

基于截距直方图和 Otsu 融合的弱光图像分割

曾艳阳, 谢高森, 张建春*

河南理工大学计算机科学与技术学院, 河南 焦作 454003

摘要 直线截距直方图 Otsu 法具有良好的分割性能,但在处理图像的偏暗部分时通常只能将其划分为背景,使得图像大量的细节信息丢失。在分析直线截距直方图算法本质的基础上,提出了一种基于方向模糊导数的 Otsu 法来对图像的弱光部分进行分割。为了增强算法的普适性,将分割的结果与 Otsu 算法分割结果进行融合。首先,通过使用方向模糊导数的值来替代像素的邻域均值以更好地分割出图像弱光部分的细节信息并抑制噪声,然后将分割结果与 Otsu 法分割的结果融合,以得到更精确的阈值分割结果。实验结果表明,与其他多种分割算法相比,本文算法可以更精确地分割图像弱光部分,提供更好的降噪效果。

关键词 图像处理; 图像分割; 直线截距直方图; Otsu; 模糊导数; 融合

中图分类号 TP391.41

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2010016

Weak-Light Image Segmentation Based on Intercept Histogram and Otsu Fusion

Zeng Yanyang, Xie Gaosen, Zhang Jianchun*

Computer Science and Technical College, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China

Abstract The line intercept histogram Otsu method has good segmentation performance, but for the weak-light part of the image, it can only divide it into background, and many details of the image are lost. Based on the analysis of the essence of the line intercept histogram algorithm, a directional fuzzy derivative Otsu method is proposed to segment the weak light part of the image. At the same time, in order to enhance algorithm universality, the segmentation results are fused with segmentation results of the traditional Otsu algorithm. Firstly, the directional fuzzy derivatives are used to replace the neighborhood mean of the pixel to achieve a good performance in segmentation of the weak-light part of the image and suppress noise. Then the segmentation results are fused with the Otsu segmentation results to get more accurate threshold segmentation results. Experimental results show that the proposed algorithm can segment the weak-light part of the image more accurately in comparison with other segmentation methods, which provides better noise reduction effects.

Key words image processing; image segmentation; line intercept histogram; Otsu; fuzzy derivative; fusion

OCIS codes 100.2000; 100.2960; 100.3008

1 引言

阈值分割以其简单、快速、高效的特点在图像分割中有着广泛的应用,它对图像的后续处理和识别起着重要的作用^[1-2]。传统的图像分割方法主要有

基于阈值的分割方法^[3-4]、基于区域的分割方法^[5-7]、基于边缘的分割方法^[8]和基于灰度直方图的阈值分割方法^[9]等。在这些方法中,最大类间方差法通过利用图像的灰度值计算前景与背景之间的最大方差,并通过选择合适的阈值将目标与背景分离,这大

收稿日期: 2020-10-09; 修回日期: 2020-11-27; 录用日期: 2021-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(61503124)、河南省科技攻关项目(182102310935)

通信作者: *1294082095@qq.com

幅改善了图像分割效果^[10-12]。但是一维的 Otsu 法对噪声和目标大小十分敏感,当目标与背景大小比例较大时,使用一维的 Otsu 对图像进行分割往往不能达到较好的结果。针对一维 Otsu 算法的缺点,文献[13]通过引入邻域灰度均值,提出了二维 Otsu 方法。该方法考虑了图像的灰度信息及邻域空间的相关信息,可保证图像的分割精度。虽然二维 Otsu 算法相对于一维 Otsu 算法增加了算法的鲁棒性,但它仍然存在着分割结果不准确和运算量大的缺点^[14]。文献[15]、文献[16]、文献[17]分别将群体智能仿真算法中的人工鱼群算法、小生境粒子群算法和萤火虫算法应用到阈值的寻优过程中,虽然这些方法加快了算法的运行速度,但是降低了阈值的准确度。文献[18]提出了一种三维直方图重建和降维的 Otsu 阈值分割算法,通过对阈值空间搜索进行降维和重建三维直方图来减少处理时间、提高算法的可靠性,但是分割结果往往可能丢失大量的细节信息。文献[19]将去噪重建后的二维直方图中的像素点投影到对角线上以改进二维 Otsu 算法,但是噪声的位置点却需要根据经验设置。文献[20]提出了一种二维直方图区域斜分阈值分割及快速递推的方法,即通过平行斜线将直方图划分为内点区、边界区和噪声区,并使用与主对角线垂直的斜线进行阈值分割,但抗噪能力依然有待提高。文献[21]和文献[22]通过校正远离对角线的噪声点来提高算法的抗噪能力,但该方法由于采用了二维的递推公式,难以有效地分割出二维噪声图像。文献[23]通过将二维直方图中的像素映射到不同的梯形区域来提高算法速度,并通过后处理策略对映射规则进行修改以提高算法的抗噪性,但该方法仍不能较好地分割图像的弱光部位。

