

基于小概率策略的 Otsu 图像分割方法

范朝冬^{①②} 欧阳红林^① 张英杰^{*②}

^①(湖南大学电气与信息工程学院 长沙 410082)

^②(湖南大学信息科学与工程学院 长沙 410082)

摘要: Otsu 自适应阈值法是一种经典的图像阈值分割方法,在其基础上发展起来的 2 维 Otsu 法及其改进算法由于存在计算(或空间)复杂度较高、抗噪能力差、难以扩展到多阈值等不足而制约了其应用。该文针对 2 维 Otsu 法的不足,将噪声点的出现视为小概率事件,用噪声点的邻域均值代替其灰度值,将噪声点转换为目标(或背景)像素,减少了图像中的噪声点数量;继而直接采用 1 维 Otsu 法进行分割,以较小的代价获得良好的分割效果。算法分析及测试实验表明:与现有 2 维 Otsu 法相比,该算法在复杂度、抗噪性、多阈值扩展性等方面都有明显改善。

关键词: 图像分割; 阈值分割; 2 维 Otsu 算法; 小概率事件

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)09-2081-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01598

Small Probability Strategy Based Otsu Thresholding Method for Image Segmentation

Fan Chao-dong^{①②} Ouyang Hong-lin^① Zhang Ying-jie^②

^①(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

^②(College of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Otsu adaptive threshold algorithm is a classic image segmentation method. The two-dimensional Otsu algorithm and its improvements which based on original Otsu algorithm are restricted, due to their computation(or space) complexity, inability for anti-noise, difficulty to extend to multilevel thresholding. In order to improve these shortages, regarding noise points' appearances as small probability events, noise point is changed to objective(or background) pixel by using its neighborhood average gray level to instead its gray level. Then the processed image is segmented through one-dimensional Otsu. So this method obtain good performance at low cost. The experimental result shows that this method has significant improvements in complexity, ability for anti-noise, ability for extending to multilevel thresholding and so on.

Key words: Image segmentation; Threshold segmentation; Two-dimensional Otsu algorithm; Small probability event

1 引言

阈值分割作为一种典型的图像分割方法,由于简单有效而被广泛应用于图像处理领域。阈值的选取直接影响图像分割的质量,因此产生了多种阈值选取方法。但在实际应用中,常用的方法只有:直方图双峰法、最大熵法、Otsu法、矩量保持法、梯度统计法,及这些方法在2维上的推广化方法^[1]。在众多的阈值分割方法中,Otsu法^[2]因计算简单、实时性高、鲁棒性强等优点而被广泛使用^[3]。

Otsu法也称大津法或最大类间方差法,该方法基于图像的1维直方图,以目标和背景的类间方差作为选取最佳阈值的依据,在大多数情况下能取得较好的效果。然而由于噪声干扰,实际图像的灰度直方图不一定呈现明显的波峰和波谷,此时仅基于1维直方图确定阈值往往造成分割错误。这是由于1维Otsu法仅考虑了像素的灰度值,而忽略了像素间的空间相关性。对此,刘健庄等人^[4]基于原始图像和其邻域平滑图的联合直方图提出了灰度图像的2维Otsu自动阈值分割法。

传统2维Otsu法一定程度提高了算法的抗噪能力,改善了分割效果。但是仍然存在以下不足:(1)基于灰度级-平均灰度级的2维直方图造成分割的不准确,影响了分割的质量^[5,6]。(2)2维直方图的引入

2012-12-07 收到, 2013-03-15 改回

国家自然科学基金(61174140)和教育部高校博士点基金(20110161110035)资助课题

*通信作者: 张英杰 zhangyj@hnu.edu.cn

增加了算法的计算复杂度。这些不足严重制约了算法的广泛应用。尽管有很多改进的2维Otsu法,如汪海洋等人^[7]提出的2维Otsu自适应阈值选取算法的快速实现、郎咸朋等人^[8]提出的基于积分图像的快速2维Otsu算法、Chen等人^[9]提出的基于灰度级-梯度直方图的2维Otsu法等。但是很多方法在改善某一性能的同时会引入新的问题。对此,本文提出一种基于小概率策略的Otsu阈值分割法,该方法将噪声点的出现视为小概率事件而进行转换,对转换后的图像用1维Otsu法进行分割。因此,该算法不仅具有较好的抗噪性,计算时间短,而且易于多阈值扩展。

