内有边缘时,可分为两个模糊子集,两个模糊子集的中心不同。本算法就是通过寻找这两个中心并对其进行差分运算来判定窗内是否存在边缘。实验证明,本文提出的边缘检测算法对于不同噪声均有较好的抗噪能力。

2 模糊迭代边缘检测算法

首先从滤波窗内像素中找出两个初始中心 $c_1^{(0)}$, $c_2^{(0)}$ 来,然后根据这两个中心由模糊隶属函数得到窗内各个像素 x_i 关于这两个中心的隶属度 $\mu(x_i, c_1^{(0)})$ 和 $\mu(x_i, c_2^{(0)})$ 。这两个中心满足以下条件: (1) 分别由这两个中心形成的模糊集的 α 截集的元素个数大于 k 。(2) $c_1^{(0)}$ 为滤波窗内满足条件 (1) 的最小元素; $c_2^{(0)}$ 为滤波窗内满足条件 (1) 的最大元素。由以上两个条件可知,当存在这样两个元素时,必是唯一的。然后根据窗内像素不同隶属度及其分布将窗内像素分解为两个模糊子集,在这两个子集内分别进行迭代运算,最终得到两个最佳中心值 c_1 、 c_2 。最后通过对其进行差分运算来确定窗内是否有边缘。

2.1 滤波窗及初始模糊中心的选择

本算法中滤波窗选为八边形滤波窗(如图 1)。

¹ 1999-04-14 收到, 1999-12-05 定稿

国家自然科学基金资助项目 69772041 号, 高校博士点基金 98005610 号

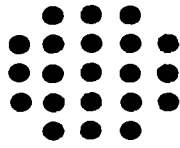


图 1 滤波窗的选择

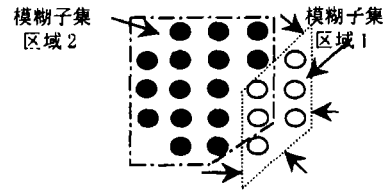


图 2 模糊子集区域选择

首先将窗内像素值进行排序, 设定排序后最小像素值为 $c_1^{(0)}$, 最大像素值为 $c_2^{(0)}$ 。根据这两个中心及模糊隶属函数得到窗内各像素的模糊隶属度。当以 $c_1^{(0)}$ 为中心的模糊集的 α 截集的元素个数小于 k 时, 将 $c_1^{(0)}$ 改为比原数稍大的一个像素值; 同理, 当以 $c_2^{(0)}$ 为中心的模糊集的 α 截集的元素个数小于 k 时, 将 $c_2^{(0)}$ 改为比原数稍小的一个像素值。直至满足条件 (1) 为止。若 $c_1^{(0)} > c_2^{(0)}$ 时, 表明窗内无边缘, 无需进一步处理。根据图 1 选定的滤波窗, 算法中令 $k = 5$ 。这样就能保证只有在边缘紧靠中心像素时, 才会有边缘检出。算法中隶属函数定义为 $\mu(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{\beta^2}}$, 其中 β 为尺度参数, c 为模糊集中心灰度值。

2.2 模糊集的确定

当满足条件的模糊中心找到后, 根据窗内像素对这两个中心不同的模糊隶属度, 将滤波窗分为两个模糊集, 然后分别在这两个模糊集中进行处理。为了充分考虑像素相关性, 本文认为由滤波窗划分出的两个模糊集应在几何形状上满足连通的和凸的。因此可根据原模糊集 α 截集元素分布划分出模糊子集。算法中定义模糊集 α 截集元素在滤波窗中所处横向、纵向及两个斜方向的最大、最小值所包围的最小区域为模糊子集区域 (如图 2)。

2.3 模糊迭代算法与边缘判定

当模糊子集确定以后, 分别在两个模糊子集中进行模糊迭代运算, 最终将两个理想的模糊中心计算出来。最后通过两个理想中心的差值与预先设定的阈值 T 做比较, 若大于 T 则边缘存在, 反之则无边缘。迭代算法描述如下:

