

基于灰度和非局部空间灰度特征的 二维 Otsu 曲线阈值分割法*

赵凤^a, 范九伦^a, 潘晓英^b, 支晓斌^c

(西安邮电学院 a. 通信与信息工程学院; b. 计算机学院; c. 理学院, 西安 710121)

摘要: 为了克服图像噪声对图像分割结果的影响, 利用图像中与像素具有相似邻域结构的像素提取当前像素的非局部空间信息, 构造了基于像素的灰度信息和非局部空间灰度信息的二维直方图, 并将此二维直方图引入到 Otsu 曲线阈值分割法中, 提出了基于灰度和非局部空间灰度特征的二维 Otsu 曲线阈值分割法。实验结果表明, 该方法能进一步提高原始二维 Otsu 曲线阈值分割法对于图像噪声的鲁棒性, 获得了更加理想的分割结果。

关键词: 非局部空间信息; 曲线阈值; 二维 Otsu; 图像分割

中图分类号: TP75; TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)05-1987-03

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2012.05.103

Two-dimensional Otsu's curve thresholding segmentation method based on gray and non local spatial gray feature

ZHAO Feng^a, FAN Jiu-lun^a, PAN Xiao-ying^b, ZHI Xiao-bin^c

(a. School of Telecommunication & Information Engineering, b. School of Computer Science & Technology, c. School of Science, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: Aiming at overcoming the influence of the image noise to the image segmentation performance, This paper extracted the non local spatial information of the pixel from a set of pixels with a similar neighborhood configuration of the current pixel, and then constructed a two-dimensional histogram based on the gray and non-local spatial gray information. This novel histogram was introduced into the Otsu's curve thresholding segmentation algorithm and it proposed a two-dimensional Otsu's curve thresholding segmentation method based on gray and non local spatial gray feature. Segmentation experiments show that the proposed method further improves the robustness of traditional two-dimensional Otsu's curve thresholding method to image noise and obtains more perfect image segmentation results.

Key words: non local spatial information; curve thresholding; two-dimensional Otsu; image segmentation

0 引言

图像分割就是将图像分割成互不重叠的多个子区域的过程,它是图像处理到图像分析的关键步骤。目前,已经存在很多图像分割方法,其中,基于阈值的分割方法是一类广泛使用的分割技术^[1]。Otsu法^[2]是一种自适应计算阈值的二值图像分割方法,是由日本学者大津展之在1979年提出的。该方法利用图像的一维灰度直方图,以目标和背景的最大类间方差或最小类内方差作为阈值选取准则,在大多数情况下都能取得良好的分割效果。然而,由于图像传感器的工作情况受各种因素的影响,图像在获取和传输过程中容易受到噪声的污染,此时一维灰度直方图不一定存在明显的波峰和波谷,仅仅利用一维灰度直方图的Otsu法无法获得理想的阈值分割结果。

为了解决Otsu法不适用于含噪图像的分割问题,刘建庄等人^[3]考虑将像素点的邻域空间信息引入进来,构造了图像的二维直方图,提出了基于二维灰度直方图的Otsu方法,简称

为二维Otsu法。该方法利用了图像像素的灰度信息和像素的邻域均值灰度信息,具有一定的抗噪性,在含噪图像分割中取得了较好的性能。然而,二维Otsu法的计算量是很大的。为了解决这一问题,人们又提出了二维Otsu的快速算法^[4,5]。需要指出,上述的两个二维Otsu算法只通过一个“点对”对图像进行分割,假设对象区域和背景区域的概率和近似为1。这种假设虽然具有一定的合理性,但忽略边界区域信息的做法在某些情况下是不合适的。为此,有学者提出通过对边界区域像素进行重新归类的后处理方式来进一步加强分割效果^[6,7]。除了可以采用后处理的方法,文献[8]中提出了二维Otsu曲线阈值分割法,实现了从“点对”阈值到曲线阈值的转变,充分考虑了边界区域对分割结果的影响,获得了比二维Otsu法更好的分割性能。文献[8]中已指出,二维Otsu法可以看成是二维Otsu曲线阈值分割法的一个特例。

