

基于加权模糊 c 均值聚类与统计检验指导的 多阈值图像自动分割算法

高新波, 李洁, 姬红兵

(西安电子科技大学电子工程学院, 陕西西安 710071)

摘要: 图像分割是计算机视觉中一个重要的研究课题. 本文提出一种基于直方图的多阈值灰度图像自动分割方法, 该方法利用加权模糊 c -均值聚类算法快速实现分割过程, 同时通过单峰统计检验指导来自动确定多阈值的合适数目. 实验结果表明了该方法的有效性.

关键词: 图像分割; 聚类分析; 加权模糊 c -均值算法; 统计检验

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 04-0661-04

A Multi-threshold Image Segmentation Algorithm Based on Weighting Fuzzy c -Means Clustering and Statistical Test

GAO Xin-bo, LI Jie, JI Hong-bing

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: Image segmentation is an important research topic in the field of computer vision. A histogram-based multi-threshold automatic segmentation method is presented for gray scale images. On the one hand, it uses the weighting fuzzy c -mean clustering algorithm to fast implement the segmentation procedure; on the other hand, it automatically determines the proper number of threshold via unimode statistical test. The experimental result illustrates the effectiveness of the proposed method.

Key words: image segmentation; cluster analysis; weighting fuzzy c -means algorithm; statistical test

1 引言

在模式识别和计算机视觉中, 常常需要从图像中将感兴趣的目标分割出来. 阈值化是图像分割中广泛应用的一种有效方法. 有关文献[1,2]指出基于类别可分性准则的 Otsu 法^[3]是性能良好且受到普遍欢迎的自动阈值选择方法. 而 Otsu 方法与 c 均值聚类准则在一定条件下是等价的^[4,5]. 随着 c 均值聚类算法研究的深入, 人们进一步提出了许多基于模糊 c 均值聚类准则的图像阈值化方法^[4,5,7,8].

对于背景简单、目标单一的图像, 只需要单个阈值即可将图像划分为目标和背景两部分. 但在许多情况下, 图像中可能包含多个目标而且不同目标又会由于表面亮度和颜色的不同在灰度级上有不同的反映, 此时往往需要多阈值分割, 以便为后续的处理提供更多的信息^[6]. 不论是单阈值还是多阈值分割大都是基于灰度直方图的方法, 理论上灰度直方图应该是多峰函数, 不同波峰分别对应目标和背景, 因此合适的阈值应对应于波谷处. 然而, 在实际图像中, 由于噪声的污染使得直方图上波谷不再明显, 此时选择出的阈值不能使图像分割获得满意的效果. 可见只利用灰度直方图分布信息选择阈值是不充分的, 人们考虑能否结合像素在空间上的相关信息来改

善分割性能, 于是提出了基于二维直方图的阈值化方法^[7,8].

在现有的基于二维直方图的多阈值分割方法中存在一个难题, 即合适的阈值及其数目的自动选择. 为此, 本文提出基于加权模糊 c 均值聚类有效性的灰度图像的阈值化方法, 该方法通过统计检验的指导实现多阈值的自动选取.

2 加权模糊 c 均值聚类算法

聚类分析是统计模式识别中无监督模式分类的一个重要分支, 随着模糊理论的引入, 鉴于分类问题本质的模糊性, 人们逐步接受了模糊聚类分析^[9]. 在众多的实现方法中模糊 c 均值(FCM)算法成为最流行的算法之一^[10]. 不过 FCM 算法也还存在不足之处: 一方面, 它不考虑样本矢量中各维特征对分类的不同影响; 另一方面, 它也不考虑不同样本矢量对聚类效果的不同影响. 针对前者我们提出了基于特征加权的 FCM 算法^[11], 对于后者我们则提出以下的基于样本加权的 FCM 算法.

假设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为 p 维实数空间中给定的一个有限样本子集, $x_k \in R^p$ 为第 k 个样本的特征矢量. 对于任意给定的类别数 $c, 2 \leq c < n$, 样本集 X 的加权模糊 c 均值(WFCM)聚类问题可以表示成如下的数学规划问题:

收稿日期: 2002-07-30; 修回日期: 2003-09-05
基金项目: 国家自然科学基金(No. 60202004)

$$\min \left\{ J_m(U, V) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c w_i \mu_{ij}^m \|x_i - v_j\|^2 \right\} \quad (1)$$

s. t. $U \in M_{fc}$

其中, w_i 为每个样本的权系数, 满足条件 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$; $U = [\mu_{ij}]_{n \times c}$ 为模糊加权划分矩阵, 有

$$M_{fc} = \left\{ U \in R^{n \times c} \left| \begin{array}{l} \mu_{ij} \in [0, 1]; \sum_{j=1}^c \mu_{ij} = 1, \forall i; \\ 0 < \sum_{i=1}^n \mu_{ij} < n, \forall j \end{array} \right. \right\} \quad (2)$$

