

快速多阈值图像分割法

李哲学, 陈树越

(江苏工业学院 信息科学与工程学院, 江苏 常州 213164)

(lizhexue@126.com)

摘要: 大津法对由多个目标组成的图像求最佳阈值时, 消耗大量时间。针对此不足, 提出简单而快速求多阈值的方法, 对已分割的小区间反复利用大津的二分法和方差比值求出需要的阈值。首先, 对研究图像的整个灰度值区间利用大津法分成两类; 然后, 对已分出的两个区间分别应用二分大津法, 两类分成四类、八类等。比较实验结果表明, 该方法适合图像特征, 能快速分割目标图像, 可以应用于模式匹配以及人脸识别。

关键词: 图像分割; 阈值; 大津法; 二分法; 方差

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Fast multi-thresholding approach

LI Zhe-xue, CHEN Shu-yue

(School of Information Science and Engineering, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou Jiangsu 213164, China)

Abstract: It is really time-consuming for Otsu to seek the optimal threshold for the image composed of multiple targets. Therefore, a simple and efficient histogram-based approach for multi-threshold was proposed. The gray range of the object image was divided into two classes with a threshold value. Following this, the two classes were divided into four classes again by applying the Otsu's bisection method to each of the divided sub-ranges. The experimental results show that the proposed method is suitable for image segmentation, and can be efficiently used for pattern matching and face recognition.

Key words: image segmentation; threshold; Otsu's method; two-class segmentation; variance

0 引言

在模式识别和文档图像分析中, 图像分割是一个基本的过程。目前为止, 已有许多图像阈值分割法。Sankur等^[1]将阈值分割法根据所利用的信息不同分为六类: 基于直方图的方法^[2]、基于空间聚类的方法^[3-4]、基于熵的方法^[5]、基于目标属性的方法^[6]、基于空间信息的方法^[7]和基于局部灰度表面信息的方法^[8-9]等。

其中, 基于聚类的阈值分割方法是首先假设像素灰度级由几个类组成, 然后根据某种判据把像素分类的方法。Otsu^[4]在1979年提出的大津法(又称最大类间方差法)在模式识别和文档图像分析等图像处理中有较好的效果, 是公认的具有良好性能的阈值分割法。但是, 应用大津法查找使类间方差最大的点时要在整个灰度值区间盲目搜索反复查找, 因此如果图像中有多个目标, 查找多个阈值时计算量会大大增加。Liao等人^[3]为了减少运算开销, 提出了修改的类间方差计算公式(以下简称Liao方法)。Liao方法考虑到查找基准值的过程中有重复计算方差的现象, 采用先计算各个区间的方差值保存到表格, 之后利用时查找表格的方法。利用Liao方法时, 随着阈值个数增加循环次数也增加, 仍然存在很高的计算复杂度($O(L^M)$), 这里 L 是灰度级别数, M 是阈值数。

Wu等人^[10]研究了根据给定的参数值自动确定阈值数和阈值的方法(以下简称Wu方法), 对大津法进行了推广。Wu方法首先利用大津法把原图像的直方图分割成两类, 然后一个个增加阈值直到分解因子大于预定的参数值为止。

本文也对大津法进行了推广: 首先, 对研究图像作直方图; 然后, 利用直方图把整个灰度值区间分成两个区间, 这两个区间再分成四个区间, 并反复这个过程。根据所需的分割数, 不足部分根据方差比值, 在下一次的分割中选取补充。该方法能在保持良好分割效果的同时限制检索区域, 缩短了计算时间。

1 大津法及其推广

1.1 大津法

大津法是查找把图像灰度值分割成两类, 并使两个类的类间方差最大的阈值的方法。

设 X 是一幅具有 L 灰度级的图像, 其中第 i 级的像素为 f_i 个, 图像总的像素点个数为 $N = \sum_{i=1}^L f_i$, 第 i 级像素的出现概率为 $p_i = f_i/N$ 。选定一个域值 t 将所有的像素分为 C_1 、 C_2 (目标和背景)两类, 其中 C_1 类的像素灰度级为 $[1, 2, \dots, t]$, C_2 类的像素灰度级为 $[t+1, t+2, \dots, L]$ 。