2 传统2维Otsu算法

设图像 $f(x,y)$ 的尺寸为 $M \times N$, 灰度级为 L , 则其邻域平滑图像 $g(x,y)$ 的尺寸和灰度级也分别为 $M \times N$ 和 L 。因此,像素的灰度值 i 和它的邻域灰度均值 j 构成二元组 (i,j) , 若二元组 (i,j) 出现的频数为 $f_{i,j}$, 则相应的联合密度为

$$P_{i,j} = \frac{f_{i,j}}{M \times N} \quad (1)$$

如将 $P_{i,j}$ 作为 $L \times L$ 矩阵中的点, 则可以得到图像的2维直方图。传统2维Otsu法假定直方图中远离对角线的概率 $P_{i,j}$ 为0, 则可得一个类间离散测度:

$$S_B(s,t) = \omega_0 \left[(\mu_{0i} - \mu_{Ti})^2 + (\mu_{0j} - \mu_{Tj})^2 \right] + \omega_1 \left[(\mu_{1i} - \mu_{Ti})^2 + (\mu_{1j} - \mu_{Tj})^2 \right] \quad (2)$$

其中 ω_0, ω_1 分别为目标和背景的总概率, μ_0, μ_1 分别表示目标、背景的灰度均值矢量, μ_T 为2维直方图总的均值矢量。 $\omega_0, \omega_1, \mu_0, \mu_1, \mu_T$ 的计算公式及传统2维Otsu法的具体步骤见文献[4]。能够使 $S_B(s,t)$ 取得最大值的阈值 (s',t') 即为最佳阈值。

3 基于小概率策略的Otsu算法

针对现有2维Otsu法的不足,采用直线 $|f-g|=T$ 将直方图划分为图1所示的A, B, C 3个区域。将区域A, 区域C中噪声点的出现视为小概率事件, 当噪声点出现时, 用其邻域灰度均值代替其灰度值。

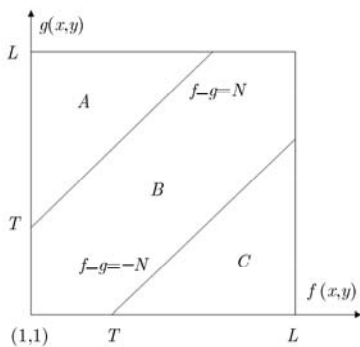


图1 2维直方图斜分法区域划分

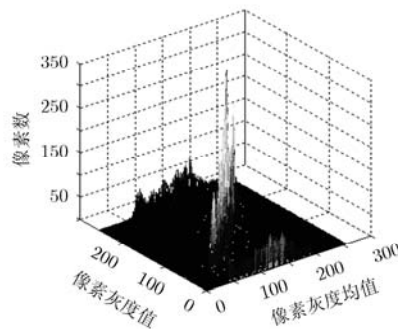


图2 噪声Lena图像2维直方图

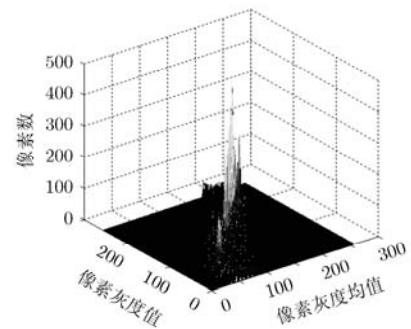


图3 噪声点替换Lena结果图像2维直方图

小概率事件是指发生概率极小的事件。如果在一次试验中, 某个小概率事件竟然发生了, 那么就认为这是一种反常现象^[10]。现定义噪声点的出现为随机事件 ξ, ξ 发生的概率为小概率 P_{noise} , 则尺寸为 $M \times N$ 的图像中噪声点数量的期望值为

$$E = M \times N \times P_{\text{noise}} \quad (3)$$

设 $h(x,y) = |f(x,y) - g(x,y)|$, 将 $h(x,y)$ 按降序排列为 $H(i), i \in [1, M \times N]$, 则将对应于 $j, j \in [1, M \times N \times P_{\text{noise}}]$ 的原图像的像素 (x,y) 视为噪声, 即满足式(4)的像素 (x,y) 为噪声点。

$$h(x,y) = |f(x,y) - g(x,y)| \geq H(M \times N \times P_{\text{noise}}) \quad (4)$$

