

文章编号: 2095-4980(2020)06-1058-07

一维对象复杂度的灰度图像分割算法

章 怡, 王海峰

(江苏理工学院 信息中心, 江苏 常州 213001)

摘 要: 从图像复杂度的角度, 提出一种一维对象复杂度的灰度图像分割算法。用阈值将灰度图像分为背景与目标2类, 统计其对应直方图与总像素个数, 并计算对象复杂度; 依据图像复杂度分割准则算法公式, 遍历每一灰度级对应的图像复杂度值, 选取图像复杂度值最小对应的灰度值为最佳分割阈值。仿真实验结果表明, 与经典Otsu算法、信息最大熵算法和最小交叉熵算法相比, 本文算法速度快, 稳定性和效率最好, 是一种通用有效的图像分割算法。

关键词: 对象复杂度; 图像分割; Otsu算法; 最大熵; 最小交叉熵

中图分类号: TN21; TP393

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2018142

Grayscale image segmentation algorithm based on one-dimensional object complexity

ZHANG Yi, WANG Haifeng

(Information Center, Jiangsu University of Technology, Changzhou Jiangsu 213001)

Abstract: Inspired by the classical segmentation algorithm, this paper proposes a grayscale image segmentation algorithm based on the image complexity. Firstly, the grayscale image is divided into background and target categories by the threshold, the corresponding histogram and total number of pixels are calculated, as well as the complexity of objects. Secondly, according to the image complexity segmentation criterion, the image complexity of each gray level is calculated. Finally, the optimal segmentation threshold is obtained by the minimum value of the object complexity. Compared with the other three classical algorithms, the experimental results show that the proposed image segmentation algorithm is fast, stable and efficient.

Keywords: object complexity; image segmentation; Otsu; maximum entropy; minimum cross entropy

图像分割是图像理解与计算机视觉的前提, 也是图像处理与分析的基本技术之一。图像阈值分割已用于诸多领域, 如, 红外技术应用中: 红外成像跟踪系统中目标的分割、红外无损检测中红外热图像的分割^[1]; 遥感应用中: 合成孔径雷达图像中目标的分割等; 医学应用中: 磁共振图像的分割、血液细胞图像的分割; 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; 工业生产应用中: 机器视觉运用于产品质量检测等。图像分割技术在这些领域的广泛应用, 充分表明图像分割起着非常重要的作用。

图像阈值分割算法种类比较多, 具有计算简单、运算效率较高、速度快的优点, 得到普遍使用。阈值分割的关键是通过何种原理选取阈值^[2]。针对这一问题, 国内外学者进行了大量的研究, 并提出了多种阈值选取方法。比较经典的有最大类间方差算法、信息最大交叉熵算法、信息最小交叉熵算法, 其中一维 Otsu 算法也叫最大类间方差法, 于 1979 年由日本学者大津(Nobuyuki Otsu)提出, 是一种图像灰度自适应阈值的分割算法, 以其计算简单、实时性高、鲁棒性强等优点被广泛使用^[3-4]。由于一维 Otsu 法未考虑像素间的空间相关性, 分割效果不佳, 抗噪性差。对此, 王坤等^[5]提出了灰度级—邻域均值灰度级的二维 Otsu, 该方法在提高运算效率的同时考虑了像素的灰度信息和其邻域的空间相关性, 改善了一维 Otsu 法抗噪性能。为进一步提高算法的性能, 杨恢先等在灰

收稿日期: 2018-07-19; 修回日期: 2018-08-01

基金项目: 江苏省常州市科技计划资助项目(CE20165049); 江苏省高校自然科学基金资助项目(18KJB520012)

作者简介: 章 怡(1983-), 女, 工程师, 主要研究方向为数字图像处理与分析。email:zhangyi@jsut.edu.cn

度级—邻域均值灰度级基础上，提出了一种二维最大类间方差的图像分割算法^[6-8]。陈琪与熊博莅等^[9]提出了灰度级—领域平均灰度级二维最小交叉熵的概念。王莹莹^[10]把属性直方图的思想应用到信息熵算法中，提出了基于属性直方图的信息熵分割算法。这些改进算法虽能更好地分割图像，但算法运行时间太长，实时性差，难以应用。因此，本文从图像目标与背景的对象复杂度角度出发，提出一种对象复杂度的图像分割新方法。