图像的总平均灰度级为 $\mu_T = \sum_{i=1}^L ip_i$, C_1 类的平均灰度级为 $\mu_1(t) = \sum_{i=1}^t ip_i$, C_2 类的平均灰度级为 $\mu_2(t) = \mu_T - \mu_1(t)$ 。两个类的概率分别为 $\omega_1(t) = \sum_{i=1}^t p_i$, $\omega_2(t) = \sum_{i=t+1}^L p_i = 1 - \omega_1(t)$ 。

类间方差定义为:

$$v_B^2(t) = \omega_1(t)(\mu_1(t) - \mu_T)^2 + \omega_2(t)(\mu_2(t) - \mu_T)^2 \quad (1)$$

收稿日期: 2009-11-30; 修回日期: 2010-01-17。

作者简介: 李哲学(1963-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 副教授, 博士, 主要研究方向: 图像处理、人脸识别; 陈树越(1963-), 男, 河北定州人, 教授, 博士, 主要研究方向: 信号与信息处理、图像处理。

类间方差最大的分割意味着错分概率最小,即分割效果最好。因此计算不同 t 值的类间方差 $v_B^2(t)$, 使 $v_B^2(t)$ 最大的那个 t 就是所要求的最优阈值。最优阈值 t^* 可以由下面的式子确定:

$$v_B^2(t^*) = \arg \max_{1 \leq t < L} v_B^2(t) \quad (2)$$

很容易将上述单阈值分割方法推广到多阈值分割(图像灰度级分割为三类以上区域)的情形。设对于 M 类分割, 灰度组 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_{M-1}\}$ 把图像分割成 M 个类: $C_1[1, 2, \dots, t_1], C_2[t_1 + 1, t_1 + 2, \dots, t_2], \dots, C_M[t_{M-1} + 1, t_{M-1} + 2, \dots, t_L]$ 。那么, 可以利用下面的判据求最优阈值组合 $T^* = \{t_1^*, t_2^*, \dots, t_{M-1}^*\}$

$$v_B^2(T^*) = \arg \max_{1 \leq t_1 < \dots < t_{M-1} < L} [v_B^2(t_1, t_2, \dots, t_{M-1})] \quad (3)$$

其中:

$$v_B^2(t_1, t_2, \dots, t_{M-1}) = \sum_{k=1}^M \omega_k (\mu_k - \mu_T)^2 \quad (4)$$

$$\text{而 } \omega_k = \sum_{i \in C_k} p_i, \mu_k = \sum_{i \in C_k} i \frac{p_i}{\omega_k}。$$

1.2 Liao 方法

大津法为确定最优阈值 T^* , 在灰度级 $\{1, 2, \dots, L\}$ 范围内取所有可能的阈值组 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_{M-1}\}$, 利用式(4)分别计算其方差值。Liao 方法考虑到这种方法有重复计算同一个区间方差的情况, 把式(4)修改简化为:

$$v_B^2(t_1, t_2, \dots, t_{M-1}) = \sum_{k=1}^M \omega_k \mu_k^2 - \mu_T^2 \quad (5)$$

在式(5)中, 等号右边的第二项与阈值组 T 的选取无关, 因此最优阈值组 T^* 的选取只与等号右边第一项(称为修改的类间方差, 记 $(v_B')^2 = \sum_{k=1}^M \omega_k \mu_k^2$) 有关, 即:

$$\{t_1^*, t_2^*, \dots, t_{M-1}^*\} = \arg \max_{1 \leq t_1 < \dots < t_{M-1} < L} \{(v_B')^2(t_1, t_2, \dots, t_{M-1})\} \quad (6)$$

利用式(6)可以减少近一半的计算量。但是, 不论利用式(3)还是式(6), 求最优阈值组时, 仍需要在整个灰度值范围 $[1, L]$ 对所有可能的阈值组 $\{t_1, t_2, \dots, t_{M-1}\}$ 进行计算, 这种计算需要 $C_M^L = \frac{L!}{M!(L-M)!}$ 次。

