

文章编号: 1008-9209(2003) 01-0108-05

生物图像阈值分割方法的研究

付 峰, 应义斌
(浙江大学 生物系统工程系, 浙江 杭州 310029)

摘 要: 阈值法是最基本的图像分割方法之一,被应用于很多领域,特别是在图像相对简单的生物图像处理方面得到了广泛使用。本文对现有的各种图像阈值分割方法进行综述,重点介绍了基于图像灰度直方图的阈值分割方法。

关 键 词: 阈值; 灰度直方图; 图像分割
中图分类号: TP391.41; TP391.76 文献标识码: A

FU Feng, YING Yi-bin (Dept. of Biosystem Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

A survey on threshold methods of image segmentation. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Science), 2003, 29(1): 108-112

Abstract The threshold method is one of the most fundamental methods of image segmentation, and it has been applied in many fields. The threshold methods of image segmentation are surveyed in this article, especially those based on the gray level histogram.

Key words threshold; gray level histogram; image segmentation

所谓图像分割是指根据灰度、彩色、空间纹理、几何形状等特征把图像划分成若干个互不相交的区域,使得这些特征在同一区域内表现出一致性或相似性,而在不同区域间表现出明显的不同。图像分割是图像处理与计算机视觉领域低层次视觉中最为基础和重要的领域之一,它是对图像进行视觉分析和模式识别的基本前提。同时它也是一个经典难题,到目前为止既不存在一种通用的图像分割方法,也不存在

一种判断是否分割成功的客观标准。

阈值法是一种传统的图像分割方法,因其实现简单、计算量小、性能较稳定而成为图像分割中最基本和应用最广泛的分割技术。已被应用于很多的领域,例如,在红外技术应用中,红外无损检测中红外热图像的分割,红外成像跟踪系统中目标的分割;在遥感应用中,合成孔径雷达图像中目标的分割等;在医学应用中,血液细胞图像的分割,磁共振图像的分割;在农业工程应用中,水果品质无损检测过程中水果图像与背景的分割。在这些应用中,分割是对图像进一步分析、识别的前提,分割的准确性将直接影响后续任务的有效性,其中阈值的选取是图像阈值分割方法中的关键技术。

收稿日期: 2002-10-23
基金项目: 国家自然科学基金(30270763)和国家“863”计划资助项目(2001AA422230)
作者简介: 付 峰(1975-)男,山东济宁人,硕士研究生,从事生物图像分析和水果品质智能化检测技术研究。

1 阈值分割的基本概念

阈值分割法是一种基于区域的图像分割技术,其基本原理是:通过设定不同的特征阈值,把图像像素点分为若干类。常用的特征包括:直接来自原始图像的灰度或彩色特征;由原始灰度或彩色值变换得到的特征。设原始图像为 $f(x, y)$,按照一定的准则在 $f(x, y)$ 中找到若干个特征值 T_1, T_2, \dots, T_N (其中 $N \geq 1$),将图像分割为几部分,分割后的图像为

$$g(x, y) = \begin{cases} L_N & \text{如果 } f(x, y) \geq T_N \\ L_{N-1} & \text{如果 } T_{N-1} \leq f(x, y) < T_N \\ \vdots & \\ L_1 & \text{如果 } T_1 \leq f(x, y) < T_2 \\ L_0 & \text{如果 } f(x, y) < T_1 \end{cases}$$

一般意义下,阈值运算可以看作是对图像中某点的灰度、该点的某种局部特性以及该点在图像中的位置的一种函数,这种阈值函数可记作

$$T(x, y, N(x, y), f(x, y))^{[1]}$$

式中, $f(x, y)$ 是点 (x, y) 的灰度值; $N(x, y)$ 是点 (x, y) 的局部邻域特性。根据对 T 的不同约束,可以得到 3 种不同类型的阈值,即

全局阈值 $T = T(f(x, y))$ (只与点的灰度值有关)

局部阈值 $T = T(N(x, y), f(x, y))$ (与点的灰度值和该点的局部邻域特征有关)

动态阈值 $T = T(x, y, N(x, y), f(x, y))$ (与点的位置、该点的灰度值和该点邻域特征有关)

2 基于直方图的阈值分割方法

直方图是一幅图像中各像素灰度值的最基本的统计形式,而且常见的阈值分割方法基本上都是基于灰度直方图统计的搜索方法,这些方法主要可分为两类,一类是谷点搜索法,另一类是指标最优搜索法。

