

中图法分类号: TP301.6 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)03-0377-05

论文索引信息: 黄港, 李俊, 潘金贵. 基于粒子群优化方法的 2 维 Otsu 快速图像分割算法 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(3): 377-381

基于粒子群优化方法的 2 维 Otsu 快速图像分割算法

黄港, 李俊, 潘金贵

(南京大学计算机软件新技术国家重点实验室, 南京 210093)

摘要: 经典的 2 维 Otsu 算法在对图像进行分割时能不依赖于图像的内容, 具有较好的适应性, 但有着计算复杂度过高和实时性较差的缺点。针对这一问题, 提出一种将粒子群算法应用于 Otsu 图像分割以提高分割速度的方法。实验结果表明, 该方法不仅能获得较好的分割效果, 而且极大地降低分割时间, 能够适应实时性应用的要求。
关键词: 图像分割; 2 维 Otsu 算法; 粒子群算法

A fast 2D Otsu image segmentation algorithm based on particle swarm optimization algorithm

Huang Gang, Li Jun, Pan Jingui

(State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093 China)

Abstract: The classic two-dimensional Otsu image segmentation algorithm is applied widely due to its content-independent characteristic. However, it cannot be applied to real-time system for its high computation complexity. To solve this problem, we present a fast two-dimensional Otsu algorithm, in which particle swarm algorithm is adopted to reduce the computing time. Extensive experiments using real-world images show that our method evidently outperforms the classic Otsu algorithm in segmentation time, while of comparable segmentation performance with the Otsu algorithm. Thus, the improved algorithm satisfies the requirements for real-time applications.

Keywords: image segmentation; 2D Otsu algorithm; PSO algorithm

0 引言

图像分割在图像分析和计算机视觉领域中占据了重要的地位, 是图像识别及恢复等后续操作的预处理步骤。图像分割是将图像分割成若干互不重叠的区域, 每个区域满足一定的灰度、纹理等特征的相似性准则。阈值法是一种简单而有效的图像分割技术。目前已经出现的图像阈值自动选取方法多达十几种, 最具代表的是 P-tile 法^[1]、双峰法^[2]、最大类

间方差法^[3]、最小误差法^[4]、最大熵方法^[5]和梯度统计法^[6]等。其中日本学者 Otsu 在 1979 年提出的最大类间方差法^[3](亦即 Otsu 算法), 具有较好的整体分割效果。该算法与物体和背景的像素分布模型无关, 因此 Otsu 算法在图像分割领域得到了广泛应用。

1 维 Otsu 算法只考虑了图像的灰度信息, 而没有利用图像像素间的空间信息, 当图像中的噪声较多时, 运用该算法的分割效果较差, 甚至会发生严重的错误。通过增加维数来对图像进一步分类成为改进分割效果的一种可行方法。Brink^[7]首先提出了

收稿日期: 2009-08-10; 修回日期: 2009-10-23

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60533080)。

第一作者简介: 黄港(1984—), 男, 现为南京大学计算机科学与技术系计算机软件与理论专业硕士研究生, 主要研究方向为计算机图形图像处理技术。E-mail: ganghuang@mes.nju.edu.cn。

2 维熵的阈值方法,刘建庄等人^[8]提出了 2 维直方图 Otsu 算法。2 维 Otsu 算法充分利用了图像像素之间的空间信息,因此具有更强的抗噪声能力。但是原始 2 维 Otsu 算法的时间复杂度高,运算时间较大,实时性较差。在上述算法基础上,郝颖明等人^[9]提出了将 2 维阈值转化为 1 维阈值的方法,大大提高了运算速度;梁光明等人^[10]则通过改变阈值取值范围、优化阈值搜索方法等措施,实现了细胞的快速分割;朗究鹏、朱枫等人^[11]则采用积分图像的方式来减少搜索分割阈值的计算量,实现了图像的快速分割;刘冬菊等人^[12]则依据 K-mean 算法与 Otsu 算法都基于最小类内方差的准则,对 Otsu 算法进行了多维扩展,且有效的降低了运算复杂度;孙丰杰等人^[13]采用模拟退火算法在 2 维直方图上搜索最优分割阈值,获得了与原始算法相当的分割效果,计算量却大大降低。