1 几种经典分割算法理论

1.1 Otsu算法

Otsu^[11-13]用阈值 t 把图像中的像素按灰度值分成 2 类 C_0 和 C_1 ， C_0 由灰度值在 $[0, t]$ 之间的像素组成， C_1 由灰度值在 $[t+1, L-1]$ 之间的像素组成，整幅图像的均值为：

$$u = \sum_{i=0}^{L-1} ip_i \quad (1)$$

式中 p_i 为对应灰度级 i 的像素数为 n 的灰度直方图概率， $p_i = \frac{n_i}{N}$ ， N 为图像总像素数。 C_0 和 C_1 的均值为：

$$u_0 = \sum_{i=0}^t ip_i / w_0, \quad u_1 = \sum_{i=t+1}^{L-1} ip_i / w_1 \quad (2)$$

式中： $w_0 = \sum_{i=0}^t p_i$ ； $w_1 = \sum_{i=t+1}^{L-1} p_i = 1 - w_0$ ； u_0, u_1 分别为 C_0 和 C_1 的均值。

由式(1)~式(2)可得：

$$u = w_0 u_0 + w_1 u_1 \quad (3)$$

类间方差定义为：

$$\sigma_B^2(t) = w_0(u_0 - u)^2 + w_1(u_1 - u)^2 = w_1 w_0 (u_1 - u_0)^2 \quad (4)$$

t 在 $[0, L-1]$ 范围依次取值计算，使 σ_B^2 数值最大时对应的 t 值即为 Otsu 法的最佳阈值。

1.2 最小交叉熵算法

M 和 N 分别表示原始图像和分割图像，定义 M 和 N 的最小交叉熵为背景与目标之间的交叉熵之和^[14-16]，即：

$$D(M : N : t) = \sum_{i=0}^t ip_i \ln \frac{i}{m_o(t)} + \sum_{i=t+1}^{L-1} ip_i \ln \frac{i}{m_b(t)} \quad (5)$$

式中： $m_o(t) = \frac{1}{P_o} \sum_{i=0}^t ip_i$ ； $m_b(t) = \frac{1}{P_b} \sum_{i=t+1}^{L-1} ip_i$ 。 P_o 和 P_b 为原始图像中背景与目标类先验概率， $P_o = \sum_{i=0}^t p_i$ ， $P_b = \sum_{i=t+1}^{L-1} p_i$ ， p_i 为灰度直方图概率。

1.3 最大交叉熵算法

最大交叉熵算法主要有 JM 熵算法、P 氏熵算法、KSW 熵算法^[17-18]，以经典的 KSW 熵算法为例介绍其原理。

设分割阈值为 t ，将原始灰度图像分成背景(B)与目标(O)2 类，背景为 $\{0, 1, 2, \dots, t\}$ 的灰度分布，目标为 $\{t+1, t+2, \dots, L-1\}$ 的灰度分布，各自概率分布为：B: $\frac{P_0}{P_n}, \frac{P_1}{P_n}, \dots, \frac{P_t}{P_n}$ ，O: $\frac{P_{t+1}}{1-P_n}, \frac{P_{t+2}}{1-P_n}, \dots, \frac{P_{L-1}}{1-P_n}$ ，其中 $P_n = \sum_{i=0}^t p_i$ 。

背景与目标 2 个概率密度相关的熵为：

$$H(B) = -\sum_{i=0}^t \frac{p_i}{P_n} \ln \frac{p_i}{P_n}, \quad H(O) = -\sum_{i=t+1}^{L-1} \frac{p_i}{1-P_n} \ln \frac{p_i}{1-P_n} \quad (6)$$

