

## 基于空间截面投影的 Otsu 图像分割算法

范朝冬<sup>1</sup>, 欧阳红林<sup>1</sup>, 肖乐意<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 长沙师范学院 教务处, 湖南 长沙 410100)

**摘 要:** 针对传统三维 Otsu 法存在抗噪性差、计算复杂度高、难以多阈值扩展等不足, 提出了一种基于空间截面投影的 Otsu 法。该方法采用垂直于主对角线的平面截三维直方图, 并将截面内的点投影到主对角线上, 进而建立一维的截面投影直方图以降低计算复杂度, 然后基于该一维直方图进行 Otsu 分割; 对于分割结果, 运用基于阈值的后处理策略做进一步的处理以增强算法的抗噪性。实验结果表明, 与现有三维 Otsu 法相比, 该算法计算效率高、抗噪性好, 能对含不同噪声的图像进行较好的分割。

**关键词:** 图像分割; 阈值选取; 最大类间方差; 三维 Otsu 法; 后处理策略

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)05-0070-09

## Otsu thresholding method based on projection of cross section for image segmentation

FAN Chao-dong<sup>1</sup>, OUYANG Hong-lin<sup>1</sup>, XIAO Le-yi<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Office of Academic Affairs, Changsha Normal University, Changsha 410100, China)

**Abstract:** Due to the disadvantages existing in the conventional three-dimensional Otsu (3D Otsu) method, such as poor anti-noise capability, high computational complexity and difficulty to extend to multilevel thresholding, a new Otsu thresholding method based on projection of cross section was proposed. A plane perpendicular to the main diagonal is used to cross the 3D histogram. Then the projections to the main diagonal from the points in the cross section, are used to establish a new histogram. Based on the histogram, the image can be segmented by 1D Otsu. In order to further enhance the anti-noise capability, the post-processing strategy based on threshold is applied to the processed image. The experimental result shows that this method has significant improvements in computational efficiency and anti-noise capability, and can segment the images corrupted with different noises well.

**Key words:** image segmentation; threshold selection; maximum between-class variance; 3D Otsu's method; post-processing strategy

### 1 引言

图像分割是计算机视觉领域内的一项关键技术, 在图像处理与分析间起着重要的桥梁作用<sup>[1]</sup>。在众多的分割方法中, 阈值分割法因其简单、有效而被广泛应用于图像处理领域<sup>[2-7]</sup>。常用的阈值法主要有最大类间方差法(简称 Otsu 法)<sup>[2]</sup>、最大熵法<sup>[6]</sup>、最小交叉熵法<sup>[7]</sup>等。其中日本学者大津展之提出的

Otsu 法因有模式识别的相关理论为基础且图像分割性能良好, 而逐渐成为一种最为流行的阈值分割技术<sup>[8]</sup>。由于一维 Otsu 法仅考虑了像素的灰度信息而未考虑像素间的空间相关性, 故当图像包含噪声时, 一维 Otsu 法的分割效果不佳。对此, 刘健庄<sup>[9]</sup>等提出了二维 Otsu 法, 该方法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 法的抗噪性。景晓军<sup>[10]</sup>等在二维 Otsu 法的基础上

收稿日期: 2014-01-10; 修回日期: 2014-03-09

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划重点基金资助项目(2012BAZ02072); 湖南省自然科学基金资助项目(13JJA002)

**Foundation Items:** The National Key Technology R&D Program in the 12th Five Year Plan of China (2012BAZ02072); The Natural Science Foundation of Hunan Province (13JJA002)

进一步引入了邻域中值灰度，并由此提出了三维 Otsu 法，该算法能更好地对低信噪比图像进行分割。

三维 Otsu 法虽然提高了算法的抗噪能力，但却大大增加了算法的运算量，严重影响了算法的效率。范九伦<sup>[11]</sup>等提出的快速递推法虽提高了运算效率，却要以消耗大量的额外空间为代价。Puthipon<sup>[12]</sup>提出的等效三维 Otsu 法虽提高了算法效率且无需额外的空间消耗，但因按照传统的三维直方图划分方式，仅考虑对角线附近的 2 个长方体区域而忽略了其他区域，往往造成分割不准确。此外，由于未对目标和背景区域的噪声进行任何处理，当噪声干扰严重时，三维 Otsu 的分割效果仍不够理想。

对此，受二维直方图斜分法的启示<sup>[13,14]</sup>，本文采用平面对三维直方图进行划分，并将截面内的点向主对角线进行投影，把三维直方图转换成一维直方图，从而提高计算效率；计算阈值时考虑了整个直方图区域，并且采用了一种基于阈值的后处理策略对分割结果进行处理，进一步改善了算法的分割效果。实验结果表明，与现有的三维 Otsu 法相比，本文方法不仅计算效率高，而且抗噪性能更稳健。

## 2 三维 Otsu 法

对于尺寸为  $M \times N$ ，灰度级为  $L$  的图像，设像素  $(x, y)$  的灰度值为  $f(x, y)$ ，则该像素  $k \times k$  邻域的均值灰度  $g(x, y)$  和中值灰度  $h(x, y)$  可分别定义如下<sup>[8]</sup>

$$g(x, y) = \frac{1}{k^2} \sum_{m=-k/2}^{k/2} \sum_{n=-k/2}^{k/2} f(x+m, y+n) \quad (1)$$

$$h(x, y) = \text{med}\{f(x+m, y+n), m = -k/2, \dots, k/2; n = -k/2, \dots, k/2\} \quad (2)$$

