

改进的快速 Otsu 自适应分割算法及其应用*

陈 滨, 田启川

(太原科技大学 电子信息工程学院, 太原 030024)

摘 要: 对 Otsu 算法因灰度直方图峰值不明显导致分割效果差提出了改进, 根据分割目标背景信息的先验值对类内灰度值进行调整, 通过迭代计算, 使类间方差最大化, 从而自动确定阈值, 并应用于虹膜图像分割。实验结果表明, 该算法对虹膜图像分割效果好, 运算速度快, 具有一定的鲁棒性和自适应性, 可用于虹膜图像的实时分割。

关键词: Otsu 算法; 阈值; 类间方差; 虹膜图像分割

中图分类号: TP368

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)04-1572-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.04.104

Improved fast adaptive Otsu segmentation algorithm & its application

CHEN Bin, TIAN Qi-chuan

(College of Electronic & Information Engineering, Taiyuan University of Science & Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: This paper introduced an improved Otsu algorithm for getting a good segmentation effect even if the histogram's peak was not obvious for image segmenting. The algorithm took advantage of the prior knowledge about target and background to decrease classification difficult by clustering known background gray value, then achieved a satisfied threshold automatically through iterating procedure based on Otsu method. Finally, the target could be extracted by comparing every pixel's gray value with the achieved threshold, and used it in iris image segmentation. From the segmentation results in eye image database, the algorithm's performance on real-time and robustness is satisfied. The algorithm can be used in the real-time system of iris image segmentation.

Key words: Otsu method; threshold value; between-class variance; iris image segmentation

图像分割是指根据感兴趣目标的特征把图像分成若干部分,它是表达目标的基础,是图像处理中的关键步骤,对特征检测有着重要的影响。阈值分割技术是实现图像分割的一种重要方法,具有快速、高效、计算简单的特点,在一定条件下不受图像对比度与亮度变化的影响,特别适用于实时图像处理系统中。阈值选择^[1-4]研究吸引着众多学者,找到一种简单实用、自适应强的阈值自动选取方法是共同的努力目标。Otsu 在 1979 年提出的最大类间方差法被认为是十分有效的方法,但对于灰度直方图峰值不明显的图像分割效果较差,即图像在背景灯光、噪声等影响下其感兴趣区域对比度下降,不能直接通过 Otsu 方法将目标有效地分割出来。进一步分析其灰度值信息,出现此现象的原因主要是像素灰度值仅反映了像素灰度级的幅值大小,并没有反映出像素与邻域的空间相关信息。基于此,Liu 等人^[1]提出了灰度图像的二维 Otsu^[4,5]自动阈值分割算法,但该方法在求协方差时较为复杂,运算速度慢,并未得到较为广泛的应用。鉴于此,一些学者对其进行了改进,提出了一些快速算法^[6,7]。冯斌等人^[6]基于改进的粒子群算法,采用量子粒子群算法来搜索最优二维阈值向量,每个粒子代表一个可行的二维阈值向量,通过各个粒子的飞行来获得最优阈值;江禹生等人^[7]将遗传算法应用到二维 Otsu 灰度图像阈值寻优中,降低了算法复杂度,提高了实时性。算法经改进后,基本上

可以满足图像处理实际应用的需要,但对象区域和背景区域上概率和近似为 1 的假设的普适性不够,导致算法的鲁棒性下降。因此,范九伦等人^[8]提出了三维 Otsu 阈值分割算法,对于混合噪声的图像,其分割效果较为理想,但算法实时性较差。Wang 等人^[9]进一步研究提出基于混合跳蛙算法(SFLA)的快速三维 Otsu 阈值分割算法,在一定程度上提高了实时性,但未能应用于实时处理系统中。

综上所述,如何使 Otsu 算法在分割效果与空间、时间复杂度上达到平衡是人们关注的焦点。本文针对这一问题,利用分割目标阈值的先验值^[6]对类内灰度值进行调整,改变直方图峰值分布,通过迭代计算并增加动量项,在其计算进入局部极大值时自动调整阈值,最终找到全局极大值,使类间方差最大化,从而得到理想的分割效果。最后应用于人眼图像的瞳孔区域分割^[10,11],并与文献[7,9]的算法进行比较。