当图像被噪声严重污染时,像素的邻域像素也可能被污染。此时,像素的邻域均值灰度信息就会失去其在含噪图像分

收稿日期: 2011-10-24; **修回日期:** 2011-11-30 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61102095); 陕西省教育厅科研计划项目(11JK1008, 2010JK835, 2010JK837)

作者简介: 赵凤(1980-),女,黑龙江桦南人,讲师,博士,主要研究方向为模式识别、图像处理、模糊信息处理(fzhao_xupt@gmail.com); 范九伦(1964-),男,教授,博士,主要研究方向为模糊集理论、模式识别、信息安全; 潘晓英(1981-),女,讲师,博士,主要研究方向为进化计算、智能信息处理; 支晓斌(1976-),男,副教授,博士,主要研究方向为模式识别、模糊集合理论与应用。

割中积极的指导作用。因此,基于灰度和邻域均值灰度的二维 Otsu 算法及二维 Otsu 曲线阈值分割法都将无法获得满意的分割结果。需要指出,对于图像中的每一个像素而言,图像中存在很多像素与它具有相似的邻域结构。与仅仅利用当前像素的邻域像素获得空间信息相比,利用和当前像素具有相似邻域结构的像素来获得空间信息显然是更合理的,本文把这种空间信息称之为非局部空间信息。本文提出利用像素的灰度信息和非局部空间灰度信息来构建新的二维直方图,称之为灰度—非局部空间灰度二维直方图,并将此二维灰度直方图引入到 Otsu 曲线阈值分割法中,提出基于灰度和非局部空间灰度特征的二维 Otsu 曲线阈值分割法。实验结果表明,该方法能进一步提高原始二维 Otsu 曲线阈值分割法对于图像噪声的鲁棒性,获得了较为令人满意的分割结果。

1 灰度—非局部空间灰度二维直方图

1.1 传统的二维直方图

对于一幅 $M \times N$ 的图像 i , $i(x, y)$ 表示图像上坐标为 (x, y) 的像素点的灰度值, $g(x, y)$ 表示图像上坐标为 (x, y) 的像素点的 $k \times k$ 邻域平均灰度值,其计算式为

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

可以明显看出,如果图像中像素灰度的最大值为 $L-1$, 则像素的邻域平均灰度的最大值小于等于 $L-1$ 。 $i(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 组成的二元组 (a, b) 就为图像的二维直方图,它定义在一个 $L \times L$ 大小的正方形区域上,其横坐标表示图像像素的灰度,纵坐标表示像素的邻域平均灰度。直方图中任意一点的值定义为 p_{ab} , 其表示二元组 (a, b) 出现的频率,计算式为

$$p_{ab} = \frac{c_{ab}}{M \times N} \quad (2)$$

其中, c_{ab} 是 (a, b) 出现的频数, $0 \leq a, b \leq L-1, \sum_{a=0}^{L-1} \sum_{b=0}^{L-1} p_{ab} = 1$ 。

1.2 灰度—非局部空间灰度二维直方图

在传统的二维直方图中,第二维特征为像素的邻域平均灰度。鉴于该特征来自于像素的邻域窗,把这种空间信息称之为局部空间信息,与此类似,像素的邻域中值灰度也属于局部空间信息的一种。需要指出,当图像被噪声严重污染时,像素的邻域像素也可能被污染,那么像素的局部空间信息就会失去其在含噪图像分割中积极的指导作用。

在图像中,每个像素都可以找到与它具有相似邻域结构的很多像素,可以利用这些像素来获得当前像素的空间信息,在此,将这种空间信息称为非局部空间信息。图像像素的非局部空间信息可以采用非局部均值滤波策略^[9-11]获得。实际上,图像中每个像素的非局部空间信息是通过对所有与该像素具有相似邻域结构的像素进行加权平均得到的。