(1) 首先设输出初值 y_0 为模糊子集内的各像素的均值, 由这个初值导出各个像素的隶属度 $\mu_{0i} = \mu(x_i, y_0)$ 。

(2) 由上一步导出的模糊隶属度 μ_{0i} 进行加权均值, 得到新的输出 y_1 。

(3) 比较 y_0 与 y_1 的差值是否小于预先设定的值 ε , 若小于该值, 则迭代结束, 输出为 y_1 ; 否则由 y_1 导出新的模糊隶属度 μ_{1i} 。

(4) 依此类推, 直至前后两次估计值的差小于 ε 。

可以证明, 上述迭代算法是收敛的。下面给出迭代算法收敛性的简单证明。

已知灰度图像的灰度值是上下有界的, 如 8 比特量化的图像信号, 其幅值一般在 0 到 255 之间, 则有以下两种情况:

(1) 序列 $\{y_n\}$ 为一个有限次增减变化的数列, 则必存在一个正整数 N , 使得在 N 的序列为单调数列, 根据单调有界数列必收敛准则可知, 序列 $\{y_n\}$ 最终必收敛为某一值 y 。

(2) 序列 $\{y_n\}$ 为一个无限次增减变化的数列, 则假定在第 i 点输出为 y_i 并发生第一次增减变化, 其前一点及后一点输出分别为 y_{i-1} 和 y_{i+1} ; 在第 k 点输出为 y_k 并发生第二次增减变化 ($k > i$)。令 $a_0 = y_i$, $b_0 = y_{i-1}$, $a_1 = y_{k-1}$, $b_1 = y_k$ 。不失一般性, 假定 $y_{i-1} > y_i$, $y_i < y_{i+1}$, $y_i < y_{k-1} < y_k$, $y_k > y_{k+1}$ 。 $\forall m, m+1 \in [i, k]$, 则有 $y_i \leq y_m < y_{m+1} \leq y_k$, 其中 y_i 和 y_{m+1} 可由下式表示:

$$y_i = \frac{\sum_{x_r > (y_{i-1} + y_m)/2} \mu_r x_r + \sum_{(y_{i-1} + y_m)/2 \geq x_s > y_i} \mu_s x_s + \sum_{x_t \leq y_i} \mu_t x_t}{\sum \mu_r + \sum \mu_s + \sum \mu_t} \quad (1)$$

$$y_{m+1} = \frac{\sum_{x_r > (y_{i-1} + y_m)/2} \mu'_r x_r + \sum_{(y_{i-1} + y_m)/2 \geq x_s > y_i} \mu'_s x_s + \sum_{x_t \leq y_i} \mu'_t x_t}{\sum \mu'_r + \sum \mu'_s + \sum \mu'_t} \quad (2)$$

由(1),(2)式可得,

$$y_{m+1} - y_i = \frac{\sum_{x_r > (y_{i-1} + y_m)/2} \mu'_r (x_r - y_r) + \sum_{(y_{i-1} + y_m)/2 \geq x_s > y_i} \mu'_s (x_s - y_i) + \sum_{x_t \leq y_i} \mu'_t (x_t - y_i)}{\sum \mu'_r + \sum \mu'_s + \sum \mu'_t} \quad (3)$$

$$\sum_{x_r > (y_{i-1} + y_m)/2} \mu_r (x_r - y_i) + \sum_{(y_{i-1} + y_m)/2 \geq x_s > y_i} \mu_s (x_s - y_i) + \sum_{x_t \leq y_i} \mu_t (x_t - y_i) = 0 \quad (4)$$

因为 $y_m < y_{m+1}$ 所以 $y_{m+1} - y_m > 0$. 又因 $y_{i-1} > y_m$, 且隶属函数 $\mu(d_i)$ 为一减函数, 又可得到, 当 $x_r > (y_{i-1} + y_m)/2$ 时, $\mu_r > \mu'_r$; 当 $(y_{i-1} + y_m)/2 \geq x_s > y_i$ 和 $x_t \leq y_i$ 时, $\mu_s \leq \mu'_s$ 和 $\mu_t < \mu'_t$.