1 Otsu 算法原理

记 $f(i, j)$ 是大小为 $m \times n$ 图像 (i, j) 点处的灰度值,其灰度级为 L ,故 $f(i, j)$ 的取值为 $[0, L-1]$ 。令灰度值 k 为一个二值化阈值,则图像被分为两部分,即目标 $G_1 \in \{f(i, j) \leq k\}$ 和背景 $G_2 \in \{f(i, j) > k\}$ 。记 $p_r(r_q) = \frac{n_q}{n}$ ($q=0, 1, 2, \dots, L-1$) 为灰度

收稿日期: 2011-08-26; 修回日期: 2011-09-29 基金项目: 山西省回国留学人员科研资助项目(2011-075); 山西省自然科学基金资助项目(2008011030); 太原市科技局大学生创新项目(2010)

作者简介: 陈滨(1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理等(cbstudent163@126.com); 田启川(1971-), 男, 副教授, 博士(后), 主要研究方向为机器学习、图像处理、模式识别等。

级为 r_q 的像素数目占图像像素数目的比例, ω_0 为目标像素所占的比例, μ_0 为目标像素的灰度均值, σ_0^2 为目标的类内方差, ω_1 为背景像素所占的比例, μ_1 为背景像素的灰度均值, σ_1^2 为背景的类内方差, μ 为整个图像的灰度均值, σ^2 为类间方差, 其各值定义如下:

$$\omega_0 = \sum_{q=0}^{k-1} p_q(r_q) \quad (1)$$

$$\omega_1 = \sum_{q=k}^{L-1} p_q(r_q) = 1 - \omega_0 \quad (2)$$

$$\mu_0 = \sum_{q=0}^{k-1} qp_q(r_q) / \omega_0 \quad (3)$$

$$\mu_1 = \sum_{q=k}^{L-1} qp_q(r_q) / \omega_1 \quad (4)$$

$$\mu = \sum_{q=0}^{L-1} qp_q(r_q) \quad (5)$$

$$\sigma_0^2 = \sum_{q=0}^{k-1} (q - \mu_0)^2 p_q(r_q) / \omega_0 \quad (6)$$

$$\sigma_1^2 = \sum_{q=k}^{L-1} (q - \mu_1)^2 p_q(r_q) / \omega_1 \quad (7)$$

$$\sigma^2 = \omega_0(u_0 - u)^2 + \omega_1(u_1 - u)^2 \quad (8)$$

为了得到较好的分割效果, 需使 σ^2 最大, σ_0^2 、 σ_1^2 最小。因方差是灰度分布均匀程度的一种度量, 其值越大, 说明在给定阈值下分割后目标与背景的差别越大, 即对特征的正确提取越有利。当背景被错分为目标时, 类间方差减小, 类内方差增大, 故类间方差最大化、类内方差最小化可使错分的概率达到最小。在实际应用中, 由于图像噪声以及图像中背景灰度可能属于较宽的几种灰度范围, 通过阈值分割后, 目标和背景的错分率较大。因此, 本文根据被分割对象的先验知识将背景区域的灰度值进行处理, 然后再当做二值的分类问题对其进行分类。

2 改进的 Otsu 自动阈值分割算法

为了解决实际应用中由于各种噪声使得图像灰度直方图峰值不明显、目标分割不准确的问题, 提出一种改进的 Otsu 自动阈值分割算法, 即根据先验值对图像灰度直方图进行预处理, 以得到效果较为理想的峰值图像, 利用先验值进行灰度范围压缩在实际中较容易做到。这样, 再通过 Otsu 选择分类阈值就可实现目标分割, 使错分概率降低, 得到较好的图像分割效果。

图1是一组人眼虹膜图像, 由于眼皮、巩膜、睫毛、图像模糊等影响, 其灰度直方图并不是理想的双峰值, 很难通过固定阈值分割出瞳孔区域, 即使使用 Otsu 自动阈值分割算法, 也达不到应有的分割效果。

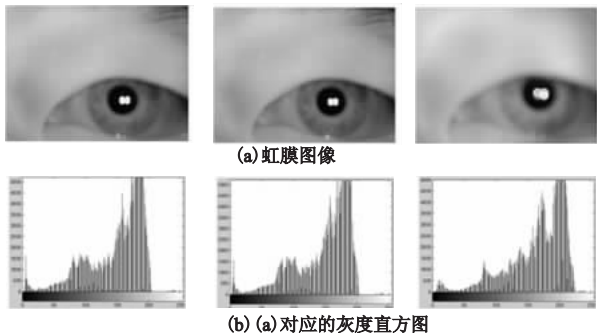


图1 人眼虹膜图像及其灰度直方图

以人眼图像中瞳孔的分割为例来介绍算法。本文在分析 Otsu 算法的基础上, 根据人眼图像的灰度特点和先验知识, 如眼皮等肯定不是目标区域, 即图像中灰度值大于分割阈值的先验值 k_0 , 将其灰度值进行重置, 从而得到效果较为理想的峰值