为样本集 X 的模糊 c 划分空间; $V = \{v_1, v_2, \dots, v_c\}$ 为 c 个模糊类的聚类中心矢量集; $\|\cdot\|$ 为某种范数, 用来定义样本与聚类中心的相似性测度; m 为模糊加权指数, 控制聚类的模糊程度。

利用拉格朗日乘子法, 我们可以推导出式(1)的优化迭代公式

$$\mu_{ij} = \left[\sum_{r=1}^c \left(\frac{\|x_i - v_j\|}{\|x_i - v_r\|} \right)^{2/(m-1)} \right]^{-1} \quad (3)$$

$$v_j = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \mu_{ij}^m x_i}{\sum_{i=1}^n w_i \mu_{ij}^m} \quad (4)$$

显然, 权系数 w_i 的主要作用在于聚类中心的调整, 当 $w_i = 1/n$ 时, 即认为各个样本对分类影响一致时, WFCM 算法就退化为经典的 FCM 算法。

3 直方图加权 FCM 图像分割算法

分类与分割问题本质上是一致的, 均是按照某种准则(如最小均方误差)来获得样本的类别标记。同时由于图像分割的无监督性和图像质量评价的主观性使得 FCM 算法特别适合于图像分割问题。

早期的基于 FCM 的分割算法中, 待分析的样本为图像的像素点, 特征为像素的灰度, 比如对于一幅 512×512 的图像, 分类样本数为 262, 144, 对于遥感图像等更大尺寸的图像而言, 样本数目将更多, 从而影响了分割过程的实时性。既然分类的特征为灰度, 人们希望直接把灰度及其出现的频度作为待分类的样本, 与 FCM 相结合就形成了一维灰度直方图加权

的 FCM 图像分割算法。这样对给定灰阶的图像, 分类的样本数不随图像尺寸的增大而增大, 比如对于 8bit 的图像, 不论尺寸多大, 分类的样本只有 256 个。图像的尺寸 $M \times N$ 只影响灰度直方图的计算, 即各灰度级出现的概率,

$$h_i = \frac{n(i)}{M \times N}, \quad i = 0, 1, \dots, L-1 \quad (5)$$

其中, $n(i)$ 表示灰度为 i 的像素在该图像中出现的次数, L 为总的灰阶数目。显然直方图满足条件 $\sum_{i=0}^{L-1} h_i = 1$, 因此, 可直接利用第 2 节中介绍的 WFCM 算法实现图像的分割。

在一维灰度直方图中, 由于噪声等原因, 许多情况下目标和背景的分布相互重叠而不可区分, 使得直方图分割方法的前提不再成立, 因而不能获得满意的分割结果。因为图像中像素与其邻域像素间存在较大的相关性, 当利用了这一空间相关信息后, 例如基于原图和邻域平滑图像而构造出的二维直方图^[7,8], 那么目标和背景的分布在二维直方图中就会比一维直方图容易区分。

二维直方图 $H(s, t)$ 描述了原图 $I(x, y)$ 中灰度值为 s , 同时在平滑图像 $\tilde{I}(x, y)$ 的同一位置具有灰度值为 t 的联合概率密度,

$$H(s, t) = \frac{n(s, t)}{M \times N}, \quad s, t = 0, 1, \dots, L-1 \quad (6)$$

如图 1 所示, 图 1(a) 为 64×64 大小的图像, 由目标(椭圆)和背景两部分组成, 其中背景灰度为 100, 物体灰度为 160, 另外叠加了一个独立的高斯噪声 $N(0, 400)$ 。图 1(b) 和 (c) 分别为图(a)对应的一维和二维直方图, 二维直方图构造中平滑图像用 5×5 的邻域平滑算子实现, 同时把灰度级压缩成 64 级。可以看出, 在噪声的干扰下, 一维直方图没有明显的双峰, 物体和背景的分布很不明显, 但在二维直方图中, 这种情况得到了相当大的改善, 能明显的看到物体与背景两个峰的不同分布。