由  $g(x, y)$  及  $h(x, y)$  的定义可知，像素的邻域均值灰度和邻域中值灰度的灰度级也为  $L$ 。定义  $f(x, y)$ 、 $g(x, y)$ 、 $h(x, y)$  形成的三元组  $(i, j, k)$  为一个三维直方图，则该直方图定义在一大大小为  $L \times L \times L$  的正方

体区域内，其 3 个坐标分别表示像素的灰度值、邻域均值灰度值和邻域中值灰度值。直方图中任一点的值记为  $p_{ijk}$ ， $p_{ijk}$  定义为

$$p_{ijk} = \frac{c_{ijk}}{M \times N} \quad (3)$$

其中， $c_{ijk}$  为  $(i, j, k)$  出现的频数， $0 \leq i, j, k \leq L-1$ ，

$$\text{且 } \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{L-1} p_{ijk} = 1。$$

传统三维 Otsu 法将直方图划分成如图 1 所示的 8 个区域。因目标和背景内部的像素间存在很强的相关性，故像素的灰度值、邻域均值灰度、邻域中值灰度三者非常接近；而位于目标与背景边界附近的像素，上述 3 个数值存在明显差异<sup>[11]</sup>。基于上述认识，传统三维 Otsu 法分别将区域 0、区域 1 视为目标和背景，而将区域 2~7 视为边缘和噪声。由于边界附近的像素数通常很少，故传统三维 Otsu 法假设区域 2~7 上的所有  $p_{ijk} \approx 0$ 。传统三维 Otsu 法采用如下的距离测度函数确定最佳阈值<sup>[10]</sup>

$$t_r \sigma_B(s, t, q) = \frac{[w_0(s, t, q)\mu_{Ti} - \mu_i(s, t, q)]^2}{w_0(s, t, q)(1 - w_0(s, t, q))} + \frac{[w_0(s, t, q)\mu_{Tj} - \mu_j(s, t, q)]^2}{w_0(s, t, q)(1 - w_0(s, t, q))} + \frac{[w_0(s, t, q)\mu_{Tk} - \mu_k(s, t, q)]^2}{w_0(s, t, q)(1 - w_0(s, t, q))} \quad (4)$$

其中， $w_0(s, t, q)$ 、 $\mu_{Ti}$ 、 $\mu_{Tj}$ 、 $\mu_{Tk}$ 、 $\mu_i(s, t, q)$ 、 $\mu_j(s, t, q)$ 、 $\mu_k(s, t, q)$  的含义及计算方式见文献[10]。

使得式(4)取得最大值的阈值  $(s_0, t_0, q_0)$  即为最佳阈值，即

$$(s_0, t_0, q_0) = \text{Arg} \max_{\substack{0 \leq s \leq L-1 \\ 0 \leq t \leq L-1 \\ 0 \leq q \leq L-1}} t_r \sigma_B(s, t, q) \quad (5)$$

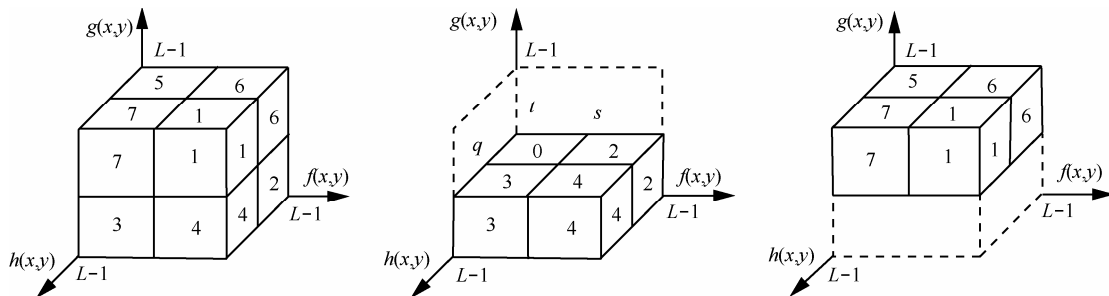


图 1 传统三维直方图区域划分

### 3 本文方法

传统三维 Otsu 法虽然增强了二维 Otsu 法的抗噪性,但是仍然存在以下几点不足:1)与二维 Otsu 法类似<sup>[13]</sup>,仅考虑了主对角线附近 0、1 两个区域,而假设区域 2~7 中的概率为 0,这与实际不符,往往造成分割不准确;2)阈值维数的增加虽能改善分割效果,但却增加了算法的运算量,严重影响了算法的效率;3)由式(4)可知,三维 Otsu 法的计算公式较为复杂,难以扩展到多阈值的情况;4)算法抗噪性不足,有待进一步增强。尽管传统三维 Otsu 法忽略了区域 2~7 中的噪声,但是区域 0、1 中通常也包含噪声,算法并未对其做进一步处理,从而影响了算法的分割效果。可见,传统三维 Otsu 法虽然同时考虑了邻域均值和中值灰度,但是计算公式复杂、抗噪性不足,故有必要对其进行改进以提高算法计算效率、增强抗噪性。

#### 3.1 基于截面投影的 Otsu 法

为了解决传统三维 Otsu 法分割不准确、运算效率低及难以多阈值扩展等问题,本文提出了截面投影直方图,并以此为基础建立了新的 Otsu 分割算法。如图 2 所示,设  $(x, y, z)$  为像素的灰度、邻域均值灰度及邻域中值灰度组成的三元组,则  $x+y+z=K$  表示三维直方图中与主对角线垂直且截距为  $K$  的空间平面。受二维直方图斜分法的启示,用平面  $x+y+z=K$  将三维直方图分割为目标和背景两部分,因区域  $x+y+z \leq K$  的灰度值较小,往往被其视为目标区,而区域  $x+y+z > K$  则通常被视为背景区。由于该划分方式考虑了整个直方图区域,避免了传统划分方式近似假设造成的不合理性。由图 2 可知,如将截距  $K$  作为阈值,则阈值搜索区域为  $0 \sim 3(L-1)$ ;为了进一步缩小阈值搜索区域,本文建立了截面投影直方图。