2.1 基于一维直方图的分割

若对应于图像中每一个灰度值,统计出具有该灰度值的像素数,并据此绘出像素数-灰

度值图形,则该图形就称为图像的一维灰度直方图。传统的阈值分割法常直接利用图像的一维灰度直方图进行图像分割,适用于内容不复杂、灰度分布较集中的图像。这类待分割的图像通常由两个区域组成,一个区域以亮色为主,另一区域以暗色为主,相应的一维直方图呈现双峰,一峰表示物体的灰度值,另一峰表示背景的灰度值。在这类图像的分割方法中, Prewitt 等人 20 世纪 60 年代提出的最频值法,至今仍在使用^[2]。该方法选择两峰之间谷点的灰度值作为阈值,这样可以把由于阈值选择的误差造成错误分割的影响降到最低。N. Papamarkos 等^[3]人提出利用多项式拟合的方法来确定谷点,先找出灰度直方图的峰值点,再利用有理多项式来拟合灰度直方图两个峰间的区域,然后求出有理多项式的极小值,从而决定阈值。

为了有效应用最频值法确定阈值,可以对图像的原始灰度直方图作适当变换,使得波峰更尖锐,波谷更深凹。Panda 和 Rosenfeld 提出了仅由边缘值(灰度变化率)较低的像素点构成灰度直方图的方法,使所得直方图与原始直方图相比,双峰基本保持不变,而谷变得更深。Mason 等人使用边缘检测算子(如 Laplacian 算子、Robert 算子等)对直方图加权,均匀区域中像素边缘值较低,给予较大的权,而边界区域中像素边缘值较高,给予较小的权。

由 Otsu 提出的最大类间方差法也是最常用的利用图像一维灰度直方图的阈值化方法之一。Otsu 方法基于一种判别式测度准则,最佳阈值在该测度函数取最大时得到。假设阈值 t 把图像分成两类,设 σ_B^2 表示类间方差,那么最佳阈值 t' 满足下式

$$\sigma_B^2(t') = \max(\sigma_B^2(t))$$

Otsu 方法是一种自动的非参数非监督的阈值选择法,仅需要计算灰度直方图的零阶和一阶累积矩,计算简单,稳定有效,但 Kittler 和 Illingworth 通过实验证明当图像中目标和背景大小之比很小时, Otsu 方法失效。

最小误差法也是常用的阈值选取方法之一。通常以图像中的灰度为模式特征,假设各模式的灰度是独立同分布的随机变量,并假设图像中待分割的模式服从一定的概率分布,则可

以得到满足 Bayes 最小误差分类准则的分割阈值。假设图像中只有目标和背景两种模式,先验概率分别是 $P_1(t)$ 和 $P_2(t)$,类内灰度 i 的条件分布是 $P_i(i/1)$ 和 $P_i(i/2)$,则根据 Bayes 最小误差分类准则求得的阈值 t 应满足

$$\begin{cases} P_1(t)P_i(i/1) \geq P_2(t)P_i(i/2) & t \leq t \\ P_1(t)P_i(i/1) < P_2(t)P_i(i/2) & t > t \end{cases}$$

根据具体图像特性给出条件分布的假设,

可得到各种最小误差准则和分割算法。Gonzales^[4]等给出了等方差混合 Gauss 分布下的最小误差分割阈值;Pal 以 Poisson 分布作为模式的灰度分布假设给出分割准则;薛景浩^[5]等提出了 SAR 图像基于灰度直方图的混合偏移 Rayleigh 分布下的最小误差分割算法。

矩量保持法算法简单,无需迭代,也是常用的阈值选择方法之一。这种方法的基本思想是使分割前后图像的矩保持不变。对于图像二值化,意味着保持图像的前三阶矩不变。图像的 k 阶矩可由图像的灰度直方图计算出来,即

$$\begin{cases} m_1 = 0 \\ m_k = \sum_i p_i(z_i)^k \quad k = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

其中, $p_i = n_i / n$, n 是图像中灰度值为 z_i 的像素个数, n 是图像像素总数。由图像的前三阶矩相等,可以得到一方程组,解此方程组,可得到图像二值化后两种灰度的像素分别应该在图像中所占的比率 p_0 和 p_1 ,然后可根据 p_0 和 p_1 确定阈值。张石等^[6]利用矩量保持法分割烧结机尾断面图像,得到了良好的效果。