定义函数 $\phi(t)$ 为 $H(B)$ 与 $H(O)$ 的和， $\phi(t) = H(B) + H(O)$ ，求出 $\phi(t)$ 最大时的灰度级 t 即为所求的最佳阈值。

2 图像复杂度

“复杂度”概念用于描述物理学、经济学、混沌理论的复杂度程度，几乎涵盖所有学科领域，因它们的研究对象和分析方法存在很大的区别，复杂度并没有一个统一的定义^[19]。图像复杂度是指在给定一幅图像中针对目标自动处理(目标识别、图像增强、图像分割、图像恢复等)时内在的困难程度^[20]。一般可以从整体复杂度、区域

复杂度和对象复杂度3个尺度分别对图像复杂度进行描述, 本文主要从对象复杂度进行研究, 研究一幅图像的背景与目标的对象复杂度, 为后续图像的阈值分割提供参考。

基于广义集合理论提出的图像复杂度计算公式为^[21]:

$$C = -\sum_{i=0}^{t-1} n_i \ln \left(\frac{n_i}{N} \right) \quad (7)$$

式中: C 代表图像复杂度; t 为划分目标区域和背景区域的分割阈值; n_i 为灰度值为 i 的像素点个数; N 为整幅图像内像素点的个数。图像复杂度具有如下性质^[22]:

1) 图像复杂度与灰度值大小无关。由式(7)可知, 图像复杂度仅与目标区域内像素个数 n_i 有关, 与灰度值大小本身无关。每个灰度值代表一个类别, 灰度级越多, 图像越复杂。

2) 图像复杂度值大于等于零。由式(7)可知, 在 $n_i=1$, 即每个灰度值都不相同时, 取得最大值 $N \ln N$; 在 $n_i=N$, 即每个灰度值都相同时, 取得最小值0, 即理论取值范围为 $[0, N \ln N]$ 。目标区域越少, 灰度值差异越小, 图像复杂度越高; 反之, 目标区域越多, 灰度值差异越大, 图像复杂度越低。

3) 图像整体复杂度不小于各部分之和。对于像素个数分别为 a, b 的2个区域A, B, 其图像复杂度分别为 $C_A = a \ln a$ 和 $C_B = b \ln b$, 如果2个区域可以进行和运算, 会出现如下2种情况:

第1种情况: 当 $a+b$ 个像素的灰度彼此完全不同时, 其复杂度为 $C_{AB} = (a+b) \ln (a+b)$, 由于 $a, b \geq 1$, 显然, $C_{AB} \geq C_A + C_B$, 即图像总体复杂度远大于部分和。

第2种情况: 当 $a=b$ 且A与B两区域灰度值也都相同时, 则合并后区域内的灰度值总数不变, 还是 a , 但由于合并后像素数增加, 总数由 a 变成了 $2a$ 个, 合并后的复杂度为 $2a \ln a$, 即在2个区域完全相同时, 合并后的区域的复杂度是原来的复杂度之和, 这时其总体复杂度等于两部分复杂度之和。

从以上2个特例, 得到结论: 一幅图像的整体复杂度不小于各部分复杂度之和, 即 $C_{ABC\dots} \geq C_A + C_B + C_C + \dots$ 。

3 对象复杂度分割算法描述

对象复杂度分割算法是一种使背景与目标对象复杂度的差值最小的自动确定阈值的方法, 该方法具有计算简单、处理速度快的优点, 是一种全局阈值选取方法。算法的基本思想如下: 设图像像素数为 N , 灰度范围为 $[0, L-1]$, 灰度值 T 把图像中的像素按灰度值分成背景与目标2类 C_0 和 C_1 , 背景 C_0 由灰度值在 $[0, T]$ 之间的像素组成, 背景 C_0 总像素数为 N_0 , 目标 C_1 由灰度值在 $[T+1, L-1]$ 之间的像素组成, 目标 C_1 总像素数为 N_1 , 其对应的对象复杂度定义为:

$$C_0 = -\sum_{i=0}^T h_0(i) \ln \left(\frac{h_0(i)}{N_0} \right), \quad C_1 = -\sum_{i=T+1}^{L-1} h_1(i) \ln \left(\frac{h_1(i)}{N_1} \right) \quad (8)$$