把非局部空间信息引入到二维灰度直方图中,提出利用像素的灰度信息和非局部空间灰度信息构建新的二维直方图,称之为灰度—非局部空间灰度二维直方图。为了公式表达方便,对于一幅 $M \times N$ 的图像,对坐标为 (x, y) 的像素点求它的绝对坐标,记为 j , 即 $j = (y-1) \times M + x$, 因此,对于 (x, y) 处的像素点,也就是像素 j , 它的非局部空间信息定义为

$$l_j = \sum_{p \in W_j^r} w_{jp} i_p \quad (3)$$

其中: W_j^r 表示以像素 j 为中心、大小为 $r \times r$ (r 为奇数) 的搜索窗; 像素 p 是落在这个搜索窗内的像素点; i_p 表示其灰度值; w_{jp} ($p \in W_j^r$) 表示权值,其大小依赖于像素 j 和 p 之间的相似性,且满足 $0 \leq w_{jp} \leq 1, \sum_{p \in W_j^r} w_{jp} = 1$ 。对搜索窗内所有的像素进行加权求和就可以得到像素 j 的非局部空间信息 l_j 。在搜索窗 W_j^r 内,像素 p 与 j 之间的权值 w_{jp} 由式(4)定义:

$$w_{jp} = \frac{1}{\delta_j} \exp(-\|v(N_j) - v(N_p)\|_{2,\alpha}^2/h^2) \quad (4)$$

其中: h 是控制权值函数 w_{jp} 衰减程度的参数,被称之为滤波程度参数; $v(N_j)$ 表示以像素 j 为中心、大小为 $f \times f$ 的相似窗 N_j 上的灰度向量; $\|v(N_j) - v(N_p)\|_{2,\alpha}^2$ 为利用高斯核函数定义的像素 j 和 p 之间的距离,其中, $\alpha > 0$ 是高斯核函数的标准差^[9]; δ_j 是归一化常数,具体定义为

$$\delta_j = \sum_{p \in W_j^r} \exp(-\|v(N_j) - v(N_p)\|_{2,\alpha}^2/h^2) \quad (5)$$

为了定义新的二维灰度直方图,现在将图像像素的绝对坐标 j 再转换为图像的二维坐标 (x, y) , 那么图像中坐标为 (x, y) 的像素点的非局部空间灰度值 $l(x, y) = l_j$ 。与传统二维直方图定义类似,把 $i(x, y)$ 和 $l(x, y)$ 组成的二元组 (a, b) 定义为灰度—非局部空间灰度二维直方图。如果图像中像素灰度的最大值为 $L-1$, 则像素的非局部空间灰度的最大值小于等于 $L-1$, 那么该二维直方图定义在一个 $L \times L$ 大小的正方形区域上,其横坐标表示图像像素的灰度值,纵坐标表示像素的非局部空间灰度值。直方图任意一点的值 p_{ab} 表示二元组 (a, b) 发生的频率,其定义如式(2)所示。下面以一幅含噪图像为例,在图 1 中展示该图像的传统二维直方图和灰度—非局部空间灰度二维直方图。从展示的结果可以看出,相比于传统二维直方图,灰度—非局部空间灰度二维直方图中目标和背景两类的波峰相距更远,且对应的频率更高,表明目标和背景两类之间的差异性更大。因此,在灰度—非局部空间灰度二维直方图上,以目标和背景的最大类间方差或最小类内方差为准则的 Otsu 方法能够获得更加理想的分割结果。