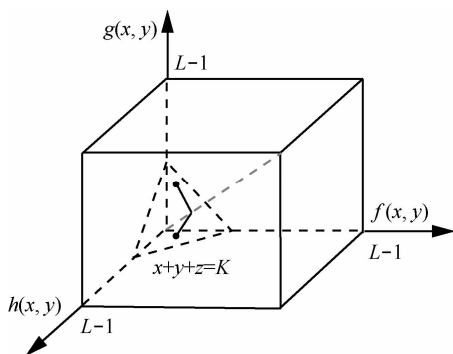


图 2 截面投影

**定义 1** 以三维直方图的主对角线为横坐标,截面内像素投影点的频率为纵坐标建立的直方图,称为截面投影直方图。设截面投影直方图的坐标系为  $X'OY'$ ,则平面  $x+y+z=K$  内所有点到主对角线的投影为  $K' = \frac{x+y+z}{\sqrt{3}}$ ,符合  $K' = \frac{x+y+z}{\sqrt{3}}$  的像素的概率密度为

$$P_r = \sum_{K' = \frac{x+y+z}{\sqrt{3}}} P_{xyz} = \frac{f_{K'}}{M \times N},$$

$$K' = 0, 1, \dots, \sqrt{3}(L-1) \quad (6)$$

其中,  $f_K$  表示截面内所有像素到主对角线的投影数(即截面  $x+y+z=K$  内的像素数量)。

图 3 为含噪声的 Lena 图像及其对应的空间截面投影直方图。截面投影直方图建立后,便可依据 Otsu 准则<sup>[2]</sup>建立新的类间方差公式:

$$\sigma_B^2(T) = P_0(T) [\mu_0(T) - \mu_T]^2 +$$

$$P_1(T) [\mu_1(T) - \mu_T]^2$$

$$= P_0(T) [1 - P_0(T)] [\mu_0(T) - \mu_1(T)]^2 \quad (7)$$

其中,  $P_0(T) = \sum_{r=0}^T P_r, P_1(T) = \sum_{r=T+1}^{\sqrt{3}(L-1)} P_r,$

$$\mu_0(T) = \frac{\sum_{r=0}^T r P_r}{P_0(T)}, \mu_1(T) = \frac{\sum_{r=T+1}^{\sqrt{3}(L-1)} r P_r}{1 - P_0(T)},$$

$$\mu_T = \sum_{r=0}^{\sqrt{3}(L-1)} r P_r$$

使得式(7)取得最大值的阈值  $T^*$  即为最佳阈值,即

$$T^* = \text{Arg} \max_{0 \leq T \leq \sqrt{3}(L-1)} \sigma_B^2(T) \quad (8)$$

由式(8)和图 3(b)可知:基于截面投影的 Otsu 法是依据一维直方图选取最佳阈值,阈值搜索空间为  $\sqrt{3}L$ ,故其计算复杂度为  $O(\sqrt{3}L)$ 。而传统三维 Otsu 法的计算复杂度为  $O(L^3)$ <sup>[11]</sup>,基于分解的三维 Otsu 法的计算复杂度为  $O(3L)$ <sup>[12]</sup>,可见本文基于截面投影的 Otsu 法明显降低了算法的计算复杂度;此外,由基于截面投影的 Otsu 法的计算过程可知,该方法无需额外的空间消耗。