另外, Liao 方法为避免重复计算, 对所有可能的灰度级区间先计算方差 $\omega_k \mu_k^2$ 并保存在表格里, 然后在需要时检索使用^[3]。

1.3 Wu 方法

Wu 等人简单推广了大津法, 即从已分割的类中求分解因子, 如果分解因子值小于给定的参数, 那么对已分割的类中方差 $\omega_k \sigma_k^2$ ($k = 1, 2, \dots, M$) 较大的类, 利用大津法再分成两个类。开始时对原图像的整个灰度级别 $1 \sim L$ 分成两个类, 然后每次增加一个, 直到分解因子 (Separability Factor, SF) 大于给定的参数。分解因子 SF 的定义如下:

$$SF = v_B^2(T)/v_T^2 = 1 - (v_w^2(T)/v_T^2) \quad (7)$$

2 快速多阈值分割方法

2.1 原理

本文提出的方法也是大津法的推广, 首先对图像整个灰度级区间 $[1, L] = \{1, 2, \dots, L\}$, 利用大津法分成 2 类, 再把 2 个类分成 4 个类等。然后根据所需要的阈值数, 在最后得到的阈值中根据类方差比值取阈值, 补充阈值总数。

如果图像由两个类组成, 全方差可以用分别表示两个类特征的类内方差 v_w^2 和表示类之间关系的类间方差 v_B^2 表示。而且关系式 $1 = (v_B^2/v_T^2) + (v_w^2/v_T^2)$ 恒成立。亦即较小的 v_w^2/v_T^2 或者较大的 v_B^2/v_T^2 意味着图像的聚集性较好。 v_B^2/v_T^2 表示图像的分割特性(或者说表示分割的必要性), 因而可以参照其比值把图像分割成两类。用 R 记 v_B^2/v_T^2 的比值。

例如, 设图像直方图分成 6 个类, 这时需要 5 个阈值。首先通过 2 次灰度级分割分成 4 个类, 保存得到的 3 个阈值。然后计算 4 个类的方差, 取方差比值较大的 2 个类, 再进行分割求阈值, 得到的 2 个阈值和前面得到的 3 个阈值组成需要的 5 个阈值组。

2.2 计算复杂度对比分析

利用式(4)时, 计算 C_i 类的累积概率 ω_i 需要 k 次加法, 计算均值 μ_i 需要 k 次加法和 k 次乘法, 计算式 $\omega_k (\mu_k - \mu_T)^2$ 需要 1 次减法和 2 次乘法, 总共需要 $3k + 3$ 次计算。这种运算要对每个类计算, 而总灰度级数为 L , 因此, 计算全均值 μ_T 需要 $2L$ 次, 计算 M 个类方差的和需要 $M - 1$ 次加法, 这样共需要 $3L + 3 + 2L + M - 1 = 5L + M + 2$ 次计算, 故大津法的计算量为 $\frac{(5L + M + 2)L!}{M!(L - M)!}$ 次。因为实际中 M 比 L 小得多, 所以计算量可以近似表示为 $O(L^{M+1})$ 。

从实验结果中可以看到, 当 $M > 5$ 时, 大津法的计算时间明显增加。为了缩短计算时间, Liao 方法利用式(6)代替了式(3), 这样计算复杂度从 $(5L + M + 2)$ 缩小到 $(3L + M)$, 计算量大约缩小到原来的 $3/5$ 。而由循环产生的计算复杂度仍是 $O(L^M)$ 。

利用 Wu 方法求新的阈值时, 采取在前一次的分割基础上选择一个区间求阈值添加到原有阈值组的方法。这种方法在每次循环中要计算各类的方差, 即式(4), 对由 k 个灰度级组成的类需要计算 $5k + 3$ 次, 而对全灰度级区域需要计算 $(5L + M + 2)$ 次。因此, 求 M 个阈值时, 需要 M 次循环即 $M(5L + M + 2)$ 次计算。

利用本文方法求 M 个阈值时, 只需要 $\lg(M + 1)$ 次循环, 比 Wu 方法还要节省时间。从实验结果也可以看到, 对实验图像, 本文方法比 Wu 方法的分割效果要好, 且执行时间更短。

3 实验结果分析

为观察图像分割效果, 本文采用了三个实验图像和人脸图像集^[11], 并在 Matlab 7.1 版本环境下实现和运行。

3.1 运行时间和分割效果的比较

为比较各方法之间的关系, 实现 Wu 方法时, 不采用自动选取阈值个数的方法, 而且根据要求指定循环次数运行程序。另外, 测时间时采用运行 100 次取平均的方法。图 1 为实验图像。表 1 给出了三种方法的分割时间(单位为秒): 大津法 (Otsu) 的 5 级分割运行时间明显比 4 级分割长; Liao 方法的运行时间比大津法运行时间短; 本文方法(表中用“Ours”表示)的运行时间最短。