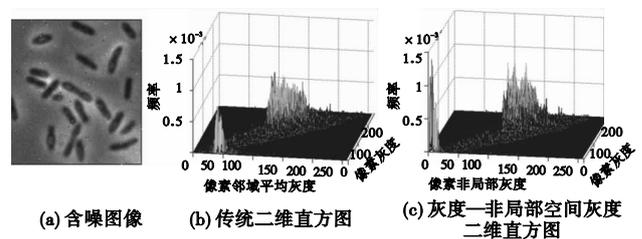


图1 含噪图像的二维直方图展示

2 基于灰度和非局部空间灰度二维直方图的 Otsu 曲线阈值分割法

假设 (s, t) 表示一个二维阈值点,不直接采用 (s, t) 对图像进行阈值分割,而是作过 (s, t) 的曲线 $r(a, b)$ 将灰度—非局部空间灰度二维直方图区域分成 $C_0(s, t)$ 和 $C_1(s, t)$ 两部分,分别代表目标和背景。这里,阈值不再是一个点,而是一条曲线,所以称之为曲线阈值,如图 2(a) 所示。

如何选取曲线 $r(a, b)$ 是一个关键问题,一种简便的方式是取 $r(a, b)$ 为过 (s, t) 且垂直于二维直方图定义域对角线的直线。这时得到的阈值是一条 $a + b = s^* + t^*$ 的直线,如图 2(b) 所示,根据这条直线对原始图像进行阈值分割。图像像素

$i(x, y)$ 的归类方式为

$$z(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{if } a + b \leq s^* + t^* \\ 255 & \text{if } a + b > s^* + t^* \end{cases} \quad (6)$$

其中, a 和 b 分别表示像素 $i(x, y)$ 的灰度值和非局部均值灰度值。

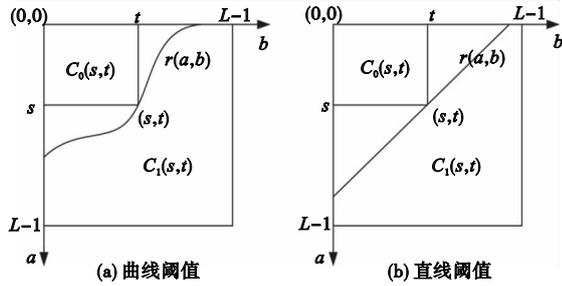


图2 曲线阈值下二维直方图的划分

直线 $r(a, b)$ 把图像的灰度—非局部空间灰度二维直方图分成目标和背景两部分,如图 2(b) 所示,用 $P_0(s, t)$ 和 $P_1(s, t)$ 分别表示目标和背景的概率,易知 $P_1(s, t) = 1 - P_0(s, t)$ 。在文献[8]中,给出了二维 Otsu 曲线阈值分割法在 $r(a, b)$ 取直线时的递推算法。这里,仍然采用该递推算法确定最佳阈值 (s^*, t^*) ,从而不必遍历整个灰度—非局部空间灰度二维直方图,只需遍历该二维直方图的主对角线和一条次对角线,搜索空间为 $2L - 1$ 个点。最佳阈值 (s^*, t^*) 由式(7)确定^[9]

$$(s^*, t^*) = \arg \max_{\substack{0 \leq s < L-1 \\ 0 \leq t < L-1}} t_r S_B(s, t) \quad (7)$$

在式(7)中, $t_r S_B$ 表示类间分离矩阵 S_B 的迹,计算式为

$$t_r S_B = \frac{(\mu_i - P_0 \mu_T)^2 + (\mu_l - P_0 \mu_T)^2}{P_0(1 - P_0)} \quad (8)$$

其中: $\mu_i = \sum_{(a,b) \in C_0(s,t)} ap_{ab}$, $\mu_l = \sum_{(a,b) \in C_1(s,t)} bp_{ab}$, $\mu_T = (\mu_{T0}, \mu_{T1})'$ 表示灰度—非局部空间灰度二维直方图上总的均值向量,定义为

$$\mu_T = (\mu_{T0}, \mu_{T1})' = \left(\sum_{a=0}^{L-1} \sum_{b=0}^{L-1} ap_{ab}, \sum_{a=0}^{L-1} \sum_{b=0}^{L-1} bp_{ab} \right)' \quad (9)$$