将满足式(4)的像素 (x,y) 的灰度值用其邻域灰度均值 $g(x,y)$ 代替, 由于噪声点的小概率, 故而代换操作对原图像的影响较小。如果 $h(x,y) = |f(x,y) - g(x,y)| \geq H(M \times N \times P_{\text{noise}})$, 则 $f(x,y) = g(x,y)$ 。

分辨率为 512×512 像素, 灰度级为 256, 带椒盐噪声的Lena图像的噪声点替换效果见图2, 图3。由图可知, 通过对噪声点进行代换, 噪声点大为减少, 像素点聚集在对角线附近。因此, 对结果图像可直接用1维Otsu法进行分割, 本文方法的具体步骤如下:

- 步骤 1 设定小概率值 P_{noise} ;
- 步骤 2 根据输入图像计算其2维直方图;
- 步骤 3 依据小概率值 P_{noise} 及图像尺寸, 按照式(3)计算图像中噪声点数量的期望值;
- 步骤 4 按照式(4)判断图像中的像素是否为噪声点;
- 步骤 5 将噪声点的灰度值转换为其邻域均值;
- 步骤 6 对转换结果图像用1维Otsu法进行分割, 1维Otsu法的具体步骤见文献[2]。

4 算法复杂度分析

为了便于对照分析本文算法的复杂度, 从时间和空间两方面将本文算法与文献[4], 文献[7], 文献[9], 文献[11]的算法进行比较。

由于搜索阈值是整个算法中最耗时的部分，所以比较计算复杂度时通常仅考虑阈值搜索部分。本文方法虽然需对噪声点进行处理，但是这些操作并没有增加算法计算复杂度的数量级。1维Otsu法搜索最佳阈值时，对于每个阈值 t ，需要对 $t+(L-t)=L$ 个值做求和平均运算及求两类的均值矢量，故计算复杂度为： $\sum_{t=1}^L [t+(L-t)] = O(L^2)$ 。由第3节可知，本文算法由于需要额外的数组 $h(x,y)$ 及 $H(i), i \in [1, M \times N]$ ，故本文算法的额外空间代价为 $2 \times M \times N$ 。

由文献[7]可知：文献[4]算法的计算复杂度为 $O(L^4)$ ，文献[7]算法的计算复杂度为 $O(L^2)$ 。由于需要建立3个 $M \times N$ 的查找表，故文献[7]的额外空间代价为 $3 \times M \times N$ 。由文献[9]的算法过程可知：对每个阈值组合 (s,t) 需要对 $s \times t + (L-s) \times t = L \times t$ 个点求和平均运算及求两类的均值矢量，故计算复杂度为

$$\sum_{s=1}^L \sum_{t=1}^L [s \times t + (L-s) \times t] = \sum_{s=1}^L \sum_{t=1}^L (L \times t) = O(L^4)$$

另外，文献[9]算法没有额外的空间消耗。由文献[11]的算法过程可知：文献[11]的计算复杂度为 $O(L^2)$ ；由于需要建立3个积分图像，每个积分图像需要一个 $M \times N$ 的辅助数组，故文献[11]算法的额外空间代价为 $6 \times M \times N$ 。

通过上述分析，将各种算法的计算复杂度和额外空间代价进行归纳，结果如表1所示。由表1可知：综合考虑时间和空间代价，本文Otsu法是一种相对高效的阈值分割算法。

5 实验结果与分析

为了对本文方法的有效性进行验证，将本文方

表1 各种算法的时间、空间代价比较

	文献[4] 算法	文献[7] 算法	文献[9] 算法	文献[11] 算法	本文 算法
时间复杂度	$O(L^4)$	$O(L^2)$	$O(L^4)$	$O(L^2)$	$O(L^2)$
额外空间代价	0	$3 \times M \times N$	0	$6 \times M \times N$	$2 \times M \times N$

法与文献[2]，文献[4]，文献[7]，文献[9]，文献[11]，文献[12]及文献[13]的Otsu法进行比较。实验环境为：Pentium(R) 2.7 GHz的CPU，内存为2G，编程语言为matlab 7.9。测试实验分为两组：第1组实验测试各种算法对带椒盐噪声的不同图像的分割效果；第2组实验比较各种方法对不同噪声图像的分割效果。

