

基于二维 Otsu 和模糊聚类的图像分割算法*

胡 敏, 宋银龙

(合肥工业大学 计算机与信息学院, 合肥 230009)

摘 要: 针对传统二维 Otsu 算法计算复杂度高的问题, 提出一种改进的 Otsu 图像分割算法。该算法通过求两个一维 Otsu 法的阈值来代替传统二维 Otsu 法的阈值, 使得计算复杂度得到了降低; 同时为了改进分割效果, 结合使用了模糊 C-均值聚类算法。实验结果表明, 改进的算法充分发挥了两者的优势, 不仅在计算速度上优于原二维 Otsu 算法, 且分割效果较好。

关键词: 图像分割; 阈值化; 二维直方图; Otsu 算法; 模糊 C-均值聚类

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)04-1563-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.04.101

Image segmentation based on two-dimensional Otsu and fuzzy clustering

HU Min, SONG Yin-long

(College of Computer & Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Considering the disadvantage that the classical 2D Otsu thresholding method is time-consuming, this paper proposed an improved algorithm. By calculating two 1D Otsu threshold method instead of the traditional 2D Otsu threshold method, it reduced the complexity of the algorithm. Simultaneously in order to improve the segmentation performance, this algorithm adopted fuzzy C-means clustering method. The experimental results show that this improved algorithm can take the advantages of both. It is better than the traditional 2D Otsu not only in the computation time, but also in the quality.

Key words: image segmentation; thresholding; two-dimensional histogram; Otsu algorithm; fuzzy C-means clustering

图像分割是数字图像处理中的一项关键技术, 它是对图像进行视觉分析和模式识别的基本前提, 多年来一直受到人们的高度重视。可以说图像分割的好坏直接影响到对图像的理解。自 20 世纪 60 年代以来, 在国际学者提出的众多分割方法中, 阈值分割因其实现简单、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^[1~3]。经典的阈值分割法是大津法(Otsu)^[4], 由日本学者大津于 1979 年提出, 因其简单、快速且性能稳定而得到广泛的应用。但是, 当图像含有较多噪声时, 从图像的一维直方图上根本看不到明显的双峰或者多峰, 使用传统的 Otsu 算法很难得到满意的分割效果。针对这一情况, Liu 等人^[5]提出了通过利用图像像素点及其邻域相关信息构建二维 Otsu 阈值分割算法, 使其分割效果得到了改善。二维 Otsu 算法在提高抗噪性的同时, 所需的计算量也以指数在增加, 不利于实际推广应用。针对这一问题, 学者们提出了一些改进算法。Gong 等人^[6]提出二维 Otsu 法的快速递推算法, 将原算法复杂度从 $O(L^4)$ 降到 $O(L^2)$ 。范九伦等人^[7]提出二维 Otsu 曲线阈值法, 只需遍历二维直方图中主对角线和一条次主对角线。但是这类改进算法都是以假设二维直方图在给定分割阈值向量进行划分, 所得目标和背景两区域的概率和近似为 1 这一前提进行推导的, 并不具有普适性。其他如文献[8~10]也对传统二维 Otsu 算法进行了改进, 但也仍然存在上述问题。文献[11, 12]使用概率

优化方法如遗传算法和粒子群算法来优化二维 Otsu 法的分割阈值, 但算法容易陷入局部最优过早收敛。另外, 近年来聚类分析^[13]也被应用到图像分割中, 但是该方法有较高的复杂性, 且实时性差。为此, 本文提出了一种新的二维阈值分割方法。

1 二维 Otsu 算法

设一幅图像 $f(x, y)$ 的灰度级为 L , 其邻域平滑图像的灰度级也为 L , 对于图像中的任何一个像素, 就有了一个二元组: 像素灰度值 i 和邻域平均灰度值 j 。设二元组 (i, j) 出现的频数为 f_{ij} , 图像总像素为 M , 则二维联合概率密度为

$$P_{ij} = \frac{f_{ij}}{M} \quad (1)$$

其中: $0 \leq i, j \leq (L-1)$, $\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} f_{ij} = M$, $\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} P_{ij} = 1$ 。