式中: $h_0(i)$ 为背景 C_0 中像素 i 的个数; $h_1(i)$ 为背景 C_1 中像素 i 的个数。

对象复杂度分割算法的阈值通过式(9)计算:

$$C(T) = \left| -\sum_{i=0}^T h_0(i) \ln \left(\frac{h_0(i)}{N_0} \right) + \sum_{i=T+1}^{L-1} h_1(i) \ln \left(\frac{h_1(i)}{N_1} \right) \right| = |C_0 - C_1| \quad (9)$$

$$g = \arg \min_{0 \leq i \leq L-1} [C(T)] \quad (10)$$

式中 T 在 $[0, L-1]$ 范围依次取值, 使得 $C(T)$ 最小的 T 值即为对象复杂度分割算法的最佳阈值。

4 对象复杂度分割算法步骤

灰度图像直方图反映了图像中各灰度级出现的频次, 从中可得到对象复杂度计算公式中的 $h_0(i), h_1(i)$ 和 N_0, N_1 , 进而可以求得对应的复杂度值, 具体计算步骤如下:

- 1) 统计灰度图像 $f(m, n)$ 的直方图 $h(i)$;
- 2) 计算灰度分割值 $T=1$ 时, 背景图像复杂度 C_0 的像素数 $N_0, h_0(i)$, 目标图像复杂度 C_1 的像素数 $N_1, h_1(i)$;
- 3) 依据式(8)计算背景图像复杂度 C_0 、目标图像复杂度 C_1 ;
- 4) 依据式(9)计算 $T=1$ 时 $C(T)$;
- 5) 重复步骤2)~4), 求取 $T=2 \sim 255$ 时对应 $C(T)$;
- 6) 依据式(9), 计算 $C(T)$ 最小值时所对应的灰度分割值 g , g 即为图像复杂度分割算法的最佳阈值。

5 实验结果分析

本文实验选取 4 幅具有代表性图像：a) 分辨力 512×512 正常照度的标准 Lena 灰度图像；b) 分辨力 269×350 低照度红外灰度图像；c) 分辨力 274×266 细胞图像；d) 分辨力 208×208 辣椒图像，实验工具 Matlab，实验图像如图 1 所示。

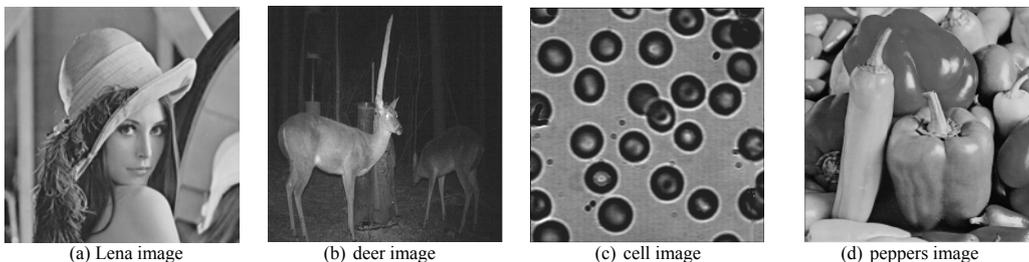


Fig.1 Original image of the experiment

图 1 实验原图像

5.1 几种算法分割结果比较

为检验算法的运算速度与处理效果，本文与经典 Otsu 算法、信息最大熵算法和最小交叉熵算法进行比较。程序运行环境：Windows 系统 Intel Pentinum CPU G860 主频 3.0 GHz。表 1 为 4 种算法分割结果，从表 1 算法运算时间看，4 种算法中本文算法运算时间最少，速度最快。