$P_0(s, t)$ 、 $\mu_i(s, t)$ 和 $\mu_l(s, t)$ 的递推式表述如下:

$$P_0(0, 0) = p_{00}, s = 0 \quad (10)$$

$$P_0(s - 1, s) = P_0(s - 1, s - 1) + \sum_{a+b=2s-1} p_{ij}, s > 0 \quad (11)$$

$$P_0(s, s) = P_0(s - 1, s) + \sum_{a+b=2s} p_{ab}, s > 0 \quad (12)$$

$$\mu_i(0, 0) = 0, s = 0 \quad (13)$$

$$\mu_i(s - 1, s) = \mu_i(s - 1, s - 1) + \sum_{a+b=2s-1} ap_{ab}, s > 0 \quad (14)$$

$$\mu_i(s, s) = \mu_i(s - 1, s) + \sum_{a+b=2s} ap_{ab}, s > 0 \quad (15)$$

$$\mu_l(0, 0) = 0, s = 0 \quad (16)$$

$$\mu_l(s - 1, s) = \mu_l(s - 1, s - 1) + \sum_{a+b=2s-1} bp_{ab}, s > 0 \quad (17)$$

$$\mu_l(s, s) = \mu_l(s - 1, s) + \sum_{a+b=2s} bp_{ab}, s > 0 \quad (18)$$

3 实验比较与结果分析

为了验证本文算法的有效性,本文在两幅自然图像、一幅医学图像和一幅合成孔径雷达(SAR)图像上进行了分割实验,并将本文方法与二维 Otsu 法^[3]和二维 Otsu 曲线阈值分割法^[8]进行比较,考查三种方法对图像噪声的鲁棒性。实验中,本文方法的三个参数 h 、 r 和 f 分别取 30、21 和 11,二维 Otsu 法和二维 Otsu 曲线阈值分割法的参数 k 取为 3。本文对细菌自然图像添加了高斯白噪声(归一化方差为 0.003)和椒盐噪声

(椒盐噪声密度为 0.001 5)的混合噪声,对 cameraman 自然图像添加了高斯白噪声(归一化方差为 0.01),对医学图像添加了高斯白噪声(归一化方差为 0.015)。最后一幅是 SAR 图像, SAR 图像的相干成像原理使得 SAR 图像本身含有大量的斑点噪声。四幅实验图像尺寸分别为 178×178 、 256×256 、 178×178 和 178×178 。图 3~6 中展示了四幅图像的分割结果。