5.1 测试实验1

实验1选取的测试对象为椒盐噪声强度为0.05的Lena, Baboon和Peppers图像，图像的分辨率为 512×512 ，灰度级为256，测试对象如图4。概率论中小概率的取值通常为0.01~0.05，故本实验设置小概率值 $P_{noise}=0.04$ 。由于文献[7]、文献[12]与文献[4]方法均基于传统2维直方图和相同的分割原理，故它们对图像的分割效果是一致的(文献[12]方法为随机搜索算法，指搜索成功时的分割效果)。同理，文献[9]、文献[11]方法对图像的分割效果也是相同的。本文方法与各种分割方法对带椒盐噪声的Lena, Baboon, Peppers图像的分割结果如图5-图9所示。由图可知：2维Otsu法的抗噪性比1维Otsu法强；文献[13]方法是文献[4]方法的近似实现，因此它们的分割效果较为接近；文献[9]、文献[11]方法能对直方图进行更准确的划分，错分的噪声点比传统2维Otsu法少，故抗噪性强于传统2维Otsu法；本文方法由于预先对噪声点进行了转换，减弱了噪声干扰而取得了最好的抗噪性，获得了最佳的分割效果。

5.2 测试实验2

为了测试本方法的通用性，实验2用各种分割方法分别对带高斯噪声、泊松噪声及乘性噪声的Peppers图像进行分割，测试对象如图10所示。各种Otsu法对带不同噪声Peppers图像的分割结果见图11-图15。由图可知：文献[2]的1维Otsu法的抗噪性差；文献[4](文献[7]、文献[12])的2维Otsu法有一定的抗噪性，但是易于丢失图像的信息(由图12知，其轮廓较为模糊)；文献[9](文献[11])的基于灰度级-梯度直方图的Otsu法能更好地保留图像信息，

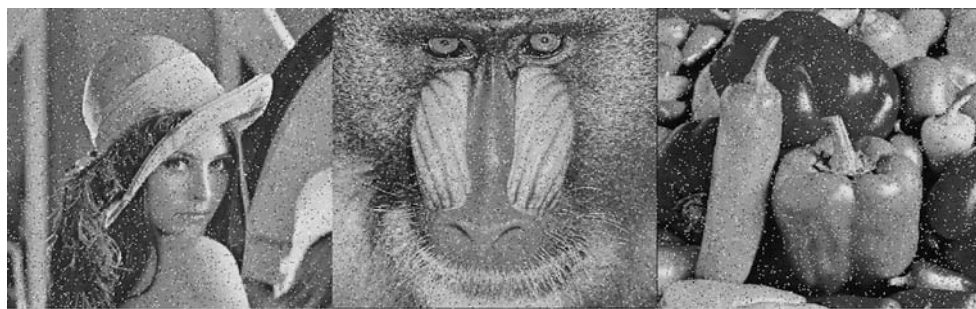


图4 带椒盐噪声的Lena图像, Baboon图像和Peppers图像(左-右)



图5 文献[2]方法对椒盐噪声图像的分割结果



图6 文献[4], 文献[7]及文献[12]方法对椒盐噪声图像的分割结果



图7 文献[9], 文献[11]方法对椒盐噪声图像的分割结果



图8 文献[13]方法的分割结果



图9 本文方法对椒盐噪声图像的分割结果



图 10 带高斯噪声、泊松噪声及乘性噪声的 Peppers 图像(左-右)

但是抗噪性不足；本文方法预先对噪声点进行了转换，减弱了噪声干扰，取得了较好的分割效果，实验结果表明本文方法具备较强的通用性。

5.3 分割效果的量化比较

为了便于对图像分割质量进行比较，采用峰值信噪比(PSNR)作为图像分割的量化指标^[14](本文选用无噪声分割结果图像作为参照图像)。各种算法的性能比较如表 2、表 3 所示。表 2 为实验 1 各种方

法对带椒盐噪声图像的分割结果，表 3 为实验 2 各种方法对不同噪声 Peppers 图像的分割结果。表中的数据为每幅图像测试 10 次的平均值。由表 2、表 3 可知：文献[2]方法求解速度快，但是峰值信噪比小，抗噪性差；文献[4]方法虽然有一定的抗噪性，但是由于直方图分割方式的缺陷导致像素的错分，对有些图像甚至分割失败(如 Baboon)，其快速实现(文献[7]方法)仅提高了分割速度，并未改善分割质