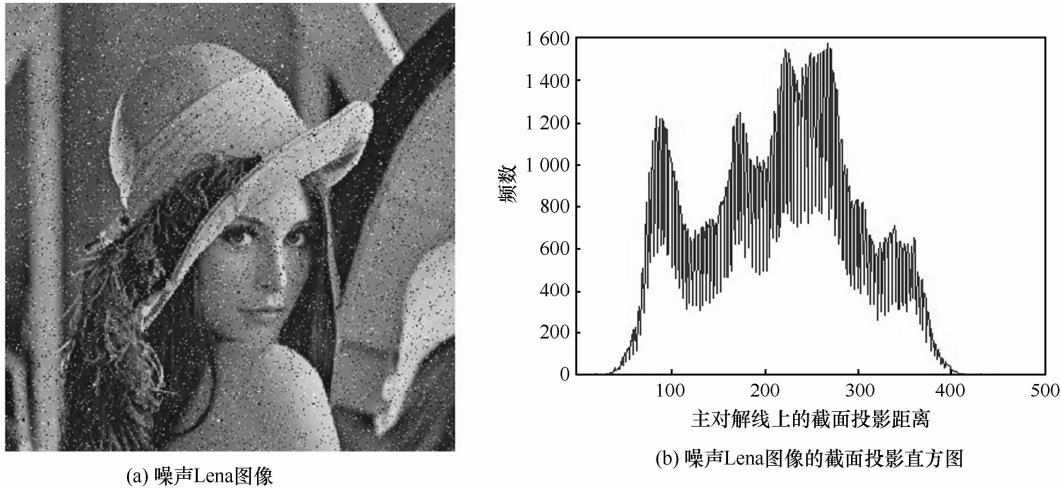


图 3 噪声 Lena 图像及其截面投影直方图

### 3.2 基于阈值的后处理策略

由前文分析可知,传统三维 Otsu 法仍然存在抗噪性不足等问题。对此,本文提出了一种基于阈值的后处理策略。该方法将二值图中的噪声点进行重新归类,从而增强算法的抗噪性,提高算法的分割质量。后处理策略通常基于像素的邻域信息,依据邻域内像素的归属情况对像素的类属情况进行判断。故首先需要对像素及其邻域信息进行讨论:1) 像素与其邻域内的所有像素属于同一类(同为目标或者背景像素),则可认为该像素不为噪声,无需对其进行处理;2) 像素与其邻域内的像素分属不同的类(像素属于目标,其邻域内包含属于背景的像素;或像素属于背景,其邻域内包含属于目标的像素)。像素与其邻域内的像素分属不同类的情况大致可分为图 4 所示的 3 类(边沿像素同时为噪声的情况较为复杂且概率较小,对整幅图的影响可忽略,故本文暂不考虑):①像素与其邻域内的所有像素归类均不相同,即像素属于背景(或目标)而邻域内的所有像素属于目标(或背景);②像素与其邻域内的部分像素归类相同,且该邻域内与像素归类相同与不同的像素数较为接近,如图 4(b)中的边沿点属于背景,其 8-邻域内属于背景的像素数为 5,属于目标的像素数为 3;③像素与其邻域内的部分像素归类相同,但其邻域内与该像素归类相同的像素数远多于与其归类不同的像素数,如图 4(c)所示,当噪声污染严重时,可能出现相邻两像素均为噪声的情况。

针对上述情况,本文给出 2 条后处理措施:1) 如图 4(a)、图 4(c)所示,如某像素邻域内的绝大多数像素属于同一类,则可认为该像素为噪声,将其

归为邻域内绝大多数像素所属的那一类;2) 如图 4(b)所示,像素邻域内分属目标和背景的像素数较为接近,此时该像素为边沿像素的可能性较大,故应保持其归类不变。所以,判断像素如何归类的关键是确定一个阈值  $Q$  (通常取  $Q \in [0.5, 1.0]$ ), 通过判断其邻域内属于目标(或背景)的像素点含量是否大于  $Q$  对其进行归类。对于一幅大小为  $M \times N$  的二值图,后处理操作的具体过程如下。

**step1** 设定阈值  $Q$  的取值。

**step2** 对于当前像素  $(x, y)$ , 统计其 8-邻域内分别属于目标的像素含量  $P_O$  和属于背景的像素含量  $P_B$ , 计算过程为

$$P_O = \frac{n_O}{n_O + n_B} = \frac{n_O}{8} \quad (9)$$

$$P_B = \frac{n_B}{n_O + n_B} = \frac{n_B}{8} = 1 - P_O \quad (10)$$

其中,  $n_O$ 、 $n_B$  分别为像素  $(x, y)$  的 8-邻域内属于目标和背景的像素数量。

**step3** 通过比较  $P_O$ 、 $P_B$  与  $Q$  的大小, 决定对像素  $(x, y)$  进行何种后处理操作。具体如下:1)  $P_O > Q$  表明像素  $(x, y)$  邻域内的绝大部分像素都属于目标, 此时将像素  $(x, y)$  也归为目标;2) 同理, 当  $P_B > Q$  时, 将像素  $(x, y)$  归为背景;3) 如 1)、2) 均不满足, 则说明像素  $(x, y)$  邻域内分属目标和背景的像素数较为接近, 像素  $(x, y)$  为边沿的可能性较大, 此时保持像素  $(x, y)$  在二值图的归类不变。

**step4** 判断是否已对二值图中的所有像素进行处理。如尚未处理完, 则返回 step2; 否则, 输出

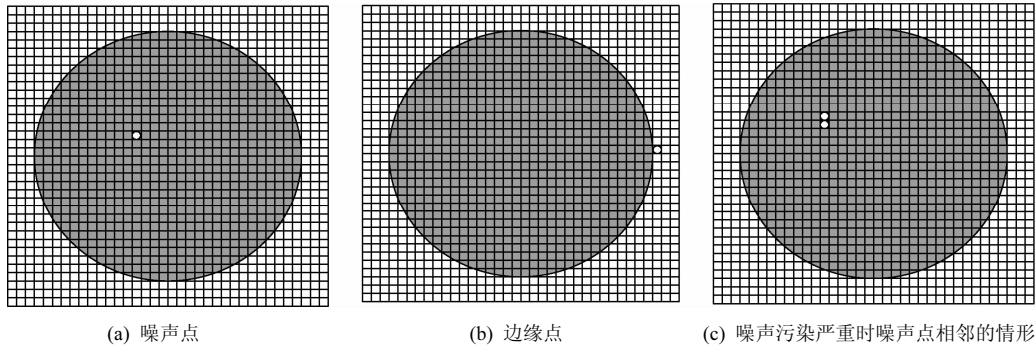


图 4 像素与其邻域内的像素属于不同类的情况

处理结果。

### 4 测试实验及讨论

为测试截面投影 Otsu 法的分割性能, 本文进行了以下 3 组实验: 1) 后处理策略中阈值  $Q$  的取值讨论, 分析阈值  $Q$  的合理取值; 2) 算法分割性能的定性分析, 从视觉角度对各种算法的分割效果进行比较; 3) 算法分割性能的量化比较, 从数值量化指标上验证算法的性能。实验选用南加州大学信号与图像处理研究所的 The USC-SIPI Image Database<sup>[15]</sup>作为测试对象, 实验运行的硬件为: Pentium (R) 2.7 GHz 的 CPU, 2 G 内存, 编程语言为 MATLAB R2009b。

为量化比较各算法的分割效果, 采用区域一致性和错分率对算法的分割效果进行评价, 区域一致性一般通过区域内的特征方差来衡量, 其计算公式为<sup>[5, 16]</sup>

$$U = 1 - \frac{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_m^2)}{C} \quad (11)$$