20 世纪 80 年代初人们开始考虑用信息论中熵的概念进行阈值选取,1980 年 Pun 首先提出了最大后验熵上限法,1985 年 Kapur 等人提出了一维最大熵阈值法,又有学者采用局部熵、条件熵、相关熵等方法来选取阈值,其中基于最大熵原则选择阈值是最重要的阈值选择方法之一。在国内,王建军等^[7]在选择最佳阈值过程中使用了相对熵。薛景浩^[8]等从目标和背景类间差异性出发,提出一种基于最大类间交叉熵准则的阈值化分割算法,与基于最小交叉熵以及基于传统香农熵的阈值化算法相比,表现出了良好的通用性和有效性。彭明生等^[9]基于图像的模糊性,将模糊数学理论和遗传算法结合

起来,提出了利用最大模糊 C 组分类熵原则确定阈值的方法。

另外,由于目标和背景处像素点灰度变化较慢,而边界处像素点灰度变化较快,利用灰度梯度直方图选取阈值在理论和实际上都是有意义的。李立源等^[10]基于灰度梯度直方图选取梯度强度均值作为阈值进行图像分割,改善了阈值化的鲁棒性和实现速度。李翊华等^[11]提出一种基于灰度梯度直方图的快速有效的双阈值自动分割法,该方法在类内离散距离最小意义下通过迭代自动选取双阈值进行图像分割。

这种直接利用一维灰度直方图的阈值分割方法算法相对简单,速度快,对于直方图具有明显双峰的图像,可获得很好的分割效果,但多数图像的直方图呈现多峰,没有明显双峰或谷底平坦等,不利于选取阈值,分割效果则可能不太理想。其原因在于一维直方图是图像中各像素灰度值出现频数的统计结果,它只反映出图像中不同灰度值出现的频数,而未反映某一灰度值的像素所在的位置及其邻域特征。直接利用图像一维直方图进行阈值分割的缺陷就在于它仅仅考虑了图像的灰度信息,却忽略了图像中的空间邻域信息,对于图像中不存在明显灰度差异或各物体的灰度范围有较大重叠的图像分割问题难以得到准确的结果。

2.2 基于二维直方图的分割

传统的图像阈值分割方法大都根据一维灰度直方图进行,但由于一维灰度直方图不能反映图像的局部空间信息,当图像信噪比递减时,传统方法将产生很多错误。改善的方法是采用图像的二维灰度直方图技术。在各像素点处,计算其邻域平均灰度值,由此形成一个灰度二元组 (i, j) ,其中 i 表示像素点的灰度值, j 表示该点邻域的平均灰度值,设灰度二元组 (i, j) 出现的频数为 f_{ij} ,定义相应的联合概率密度为

$$p_{ij} = f_{ij} / N,$$

其中 N 为图像的像素总数,以 i, j 为自变量, p_{ij} 为因变量,就形成了图像的二维灰度直方图。二维灰度直方图是像素的灰度值分布及其邻域的平均灰度值分布构成的直方图,不仅反映了图像的灰度分布信息,而且还反映了邻域空间的相关信息,因此分割效果明显优于传

统的一维灰度直方图阈值分割方法

对传统的阈值选择方法,如最大类间方差法、最小误差法、最大熵法等加以推广,可以扩展到二维灰度直方图。刘健庄等^[12]把一维 Otsu 阈值选择法推广到适合二维直方图的情况,同时考虑像素的灰度分布和邻域像素的平均灰度分布,在二维测度准则取最大值时得到最佳的二维矢量阈值。杨恬等^[13]又进一步改善了二维 Otsu 阈值分割方法的分割判决的门限函数,增强抗噪性。龚坚^[14]和张毅军等^[15]分别提出了二维最大熵图像阈值分割的快速递推算法,有效提高了熵函数的计算速度。靳宏磊等^[16]根据二维灰度直方图上灰度分布的模型,对所有像素点均给予考虑,使用最小误差法,得到了二维灰度直方图上的最佳二次分割曲线,并通过实验证明了其相对于其他二维灰度直方图上的分割方法的优越性。另外,李立源等在分析图像二维灰度直方图上聚类集形状特征的基础上,证明存在其最佳一维投影,并提出了最佳一维投影分割方法^[17]及基于二维灰度直方图的 Fisher 线性分割方法^[18],提高了分割的精度和速度。