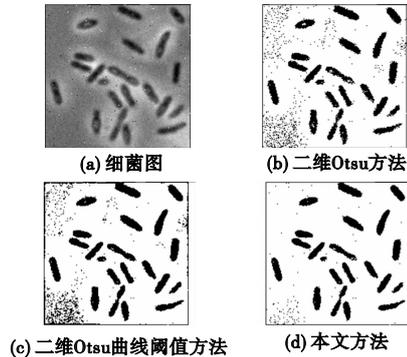


图3 细菌图的分割结果

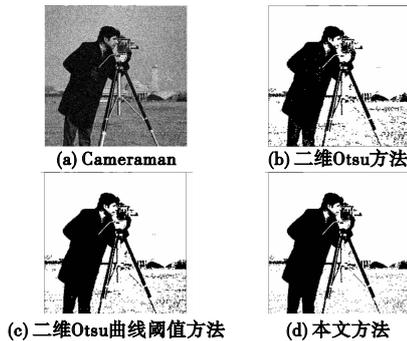


图4 Cameraman的分割结果

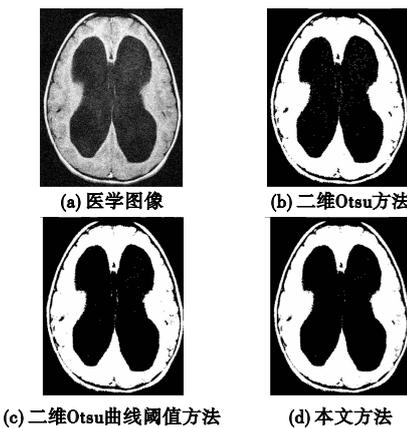


图5 医学图像的分割结果

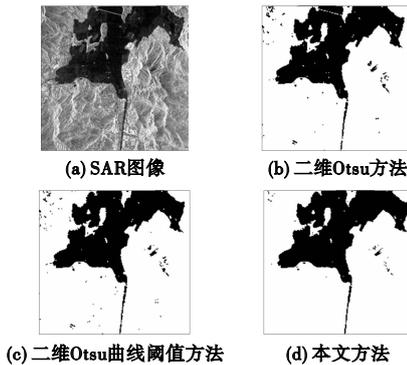


图6 SAR图像的分割结果

从图 3~5 的实验结果可以看出,二维 Otsu 法的性能是最差的,三幅图像的分割结果中残留了很多噪声点,特别是细菌图像的分割结果,如图 3(b) 所示;二维 Otsu 曲(下转第 2000 页)

(上接第 1989 页)线阈值法获得的分割结果要优于二维 Otsu 法,但还是没能很好地去掉图像中的噪声;本文方法较好地克服了图像中的噪声影响,获得了比二维 Otsu 法和二维 Otsu 曲线阈值法更加理想的分割结果。如图 6 所示,在 SAR 图像的分割结果中,本文方法是滤除图像噪声最好的分割算法,分割得到的海洋区域也比较完整。需要指出的是,二维 Otsu 法可以将该图像上方的海洋区域上的输油管道分割出来,而本文方法和二维 Otsu 曲线阈值法却没有达到,这一问题还需在下一步的工作中进行研究。

4 结束语

本文提出的基于灰度和非局部空间灰度特征的二维 Otsu 曲线阈值分割法充分利用了与像素具有相似邻域结构的像素灰度信息,也考虑边界区域的信息对分割结果的影响,在一定程度上克服了图像中噪声的影响及 Otsu 算法中“点对”阈值带来的问题。仿真实验表明,本文方法可以很好地去掉图像噪声对分割性能的影响,获得了比二维 Otsu 法和二维 Otsu 曲线阈值分割法更加理想的分割结果,是一个具有实用价值的二值分割方法。本文中曲线选取为直线,使得递推式的获得简单方便。除直线外,如何选取合适的阈值曲线,是一个值得考虑的问题。

参考文献:

[1] MEHMET S, BULENT S. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation [J]. *Journal of Electronic*

Imaging,2004,13(1):146-165.

- [2] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Trans on System Man and Cybernetic*,1979,9(1):62-66.
- [3] 刘健庄, 粟文青. 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.
- [4] GONG Jian, LI Li-yuan, CHEN Wei-nan. Fast recursive algorithm for two-dimensional thresholding[J]. *Pattern Recognition*,1998,31(3):295-300.
- [5] 陈琪, 熊博荏, 陆军, 等. 改进的二维 Otsu 图像分割方法及其快速实现[J]. *电子与信息学报*,2010,32(5):1100-1104.
- [6] 王培珍, 杨维翰. 图像分割的分层处理方案[J]. *安徽工业大学学报*,2002,19(3):205-208.
- [7] 赵凤, 范九伦. 一种结合二维 Otsu 法和模糊熵的图像分割方法[J]. *计算机应用研究*,2007,24(6):189-191.
- [8] 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.
- [9] BUADES A, COLL B, MOREL J M. A non-local algorithm for image denoising[C]//Proc of IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington DC:IEEE Computer Society,2005:60-65.
- [10] 邓志全. 改进的非局部均值图像去噪算法[D]. 广州:中山大学,2008.
- [11] ZHAO Feng, JIAO Li-cheng, LIU Han-qing, *et al.* A novel fuzzy clustering algorithm with non local adaptive spatial constraint for image segmentation[J]. *Signal Processing*,2011,91(4):988-999.