其中,  $\sigma_i^2 = \sum_{(x,y) \in R_i} \frac{[f(x,y) - \mu_i]^2}{A_i}$ ,  $\mu_i = \frac{\sum_{(x,y) \in R_i} f(x,y)}{A_i}$ ,

$m$ 、 $A_i$ 、 $C$  分别为图像分割的区域数, 区域  $R_i$  内的像素点数及图像的总像素点数。由式(11)可知, 区

域一致性的值越接近 1, 则区域一致性越好, 分割质量越高。

图像的分割过程可视为像素点的分类过程, 因此像素的错分率能较好的反映算法分割的准确性, 错分率定义为<sup>[17]</sup>

$$ME = 1 - \frac{|I_1 \cap \hat{I}_1| + |I_2 \cap \hat{I}_2| + \dots + |I_n \cap \hat{I}_n|}{I} \quad (12)$$

其中,  $I$  表示理想的图像分割结果,  $\hat{I}_i$  表示分割算法得到的第  $i$  类集合,  $|\bullet|$  表示集合  $\bullet$  的势。式(12)表明: 错分率越接近 0, 算法分割结果与理想分割越接近, 分割效果越好。

#### 4.1 后处理策略中阈值 $Q$ 的取值分析

由 3.2 节可知, 阈值  $Q$  的取值将直接影响算法的后处理效果, 进而对算法的分割性能造成影响。为了分析阈值  $Q$  的不同取值对算法分割效果的影响, 本节选用图 4(a)所示含噪声的 Lena 图像作为测试对象, 分别对  $Q=0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$  时截面投影 Otsu 法的分割效果进行比较, 比较结果如图 5 所示。由图中方形标志部分可知, 当  $Q=0.5, 0.6$  时细节内容被误分的可能性较大, 造成了图像细节信息的丢失; 而由图中圆形标志部分可知, 随着阈值  $Q$  的逐渐增大, 图像的细节被更好地保持, 但算法的抗噪性逐渐减弱; 通过比较可知, 当  $Q$  取 0.7 左右时, 算法既能较好的保持图像的细节, 同时又具

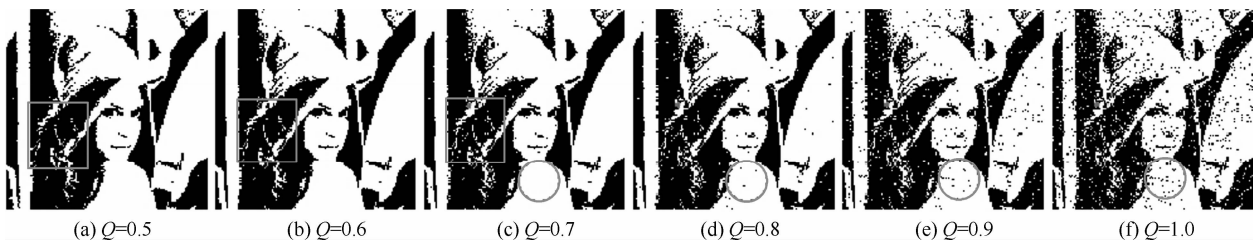


图 5 阈值  $Q$  取不同值对分割效果的影响

备较好的抗噪性。

为了进一步分析  $Q$  的合理取值,用区域一致性和错分率两项指标对 The USC-SIPI Image Database 中的所有图像(共 215 幅)在  $Q$  分别取 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 时的不同情况进行了测试,并将所有图像的测试结果取均值,然后用最小二乘法对其进行拟合。当  $Q=0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$  时,区域一致性和错分率的二次拟合方程分别如式(13)、式(14)所示,其对应的拟合曲线分别如图 6、图 7 所示。

$$f_1(x) = -0.0151x^2 + 0.0209x + 0.9836 \quad (13)$$

$$f_2(x) = 0.2213x^2 - 0.3247x + 0.2088 \quad (14)$$

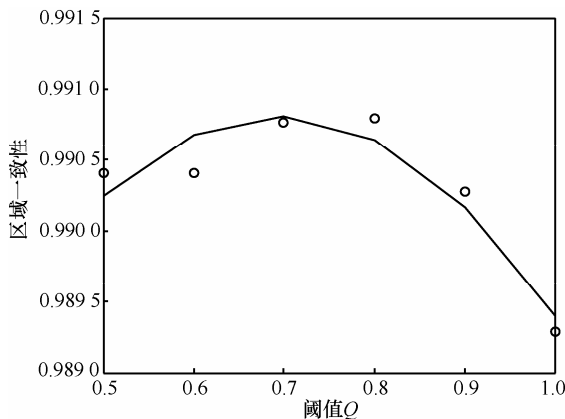


图 6  $Q$  取不同值时,区域一致性的拟合曲线

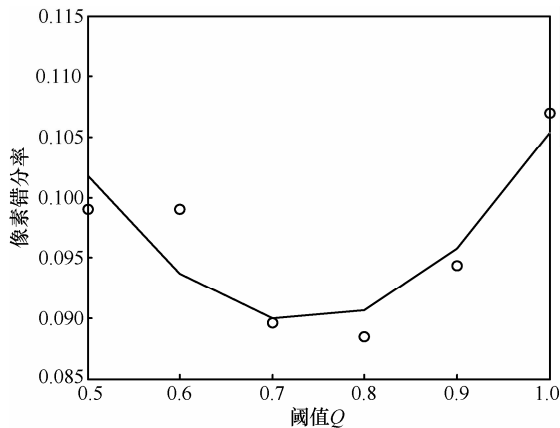


图 7  $Q$  取不同值时,错分率的拟合曲线

由拟合结果可知:当  $Q$  分别取 0.692 1 和 0.733 6 时,区域一致性和错分率分别取得最大和最小值; $Q$  取值过大或过小均会影响区域一致性和错分率的值,即影响算法的分割效果。拟合结果与前文分析基本一致,故在后续的所有实验中取  $Q = \frac{0.6921+0.7336}{2} = 0.7129$ 。