设图像的分割阈值为 (s, t) , 则可以将二维直方图的投影平面分割成四个区域, 如图 1 所示。区域 0 和 1 代表目标或背景类, 区域 2 和 3 表示边缘点或噪声。对于背景或目标内部的像素而言, 其灰度值与邻域平均灰度值是相似的, 而对于位于目标和背景边缘处的像素, 其灰度值与邻域平均灰度值有很大的不同。

设在二维直方图中存在两类 C_0 和 C_1 , 它们分别代表目标和背景, 则两类的概率分别记为

收稿日期: 2011-08-17; 修回日期: 2011-09-30 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61075032); 安徽省自然科学基金资助项目(090412059)

作者简介: 胡敏(1967-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为计算机图形学、数字图像处理等; 宋银龙(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机图形学、数字图像处理等(songyinlong135@163.com)。

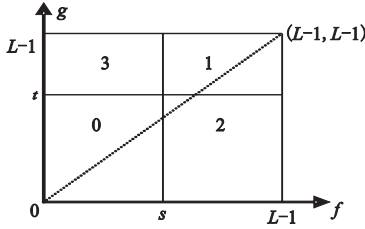


图1 二维直方图的平面投影

$$\omega_0 = \sum_{i=0}^s \sum_{j=0}^t P_{ij} \quad (2)$$

$$\omega_1 = \sum_{i=s+1}^{L-1} \sum_{j=t+1}^{L-1} P_{ij} \quad (3)$$

两类对应的均值矢量为

$$u_0 = (\overline{u_{0i}}, \overline{u_{0j}})^T = \left(\sum_{i=0}^s \sum_{j=0}^t \frac{iP_{ij}}{\omega_0}, \sum_{i=0}^s \sum_{j=0}^t \frac{jP_{ij}}{\omega_0} \right)^T \quad (4)$$

$$u_1 = (\overline{u_{1i}}, \overline{u_{1j}})^T = \left(\sum_{i=s+1}^{L-1} \sum_{j=t+1}^{L-1} \frac{iP_{ij}}{\omega_1}, \sum_{i=s+1}^{L-1} \sum_{j=t+1}^{L-1} \frac{jP_{ij}}{\omega_1} \right)^T \quad (5)$$

二维直方图上总的均值矢量为

$$u = (\overline{u_i}, \overline{u_j})^T = \left(\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} \frac{iP_{ij}}{\omega}, \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} \frac{jP_{ij}}{\omega} \right)^T \quad (6)$$

定义目标与背景间的离散度矩阵为

$$S_B(s, t) = \omega_0 (u_0 - u)^T (u_0 - u) + \omega_1 (u_1 - u)^T (u_1 - u) \quad (7)$$

用离散度矩阵的迹作为背景和目标的距离测度函数:

$$\begin{aligned} tr(S_B) = & \omega_0 [(\overline{u_{0i}} - \overline{u_i})^2 + (\overline{u_{0j}} - \overline{u_j})^2] + \\ & \omega_1 [(\overline{u_{1i}} - \overline{u_i})^2 + (\overline{u_{1j}} - \overline{u_j})^2] \end{aligned} \quad (8)$$

二维 Otsu 算法就是遍历整幅图像,对每个 (s, t) 计算对应的类间离散度 $tr(S_B)$,当其最大时所取得的分割阈值即为最优的阈值 (s, t) 。

2 模糊 C-均值聚类分割算法

模糊 C-均值聚类 (FCM) 算法用于图像分割,是把图像的像素点看成数据集的样本点,把像素点的特征 (对于灰度图像,即为灰度) 看成样本点的特征,则图像的分割问题转换为数据集优化问题。这样就可以将图像中属性相一致的像素进行模糊聚类后对每类像素进行标定,从而实现图像分割。

聚类分析的目标函数式:

$$J(U, V) = \sum_{k=1}^c \sum_{i=1}^n (U_{ik})^m (d_{ik})^2 \quad (9)$$

隶属度矩阵:

$$U_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left(\frac{d_{ik}}{d_{jk}} \right)^{2/(m-1)}} \quad (10)$$