这样, 我们可以把基于一维直方图加权的 FCM 算法推广到基于二维直方图加权的 FCM 图像分割算法。具体的实现方法如下: 定义待分类样本为二元组 $x_i = (s, t)$, $i = 0, 1, \dots, L^2 - 1$, 其中 $i = sL + t$, 加权系数为 $w_i = H(s, t)$ 。

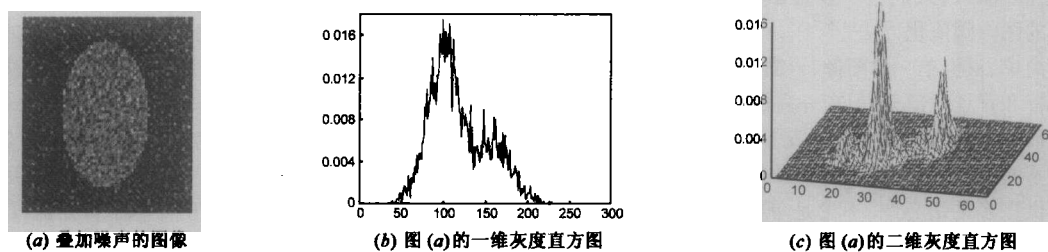


图 1 噪声污染的图像及其灰度直方图特性

4 统计检验指导的多阈值自动确定算法

基于直方图的 WFCM 算法通过迭代法可以高效地实现图像的阈值分割。对于背景简单目标单一的图像, 只需单个阈值即可, 也就是说在 WFCM 算法中可以指定聚类数目 $c = 2$ 。但是, 在复杂背景下多目标的情况, 则往往需要多阈值分割,

即 $c \geq 2$ 。如何选择合适的阈值数目, 成为 WFCM 图像分割算法的瓶颈。要实现图像多阈值自动分割, 必须研究针对 WFCM 算法的聚类有效性准则。

我们知道, 基于 WFCM 的图像分割算法中假定背景和目標在一维或二维直方图中对应不同的波峰, WFCM 算法进行图像分割就对应着直方图中峰态的分解, 当分解得到的每个

聚类均为单峰分布时,表明峰态分解完全,此时得到的聚类数目最合适.反之则需要继续分解.另外,如果所得到的图像的直方图为单峰分布,则说明基于直方图无法实现图像的分割,此时无需再用 WFCM 去分析,因为分割的前提不成立.基于以上分析,我们可以利用早前提出的基于统计检验指导的聚类分析方法^[12]来进行多阈值数目的自动获取及其图像的自动分割,其结构框图如图 2 所示.

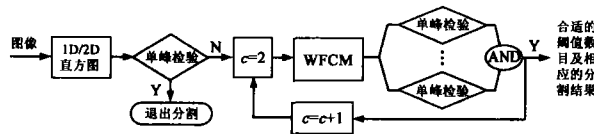


图 2 统计检验指导的多阈值图像自动分割框图

对于待分割的图像,本方案首先统计得到图像的一维或二维灰度直方图,然后对直方图进行单峰分布的统计检验,以确定能否用直方图加权的 FCM 算法进行分割.单峰检验中涉及到两个重要的算法:半数框架建立算法和 k -近邻 T 平方统计量 T_k 的 α -显著性检验算法,算法的具体细节可参见文献[9,12].文献[9,12]中业已证明统计量 T_k 在半数框架的约束条件下,对特征空间中均匀分布的模式能建立可信的检验基础,对单一高斯分布模式具有极低的功效检验.因此,完全可以用来进行单峰模式的统计检验.如果待分析图像的直方图为多峰分布的,则首先令 $c=2$,用基于直方图的 WFCM 算法对图像进行聚类分析,然后对得到的 c 个类分别进行单峰检验,只要还有一个子集不满足 α -显著性检验,则说明仍存在可分性.令 $c=c+1$ 重新聚类,直到所有 c 个子集均不具有可分性后,说明图像直方图的峰态已经分解完全,每个聚类均为单峰分布模式了,则输出满意的阈值数目和图像分割的结果.

该方案既可以用于一维灰度直方图、二维灰度直方图,也可以用于高维的彩色直方图.由于单峰统计检验的引入使得图像分割问题无需人工干预,从而实现了多阈值图像分割的

自动化.

5 实验结果与分析

为了验证本文算法的有效性,我们用人造数据和实际数据做了大量的实验,分别比较了 WFCM 算法与传统 FCM 算法的图像分割效率,基于二维与一维直方图的 WFCM 算法的性能,并测试了图像分割中阈值数目自动选取的效果.