直方图。实现方法如下:

若 $f(i, j) \geq k_0$

$$\text{则 } f_c(i, j) = \mu_1 + c \quad (9)$$

其中: $f_c(i, j)$ 表示 $f(i, j)$ 重置后的灰度值。即把图像中灰度值与先验值 k_0 作比较, 若大于 k_0 , 则将其直接取值为 $\mu_1 + c$, c 为常数, 一般取值为 $1 \sim 20$ 。记 u_c 为重置后图像的 u , u_{1c} 为重置后图像的 u_1 , σ_c^2 为重置后图像的 σ^2 , σ_{1c}^2 为重置后图像的 σ_1^2 , 则显然有:

$$\begin{aligned} \sigma_c^2 &= \omega_0(u_0 - u_c)^2 + \omega_1(u_{1c} - u_c)^2 = \\ &\omega_0(u_0 - (\sum_{q=0}^{k-1} qp_q(r_q) + \sum_{q=\mu_1+c}^{\mu_1+c} qp_q(r_q)))^2 + \\ &\omega_1(\sum_{q=k}^{\mu_1+c} qp_q(r_q) / \omega_1 - (\sum_{q=0}^{k-1} qp_q(r_q) + \sum_{q=\mu_1+c}^{\mu_1+c} qp_q(r_q)))^2 > \\ &\omega_0(u_0 - (\sum_{q=0}^{k-1} qp_q(r_q) + \sum_{q=k}^{L-1} qp_q(r_q)))^2 + \\ &\omega_1(\sum_{q=k}^{L-1} qp_q(r_q) / \omega_1 - (\sum_{q=0}^{k-1} qp_q(r_q) + \sum_{q=k}^{L-1} qp_q(r_q)))^2 > \sigma^2 \quad (10) \\ \sigma_{1c}^2 &= \sum_{q=\mu_1+c}^{\mu_1+c} (q - \mu_{1c})^2 p_q(r_q) / \omega_1 < \\ &\sum_{q=k}^{L-1} (q - \mu_1)^2 p_q(r_q) / \omega_1 < \sigma_1^2 \quad (11) \end{aligned}$$

由式(10)(11)可知, 重置后图像的类间方差增大, 类内方差减小, 降低了错分的概率, 有利于目标区域的分割、提取, 在灰度直方图上表现为明显的双峰效果, 如图2(直方图顺序与图1中对应)所示。本文通过式(9)处理后, 将图像灰度范围大于 k_0 的区域压缩, 即增加感兴趣区域的对比度, 以便阈值的选取。因此, 当有噪声处于背景区域时并不会影响图像的分割, 具有一定的鲁棒性。式(9)中判断符号的选择取决于目标区域灰度值的分布, 即当目标区域灰度值均大于 k_0 时, 背景区域则为小于 k_0 部分, 由于处理是将背景区域灰度范围压缩, 故判断符号取为小于等于; 当目标区域灰度值均小于 k_0 时, 背景区域则为大于 k_0 部分, 将判断符号取为大于等于。虹膜瞳孔区域灰度值明显小于 k_0 , 故在本算法中选取大于等于。图像经过预处理后, 进行迭代计算, 使类间方差最大化, 从而自动确定其分割阈值。

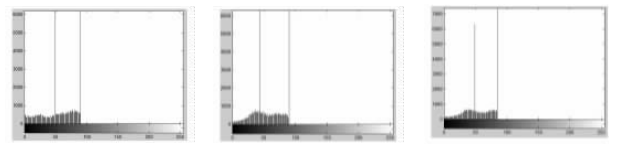


图2 调整后灰度直方图

算法步骤如下:

a) 由式(9)将图像进行灰度值重置, 得到效果较好的峰值直方图。

b) 确定重置后, 图像的初始分割阈值 $k(1) = \frac{k_{\max} + k_{\min}}{2}$, $k_{\max} = \max(f_c(i, j))$, $k_{\min} = \min(f_c(i, j))$ 分别为重置后图像中灰度值的最大值和最小值。

c) 使用初始分割阈值 $k(1)$ 分割重置后的图像 $f_c(i, j)$, 得到目标和背景两个区域, 并将其分别记为 G_1 、 G_2 。

d) 分别计算 G_1 和 G_2 内像素的平均值, 可由式(12)计算所得。

$$\overline{G_1} = \frac{\sum_{i=0}^{k_1} h_i \times i}{\sum_{i=0}^{k_1} h_i}, \quad \overline{G_2} = \frac{\sum_{i=k_1+1}^{L-1} h_i \times i}{\sum_{i=k_1+1}^{L-1} h_i} \quad (12)$$