可以得到

$$\sum_{x_r > (y_{i-1} + y_m)/2} \mu_r (x_r - y_i) > \sum_{x_r > (y_{i-1} + y_m)/2} \mu'_r (x_r - y_i) > 0$$

$$\sum_{x_t \leq y_i} \mu'_t (x_t - y_i) < \sum_{x_t \leq y_i} \mu_t (x_t - y_i) < 0$$

$$\begin{aligned} \sum_{x_r > (y_{i-1} + y_m)/2} \mu'_r (x_r - y_i) + \sum_{x_t \leq y_i} \mu'_t (x_t - y_i) &< \sum_{x_r > (y_{i-1} + y_m)/2} \mu_r (x_r - y_i) + \sum_{x_t \leq y_i} \mu_t (x_t - y_i) \\ &= - \sum_{(y_{i-1} + y_m)/2 \geq x_s > y_i} \mu_s (x_s - y_i) < 0 \end{aligned} \quad (5)$$

因此, 由(3)式可得

$$\begin{aligned} y_{m+1} &= \frac{\sum_{x_r > (y_{i-1} + y_m)/2} \mu'_r (x_r - y_r) + \sum_{(y_{i-1} + y_m)/2 \geq x_s > y_i} \mu'_s (x_s - y_i) + \sum_{x_t \leq y_i} \mu'_t (x_t - y_i)}{\sum \mu'_r + \sum \mu'_s + \sum \mu'_t} + y_i \\ &< \frac{\sum_{(y_{i-1} + y_m)/2 \geq x_s > y_m} \mu'_s (x_s - y_i)}{\sum \mu'_r + \sum \mu'_s + \sum \mu'_t} + y_i < \frac{y_{i-1} + y_m}{2} - y_i + y_i = \frac{y_{i-1} + y_m}{2} \end{aligned} \quad (6)$$

又因 $y_i \leq y_m < y_{m+1} \leq y_{i-1}$, 故 $y_{m+1} - y_m < (y_{i-1} - y_i)/2$, 所以当 $m = k - 1$ 时, 有 $y_k - y_{k-1} < (y_{i-1} - y_i)/2$, 由此可以得出 $[a_1, b_1] \subset [a_0, b_0]$ 且 $b_1 - a_1 < (b_0 - a_0)/2$. 同理可以得出, 当序列 $\{y_n\}$ 在 $n > k$ 后, $y_n \in [a_1, b_1]$. 由此可以看出, 当序列 $\{y_n\}$ 无限次增减变化后, 可以得出一个闭区间序列 $[a_n, b_n]$, 其区间宽度以 2 为底的指数递减. 由此可以得

出, $\forall \varepsilon > 0$, $\exists N > 0$, 使得 $m, n > N$ 时, $|y_m - y_n| < \varepsilon$, 因此序列 $\{y_n\}$ 将收敛. 综上所述, 序列 $\{y_n\}$ 必收敛.

本文所提出的边缘检测算法总结如下: (1) 根据滤波窗内像素值找出两个模糊集中心. (2) 根据这两个中心及滤波窗内像素值的模糊隶属度将滤波窗划分为两个模糊子集. (3) 在两个模糊子集中进行迭代运算, 得出两个理想模糊集中心. (4) 对这两个理想模糊中心进行差分运算判定边缘存在与否.

3 边缘检测性能及实验结果

3.1 抗噪能力

本算法对于不同噪声都有较好的抗噪能力. 当窗内有脉冲噪声时, 由于在选择模糊集中心要求以其为中心的模糊集的 α 截集元素个数不少于 k 个, 因此脉冲噪声点一般不会被当作中心点的, 在以后的平滑迭代运算中, 由于脉冲噪声点的隶属度很低, 其对整个运算的影响是非常小的. 即便是在某些特别情况下窗内单向脉冲噪声点超过 k 个, 由于噪声分布是随机的, 因此得到的模糊子窗就会很大, 在这个大窗中, 脉冲噪声并不占主要地位, 因此可以由后续的迭代处理将其消除. 当图像被高斯噪声污染时, 不同像素点的受污染程度是不同的, 因此, 根据其隶属度给予权值进行加权运算能够达到最佳的平滑效果. 综上所述, 可知对于混合噪声污染的图像, 该算法的噪声抑制能力也是很好的.