如图 3(a)所示为标准图像 Lena,图像尺寸为 512×512 ,灰度级为 256 级.我们分别用 FCM 算法和一维直方图 WFCM 算法进行分割实验,分割结果如图 3(b),(c)所示.显然两者的分割结果是相同的,因为两种分割准则是一致的.所不同的是两者的分割效率,同样在 PC486,主频 466MHz,内存 128MB 的运行环境下,用 Matlab 编程实现,FCM 分割算法的运行时间为 77.58s,而基于一维直方图的 WFCM 分割算法只需 0.26s,运行速度提高了 298 倍.

为了比较一维直方图加权的 FCM(1DFCM)算法与二维直方图加权的 FCM(2DFCM)算法的图像分割性能,我们构造了一幅 64×64 大小的人造图像,由目标(椭圆)和背景两部分组成,其中背景灰度为 100,物体灰度为 160,在叠加了不同方差的高斯噪声后作为测试数据.图 4 和图 5 分别为叠加了 $N(0,400)$ 和 $N(0,900)$ 的高斯噪声后两种算法的分割结果,表 1 统计了两种情况下的错误分割的像素点数目以及所占的百分比.显然 2DFCM 算法的性能明显优于 1DFCM 算法.



图 3 Lena 图像及其分割结果

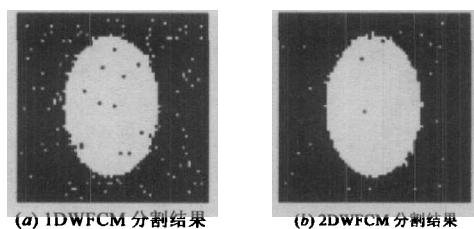


图 4 在 $N(0,400)$ 噪声下两种分割算法性能比较

表 1 不同噪声情况下两种分割算法的性能比较

图像分割 算法	噪声为 $N(0,400)$		噪声为 $N(0,900)$	
	错分点数	错误率(%)	错分点数	错误率(%)
1DFCM	343	8.3	661	16.14
2DFCM	46	1.12	130	3.17

表 2 不同类别下 α -显著性检验的检验大小

α 大小	类别数 c (对应阈值数目加 1)			
	1	2	3	4
0.05	0.78	(0.03,0.57)	(0.05,0.14,0.48)	(0.03,0.05,0.07,0.03)
0.01	0.59	(0.02,0.44)	(0.03,0.11,0.40)	(0.02,0.02,0.03,0.01)

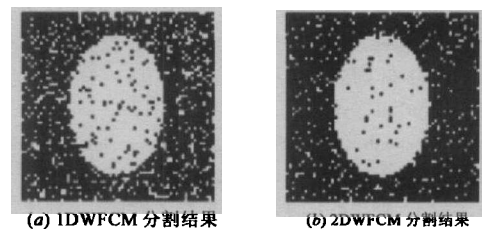


图 5 在 $N(0,900)$ 噪声下两种分割算法性能比较

对于本文提出的统计检验指导的 WFCM 分割算法,除了具有良好的分割性能外,还具有能够自动确定分类数目的优点.为了验证算法性能,我们用 WFCM 算法对如图 6(a)所示的实际图像进行分割实验.表 2 给出了在不同类别数 c 下对各个聚类进行的 α -显著性检验的检验大小.从表中可以看出,原图的二维直方图没有通过单峰检验,说明具有类可分性,两类、三类的 WFCM 算法仍然没有通过单峰检验,最终在 $c=4$ 时的聚类结果才满足单峰检验,从而得到合理的阈值数目为 3.图 6(b)~(d)分别给出了单阈值、双阈值和三阈值情况下的分割结果,与原图比较可知三阈值的分割结果是合理的.

图 7 为统计检验指导的二维直方图加权的 FCM 算法用于医学核磁共振图像的分割结果. 算法自动确定的阈值数目为 3, 即分为 4 类, 每一类的分割结果分别显示在图 7(b)~(e) 中, 分别对应一定物理意义的区域, 因此分割结果还是相当合理的.

6 结论

本文提出了一种加权 FCM 算法, 用于图像分割时可以利

用一维灰度直方图或二维直灰度直方图加权的 FCM 算法. 由实验分析可知, 加权 FCM 算法的分割效率远大于直接用 FCM 算法对原始图像的分割, 同时基于二维直方图加权的 FCM 算法的分割性能大大优于一维直方图加权的 FCM 算法. 通过单峰检验的统计指导, 加权 FCM 算法能够自动确定多阈值图像分割的合理的阈值数目, 对于实现图像分割的自动化具有重要的意义.