在刘建庄等人提出的 2 维 Otsu 算法基础上,本文采用粒子群算法来求取 2 维 Otsu 算法的最优阈值,基本保持了与原始 2 维 Otsu 算法相同的分割效果,并且大大的提高了运算速度,满足了实时性应用的要求。

1 Otsu 阈值法

1 维 Otsu 算法是由日本学者 Otsu 提出,利用图像的直方图,使得目标和背景的概率最大化来自动确定分割阈值。该算法首先使用直方图来计算各灰度级出现的概率,并以阈值变量 t 将灰度图像的像素分为两类,然后求每一类的类内方差及类间方差,选取使得类间方差最大、类内方差最小的灰度级 t 作为最佳阈值。

在实际应用中,由于噪声等的存在,1 维灰度直方图并不一定存在明显的波峰和波谷,此时 1 维 Otsu 算法就不适应于确定图像的分割阈值。于是,刘建庄等人^[8]提出了 2 维 Otsu 自适应阈值分割算法。该算法在 1 维 Otsu 算法基础上,将每个像素点邻域内的灰度均值作为分割的参考属性,从而达到更好的分割效果。算法思路如下:假设灰度值为 i ,其邻域均值为 j 的像素出现的频率为 f_{ij} ,则 2 维联合概率分布密度为

$$p_{ij} = f_{ij}/N \tag{1}$$

式中, $\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} p_{ij} = 1$

如图 1 所示,对任意给定的一个阈值 (s, t) ,可以将图像分割为 4 个区域: I, II, III, IV,其中对角线上的区域 I 和 III 分别对应图像的目标物体和背景,远离对角线的区域 II 和 IV 对应图像的噪声和边

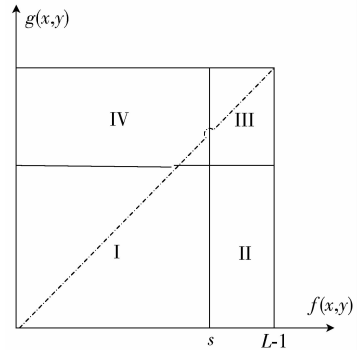


图 1 原始 2 维 Otsu 算法的阈值分割
Fig. 1 Otsu algorithm for image segmentation

缘。物体和背景对应的概率分别是 p_o 和 p_b ,当阈值为 (s, t) 时,其值分别为

$$p_o = \sum_{i=0}^s \sum_{j=0}^t p_{ij}, p_b = \sum_{i=s+1}^{L-1} \sum_{j=t+1}^{L-1} p_{ij} \tag{2}$$

则 c_o 和 c_b 对应的灰度均值矢量为

$$\mathbf{u}_o = (u_{oi}, u_{oj})^T = \left(\sum_{i=0}^s i \times p(i | c_o), \sum_{j=0}^t j \times p(j | c_o) \right)^T \tag{3}$$

$$\mathbf{u}_b = (u_{bi}, u_{bj})^T = \left(\sum_{i=s+1}^{L-1} i \times p(i | c_b), \sum_{j=t+1}^{L-1} j \times p(j | c_b) \right)^T \tag{4}$$

图像总的灰度均值矢量为

$$\mathbf{u}_T = (u_{Ti}, u_{Tj})^T = \left(\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} i \times p_{ij}, \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} j \times p_{ij} \right)^T \tag{5}$$

定义离散度矩阵

$$S_{(s,t)} = p_o \times (u_o - u_T) \times (u_o - u_T)^T + p_b \times (u_b - u_T) \times (u_b - u_T)^T \tag{6}$$

以离散度矩阵的迹作为离散度测度,则

$$\text{tr}(S_{(s,t)}) = p_o \times [(u_{oi} - u_{Ti})^2 + (u_{oj} - u_{Tj})^2] + p_b \times [(u_{bi} - u_{Ti})^2 + (u_{bj} - u_{Tj})^2] \tag{7}$$