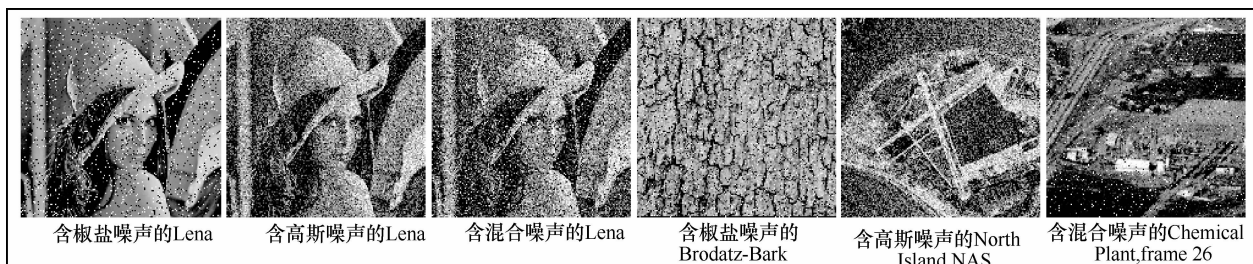
### 4.2 各三维 Otsu 法的分割效果比较

为了测试截面投影 Otsu 法的性能,将其分别对图 8(a)所示含椒盐噪声、高斯噪声及(高斯—椒盐)混合噪声的 Lena 图像,含椒盐噪声的 Brodatz-Bark 图像,含高斯噪声的 San Diego (Miramar NAS)图像及含(高斯-椒盐)混合噪声的 Chemical Plant, frame 26 图像进行分割,并将其结果与文献[10]的传统三维 Otsu 法、文献[11]的快速三维 Otsu 法及文献[12]的基于分解的三维 Otsu 法进行比较。由于文献[11]的快速三维 Otsu 法仅是文献[10]传统三维 Otsu 法的快速实现,其分割原理完全相同,故其分割效果一致。由图 8(b)和图 8(c)可知,基于分解的三维 Otsu 法的分割效果稍好于传统三维 Otsu 法,这是由于传统三维 Otsu 法假设直方图中离主对角线较远区域的概率为 0,以近似计算选取最佳阈值,造成了分割的不准确。由图 8(d)可知,截面投影 Otsu 法取得了最好的能割效果,这是由于该方法采用的截面投影直方图考虑了所有像素,避免了传统三维直方图的不足;且对分割后的二值图进行了后处理操作,提高了像素分割的准确性。可见,截面投影 Otsu 法对含不同噪声类型的图像均能取得较好的分割效果,故该方法具备较好的普遍适用性。

为了测试截面投影 Otsu 法的抗噪稳健性,选用图 9(a)所示含不同强度椒盐噪声的 House 图像及含不同方差高斯噪声的 Cameraman 图像作为测试对象。其中,House 图像所含椒盐噪声的强度和 Cameraman 图像所含高斯噪声的方差依次分别为 0.02、0.04、0.06。由 9(b)和图 9(c)可知,传统三维 Otsu 法与基于分解的三维 Otsu 法的分割效果相近,但基于分解的三维 Otsu 法的分割效果总体上略好于传统三维 Otsu 法;且随着噪声的增强,基于分解的三维 Otsu 法抗噪更为稳健。由图 9(d)可知,与传统三维 Otsu 法和基于分解的三维 Otsu 法相比,截面投影 Otsu 法取得了更好的分割效果;且随着噪声强度的增大,其分割效果未产生明显变化,故该算法具备较好的抗噪稳健性。由上述分析可知,截面投影 Otsu 法在不同类型和不同强度的噪声干扰下均能取得较好的分割效果。

### 4.3 分割性能的量化比较

以上从视觉方面对截面投影 Otsu 法进行了分析,为了进一步从量化指标上对其性能进行评价,选择区域一致性、错分率和计算时间 3 项指标对各种算法的分割性能进行量化比较。其中,区域一致



(a) 含不同噪声的Lena、含椒盐噪声的Brodatz-Bark、含高斯噪声的North Island NAS 及含混合噪声的Chemical Plant,frame 26图像



(b) 传统及快速三维Otsu法的分割结果



(c) 基于分解的三维Otsu法的分割结果



(d) 基于截面投影的Otsu法的分割结果

图 8 各算法对含不同噪声类型的图像的分割效果比较

性主要评价各算法分割的质量，错分率主要考查各算法分割的准确性，而计算时间则主要衡量各算法的分割效率。

为免篇幅过长同时又能说明问题，仅将图 8(a)中含不同噪声的 Lena 图像作为测试对象，为突现算法的性能，增加分别经过中值滤波和均值滤波处理的 Otsu 法作为比较对象，比较结果如表 1 所示。由表 1 可知：因快速三维 Otsu 法仅是传统三维 Otsu 法的快速实现，二者分割效果一致，但快速三维 Otsu 法的运算效率远高于传统三维 Otsu 法；基于分解的三维 Otsu 法避免了传统方法中的近似计算，提高了分割精度，改善了分割质量，且其计算复杂