聚类中心:

$$V_i = \frac{\sum_{k=1}^n (U_{ik})^m x_k}{\sum_{k=1}^n (U_{ik})^m} \quad (11)$$

其中: x 为像素的集合; c 为聚类类别数; m 为模糊加权指数,常取值为 2; n 为聚类空间的样本数; $(d_{ik})^2$ 为第 k 个像素到第 i 类中心的距离,定义为

$$(d_{ik})^2 = \|x_k - V_i\|^2 = (x_k - V_i)^T (x_k - V_i) \quad (12)$$

图像的优化分割就是通过迭代寻找聚类中心和隶属度值,使得目标函数值最小。

3 改进的二维 Otsu 算法

上述 Otsu 和 FCM 算法被用于图像分割时,表现出了各自的优势和不足。

二维 Otsu 算法除考虑像素的灰度信息外,还考虑了像素点与其邻域的空间相关信息,但该方法在提高抗噪性的同时也加大了算法的搜索复杂性。为了求得最佳阈值,二维 Otsu 法需要遍历整幅图像对每个 (s, t) 计算其所对应的类间散度,因此二维 Otsu 算法的时间复杂度为

$$O(L^2 \times (s \times t + (L-s) \times (L-t))) = O(L^4)$$

可见运算量很大。

针对二维 Otsu 算法计算复杂度高的问题,本文提出一种基于分解的二维 Otsu 算法。假设二维直方图中远离对角线的分量近似为 0,即 $\sum_{i=s+1}^{L-1} \sum_{j=0}^t P_{ij} = 0$, $\sum_{i=0}^s \sum_{j=t+1}^{L-1} P_{ij} = 0$; 同时可以根据概率分布 P_{ij} 得到边缘概率 $Q_i = \sum_{j=0}^{L-1} P_{ij}$ 和 $R_j = \sum_{i=0}^{L-1} P_{ij}$, 因此可得

$$\omega_0 = \sum_{i=0}^s \sum_{j=0}^t P_{ij} = \sum_{i=0}^s \sum_{j=0}^t P_{ij} + \sum_{i=0}^s \sum_{j=t+1}^{L-1} P_{ij} = \sum_{i=0}^s \sum_{j=0}^{L-1} P_{ij} = \sum_{i=0}^s Q_i \quad (13)$$

同理可得

$$\omega_1 = \sum_{i=s+1}^{L-1} Q_i = \sum_{j=t+1}^{L-1} R_j \quad (14)$$

以及

$$\overline{u_{0i}} = \frac{\sum_{i=0}^s iQ_i}{\omega_0}, \overline{u_{0j}} = \frac{\sum_{j=0}^t jR_j}{\omega_0} \quad (15)$$

$$\overline{u_{1i}} = \frac{\sum_{i=s+1}^{L-1} iQ_i}{\omega_1}, \overline{u_{1j}} = \frac{\sum_{j=t+1}^{L-1} jR_j}{\omega_1} \quad (16)$$

可以得到像素灰度值 i 所对应的一维类间方差为

$$\sigma_{Bi}(s) = \omega_0 (\overline{u_{0i}} - \overline{u_i})^2 + \omega_1 (\overline{u_{1i}} - \overline{u_i})^2 \quad (17)$$

邻域灰度值 j 对应的一维类间方差为

$$\sigma_{Bj}(t) = \omega_0 (\overline{u_{0j}} - \overline{u_j})^2 + \omega_1 (\overline{u_{1j}} - \overline{u_j})^2 \quad (18)$$

因此

$$\begin{aligned} tr(S_B) = & \omega_0 [(\overline{u_{0i}} - \overline{u_i})^2 + (\overline{u_{0j}} - \overline{u_j})^2] + \\ & \omega_1 [(\overline{u_{1i}} - \overline{u_i})^2 + (\overline{u_{1j}} - \overline{u_j})^2] = \\ & \omega_0 (\overline{u_{0i}} - \overline{u_i})^2 + \omega_1 (\overline{u_{1i}} - \overline{u_i})^2 + \\ & \omega_0 (\overline{u_{0j}} - \overline{u_j})^2 + \omega_1 (\overline{u_{1j}} - \overline{u_j})^2 = \sigma_{Bi}(s) + \sigma_{Bj}(t) \end{aligned} \quad (19)$$