当迹取最大值时对应的分割阈值就是最优阈值,即最优分割阈值 (s^*, t^*) ,其满足

$$\text{tr}(S_{(s^*, t^*)}) = \max_{0 \leq s, t \leq L-1} (\text{tr}(S_{(s,t)})) \tag{8}$$

实验结果表明,在大多数情况下,利用 2 维 Otsu 算法可以获得比 1 维 Otsu 算法更好的分割效果,但是由于参考属性维度的增加,2 维 Otsu 算法的计算复

杂度为 $O(L^4)$, 比前者要高得多, 因此很难满足实时处理的要求。

2 采用粒子群优化算法的 Otsu 方法

2.1 粒子群算法

由 Kennedy 和 Eberhart 提出粒子群算法^[14]是一种基于群智能的随机优化算法。它借鉴了鸟群和鱼群捕食过程中的社会行为, 是一种有别于遗传算法的进化优化技术。该算法将每个个体看作是 d 维搜索空间中的一个没有体积和质量的粒子, 粒子在该空间中以一定的速度飞行, 并根据个体和群体的最优位置动态调整自身的速度和位置。每个微粒代表解空间的一个候选解, 解的优劣程度由适应度函数决定, 适应度函数则根据优化目标定义。本文算法中, 粒子的适应度为离散度矩阵的迹的值, 灰度向量 (s, t) 为一个候选解。设种群共有 N 个粒子, 其搜索空间为 d 维空间, 则第 i 个微粒的位置可表示为 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$, 其飞行速度表示为 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ 。每个粒子所经历过的具有最好适应值的位置, 记为 $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$, 种群所有微粒所经历最过的最好适应值位置成为全局最好位置, 记 $p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd})$ 。对粒子群算法的每一次迭代, 粒子通过动态的跟踪 p_i, p_g 来更新自身的速度和位置。速度和位置的更新方程为

$$v_{ij}(t+1) = w \times v_{ij}(t) + c_1 \times r_{1j}(t) \times (p_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2 \times r_{2j}(t) \times (p_{gj}(t) - x_{ij}(t)) \quad (9)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (10)$$

其中, v_{ij} 表示第 i 表示第 i 个粒子第 j 维上的速度, x_{ij} 表示第 i 个粒子第 j 维上的位置, t 表示第 t 次迭代, w 为惯性系数, c_1, c_2 表示加速常数, 通常在 $0 \sim 2$ 间取值, r_1 和 r_2 是介于 $[0, 1]$ 之间的两个相互独立的随机数。

为了使算法在初期具有较强的全局搜索能力, 在晚期具有较强的局部搜索能力, 可以对惯性系数 w 进行改进。随着迭代的进行, 速度更新公式的加权因子 w 由最大加权因子 w_{\max} 线性减少到最小加权 w_{\min} 。

2.2 采用粒子群优化算法的 Otsu 图像分割方法

由原始的 2 维 Otsu 算法的图像分割过程可知, 其本质就是在像素点灰度和像素点邻域灰度平均值

构成的 2 维参考属性空间上搜索一组最优解 (s^*, t^*) , 使得公式 (8) 的值最大。由于维数的增多, 原始 2 维 Otsu 算法的计算量大, 耗时多。本文将粒子群算法应用于 2 维 Otsu 算法中搜索最优阈值, 从而降低了算法的复杂度, 满足了实时性的要求。

为了增强算法的全局搜索能力, 避免粒子群算法过早陷入局部收敛, 提出的算法在粒子群优化算法基础上, 引入遗传算法中的选择算子和突变算子。在粒子群迭代演化的过程中, 每一代粒子到达一个新位置以后, 采用精英选择策略, 将适应度最大的个体, 即粒子群中最好的粒子无条件地复制, 其余粒子则按轮盘赌根据其的适应度来进行选择, 然后对上一代粒子进行变异算子, 从而得到新一代粒子群。