比较多阈值图像分割效果时, 本文对 3 个实验图像取 4 级 3 阈值进行实验比较。亦即把 3 个实验图像分别用大津法、Liao 方法、Wu 方法和本文方法计算出 3 个阈值, 然后利用这 3 个阈值把图像分别分割成 4 类。对分割得到的 4 类目标图像, 分别分配灰度级 1、86、171 和 256, 然后再利用 Zero-crossing 法求边缘。图 2 为图 1 计算得到的边缘图像。由于

大津法和把它快速化的 Liao 方法得到的阈值相同,求边缘的结果也相同,因此,本文仅给出其中之一的边缘图像。

表1 阈值分割时间比较

图像	阈值级	方法	阈值	时间/s
Lena	5	Otsu	50, 93, 130, 170	23 651.000
		Liao	50, 93, 130, 170	20.330
		Wu	43, 81, 141, 176	0.034
		Ours	43, 81, 141, 176	0.031
	4	Otsu	52, 98, 146	305.200
		Liao	52, 98, 146	0.734
		Wu	43, 81, 141	0.017
		Ours	43, 81, 141	0.016
house	4	Otsu	83, 113, 158	438.100
		Liao	83, 113, 158	1.203
		Wu	67, 96, 147	0.026
		Ours	96, 147, 205	0.024
auroras	4	Otsu	22, 65, 137	455.000
		Liao	22, 65, 137	1.203
		Wu	64, 136, 188	0.029
		Ours	22, 64, 136	0.025

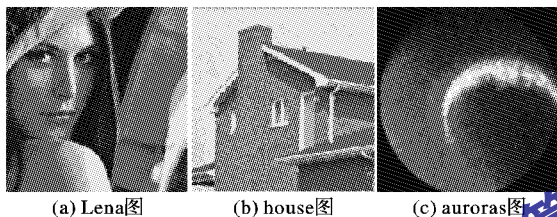


图1 实验图像

图2中,对“Lena”图像,三种方法都有相近的结果,而“auroras”图像,大津法和本文方法较好地表示了图像特征,而Wu方法在上部有未表示的部分,所表示的图像内容有欠缺;对“house”图像,本文方法较好地描述了屋顶边缘和房子结构。这表明本文方法在图像分割中可以得到较好的效果。

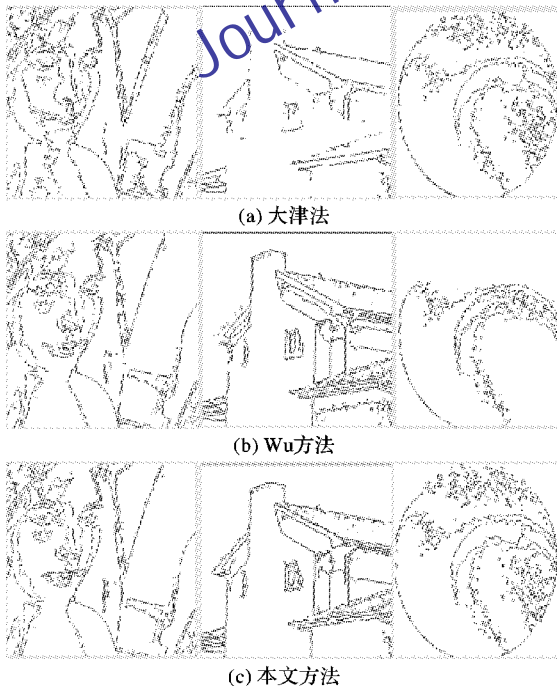


图2 分割图像的边缘

3.2 利用 Hausdorff 距的人脸匹配实验

基于计算两个目标边缘距离的 Hausdorff 距,是一种比较

对象形状的图像处理中经常使用的方法。Hausdorff 距的主要优点是不直接计算两个集合点间的距离。设有两个有限点集 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_p\}$ 和 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_q\}$, 则 Hausdorff 距定义如下^[12]:

$$H(A, B) = \max \{h(A, B), h(B, A)\} \quad (8)$$

其中 $h(A, B) = \max_{a \in A} (\min_{b \in B} \|a - b\|)$, $\|\cdot\|$ 表示点集 A 和 B 的范数。