表 1 算法比较结果

Table1 Comparison results of the four algorithms

	Lena		deer		cell		peppers	
	T	t/s	T	t/s	T	t/s	T	t/s
Otsu	117	0.046	91	0.031	95	0.052	120	0.043
maximum entropy	122	0.063	92	0.047	155	0.088	117	0.073
minimum cross entropy	108	0.063	80	0.047	83	0.088	110	0.079
proposed	128	0.045	55	0.030	134	0.015	120	0.015

算法分割效果如图 2~图 5 所示。从图 2~图 5 图像分割效果看，Otsu 算法、信息最大熵算法与最小交叉熵算法在目标与背景灰度区别不明显时，存在分割的图像信息丢失较为严重现象。如图 2 中正常照度下的 Lena 面部特征中鼻子与嘴唇基本没有，在低照度红外图像分割中，前 3 种算法分割后图像右边小鹿基本都没有，只有本文算法将目标(大鹿和小鹿)分割出来。



Fig.2 Segmentation results of the Lena image

图 2 Lena 图像分割结果

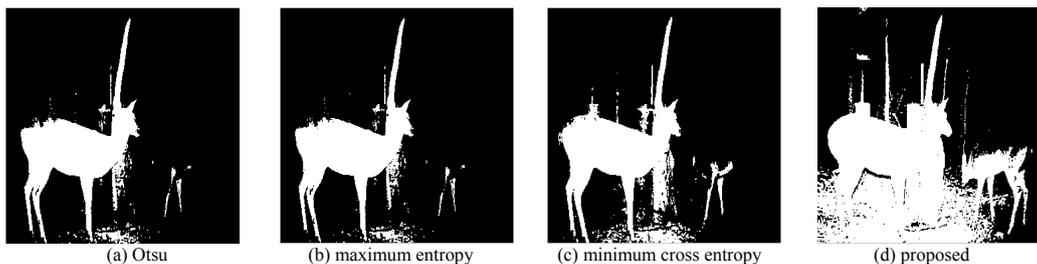


Fig.3 Segmentation results of the infrared image

图 3 红外图像分割结果

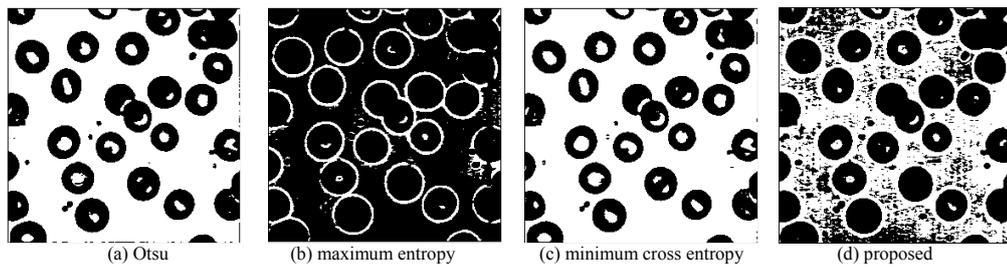


Fig.4 Segmentation results of the cell image
图 4 细胞图像分割结果

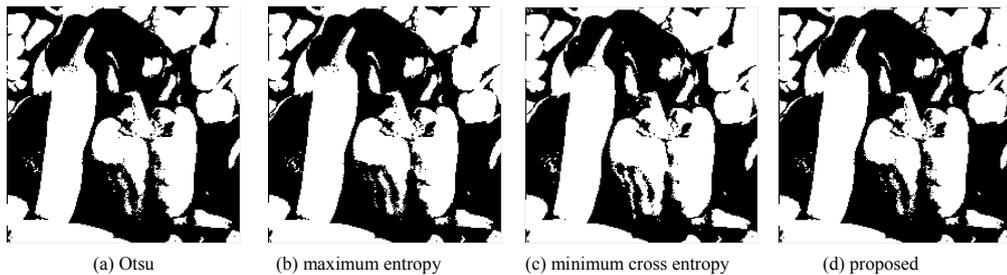


Fig.5 Segmentation results of the pepper image
图 5 辣椒图像分割结果

5.2 稳定性与可靠性测试

同一分割算法下，分别计算原图像分割阈值 T_1 、受噪声污染的图像分割阈值 T_2 ，两分割阈值相减的绝对值大小，定义为阈值偏离量 $\Delta T = |T_1 - T_2|$ 。当图像信噪比逐渐减小时，即噪声污染不断加大的情况下，若阈值偏离量越小，表明噪声对该算法分割阈值影响力越弱，该算法稳定性与可靠性越强；反之，则稳定性与可靠性越弱。本文列举了正常灰度图像 Lena、低照度红外图像的实验数据。在实验图像上加入均值为 0、方差从 0.01~0.05 变化的高斯噪声，阈值偏离量 ΔT 结果见表 2。图 6~图 7 为 4 种算法加入方差为 0.03 的高斯噪声图像的分割结果。