图 11 文献[2]方法对不同噪声 Peppers 图像的分割结果



图 12 文献[4]，文献[7]及文献[12]方法对不同噪声 Peppers 图像的分割结果



图 13 文献[9]，文献[11]方法对不同噪声 Peppers 图像的分割结果



图 14 文献[13]方法对不同噪声 Peppers 图像的分割结果



图 15 本文方法对不同噪声 Peppers 图像的分割结果

表 2 各种 Otsu 法对椒盐噪声图像分割的量化比较

方法	Lena			Baboon			Peppers		
	时间(s)	阈值	PSNR (dB)	时间(s)	阈值	PSNR (dB)	时间(s)	阈值	PSNR (dB)
文献[2]方法	0.0335	116	15.2301	0.0351	126	14.6551	0.0344	103	15.5361
文献[4]方法	63.7181	116, 125	16.3271	64.1696	83, 90	4.5387	64.1003	117, 94	13.0513
文献[7]方法	1.0831	116, 125	16.3271	1.0939	83, 90	4.5387	1.1124	117, 94	13.0513
文献[9]方法	67.6014	117, 45	15.8469	67.3866	127, 65	14.8652	67.3595	102, 47	15.8789
文献[11]方法	1.0936	117, 45	15.8469	1.1007	127, 65	14.8652	1.0952	102, 47	15.8789
文献[12]方法	4.7974	117, 121	14.9302	5.4168	82, 90	4.5136	4.8468	114, 96	13.3590
文献[13]方法	1.0492	124, 114	12.6245	1.0477	79, 79	4.1493	1.0451	111, 89	12.1031
本文方法	0.4514	117	22.0956	0.4554	127	19.4652	0.4540	101	21.6423

表 3 各种 Otsu 法对不同 Peppers 噪声图像分割的量化比较

方法	高斯噪声			泊松噪声			乘性噪声		
	时间(s)	阈值	PSNR (dB)	时间(s)	阈值	PSNR (dB)	时间(s)	阈值	PSNR (dB)
文献[2]方法	0.0304	103	13.0440	0.0314	102	16.0104	0.0323	110	9.7359
文献[4]方法	62.7819	75, 133	9.4427	62.8397	132, 74	10.6777	62.8991	132, 74	10.5540
文献[7]方法	1.1064	75, 133	9.4427	1.1053	132, 74	10.6777	1.1068	132, 74	10.5540
文献[9]方法	62.8411	103, 34	11.9590	62.9818	102, 22	14.6483	62.7017	105, 52	10.7488
文献[11]方法	1.4114	103, 34	11.9590	1.4109	102, 22	14.6483	1.3946	105, 52	10.7488
文献[12]方法	5.5661	75, 134	9.4427	5.5888	127, 80	11.9757	5.7005	132, 74	10.5540
文献[13]方法	1.0797	79, 127	10.1939	1.0712	127, 74	10.6777	1.0702	112, 74	10.5463
本文方法	0.4764	102	14.9748	0.4758	102	16.5220	0.4774	102	13.1439

量；文献[9]方法分割质量稍好，且其快速实现(文献[11]方法)能提高分割速度，但是该方法没有对噪声

点进行处理，影响了分割质量；文献[12]方法用智能算法搜索阈值，缩短了搜索时间，但是不能确保每

次搜索都成功; 文献[13]方法通过缩小阈值搜索的范围, 提高了搜索速度, 但是属于近似搜索, 搜索结果作为文献[4]方法的近似值。本文方法由于对噪声点进行了转换, 且依靠1维Otsu法对其进行分割, 因此分割速度快、分割质量好。量化分析结果进一步验证了5.1节、5.2节的结论。

6 结论

在实际应用中, 图像中难免存在噪声干扰, 用1维Otsu法往往难以取得令人满意的效果。2维Otsu法虽然改善了算法的抗噪性, 但是由于直方图分割方式不合理, 且没有对噪声点进行转换, 故影响了图像分割的质量; 另一方面, 2维直方图的引入增加了算法的计算复杂度。