基于二维灰度直方图的阈值分割方法在考察各像素灰度值的出现频数的同时,也考察各像素的位置及其邻域特征等空间信息,因此这种方法与基于一维灰度直方图的阈值分割方法相比具有更高的精度和鲁棒性,适用于大噪声的复杂图像的分割。当然,基于二维灰度直方图的阈值分割方法的算法更复杂,也需要耗费更多的图像处理时间。

3 其他阈值分割方法

随着神经网络、遗传算法、模糊集合论等理论不断发展,这些理论也逐渐被引入到图像阈值分割领域,产生了许多新的阈值选取方法。钱云涛等^[19]利用高斯基函数神经网络进行多阈值图像分割,而且采用模糊方向传播的学习方式加快速度。叶芎芸等^[20]提出了基于选择性多分辨率 Kohonen 网络的自适应灰度图像分割方法,该方法具有良好的适应性。遗传算法在图像分割中的应用也日渐受到重视,将遗传算法与传统的阈值选取算法相结合可以加快分

割速度。郑宏等^[21]利用遗传算法对阈值选取中的最大类间方差法进行了优化处理,袁占亭等^[22]将遗传算法应用于最佳阈值搜索中的二维熵阈值分割,种劲松等^[23]用遗传算法分别实现了 Otsu 法和 KSW 熵法,实验表明分割速度明显快于传统的阈值分割方法。模糊理论的出现使阈值法有了新的发展,生克伟等^[24]将模糊子集理论中的模糊熵概念引入到阈值分割技术中,依据最大熵理论确定阈值,郭英凯^[25]等有机结合模糊集理论和遗传算法进行图像分割,实验证明了这种方法具有较快的速度和较高的鲁棒性。

4 结束语

纵观阈值分割技术领域的发展,可以看出以下几个比较明显的发展趋势,一是目前还不存在一种通用的阈值分割方法,人们除了不断地将神经网络、模糊集论、遗传算法、数学形态学等新理论、新概念引入图像分割领域外,更加重视阈值分割技术与其他图像分割方法的有机结合,二是针对具体研究领域中的图像分割问题,人们尽量多地利用该领域中的先验知识来辅助图像阈值的选取以便分割,三是半自动分割方式受到广泛的关注,通过在人机交互时加入先验知识适当干预图像的分割,可以得到较理想的分割效果。

References

- [1] ZHENG Nan-ning (郑南宁). *Computer vision and mode recognition* (计算机视觉与模式识别) [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998: 82. (in Chinese)
- [2] YING Yi-bin (应义斌). Study on background segment and edge detection [J]. *Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.)* [浙江大学学报 (农业与生命科学版)], 2000, 26(1): 35-38. (in Chinese)
- [3] Papamarkos N, Gates B. A new approach for multilevel threshold Selection [J]. *CVGIP: Graphic Models and Image processing*, 1994, 56: 357-370.
- [4] Gonzales R C, Wintz P. *Digital image processing* [M]. London: Addison-Wesley, 1977: 325-327.
- [5] XUE Jing-hao, ZHANG Yu-jin, LIN Xing-gang (薛景浩, 章毓晋, 林行刚). Rayleigh-distribution based minimum error thresholding for SAR images [J]. *Journal of*