表 2 阈值偏离量实验结果
Table2 Experimental results of the threshold deviation

experimental images	Gaussian noise variance	Otsu	maximum entropy	minimum cross entropy	proposed
Lena	0.01	4	5	3	2
	0.02	5	4	5	3
	0.03	6	7	7	3
	0.04	7	8	9	3
	0.05	7	8	9	2
infrared deer image	0.01	11	21	19	4
	0.02	15	36	28	8
	0.03	16	45	31	11
	0.04	14	48	33	14
	0.05	12	49	34	17

从表 2 看，正常灰度实验图像 Lena 中引入噪声后，4 种算法阈值偏离量 ΔT 都发生了偏移，说明噪声对阈值分割都产生了影响。随着噪声强度加强，4 种算法的偏离量 ΔT 也随之增大，Otsu 算法、信息最大熵算法、最小交叉熵算法的最大偏离量 ΔT 大于 7，表明 3 种算法都对噪声敏感，算法的稳定性与可靠性性能差，本文算法偏离量 ΔT 大约为 2。在低照度红外图像中，4 种算法偏离量都比正常灰度图像大，说明噪声对低照度红外图像分割比正常灰度图像的影响更大。综合比较，4 种算法中本文算法的偏离量最小，大约是其他 3 种算法的 1/3，表明本文算法比其他 3 种算法的稳定性与可靠性好。

综上所述，在算法运算时间上，本文算法>Otsu 算法>最大熵算法=最小交叉熵算法，即本文算法运行速度快。在算法分割效果上，4 种算法中本文算法分割的目标特征保留最多，效果最优。在算法稳定性与可靠性上，4 种算法中本文算法在正常灰度图像与低照度红外图像存在噪声分割时，阈值偏离量受噪声的影响最小，表明本文算法稳定性性能最优。

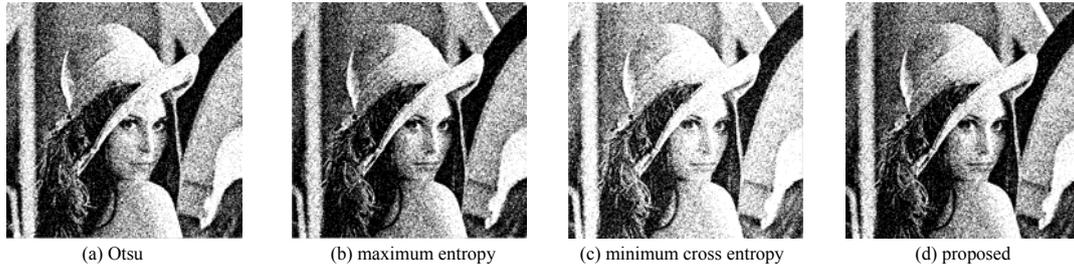


Fig.6 Segmentation results with Gaussian noise of the Lena image
图 6 有高斯噪声时的 Lena 图像分割结果