算法的基本步骤如下:

1) 初始化: 假定微粒规模为 N , 维度设为 2, 并初始化为 $0 \sim 255$ 区间的某个灰度值, 同时对速度进行初始设定, 并设置算法的有关参数。

2) 根据输入图像, 计算图像的 2 维直方图以及概率分布。

3) 如果迭代次数 t 大于指定阈值 T , 转步骤 7), 否则转 4)。

4) 根据式 (8) 计算粒子中每个微粒的适应值, 依照式 (9) (10) 计算第 $t+1$ 次迭代后各个粒子的临时位置, 转 5)。

5) 将粒子群适应度最大的粒子进行复制, 并采用轮盘赌算法对粒子群进行选择, 得到一个新的粒子群, 转 6)。

6) 对粒子群进行变异操作, 得到第 $t+1$ 次迭代粒子群的最终位置, 并更新每个粒子当前最优位置和整个粒子群的最优位置, 返回 3)。

7) 将此时粒子群的最优位置 (s^*, t^*) 作为分割阈值, 对图像进行二值化分割, 算法结束。

原始的 2 维 Otsu 算法复杂度为 $O(L^4)$, 其中 L 为图像的灰度级范围, 当 L 的值比较大时, 算法的计算量会十分庞大, 不利于图像的实时处理。提出的基于粒子群优化方法的 Otsu 分割图像算法, 采用粒子群算法来搜索最优分割阈值, 计算量只与迭代的次数和每次迭代的运算量相关, 每次的迭代的运算由若干基本运算步骤, 迭代的次数一般不超过 100, 因此本文提出的算法与原始 2 维 Otsu 算法相比较, 具有运算量小, 易于实现、强鲁棒性和自适应性的优点。

3 实验仿真及分析

基于 opencv 库在 vc6.0 下进行仿真实验。为了保证搜索的阈值能够在最优阈值附近收敛,算法中粒子群的群体规模设置为 100,最大迭代次数 $iter_{max}$ 为 50,惯性系数为 $w_{max} = 1.4$,随着迭代次数的增加,惯性系数逐渐减小至 $w_{min} = 0.8$,从而使得算法在初期具有较强的全局搜索能力,在晚期具有较强的局部搜索能力,多次实验表明,学习因子为 $c_1 = c_2 = 1.29$,变异率为 $g = 0.05$ 时,结果能较稳定的收敛在最优阈值附近。

实验中,采用的图像分别为 rice, enamel 和 Lena,如图 2 所示,它们依次代表了 3 种不同类型的图像:双峰模式图像、单峰模式图像和多峰模式图像。

将本文算法应用于 3 种具有不同灰度直方图分布的图像进行分割实验,并分别与经典的 2 维 Otsu 算法和模拟退火算法的图像分割的实验结果进行比较,实验结果如图 3 所示。表 1 列出了经典 Otsu 与本文算法在不同图像中十次实验数据结果,表 2 列