针对直线截距直方图方法所具有的良好性能,本文在分析了其本质的基础上提出了一种基于方向模糊导数的直线截距直方图阈值分割方法。算法使用方向模糊导数值来替代二维 Otsu 中的邻域灰度均值信息,以突出图像弱光部分的细节信息和抑制噪声,然后对图像进行直线截距直方图阈值分割。阈值分割是根据全局像素的灰度值进行分割,在分割出弱光部位的细节信息时可能会丢失较亮部分的信息,因此将得到的结果与 Otsu 分割的结果进行融合,可得到更加精确的阈值分割结果。实验结果表明,本文提出的算法与对比算法相比,在分割图像弱光部分细节和提高抗噪能力等方面有着明显的优势。

2 直线截距直方图原理和改进

2.1 直线截距直方图原理

传统的二维 Otsu 算法通过考虑图像的灰度信息即邻域空间的相关信息,来保证图像的分割精度。该方法通过均值二维直方图来体现像素点的灰度分布和像素点与其邻域空间的灰度分布。它通过一个阈值点坐标 (s, t) 将直方图划分为 4 个矩形区域,如图 1(a) 所示,图像分割的最佳阈值是二维 Otsu 测度准则取最大值时得到的一个二维矢量。图 1 中 f, g 代表二维直方图的坐标轴, $T = f + g$ 为过阈值点的垂直于主对角线的直线。但是在计算阈值时,传统的二维 Otsu 方法假定远离对角线的两个矩形区域的概率为 0,这影响了图像分割的精度^[22]。为了解决这一问题,文献[22]和文献[24]通过使用垂直于主对角线的直线来获取截距的方法将直方图划分为目标区域和背景区域,如图 1(b) 所示。这种方法在计算时考虑了整个直方图区域,从而提高了图像分割的准确性。

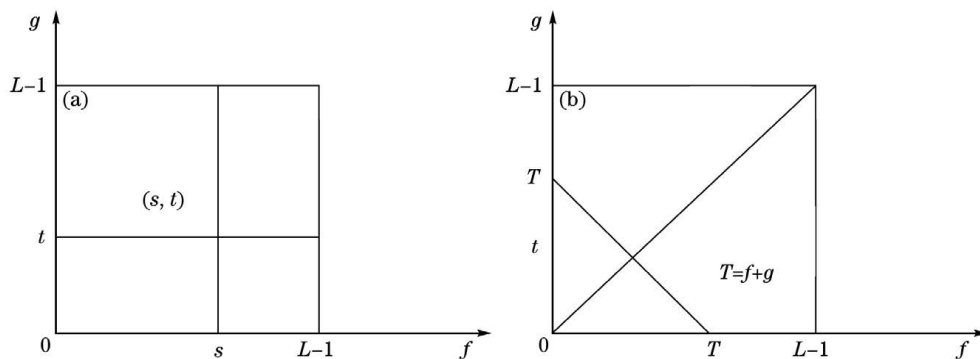


图 1 二维直方图中的区域。(a)直方图法;(b)直线截距直方图法

Fig. 1 Regions in 2D histogram. (a) Histogram method; (b) line interpret histogram method