- Electronics*(电子科学学刊), 1999, 21(2): 219-225. (in Chinese)
- [6] ZHANG Shi, ZHANG Hong-xun, LI Shu-yun(张石, 张宏勋, 李淑云). The moment-preserving algorithm and its application in the analyzer of the cross-section image of the discharge end[J]. *Basic Automation* (基础自动化), 1998, 4: 48-50. (in Chinese)
- [7] WANG Jian-jun, YUAN Wei-qi, ZHANG Shi, et al. (王建军, 苑玮琦, 张石, 等). A relative Entropy and edge detection-based algorithm to image segmentation[J]. *Control and Decision*(控制与决策), 1997, 12(5): 581-585. (in Chinese)
- [8] XUE Jing-hao, ZHANG Yu-jin, LIN Xing-gang(薛景浩, 章毓晋, 林行刚). Image thresholding based on maximum between-class posterior cross entropy[J]. *Journal of Image and Graphics*(中国图像图形学报), 1999, 4A(2): 110-114. (in Chinese)
- [9] PENG Ming-sheng, MO Yu-long(彭明生, 莫玉龙). A method of gray-scale image thresholding based on fuzzy entropy and genetic algorithm[J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science)*[上海大学学报(自然科学版)], 1999, 5(6): 481-485. (in Chinese)
- [10] LI Li-yuan, CHEN Wei-nan(李立源, 陈维南). A robust and completely deterministic method for gray-level picture thresholding[J]. *PI & AI*(模式识别与人工智能), 1993, 6(3): 235-241. (in Chinese)
- [11] LI Yi-hua, HU Kuang-hu(李翊华, 胡匡祐). A fast bi-thresholding segmentation method for cell image[J]. *PI & AI*(模式识别与人工智能), 1995, 8(4): 357-362. (in Chinese)
- [12] LIU Jian-zhuang, LI Wen-qing(刘健庄, 栗文清). The automatic thresholding of gray-level pictures via two-dimensional otsu method[J]. *Acta Automatica Sinica* (自动化学报), 1993, 19(1): 101-105. (in Chinese)
- [13] YANG Tian, LI De-fang(杨恬, 李德芳). Study of two-dimensional otsu thresholding for grey image segmentation[J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science)* [西南师范大学学报(自然科学版)], 1998, 23(6): 654-662. (in Chinese)
- [14] GONG Jian, LI Li-yuan, CHEN Wei-nan(龚坚, 李立源, 陈维南). A fast two-dimensional entropic thresholding method[J]. *Journal of Southeast University*(东南大学学报), 1996, 26(4): 31-36. (in Chinese)
- [15] ZHANG Yi-jun, WU Xue-jing, XIA Liang-zheng(张毅军, 吴雪菁, 夏良正). A fast Recurring algorithm for two-dimensional entropic thresholding for image segmentation[J]. *PR & AI*(模式识别与人工智能), 1997, 10(3): 259-264. (in Chinese)
- [16] JIN Hong-lei, ZHU Wei-ping, LI Li-yuan, et al.(靳宏磊, 朱蔚萍, 李立源, 等). The best thresholding on 2-D gray level histogram[J]. *PR & AI*(模式识别与人工智能), 1999, 12(3): 329-333. (in Chinese)
- [17] LI Li-yuan, GONG Jian, CHEN Wei-nan(李立源, 龚坚, 陈维南). The gray-level image thresholding method based on the optimal one-dimensional projection of two-dimensional histogram[J]. *Acta Automatica Sinica* (自动化学报), 1996, 22(3): 315-322. (in Chinese)
- [18] GONG Jian, LI Li-yuan, CHEN Wei-nan(龚坚, 李立源, 陈维南). The gray-level thresholding method based on fisher linear discriminant of two-dimensional histogram[J]. *PR & AI*(模式识别与人工智能), 1997, 10(1): 1-8. (in Chinese)
- [19] QIAN Yun-tao, XIE Wei-xin(钱云涛, 谢维信). Multi-level thresholding using basis function neural networks[J]. *Signal Processing* (信号处理), 1996, 12(3): 209-217. (in Chinese)
- [20] YE Xiang-yun, QI Fei-hu, JIANG Jun(叶芾芸, 戚飞虎, 蒋隽). Adaptive image segmentation based on selective multiresolutional Kohonen neural network[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (红外与毫米波学报), 1998, 17(1): 48-53. (in Chinese)
- [21] ZHENG Hong, PAN Li(郑宏, 潘励). Genetic algorithms and its application in the selection of image threshold[J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping* (武汉测绘科技大学学报), 1999, 21(1): 20-23. (in Chinese)
- [22] YUAN Zhan-ting, HONG Yi, WANG Qing(袁占亭, 洪毅, 王青). Genetic algorithms of thresholding segment in 2D entropy image[J]. *Journal of Gansu University of Technology* (甘肃工业大学学报), 1999, 25(1): 68-72. (in Chinese)
- [23] ZHONG Jin-song, ZHOU Xiao-kuan, WANG Hong-q, et al. (种劲松, 周孝宽, 王宏琦, 等). Image thresholding segmentation based on genetic algorithm[J]. *Journal of Electronics*(电子科学学刊), 2000, 22(5): 785-790. (in Chinese)
- [24] SHENG Ke-wei, ZHENG Jian-hong(生克伟, 郑建宏). A new method for gray-level picture thresholding using the fuzzy entropy[J]. *Signal Processing* (信号处理), 1998, 14(3): 269-272. (in Chinese)
- [25] GUO Ying-kai, YANG Jie, LU Zheng-gang(郭英凯, 杨杰, 陆正刚). Threshold image segmentation based on fuzzy and genetic algorithms[J]. *Infrared and Laser Engineering* (红外与激光工程), 2000, 29(5): 15-18. (in Chinese)