为考查本文提出的多阈值分割法的效果,在 AT&T 人脸图像数据库^[11]中取 1 到 5 号人的 50 个人脸图像进行匹配实验,结果如图 3 所示。



图3 实验图像及其边缘图像

首先,对人脸数据库 50 个人脸图像,利用三种方法进行 3 级别分割后用 Zero-Crossing 法求边缘图像,对求得的边缘图像之间计算 Hausdorff 距得到 50×50 的非相似度行列式^[12];然后,按人求 10×10 子行列式均值组成 5×5 非相似度行列式。人脸图像的非相似度行列式的值,对同一个图像取零,不同图像随相异程度增大而增大。非相似度行列式可以用 0~255 的灰度图像来表示。

图 4 表示 5×5 人脸图像的非相似度行列式。从图中可以看到,大津法和本文方法在对角线上显示均匀的黑色带,表明大津法和本文方法对自身脸部图像比其他人脸部图像具有较小的距离值,即说明大津法和本文方法在人脸识别应用中有较好的效果。综上所述,从计算时间和处理效果看,本文的多阈值方法是实用且效果较好的图像分割方法。

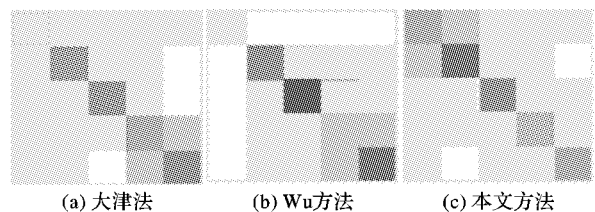


图4 对 5 个人 50 个脸图像的 Hausdorff 非相似度行列式

(下转第 1343 页)

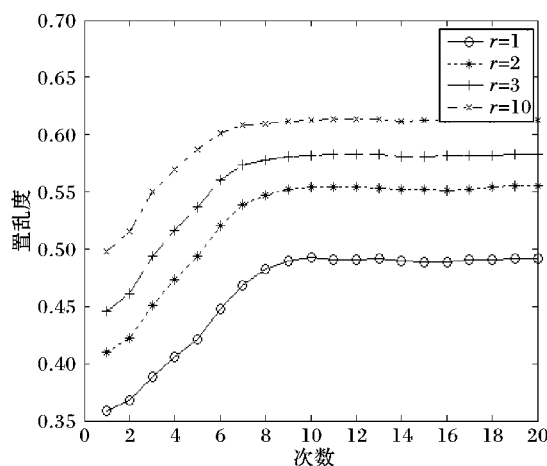


图14 亚仿射变换置乱Lena图20次所得
本文置乱度随邻域参数变化的曲线

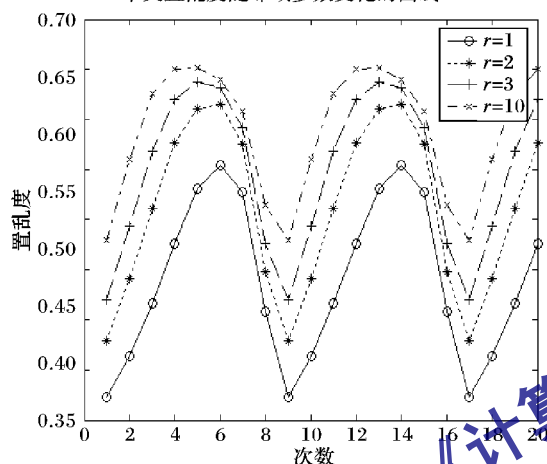


图15 $\frac{1}{2 \times 2}$ 抽样变换置乱Lena图20次所得
本文置乱度随邻域参数变化的曲线

参考文献:

- [1] 丁伟, 齐东旭. 数字图像变换与信息隐藏与伪装技术[J]. 计算机学报, 1998, 21(9): 839-943.
- [2] 齐东旭, 邹建成, 韩效有. 一类新的置乱变换及其在图像信息隐

藏中的应用[J]. 中国科学: E 辑, 2000, 30(5): 440-447.