3.2 细节保护能力

本算法采用非固定子集选取方法, 使得选得的子集形状可以随意变化, 一方面保持了像素之间的相关特性, 另一方面又充分地保护了图像的细节. 这一点比一般的非线性预滤波后在进行边缘检测效果要好.

3.3 实验结果和讨论

为了对此边缘检测算法有一个直观的了解, 用计算机先后分别对一幅受不同噪声影响的女孩图像 (256×256) 进行处理, 并跟 5×5 多层中值预滤波后 Sobel 边缘检测的方法进行了比较 (如图 3). 其中滤波参数分别为 $k=5$, $\alpha=0.7$, $\beta^2=2000$, $T=25$, $\varepsilon=1$.

通过实验还证明, 本算法对高斯噪声抑制能力与尺度参数 β 密切相关. 当尺度参数 β 较大时, 处理的平滑效果较好, 对高斯噪声的抑制能力就较强; 而当 β 较小时, 高斯噪声抑制能力降低但同时能检出一些更小尺度的边缘.

由图 3 可以看出, 对于纯高斯噪声污染图像来说, 本文所提出的算法要大大优于多层中值预滤波的检测方法 (如图 3(c), 3(d)). 对于纯脉冲噪声污染图像来说, 本文提出的算法的消除脉冲噪声影响的能力也优于多层中值预滤波的方法, 而细节保护能力接近多层中值预滤波 (如图 3(e), 3(f)). 对于混合噪声, 本文算法效果也优于多层中值预滤波的 (如图 3(g), 3(h)).

4 结 论

本文提出了一种基于模糊理论的边缘检测方法, 利用模糊集的隶属度对像素进行处理来判定边缘存在与否. 实验证明, 该算法对不同噪声都有较好的抗噪能力, 同时计算复杂度不高.