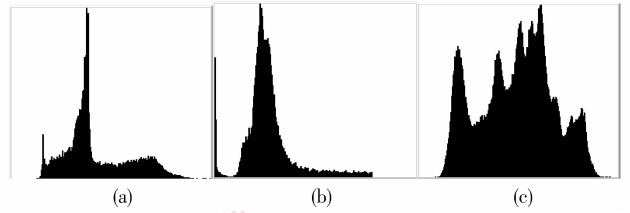
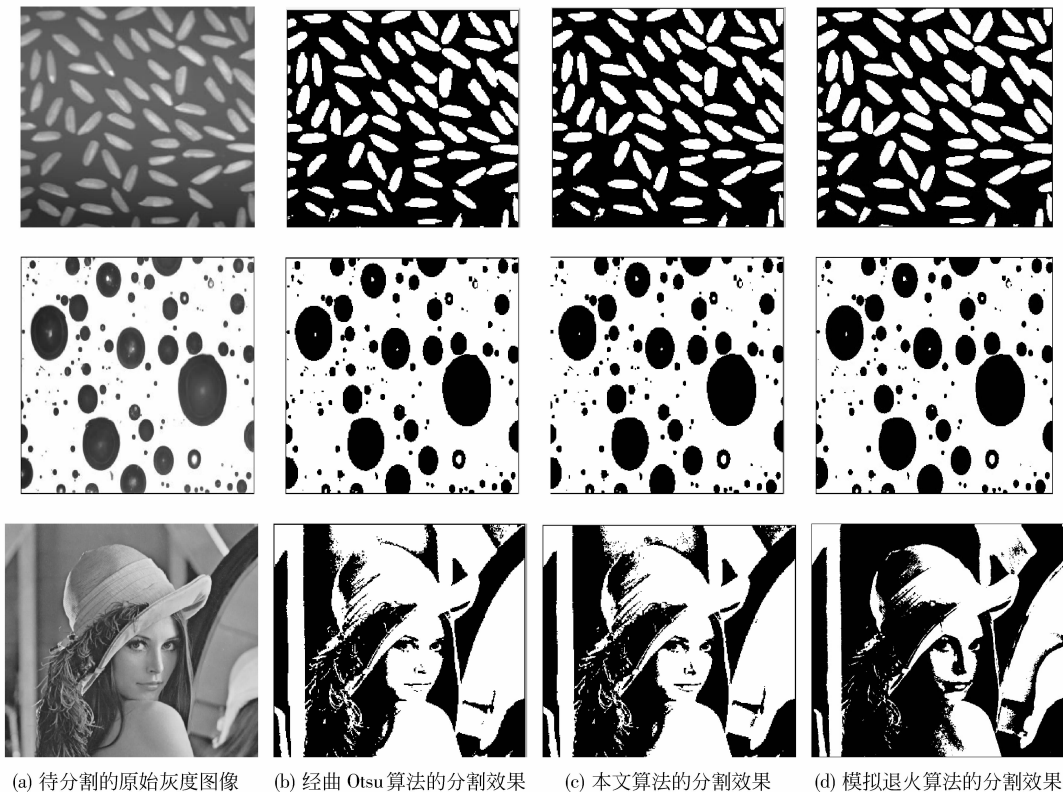


图 2 rice、enamel 和 Lena 的灰度直方图
Fig. 2 Histograms of rice、enamel and Lena

出了基于模拟退火优化的 Otsu 算法与本文算法在不同图像中 10 次实验数据结果,分割阈值和运行时间数据为 10 次实验结果的平均值,其数据都是在 Intel(R) Core2 Duo CPU E7400, 2.00 GB 的内存以及 Windows XP 操作系统的环境下完成。

实验结果表明,对于各种灰度分布的灰度图像,本文的算法求得的阈值大致稳定在原始 2 维 Otsu 算法最优阈值的左右,因此可以获得与经典算法大致相同的分割结果,但是前者运行时间比后者大大地降低。在单峰和双峰模式的图像中,采用模拟退火算法可以获得与本文算法相当的结果,但是对多峰模式,由于图像的 2 维直方图呈现多个极值点,使得搜索的时间变大,且分割效果不太理想。因此



(a) 待分割的原始灰度图像 (b) 经典 Otsu 算法的分割效果 (c) 本文算法的分割效果 (d) 模拟退火算法的分割效果

图 3 经典 Otsu 算法和本文算法分割结果比较

Fig. 3 The segmentation result comparison between classic 2D Otsu algorithm and this proposed algorithm

本文提出的算法具有适应性、实时性和鲁棒性,能满足实时分割的要求。

表1 本文算法与经典算法比较

Tab.1 Comparison between our algorithm and classic Otsu algorithm

实验图像	运行时间/ms		最优阈值(s^* , t^*) /灰度级	
	经典 Otsu 算法	本文算法	经典 Otsu 算法	本文算法
rice 256 × 256	30 438	157	141, 89	142, 91
enamel 392 × 279	30 453	165	120, 208	124, 196
Lena 512 × 512	30 484	160	92, 150	87, 152