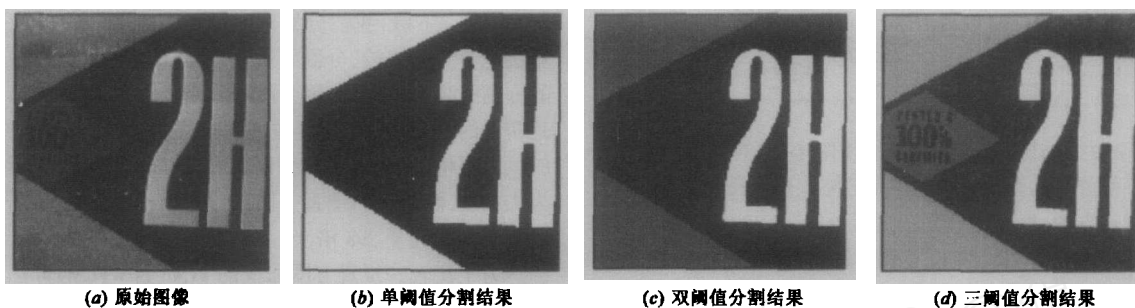


图 6 不同阈值数目下 WFCM 算法的分割结果

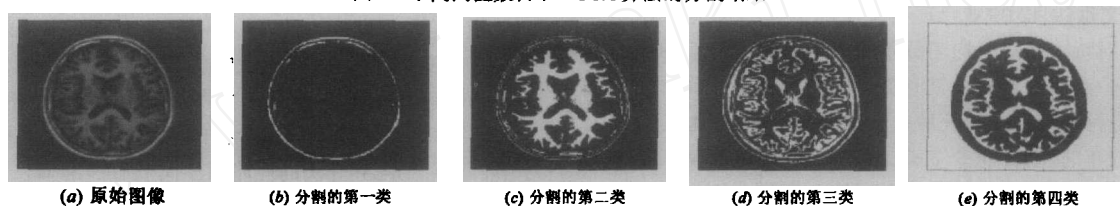


图 7 2DWFCM 算法的分割结果分列图

参考文献:

- [1] P K School, S Soltani, A K C Wong, Y C Chen. A survey of thresholding techniques [J]. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1988, 41(2): 233 - 260.
- [2] S U Lee, S A Chung. Comparative performance study of several global thresholding techniques for segmentation [J]. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1990, 52(2): 171 - 190.
- [3] N Otsu. A threshold selection method from gray level histograms [J]. *IEEE Trans. SMC*, 1979, 9(1): 62 - 66.
- [4] J Kittler, J Illingworth. On threshold selection using clustering criteria [J]. *IEEE Trans. SMC*, 1985, 15(5): 652 - 655.
- [5] 刘健庄, 涂予青. 使用高效的 c 均值聚类算法的图像阈值化方法 [J]. *电子科学学刊*, 1992, 14(4): 424 - 427.
- [6] 刘健庄, 谢维信, 高新波. 多阈值图像分割的遗传算法方法 [J]. *模式识别与人工智能*, 1995, 18(增刊): 126 - 132.
- [7] 刘健庄. 基于二维直方图的图像模糊聚类分割方法 [J]. *电子学报*, 1992, 9(20): 40 - 46.
- [8] 丁震, 胡钟山, 等. 一种基于模糊聚类的图像分割方法 [J]. *计算机研究与发展*, 1997, 34(7): 536 - 541.
- [9] 高新波. 模糊聚类算法的优化及应用研究 [D]. 博士学位论文, 西安: 西安电子科技大学, 1999.
- [10] Gao Xin-bo, Xie Wei-xin. Advances in theory and applications of fuzzy clustering [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(11): 961 - 970.

- [11] 高新波, 姬红兵. 一种基于特征加权的模糊 c 均值聚类算法 [J]. *西安电子科技大学学报*, 2000, 27(增刊), 80 - 83.
- [12] 高新波, 裴继红, 谢维信. 基于统计检验指导的聚类分析方法 [J]. *电子科学学刊*, 2000, 26(1): 6 - 12.

作者简介:



高新波 男, 1972 年生于山东莱芜, 工学博士, 西安电子科技大学教授, 博士生导师, IEEE 会员, 中国电子学会高级会员, 主要从事智能信息处理、计算机视觉、基于内容的图像与视频信息检索等领域的研究.



李洁 女, 1972 年生于陕西西安, 工学硕士, 现为西安电子科技大学讲师, 在职博士生, 主要从事数据挖掘、图像处理和模糊聚类分析等领域的研究.