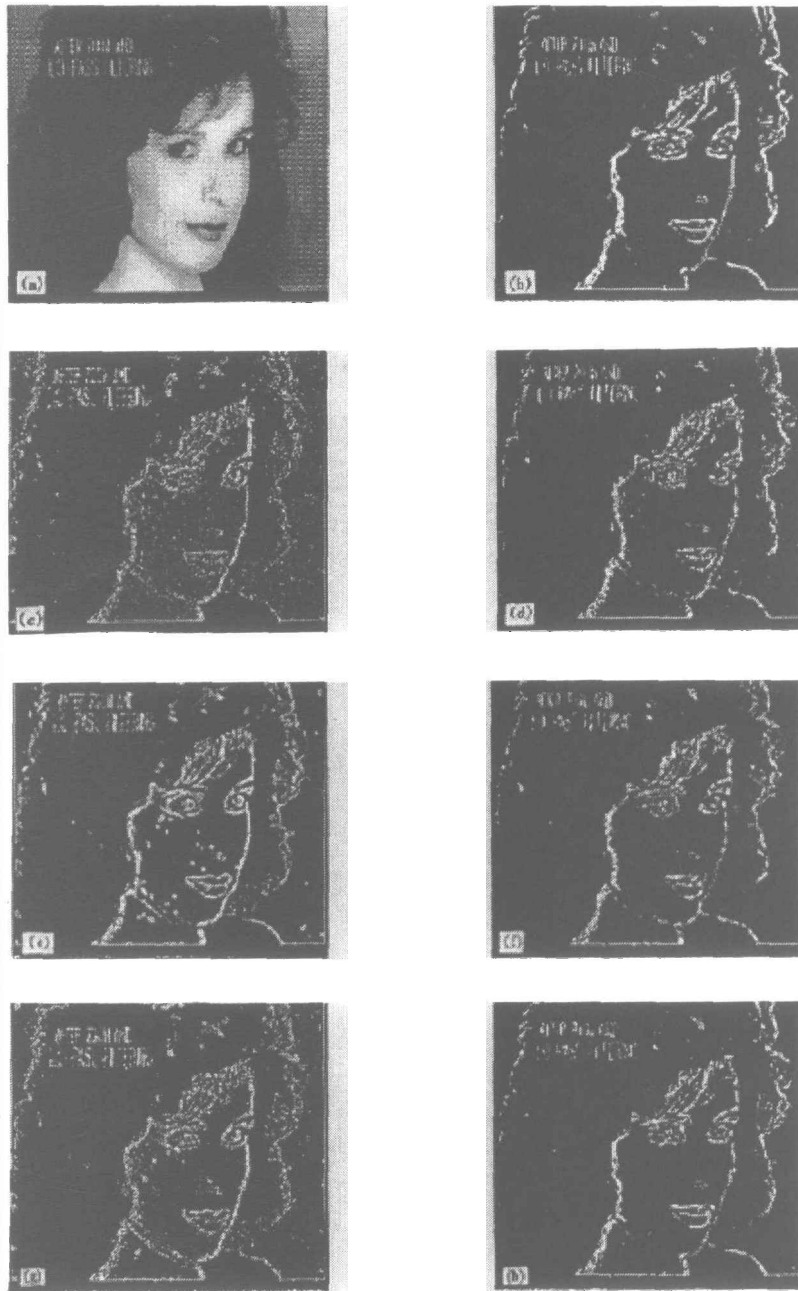


图3 边缘检测性能比较

- (a) 未受噪声污染图像; (b) 未受噪声污染图像的模糊迭代边缘检测
 (c) $\sigma=15$ 高斯噪声污染图像经 5×5 多层中值预滤波后边缘检测
 (d) $\sigma=15$ 高斯噪声污染图像的模糊迭代边缘检测
 (e) $p=10\%$ 脉冲噪声污染图像经 5×5 多层中值预滤波后边缘检测
 (f) $p=10\%$ 脉冲噪声污染图像的模糊迭代边缘检测
 (g) $\sigma=10$ 高斯噪声 $p=8\%$ 脉冲噪声混合噪声污染图像经 5×5 多层中值预滤波后边缘检测
 (h) $\sigma=10$ 高斯噪声 $p=8\%$ 脉冲噪声混合噪声污染图像的模糊迭代边缘检测

参 考 文 献

- [1] 王润生. 图象理解. 长沙, 国防科技大学出版社, 1995, 第 2,3 章.
- [2] 李向吉, 丁润涛. 脉冲噪声污染图像中的数学形态边缘检测器. 中国图形图像学报, 1998, 3(11): 903-906.
- [3] Choi Y, Kirshnapuram R. A robust approach to image enhancement based on fuzzy logic. IEEE Trans. on IP, 1997, IP-6(6): 429-440.
- [4] Chatzis V, Pitas I. Nonlinear location and scale estimators of fuzzy numbers. IEEE Trans. on SP, 1998, SP-46(1): 808-825.
- [5] 郭桂蓉, 庄钊文. 信息处理中的模糊技术. 长沙, 国防科技大学出版社, 1996, 第 1-8 章.
- [6] 何新贵. 模糊知识处理的理论与技术. 北京, 国防工业出版社, 1998, 第 1-9 章.

FUZZY ITERATION EDGE DETECTOR

Cai Jing Liu Feng Ding Runtao

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract This paper mainly studies the edge detection of noisy images. An edge detector based on the fuzzy theory is presented. The algorithm first makes the pixels in the window as a fuzzy set, and divides two sub-sets by their membership functions, and then iterates in the two sub-sets, lastly detects the edge by the difference of the two values from the two sub-sets. The computer simulation shows that the edge detector is good for attenuation not only of Gaussian noise but also of impulse noise and mixture noise.

Key words Edge detection, Fuzzy membership function, Gaussian noise, Impulse noise

蔡 靖: 男, 1973 年生, 博士生, 主要研究方向为非线性滤波理论、模式识别、计算机视觉、模糊理论及小波变换等. 已发表学术论文数篇.

刘 峰: 男, 讲师, 主要研究方向为视频编码、模式识别、计算机视觉等.

丁润涛: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 多年来一直从事信号与信息处理、图象处理、电视与视频技术等方面的研究, 曾发表学术论文五十余篇, 并主持了多项国家自然科学基金、高校博士点基金项目等的研究.