也就是说,可以根据一维 Otsu 法分别求解灰度值和邻域灰度值的最佳阈值,再将它们组合成二维 Otsu 法到最佳阈值。这样就可以将二维 Otsu 法的时间复杂度降为 $O(L + L) = O(L)$,使其在时间和空间上具有明显的优势。

二维 Otsu 算法和上述改进算法都是假定目标和背景两区域的概率和为 1,在取阈值时将图 1 中的 2 和 3 部分全部忽略,势必会影响分割结果。FCM 算法用于灰度图像分割,是一种非监督模糊聚类后再标定的过程,适合灰度图像中存在模糊和不确定点。但是,FCM 算法对初值敏感,很大程度上依赖初始聚类中心的选择,当初始聚类中心严重偏离全局最优聚类中心时,用其很可能陷入局部极小值。

在此,本着优势互补的原则,通过将两种算法进行组合,提出一种图像分割的新算法。首先通过改进后的二维 Otsu 算法对图像进行分割,解决传统二维 Otsu 算法计算复杂度高的问题,同时利用求得的阈值 (s, t) 来计算 FCM 算法的初始聚类中心,这样就避免了 FCM 算法采用随机选取聚类中心点而易使迭代过程陷入局部最优解的缺点;然后使用聚类算法

对在二维直方图中概率假设为0的点(图1中2和3区域)进行再划分,解决了现有二维 Otsu 法接受目标区域和背景区域的概率和为1这种不具普遍适用性的假设的缺点,使得分割效果更好。

具体实现步骤如下:

a) 运用改进的二维 Otsu 算法对图像进行分割,找出最佳阈值(s, t)。

b) 利用(s, t)初始化聚类中心,设定图1中0和1区域中心点为聚类中心,即 $(\frac{s}{2}, \frac{t}{2})$ 和 $(\frac{s+L-1}{2}, \frac{t+L-1}{2})$ 。

c) 继续运用 FCM 算法对图1中2和3区域进行迭代处理,获得最终的区域轮廓。

4 实验结果与分析

为了验证本算法的性能,利用上述算法对两幅灰度图像进行分割实验。实验平台是 Pentium4 2.8 GHz CPU, 1 GB RAM, 运行环境为 MATLAB 7.0。

图2和3是分别用不同方法对两幅灰度图像的分割结果。由图2和3可以看出,使用二维 Otsu 法的效果是不令人满意的,其原因是,该分割方法建立在目标区域和背景区域上的概率和近似为1这种假设基础上的。在最终二值化的过程中,通常采取的方法是令图1中的区域0或1为一类,而其余三块为另一类,或者干脆对于区域2和3的点不加处理,当出现如图2中的目标与背景相近时就会出现误分割情况。而直接使用 FCM 算法对图像进行聚类分割的速度不仅慢,且图像中的类相互重叠会产生错误分割,尤其是在类的数目未知的情况下,聚类效果是十分不理想的。而使用本文方法可使结果得到改善,结果如图2(d)所示。图3是一幅叠加了 $N(0, 0.01)$ 的高斯白噪声的图像。从图中可以看出,在错分点数和错误率上,本文算法明显优于另外两种算法。