本文针对2维Otsu法存在的不足, 提出了一种改进的图像分割算法。该算法将噪声点的出现视为小概率事件, 对2维直方图进行斜分, 分割出目标象区和噪声区, 然后用噪声点的邻域平均灰度值代替其灰度值对其进行转换, 最后对转换结果图像用1维Otsu法进行分割。因此, 本文方法额外空间消耗小, 能取得比2维Otsu法更好的分割效果, 且具有1维Otsu法计算简单、易于多阈值扩展等优点。

参考文献

- [1] 郝颖明, 朱枫. 2维Otsu自适应阈值的快速算法[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(4): 484-488.
Hao Ying-ming and Zhu Feng. Fast algorithm for two-dimensional Otsu adaptive threshold algorithm[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2005, 10(4): 484-488.
 - [2] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE Transactions on System Man and Cybernetic*, 1979, 9(1): 62-66.
 - [3] 申铨京, 龙建武, 陈海鹏, 等. 三维直方图重建和降维的Otsu阈值分割算法[J]. 电子学报, 2011, 39(5): 1108-1114.
Shen Xuan-jing, Long Jian-wu, Chen Hai-peng, et al. Otsu thresholding algorithm based on rebuilding and dimension reduction of the 3-Dimensional histogram[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(5): 1108-1114.
 - [4] 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.
Liu Jian-zhuang and Li Wen-qing. Automatic thresholding of gray-level pictures using two-dimension Otsu method[J]. *Acta Automatica Sinica*, 1993, 19(1): 101-105.
 - [5] 张新明, 郑延斌. 二维直方图准分的Tsallis熵阈值分割速实现[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(8): 1796-1802.
Zhang Xin-ming and Zheng Yan-bin. Precise 2-D Tsallis entropy image threshold segmentation and its fast recursive realization[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(8): 1796-1802.
 - [6] 吴一全, 张晓杰, 吴诗嫻, 等. 二维直方图 θ -划分最小误差图像阈值分割[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(6): 892-899.
Wu Yi-quan, Zhang Xiao-jie, Wu Shi-hua, et al. Image thresholding based on 2-D histogram θ -division and minimum error[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2012, 46(6): 892-899.
 - [7] 汪海洋, 潘德炉, 夏德深. 二维Otsu自适应阈值选取算法的快速实现[J]. 自动化学报, 2007, 33(9): 968-971.
Wang Hai-yang, Pan De-lu, and Xia De-shen. A fast algorithm for two-dimensional Otsu adaptive threshold algorithm[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(9): 968-971.
 - [8] 郎咸朋, 朱枫, 郝颖明, 等. 基于积分图像的快速二维Otsu算法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(1): 39-43.
Lang Xian-peng, Zhu Feng, Hao Ying-ming, et al. Fast two-dimensional Otsu algorithm based on integral image[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(1): 39-43.
 - [9] Chen Yu, Chen Dian-ren, Li Yang, et al. Otsu's thresholding method based on gray level-gradient two-dimensional histogram[C]. 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Wuhan, 2010: 282-285.
 - [10] 吴宏镔, 梁瑛. 小概率事件原理的一点补充[J]. 高等数学研究, 2009, 12(1): 84-85.
Wu Hong-e and Liang Ying. Some complementarity for small probability event principle[J]. *Studies In College Mathematics*, 2009, 12(1): 84-85.
 - [11] Chen Yu, Chen Dian-ren, Yang Xu, et al. Fast two-dimensional Otsu's thresholding method based on integral image[C]. International Conference on Multimedia Technology, Ningbo, 2010: 1-4.
 - [12] 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.
Huang Gang, Li Jun, and Pan Jin-gui. A fast 2D Otsu image segmentation algorithm based on particle swarm optimization algorithm[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, 16(3): 377-381.
 - [13] 徐长新, 彭国华. 二维Otsu阈值法的快速算法[J]. 计算机应用, 2012, 32(5): 1258-1260.
Xu Chang-xin and Peng Guo-hua. Fast algorithm for 2D Otsu thresholding algorithm[J]. *Journal of Computer Applications*, 2012, 32(5): 1258-1260.
 - [14] Horng M. Multilevel thresholding selection based on the artificial bee colony algorithm for image segmentation[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(11): 13785-13791.
- 范朝冬: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为图像处理、智能信息处理等。
欧阳红林: 男, 1965年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能信息处理、新型电力电子技术及其应用、电力传动与变频技术等。
张英杰: 男, 1970年生, 副教授, 研究方向为智能控制、节能减排过程控制等。