其中: h_i 表示灰度级为 i 的像素个数。

e)通过计算得到阈值 $k'(n) = \frac{1}{2}(\overline{G_1} + \overline{G_2})$;

f)在确定新的分割阈值 $k(n)$ 时,为了加快收敛速度,跳出局部极大值,增强算法的自适应性,引入动量项 $\Delta\omega(n)$:

$$\Delta\omega(n) = \sum_{t=0}^n \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial \omega(t)} \quad (13)$$

其中: $\varepsilon(t) = k(n-1) - k(n-2)$ 。当本次的 $\frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial \omega(t)}$ 与上一次同号时,其加权求和值增大,在稳定调节时加快了分割阈值的调节速度;当 $\frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial \omega(t)}$ 与前次符号相反时,说明具有一定的振荡,此时指数加权求和结果使 $\Delta\omega(n)$ 减小,起到稳定的作用。新的阈值定义为 $k(n) = k'(n) + \alpha\Delta\omega(n)$,其中 α 为一正系数。得到新的分割阈值后跳至步骤 c),开始循环执行,直到循环次数达到上限 m 或者满足下式:

$$|k(n) - k(n-1)| < \theta \quad (14)$$

则结束循环,最后的 $k(n)$ 即为分割阈值。

初始阈值 k 可在图像的最小灰度值与最大灰度值之间任意选取,为了加快算法收敛速度,故将其取为均值。 θ 值的选取关系到算法运算速度以及分割效果。其取值过小则会延长计算时间,但可提高分割效果;取值过大可快速结束迭代运算,但会影响分割效果。经实验数据分析所得,其取值在 2~5 之间较为合适(针对灰度级为 256 时,瞳孔区域分割)。迭代次数上限 m 可以保证无法满足式(14)时,即参数 θ 值设置不合理,算法也能结束迭代计算,得到在相应要求下较为理想的分割效果。 θ 、 m 、 ω 的引入可以使算法快速得到分割阈值,并且提高了其鲁棒性和自适应性。

3 实验验证及分析

本文将算法应用于虹膜瞳孔区域分割,在 PC 机上运行,CPU 为 Intel E4600 2.4 GHz, RAM 为 DDR2 800 3 GB。虹膜图片大小为 320×280 , L 为 256, θ 取值为 3, k_0 取值为 50, c 取值为 3, m 取值为 30。实验共取清晰图像 5 组 200 张,模糊图像 5 组 200 张,要求尽可能将虹膜瞳孔区域完整地分割出来,去除眼皮、睫毛等带来的影响。各算法分割效果如图 3 所示,其中,(a)为原始虹膜图像,图像的模糊度从上到下逐渐增加;(b)~(d)为各算法分割结果,均为二值图像。其中,(b)为本文算法所得结果;(c)为文献[7]算法分割所得结果;(d)为文献[9]算法所得结果。

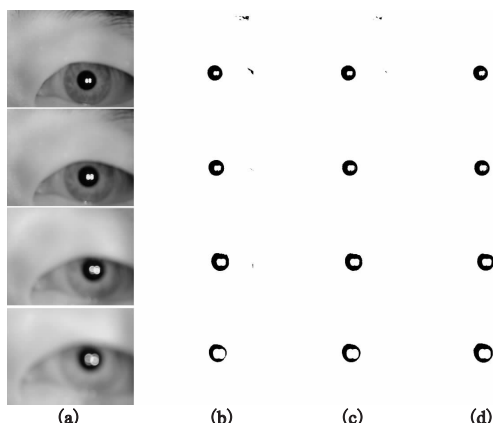


图3 实验结果

由图 3(b)~(d)的二值图像对比所得,在分割效果上,三者均可以有效去除虹膜图像中眼睫毛、眼角等带来的影响,并

可有效抑制噪声,即使在图像模糊情况下也可将瞳孔区域分割出来,达到瞳孔区域分割要求,具有一定的鲁棒性和自适应性。经灰度直方图分析所得,原始 Otsu 算法主要在处理多峰值、无明显峰值时存在缺陷,很难确定分割阈值,经过本算法改进后,可以根据图像中分割目标背景信息的先验值产生较为理想的分割效果。各算法分割的正确率如图 4 所示。