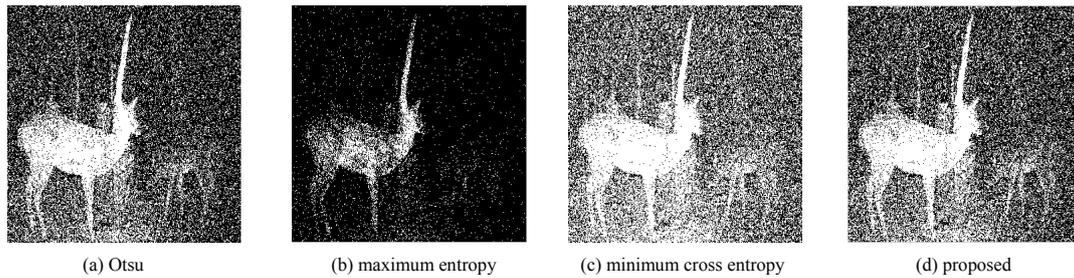


Fig.7 Segmentation results with Gaussian noise of the infrared image
图 7 有高斯噪声时的红外图像分割结果

6 结论

为提高图像分割算法的稳定性与可靠性,本文从图像复杂度的角度提出了基于一维图像复杂度的灰度图像分割算法。算法首先计算灰度图像的背景与目标两类对象复杂度,其次将灰度图像背景与目标两类对象复杂度差值的绝对值作为图像分割方法,最后确立了阈值选取准则。实验测试了算法的运算速度、分割效果、稳定性与可靠性,表明了本文算法是一种分割效果好、实时性强的分割算法。但本算法也把一些无关信息分割进目标中,造成目标轮廓不清晰,如何解决此问题是未来本文的研究重点和方向。

参考文献:

- [1] ALSAEED D,BOURIDANE A,EL-ZAART A. A novel fast Otsu digital image segmentation method[J]. International Arab Journal of Information Technology, 2016,13(4):427-434.
- [2] 戚娜,马占文. 基于万有引力搜索算法图像分割的实现[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(3):475-479. (QI Na,MA Zhanwen. Image segmentation based on the universal gravitation search algorithm[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(3):475-479.)
- [3] DYLAN Wanyi,LING Tang. Gastrointestinal endoscopy image segmentation using modified Otsu algorithm[C]// International Symposium on Fuzzy Systems. Xiamen,China:[s.n.], 2014:90-98.
- [4] YUAN Xiaocui,WU Lushen,CHEN Huawei. Rail image segmentation based on Otsu threshold method[J]. Guangxue Jingmi Gongcheng, 2016,24(7):1772-1781.
- [5] 王坤,张杨,宋胜博. 改进二维 Otsu 和自适应遗传算法的红外图像分割[J]. 系统仿真学报, 2017,29(6):1229-1236. (WANG Kun,ZHANG Yang,SONG Shengbo. Infrared image segmentation based on improved dimensional Otsu and genetic algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2017,29(6):1229-1236.)
- [6] 杨恢先,颜微,谭正华,等. 改进的灰度-局部方差二维直方图图像分割[J]. 计算机工程与应用, 2017,53(4):209-213. (YANG Huixian,YAN Wei,TAN Zhenghua,et al. Improvement image segmentation based on average gray level-local variance two dimensional histogram[J]. Computer Engineering and Applications, 2017,53(4):209-213.)
- [7] CAI Qing,LIU Huiying,SUN Jingfeng,et al. An adaptive scale active contour model based on information entropy for image segmentation[J]. Xibei Gongye Daxue Xuebao, 2017,35(2):286-291.
- [8] 徐黎明,吕继东. 基于最小交叉熵的改进 PCNN 杨梅图像分割算法[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2016,52(1):43-46. (XU Liming,LYU Jidong. Improved PCNN bayberry image segmentation algorithm based on minimum cross entropy[J]. Journal of Northwest Normal University(Natural Science), 2016,52(1):43-46.)
- [9] 陈琪,熊博莅,陆军. 二维类内最小交叉熵的图像分割快速方法[J]. 计算机工程与应用, 2011,47(9):149-151. (CHEN Qi,XIONG Boli,LU Jun. Fast image segmentation method based on two-dimensional within-class minimum cross entropy[J].