- [3] 齐东旭. 矩阵变换及其在图像信息隐藏中的应用研究[J]. 北方工业大学学报, 1999, 11(1): 24-28.
- [4] 邹建成, 李国富, 齐东旭. 广义 Gray 码及其在数字图像置乱中的应用[J]. 高等应用数学学报: A 辑, 2002, 17(3): 363-373.
- [5] 柏森, 曹长修. 亚仿射变换的性质及其应用[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(2): 205-208, 214.
- [6] 熊昌镇, 邹建成. 数字图像抽样技术的置乱效果及分析[J]. 北方工业大学学报, 2002, 14(3): 5-12.
- [7] 柏森, 曹长修. 图像置乱程度研究[C]//第3届信息隐藏全国学术研讨会论文集. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001: 75-81.
- [8] 商艳红, 李南, 邹建成. Fibonacci 变换及其在数字图像水印中的应用[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2004, 43(S2): 148-151, 155.
- [9] 柏森, 廖晓峰. 基于 Walsh 变换的图像置乱程度评价方法[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2004, 43(S2): 58-61.
- [10] 李志伟, 陈燕梅, 张胜元. 基于 SNR 的数字图像置乱程度评价方法[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2006, 45(4): 484-487.
- [11] 卢振泰, 黎罗. 一种新的衡量图像置乱程度的方法[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2005, 44(S1): 126-129.
- [12] 陈燕梅, 张胜元. 基于交叉熵的数字图像置乱程度评价方法[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(6): 997-1001.
- [13] 张华熊, 吕辉, 翁向军. 基于信息熵的图像置乱程度评价方法[J]. 电路与系统学报, 2007, 12(6): 95-98.
- [14] WANG LIWEI, ZHANG YAN, PENG JUFU. On the Euclidean distance of image [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(8): 1334-1339.
- [15] LI JING, LU BAO-LIANG. An adaptive image Euclidean distance [J]. Pattern Recognition, 2009, 42(3): 349-357.
- [16] DAHMEN J, KEYSERS D, NEY H. Combined classification of hand-written digits using the 'Virtual Test Sample Method' [EB/OL]. [2009-07-10]. www.springerlink.com/index/uyujjq8clkfmgw.pdf.
- [17] DAHMEN J, THEINER T, KEYSERS D, et al. Classification of radiographs in the image retrieval in medical applications'-system (IRMA) [C]//6th International RIAO Conference on Content-based Multimedia Information Access. Paris, France: [s. n.], 2000: 551-566.

(上接第 1337 页)

4 结语

本文提出把大津法的单阈值二分法推广到多阈值的简单快速分割方法。不同于对全灰度区域盲目搜索的既有方法, 利用简单的分段分割方法, 实现了快速分割。通过计算机实验验证了该方法运行时间短, 能较好地分割处理输入图像。今后的研究课题是把快速多阈值图像分割法应用到模式匹配和人脸识别等图像识别。

参考文献:

- [1] SANKUR B, SEZGIN M. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation [J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1): 146-165.
- [2] KÜÇÜKTUNÇ O, GÜDÜKABY U, ULUSOY Ö. Fuzzy color histogram-based video segmentation [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2010, 114(1): 125-134.
- [3] LIAO P-S, CHEN T-S, CHUNG P-C. A fast algorithm for multilevel thresholding [J]. Journal of Information Science and Engineering, 2001, 17(5): 713-727.
- [4] OTSU N. A threshold selection method from gray level histogram [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [5] DARIUSZ M, JAROSŁAW S. Adaptive multilevel rough entropy evolutionary thresholding [J]. Information Sciences, 2010, 180(7): 1138-1158.
- [6] SHAO Y, CELENK M. Higher-Order Spectra (HOS) invariants for shape recognition [J]. Pattern Recognition, 2001, 34(11): 2079-2113.
- [7] CHUNG K L, CHEN W Y. Fast adaptive PNN-based thresholding algorithms [J]. Pattern Recognition, 2003, 36(12): 2793-2804.
- [8] SAHOO P K, ARORA G. Image thresholding using two-dimensional Tsallis-Havrda-Charvat entropy [J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(6): 520-528.
- [9] HUANG QINGMING, GAO WEN, CAI WENJIAN. Thresholding technique with adaptive window selection for uneven lighting image [J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26(6): 801-808.
- [10] WU B-F, CHEN Y-L, CHIU C-C. A discriminant analysis based recursive automatic thresholding approach for image segmentation [J]. IEICE-Transactions on Information and Systems, 2005, E88-D(7): 1716-1723.
- [11] ATT [EB/OL]. [2009-07-12]. www.uk.research.att.com/facedatabase.html.
- [12] KIM S-W, OOMMEN B J. On using prototype reduction schemes to optimize kernel-based Fisher discriminant analysis [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2008, 38(2): 564-570.