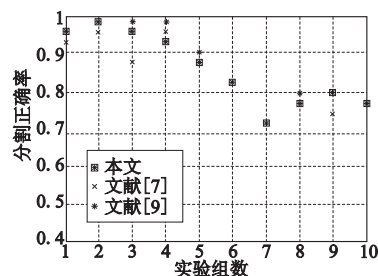


图4 各算法分割正确率

本文算法分割正确率与文献[9]接近,最大差值仅为 4%,优于文献[7],在实际应用中符合要求。但三者和时间代价、空间代价上存在着较大的差异,同等运行环境下,本文算法明显优于文献[7,9],具体如表 1 所示。其运行时间代价、空间代价均为单幅图像的平均分割代价。

表 1 三种算法的时间、空间代价

比较项	算法		
	本文	文献[7]	文献[9]
运行时间/s	0.050 3	0.53	18.25
额外的空间代价/Byte	12 258	786 432	5 145 728

在时间代价上,本文算法仅为文献[7]的 9.5%,文献[9]的 0.27%,较大地提高了实时性;在增加的额外空间代价上,本文算法仅为文献[7]的 1.5%,文献[9]的 0.23%,极大地减小了运行所需的空间代价。本算法在保证分割效果的前提下,极大地提高了实时性,降低了空间复杂度,找到了两者的平衡点,可应用于基于嵌入式的虹膜实时检测系统中。

4 结束语

本文基于对图像灰度直方图峰值信息的研究,根据图像中分割目标背景信息的先验值将类内灰度值进行调整,得到较为理想的峰值直方图,采用改进的 Otsu 算法,通过迭代计算自动获得分割阈值。实验结果证明,该算法具有较好的鲁棒性和泛化性,改善了算法自适应性,加快了算法运算速度,在虹膜瞳孔区域提取中分割效果较好,该算法可应用于虹膜实时检测系统中。对于不同类型的分割, k_0 值的选取需要根据图像的特点,在一定的先验知识的基础上选择,下一步工作可针对彩色图像中目标分割来改进算法。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] WU S, AMIN A. Automatic thresholding of gray-level using multi-stage approach [C]//Proc of the 7th International Conference on Document Analysis and Recognition. Washington DC: IEEE Computer Society, 2003: 493-497.
- [3] MURTHY C A, PAL S K. Histogram thresholding by minimizing gray-level fuzziness [J]. Information Science, 1992, 60(1-2): 107-135.

其中: MSE_{total}^{BW-C} 表示黑白图像与原始彩色图像之间的均方差, MSE_{total}^{C-Cz} 则表示通过着色后的图像与原始彩色图像之间的均方差。

2 实验设置和结果

在本文中,采用 AVI 格式的视频图像进行训练和测试,其分辨率为 640×480 。图 3 显示了一组从视频中截取的原始图像和相应的灰度图像示例。

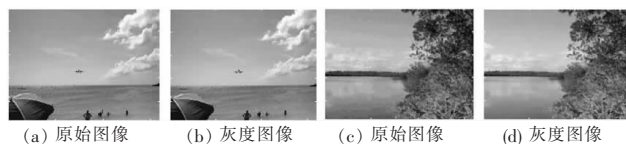


图3 实验图像样本

实验设置如下:首先从视频中采集一组彩色序列图像;然后通过对各个颜色通道的强度加权平均,将彩色图像转换成为相应的灰度图像;再采用本文提出的着色方法对灰度图像进行着色操作,最终得到着色化以后的彩色图像。