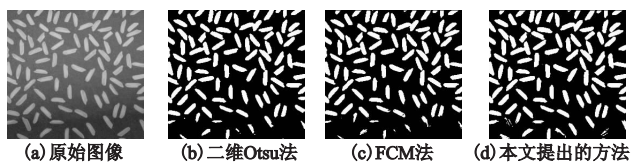


图2 图像1上的分割结果比较

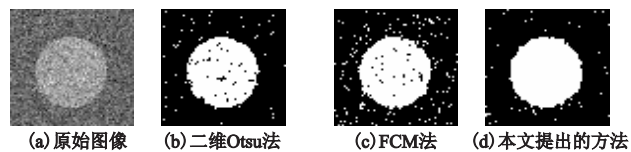


图3 图像2上的分割结果比较

由表1可以看出,由于使用两个一维 Otsu 算法取代二维 Otsu 法,同时给定了聚类中心,使得本文算法更满足实时性的要求。

表1 三种算法的时间比较

图像	二维 Otsu 法	二维 FCM 法	本文方法
图2	2.78	3.4	1.10
图3	2.13	2.38	0.98

通常对图像分割的结果是以人的主观判决为评价准则,但效果只靠观察来判断很不科学,所以对不同分割方法的处理结果作定量评价也是必需的。本文采用图像分割质量评价指标区域一致性^[14]来定量评价三种算法的性能,如表2所示。

表2 三种算法结果的定量比较

图像	二维 Otsu 法	二维 FCM 法	本文方法
图2	0.902 5	0.875 3	0.968 5
图3	0.928 3	0.915 9	0.985 6

由表2可以看出,本文算法对区域一致性参数具有更好的指标,与人的视觉主观判断基本一致。综上所述,本文算法在总体效果上要优于二维 Otsu 法和 FCM 法。

5 结束语

面对现有二维 Otsu 法接受目标区域和背景区域的概率和为1这种不具普遍适用性的假设,以及计算复杂度高的问题,本文将二维 Otsu 法与 FCM 法结合提出了一种新的算法,用两个一维阈值来代替传统的二维阈值,在此基础上利用聚类算法对其进行再划分。实验结果表明,与其他的算法相比,本文算法不仅分割效果较理想,而且在时间上得到了大大的改善。因此,本文算法具有更广泛的应用价值。

参考文献:

- [1] SEZGIN M, SANKUR B. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation[J]. *Journal of Electronic Image*, 2004, 13(1): 146-165.
- [2] DONG Li-ju, YU Ge, OGUNBONA P, et al. An efficient iterative algorithm for image thresholding[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2008, 29(9): 1311-1316.
- [3] TIZHOOSH H R. Image thresholding using type II fuzzy sets[J]. *Pattern Recognition*, 2005, 38(12): 2363-2372.
- [4] OTSU N. A threshold selection method from gray level histograms[J]. *IEEE Trans on SMC*, 1979, 9(1): 62-66.
- [5] LIU Jian-zhuang, LI Wen-qing. The automatic thresholding of gray-level picture via 2D Otsu method[J]. *Acta Automatica Sinica*, 1993, 19(1): 101-105.
- [6] GONG Jian, LI Li-yun, CHEN Wei-nan. Fast recursive algorithm for two-dimensional thresholding[J]. *Pattern Recognition*, 1998, 31(3): 295-300.
- [7] 范九伦, 赵凤. 灰度图像的二维 Otsu 曲线阈值分割法[J]. *电子学报*, 2007, 35(4): 751-755.
- [8] 郝颖明, 朱枫. 改进的二维 Otsu 图像分割方法及其快速实现[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(5): 1100-1104.
- [9] WU Cheng-mao, TIAN Xiao-ping, TAN Tie-niu. Fast iterative algorithm for 2D Otsu thresholding method[J]. *PR&AI*, 2008, 21(6): 746-757.
- [10] WU Yi-quan, WU Wen-yi, PAN Zhe. A fast iterative algorithm for image segmentation based on 2D maximum between cluster variance[J]. *Chinese Journal of Stereology and Image Analysis*, 2007, 12(3): 216-220.
- [11] 李康顺, 李茂民, 张文生. 一种基于改进遗传算法的图像分割方法[J]. *计算机应用研究*, 2009, 26(11): 4364-4367.
- [12] 张俊宝. 基于改进 PSO 理论的二维 Otsu 分割算法[J]. *电光与控制*, 2010, 17(7): 35-37.
- [13] 康家银. 一种改进的顾及像素空间信息的 FCM 聚类算法[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(1): 208-212.
- [14] 章毓晋. 图像分割评价技术分类和比较[J]. *中国图象图形学报*, 1996, 1(2): 151-158.