- Computer Engineering and Applications, 2011,47(9):149-151.)
- [10] 王莹莹,何苹,魏彤,等. 二维信息熵的红外图像分割算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2015,16(1):77-78. (WANG Yingying,HE Ping,WEI Tong,et al. A research of an infrared image segmentation algorithm based on the two-dimensional entropy[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science), 2015,16(1):77-78.)
- [11] 申铨京,刘翔,陈海鹏. 基于多阈值 Otsu 准则的阈值分割快速计算[J]. 电子信息学报, 2017,39(1):144-149. (SHEN Xuanjing,LIU Xiang,CHEN Haipeng. Fast computation of threshold based on multi-threshold Otsu criterion[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017,39(1):144-149.)
- [12] YU Fangjie,SUN Wuz,LI Jiaojiao. An improved Otsu method for oil spill detection from SAR images[J]. Oceanologia, 2017, 59(3):311-317.
- [13] FAN Haidi,XIE Fengying,LI Yang. Automatic segmentation of dermoscopy images using saliency combined with OTSU threshold[J]. Computers in Biology and Medicine, 2017(85):75-85.
- [14] 陈世文,刘越畅. 一种基于最小交叉熵的 Canny 边缘检测算法[J]. 电视技术, 2013,37(1):165-168. (CHEN Shiwen,LIU Yuechang. Improved Canny edge detection algorithm based on minimum cross entropy[J]. Video Engineering, 2013,37(1):165-168.)
- [15] PARE S,KUMAR A,BAJAJ V,et al. An efficient method for multilevel color image thresholding using cuckoo search algorithm based on minimum cross entropy[J]. Applied Soft Computing Journal, 2017(61):570-592.
- [16] SARKAR Soham,DAS Swagatam,SINHA Chaudhuri Sheli. A multilevel color image thresholding scheme based on minimum cross entropy and differential evolution[J]. Pattern Recognition Letters, 2015(54):27-35.
- [17] 温凯峰,叶仕通,万智萍. 复杂背景下的最大熵阈值红外目标分割算法[J]. 激光与红外, 2016,46(1):103-108. (WEN Kaifeng,YE Shitong,WAN Zhiping. Infrared target segmentation algorithm based on maximum entropy threshold in complex background[J]. Laser & Infrared, 2016,46(1):103-108.)
- [18] 伦向敏,侯一民. 运用迭代最大熵算法选取最佳图像分割阈值[J]. 计算机工程与设计, 2015,36(5):1265-1268. (LUN Xiangmin,HOU Yimin. Optimal threshold selection for image segmentation utilizing entropy-max algorithm[J]. Computer Engineering and Design, 2015,36(5):1265-1268.)
- [19] 王崑,王晓军,刘晓卫,等. 基于图像复杂度的图像分割算法[J]. 探测与控制学报, 2015,37(3):5-9. (WANG Wei,WANG Xiaojun,LIU Xiaowei,et al. Image segmentation algorithm based on image complexity[J]. Journal of Detection & Control, 2015,37(3):5-9.)
- [20] 陈燕芹,段锦,祝勇,等. 基于纹理特征的图像复杂度研究[J]. 中国光学, 2015,8(3):407-412. (CHEN Yanqin,DUAN Jin,ZHU Yong,et al. Research on the image complexity based on texture features[J]. Chinese Optics, 2015,8(3):407-412.)
- [21] 高振宇,杨晓梅,龚剑明,等. 图像复杂度描述方法研究[J]. 中国图像图形学报, 2010,15(1):129-135. (GAO Zhenyu,YANG Xiaomei,GONG Jianming,et al. Research on image complexity description methods[J]. Journal of Image and Graphics, 2010,15(1):129-135.)
- [22] 董忠言,蒋理兴,王俊亚,等. 基于图像复杂度的一维 OTSU 改进算法[J]. 计算机科学, 2015,42(6A):171-174. (DONG Zhongyan,JIANG Lixing,WANG Junya,et al. Modified one-dimensional OTSU algorithm based on image complexity[J]. Computer Science, 2015,42(6A):171-174.)