在图 4 和 5 中显示了图 3 所示样本序列中不同灰度图像的着色结果。

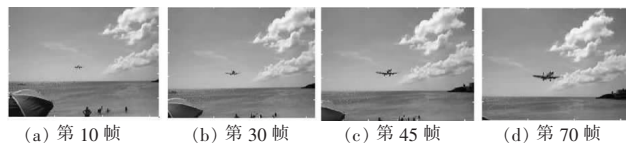


图4 飞机序列图像着色结果

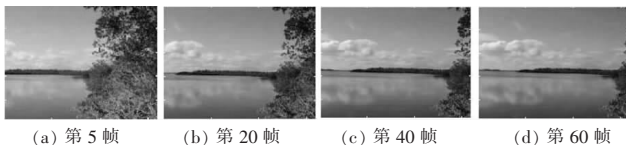


图5 湖面序列图像着色结果

从实验结果可以看到,由于采用了色彩空间压缩,经过着色处理的图像颜色没有原始图像的色彩丰富,但着色后的图像在视觉上依然能够提供较好的色彩观感效果。

为了对比不同特征和神经网络对于图像着色的影响,本文进行了不同的测试,并将结果显示在表 1 中。

从以上实验结果可以看到,使用各个像素的灰度特征以及坐标特征并结合色彩空间压缩的方法,能有效地提高图像着色的准确率。从表 1 中可以得到如下结论:在使用合适的色彩空间压缩算法后,不但能有效地减少系统的计算量和过高

特征维数给神经网络的训练及识别造成的不稳定性因素,还提高了系统的着色效果,使得图像更接近于原始的彩色图像。

表1 图像着色实验结果

实验号	实验设置	飞机序列/%	湖面序列/%
1	仅使用灰度	37.3	20.5
2	实验 1 + 坐标	62.0	55.7
3	Laws 滤波	560	47.5
4	实验 1 + 色彩空间压缩	91.1	79.9
5	实验 2 + 色彩空间压缩	93.2	83.0
6	实验 3 + 色彩空间压缩	92.5	80.1

3 结束语

本文提出了一种基于神经网络的灰度(黑白)图像着色方法。通过利用像素的灰度信息以及空间信息,以一个相关图像序列中的第一幅图像作为训练图像,能快速地训练得到一个神经网络,并将灰度图像投影到一个压缩的色彩空间中,形成一幅彩色图像。实验结果显示,本文的算法能提供具有良好视觉效果的结果。利用其他类型的特征或色彩空间表达,如 YIQ 色彩空间等,本文所提出的方法构架能获得更好的实验效果。

参考文献:

- [1] WELSH T, ASHIKHMIN M, MUELLER K. Transferring color to grayscale images[J]. ACM Trans on Graphics, 2002, 21(3): 277-280.
- [2] IRONY R, COHEN-OR D, LISCHINSKI D. Colorization by example[C]//Proc of Eurographics Symposium on Rendering. 2005: 201-210.
- [3] MONADJEMI A. Towards efficient texture classification and abnormality detection[D]. Bristolvk: Dept of Computer Science, University of Bristol, 2004: 19-21.
- [4] 廖飞雄, 马良. 图着色问题的启发式搜索蚂蚁算法[J]. 计算机工程, 2007, 33(16): 191-192, 195.
- [5] 朱黎博, 孙韶媛, 谷小婧, 等. 基于色彩传递与扩展的图像着色算法[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(2): 200-205.
- [6] 赵国英, 李华. 人体脸部灰度图像上色的改进算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(8): 1051-1056.
- [7] QU Ying-ge, WONG T T, HENG P A. Manga colorization[J]. ACM Trans on Graphics, 2006, 25(3): 1214-1220.
- [8] YATIZV L, SAPTRO G. Fast image and video colorization using chrominance blending[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2006, 15(5): 1120-1129.
- [9] WANG Na, LI Xia, CHEN Xiao-hong. Fast three-dimensional Otsu thresholding with shuffled frog-leaping algorithm[J]. Pattern Recognition Letters, 2010, 31(13): 1809-1815.
- [10] REALE M, HUNG T, YIN Li-jun. Pointing with the eyes: gaze estimation using a static/active camera system and 3D iris disk model[C]//Proc of IEEE International Conference on Multimedia and Expo. [S. l.]: IEEE, 2010: 280-285.
- [11] WANG Lu, YANG Gong-ping, YIN Yi-long. Fast iris localization based on improved Hough transform[C]//Proc of the 5th International Conference on Rough set and Knowledge Technology. Berlin: Springer-Verlag, 2010: 439-446.

(上接第 1574 页)

- [4] 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.
- [5] MEDINA-CAMICER R, MADRID-CUEVAS F J. Unimodal thresholding for edge detection[J]. Pattern Recognition, 2008, 41(7): 2337-2346.
- [6] 冯斌, 王璋, 孙俊. 基于改进粒子群算法的二维阈值图像分割[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(8): 2402-2404.
- [7] 江禹生, 宋香丽, 任晶晶. 基于遗传算法的二维 Otsu 算法改进[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(3): 1189-1191.
- [8] 范九伦, 赵凤, 张雪峰. 三维 Otsu 阈值分割方法的递推算法[J]. 电子学报, 2007, 35(7): 1398-1402.