表2 本文算法与基于模拟退火优化的 Otsu 算法比较

Tab.2 Comparison between our algorithm and 2D Otsu based simulated annealing genetic algorithm

实验图像	运行时间/ms		最优阈值(s^* , t^*) /灰度级	
	文献[13] 中算法	本文算法	文献[13] 中算法	本文算法
rice 256 × 256	213	157	135, 79	142, 91
enamel 392 × 279	342	165	103, 210	124, 196
Lena 512 × 512	506	160	113, 170	87, 152

4 结 论

提出了一种基于粒子群优化方法的 Otsu 图像分割算法,在经典 2 维 Otsu 阈值分割算法的基础上,使用粒子群优化方法来搜索最优分割阈值,并引入遗传算法中的变异算子,尽量避免粒子群算法在求解最优解的搜索过程中的过早陷入局部收敛。仿真实验表明,该算法得到了分割效果与经典 2 维 Otsu 算法相当,且比基于模拟退火的优化方法的 Otsu 算法更稳定,因此,本文算法具有较好的鲁棒性、适应性和实时性。

参考文献 (References)

- [1] Doyle W. Operation useful for similarity-invariant pattern recognition [J]. Journal Association for Computing Machinery, 1962, 9(2):259- 267.
- [2] Lee S, Chung S, Park R. A comparative performance study of

several global thresholding techniques for segmentation [J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1990, 52(2):171-190.

- [3] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetic, 1979, 9(1): 62-66.
- [4] Kittler J, Illingworth J. Minimum error thresholding [J]. Pattern Recognition, 1986, 19(1):41-47.
- [5] Pun T. A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram [J]. Signal Processing, 1980, 2(3):223-237.
- [6] Li Liyuan, Chen Weinan. A robust and completely deterministic method for gray-level picture thresholding [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 1993, 6(3): 235-241. [李立源,陈维南. 一种强鲁棒的完全确定型的快速阈值化方法 [J]. 模式识别与人工智能, 1993, 6(3): 235-241.]
- [7] Brink A D. Thresholding of digital images using two-dimensional entropies [J]. Pattern Recognition, 1992, 25(8): 803-808.
- [8] Liu Jianzhuang, Li Wen-qing. The automatic thresholding of gray-level pictures via two-dimensional Otsu method [J]. Acta Automatica Sinica, 1993, 19(1): 101-105. [刘健庄, 栗文清. 灰度图像的二维 Otsu 自动阈值分割法 [J]. 自动化学报, 1993, 19(1): 101-105.]
- [9] Hao Yingming, Zhu Feng. Fast algorithm for two-dimensional Otsu adaptive threshold algorithm [J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(4): 484-488. [郝颖明, 朱枫. 2 维 Otsu 自适应阈值快速算法 [J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(4): 484-488.]
- [10] Liang Guangming, Liu Donghua, Li Bo, et al. Improvement of Two-dimension Adaptive Thresholding Segmentation Algorithm for Microscopic Cellular Images [J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8(7): 764-768. [梁光明, 刘东华, 李波等. 用于显微细胞图像二维自适应阈值分割算法的优化 [J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(7): 764-768.]
- [11] Lang Xianpeng, Zhu Feng, Hao Yingming, et al. Integral image based fast algorithm for two-dimensional Otsu thresholding [C] // Image and Signal Processing. Cambridge UK: CISP, 2008:667-681.
- [12] Liu Dongju, Yu Jian. Otsu method and K-means [C] // Hybrid Intelligent Systems. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2009:344-349.
- [13] Sun Fengjie, Wang He, Fan Jieqing. 2D Otsu segmentation algorithm based on simulated annealing genetic algorithm for iced-cable images [C] // Information Technology and Applications. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2009:600-602.
- [14] Eberhart R C, Kennedy J. Particle swarm optimization [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway, NJ, USA: IEEE Service Center, 1995: 1942-1948.