度降为  $O(3L)$ ，计算效率得以明显提升。中值滤波 Otsu 法和均值滤波 Otsu 法因分别预先对图像进行了中值滤波和均值滤波处理，故其分割效果较好；但由于中值滤波适合于处理椒盐噪声，而均值滤波适合于处理高斯噪声，因此，它们往往对仅某种噪声表现出良好的效果，而不具备处理多种噪声的能力；由于无需同时计算图像像素的邻域中值和邻域均值，故其计算效率比三维 Otsu 法高。截面投影 Otsu 法因采用空间截面投影直方图，考虑了图像的所有像素，提高了算法分割的准确性；通过采用基于阈值的后处理策略进一步纠正了像素的错分，改善了图像分割的质量，对不同类型的噪声图像均能



图 9 各算法对含不同噪声强度的图像的分割效果比较

表 1 各种三维 Otsu 法对含不同噪声 Lena 图像的分割性能比较

分割算法	含椒盐噪声的 Lena			含高斯噪声的 Lena			含混合噪声的 Lena		
	区域一致性	错分率	时间/s	区域一致性	错分率	时间/s	区域一致性	错分率	时间/s
传统三维 Otsu 法	0.973 3	0.054 6	203.721 3	0.944 5	0.126 4	203.931 6	0.921 1	0.200 8	203.740 2
快速三维 Otsu 法	0.973 3	0.054 6	17.790 6	0.944 5	0.126 4	18.038 4	0.921 1	0.200 8	17.968 1
基于分解的三维 Otsu 法	0.981 1	0.050 9	4.003 8	0.949 3	0.125 5	4.043 1	0.939 7	0.152 3	4.037 4
中值滤波 Otsu 法	0.991 1	0.017 7	1.861 4	0.952 7	0.104 5	1.868 1	0.947 0	0.121 0	1.869 7
均值滤波 Otsu 法	0.958 4	0.090 1	1.021 7	0.959 3	0.088 2	1.039 7	0.946 1	0.123 8	1.034 2
基于截面投影的 Otsu 法	0.984 0	0.031 7	2.770 8	0.960 1	0.086 2	2.788 7	0.953 1	0.104 8	2.782 9

取得较好的分割效果; 因其计算复杂度仅为  $O(\sqrt{3}L)$ , 故与现有三维 Otsu 法相比, 其运算效率较高, 但因需同时计算图像像素的邻域中值和邻域均值, 其计算效率比中值滤波和均值滤波 Otsu 法低。由于实际应用中往往无法预先知道图像是否含有噪声以及所含有的噪声为何种类型, 故难以确定进行何种滤波较为合适; 且如果图像不含噪声, 却盲目地进行滤波处理, 反而容易造成图像信息的丢失。因此, 综合考虑各算法的运算效率和分割效果, 截面投影 Otsu 法是一种相对较好的选择。各算法的量化比较结果从量化指标上进一步说明了截面投影 Otsu 法的有效性。

## 5 结束语

针对传统三维 Otsu 法存在像素错分率高、抗噪性差、计算效率低及难以多阈值扩展等不足, 本文提出了一种基于空间截面投影的 Otsu 法。该方法采用一维截面投影直方图并基于该直方图建立了相应的 Otsu 准则, 避免了传统方法中的近似计算, 提高了图像分割的准确性并使算法复杂度降低为  $O(\sqrt{3}L)$ ; 为进一步提高分割精度, 改善分割效果, 本文提出了基于阈值的后处理策略。通过对阈值  $Q$  的取值进行讨论, 大致确定了阈值  $Q$  的合理取值。将截面投影 Otsu 法与传统三维 Otsu 法及基于分解的三维 Otsu 法进行了定性和定量比较, 定性分析表明截面投影 Otsu 法对含不同噪声类型及不同噪声强度的图像均能取得较好的分割效果, 说明该算法具备较强的抗噪性和抗噪顽健性; 定量分析则从量化指标上对该算法的分割效果和计算效率进行了验证。定性和定量分析充分说明了截面投影 Otsu 法是一种分割精度高、抗噪性强、分割效果好、运算效率高的图像分割算法, 有望应用于噪声干扰严重及时间方面要求较高的系统, 表现出重要的研究价值和广阔应用前景。

## 参考文献:

- [1] 李伟斌, 高二, 宋松和. 一种全局最小化的图像分割方法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(4): 791-796.  
LI W B, GAO E, SONG S H. A global minimization method for image segmentation[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(4): 791-796.
- [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] 岳峰, 左旺孟, 王宽全. 基于分解的灰度图像二维阈值选取算法[J]. 自动化学报, 2009, 35(7): 1022-1027.
- [4] YUE F, ZUO W M, WANG K Q. Decomposition based two-dimensional threshold algorithm for gray images[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(7): 1022-1027.
- [5] 吴一全, 张金矿. 二维直方图  $\theta$  划分最大 Shannon 熵图像阈值分割[J]. 物理学报, 2010, 59(8): 5487-5495.  
WU Y Q, ZHANG J K. Image thresholding based on  $\theta$ -division of 2-D histogram and maximum Shannon entropy[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(8): 5487-5495.
- [6] HEN Q, ZHAO L, LU J, et al. Modified two-dimensional Otsu image segmentation algorithm and fast realization[J]. IET Image Processing, 2012, 6(4): 426-433.
- [7] 阿里木·赛买提, 杜培军, 柳思聪. 基于人工蜂群优化的二维最大熵图像分割[J]. 计算机工程, 2012, 38(9): 223-243.  
ALIM S, DU P J, LIU S C. Maximum 2D entropy image segmentation based on artificial bee colony optimization[J]. Computer Engineering, 2012, 38(9): 223-243.
- [8] HORNG M H, LIOU R J. Multilevel minimum cross entropy threshold selection based on the firefly algorithm[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(12): 14805-14811.
- [9] GAO H, KWONG S, YANG J J, et al. Particle swarm optimization based on intermediate disturbance strategy algorithm and its application in multi-threshold image segmentation[J]. Information Sciences, 2013, 250(20): 82-112.
- [10] 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 J Z, LI W Q. Automatic thresholding of gray-level pictures using two-dimension Otsu method[J]. Acta Automatica Sinica, 1993, 19(1): 101-105.
- [11] 景晓军, 李剑峰, 刘郁林. 一种基于三维最大类间方差的图像分割算法[J]. 电子学报, 2003, 31(9): 1281-1285.  
JING X J, LI J F, LIU Y L. Image segmentation based on 3-D maximum between-cluster variance[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(9): 1281-1285.
- [12] 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.  
FAN J L, ZHAO F, ZHANG X F. Recursive algorithm for three-dimensional Otsu's thresholding segmentation method[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(7): 1398-1402.
- [13] STHITPATTANAPONGSA P, SRINARK T. An equivalent 3D Otsu's thresholding method[A]. The 5th Pacific Rim Symposium on Image and Video Technology[C]. 2011. 358-369.
- [14] 吴一全, 吴文怡, 潘喆. 基于二维直方图斜分的最小类内方差阈值分割[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(12): 2651-2657.  
WU Y Q, WU W Y, PAN Z. Minimum within-class variance thresholding based on two-dimensional histogram oblique segmentation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(12): 2651-2657.
- [15] 张新明, 李振云, 孙印杰. 快速二维直方图斜分最小误差的图像阈值分割[J]. 电光与控制, 2012, 19(6): 8-12.  
ZHANG X M, LI Z Y, SUN Y J. Fast image thresholding with minimum error based on 2-D oblique segmentation[J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(6): 8-12.
- [16] The USC-SIPI image database[EB/OL]. <http://sipi.usc.edu/database/>, 2014.

密钥比特。因为攻击依赖于每次 $kP$ 运算过程中的不变量 $P$ ，本文中提出的方法适用于基于从左至右方式实现的各种 ECC 标量乘算法。实验结果表明，本文中的方法对多种 ECC 算法软硬件实现均有效。

### 参考文献:

- [1] KOCHER P, JAFFE J, JUN B. Timing attacks on implementations of Diffie-Hellman, RSA, DSS, and other systems[A]. Proceedings of 16th International Advances in Cryptology Conference-CRYPTO '96[C]. 1996.104-113.
- [2] YENS M, LIEN W C, MOONS J, *et al.* Power analysis by exploiting chosen message and internal collisions-vulnerability of checking mechanism for RSA decryption[A]. MYCRYPT 2005[C]. 2005. 183-195.
- [3] MIYAMOTO A, HOMMA N, AOKI T, *et al.* Enhanced power analysis attack using chosen message against RSA hardware implementations[A]. IEEE International Conference on Field Programmable Logic and Applications[C]. 2008.3282-3285.
- [4] HOMMA N, MIYAMOTO A, AOKI T, *et al.* Comparative power analysis of modular exponentiation algorithms[J]. IEEE Transaction on Computers, 2010.795-807.
- [5] YENSM, LIEN W C, CHEN C N. Modified doubling attack by exploiting chosen ciphertext of small order[A]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences[C]. 2011.1981-1990.
- [6] FAN J, GIERLICH B, VERCAUTEREN F. To infinity and beyond: combined attack on ECC using points of low order[A]. International Workshop on Cryptographic Hardware and Embedded Systems[C]. CHES, LNCS, 2011.
- [7] HANKERSON D, MENEZES A, VANSTONE S. Guide to Elliptic Curve Cryptography[M]. New York, USA: Springer-Verlag, 2003.
- [8] CORON J S. Resistance against differential power analysis for elliptic curve cryptosystems[A]. International Workshop on Cryptographic

- Hardware and Embedded Systems[C]. CHES, LNCS, 1999.
- [9] CHEN T, LI H, WU K, YU F. Countermeasure of ECC against side-channel attacks: balanced point addition and point doubling operation procedure[A]. AsiaPacific Conference on Information Processing 2009[C]. 2009. 465-469
- [10] LUO P, FENG D G, ZHOU Y B. Power model in power analysis attack[J]. Journal on Communications, 2012, 33(Z1):276-282.

### 作者简介:



罗鹏(1978-), 男, 四川遂宁人, 中国科学院博士生, 主要研究方向为密码学、信息安全。



李慧云(1977-), 女, 安徽金寨人, 博士, 中国科学院深圳先进技术研究院副研究员, 主要研究方向为集成电路设计、信息安全。

王鲲鹏(1971-), 男, 河北尚义人, 博士, 中国科学院研究员, 主要研究方向为密码学、信息安全。

王亚伟(1984-), 男, 河南驻马店人, 北京华大信安科技有限公司高级工程师, 主要研究方向为安全芯片的密码系统设计、攻击及防护。

(上接第 78 页)

- [16] ADILJAN Y, YOSHIHIRO H, TASUKU M, *et al.* 2-D direction histogram based entropic thresholding[J]. Neurocomputing, 2013, 120(23): 287-297.
- [17] 张弘, 范九伦. 二维 Arimoto 熵直线型阈值分割法[J]. 光子学报, 2013, 42(2): 234-240.  
ZHANG H, FAN J L. Two-dimensional Arimoto entropy linear-type threshold segmentation method[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(2): 234-240.

### 作者简介:



范朝冬[通信作者](1984-), 男, 江西宜春人, 湖南大学博士生, 主要研究方向为图像处理、智能信息处理。E-mail: fanchd@126.com。



欧阳红林(1965-), 男, 湖南衡阳人, 湖南大学教授、博士生导师, 主要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。



肖乐意(1986-), 女, 湖南常德人, 硕士, 长沙师范学院讲师, 主要研究方向为智能课程设计、智能信息处理。