为了提高算法的有效性和算法的抗噪能力,直线截距直方图算法以垂直于主对角线直线的截距

T 作为阈值。假设 (x, y) 表示由像素的灰度值及其邻域平均灰度值组成的二元组,则图像中符合

$x + y = k$ 的像素的概率为

$$p_k = \frac{n_k}{M \times N}, k = 0, 1, \dots, 2(L - 1), \quad (1)$$

式中： n_k 是满足 $x + y = k$ 的像素点的个数； $M \times N$ 是图像的总像素个数； L 为图像的灰度级。

假设集合 A 是图像中所有像素的灰度值和平均灰度值的集合，即

$$A = \left\{ (x, y) \mid x = 0, 1, \dots, L - 1; y = 0, 1, \dots, L - 1 \right\}. \quad (2)$$

假设集合 B 是线截距的所有可能值的集合，即 $B = \{T \mid T = 0, 1, \dots, 2(L - 1)\}$ ，假设 g 是由集合 A 映射到集合 B 所对应的映射规则，则 $g = x + y$ 。

直线截距直方图 Otsu 方法虽然有很多优点，但它仍然存在以下不足：1) 直线截距直方图 Otsu 在计算阈值时虽然考虑了整个直方图区域，但算法的抗噪能力依然有待提高；2) 直线截距直方图算法在对图像进行阈值划分时会丢失图像较暗部分的细节信息，因此需对其进行改进以划分出图像的更多细节信息。为了对其进行改进，将集合 A 到集合 B 的映射 g 转变为映射函数 g_1 。 g_1 表示方向模糊导数值与图像原始灰度值的和，即 $g_1 = x + y_1$ ， y_1 是方向模糊导数的值。

2.2 方向模糊导数改进截距直方图

像素 (i, j) 的邻域如图 2(a) 所示，中心像素 (i, j) 在方向 D 处的导数定义为其与相邻像素在方向 D 的差值。在这里， $D = \{NW, N, NE, W, E, SW, S, SE\}$ ，NW、N、NE、W、E、SW、S、SE 分别代表西北、北、东北、西、东、西南、东南方向。则有

$$V_N(i, j) = I(i, j - 1) - I(i, j), \quad (3)$$

式中： $V_N(i, j)$ 为像素 (i, j) 在 N 方向上的模糊倒数值； $I(i, j)$ 为像素 (i, j) 的灰度值。

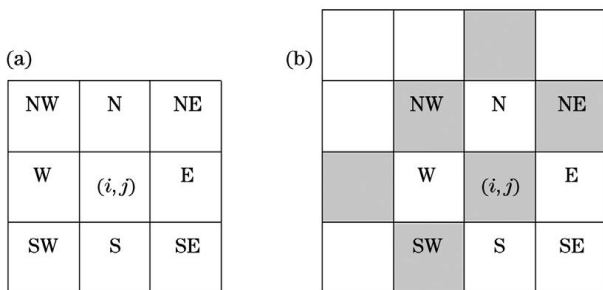


图 2 关于某个像素的方向。(a)中心像素的 8 个方向；

(b)SW-NE 方向边缘的 NW 方向

Fig. 2 Directions about a pixel. (a) Eight directions of center pixel; (b) NW direction of edge of SW-NE direction

假设有一条边沿 SW 和 NE 方向穿过像素 (i, j) ，则其对应的导数值 $V_{NW}(i, j)$ 将比较大，与边缘方向垂直的相邻像素 (NE 和 SW) 的位置导数也较大。因此如果有一条边缘沿 SW-NE 方向穿过 (i, j) ，如图 2(b) 所示，那么位置 (i, j) ， $(i + 1, j - 1)$ 和 $(i - 1, j + 1)$ 处的像素在 NW 方向的导数值将会比较大。将这 3 个导数值的均值作为 (i, j) 处 NW 方向的模糊导数值，记为 $g(i, j)$ 。如果这三个导数值均比较小，则可以假设在该方向上没有边缘的存在，即可以认为其在 SW-NE 方向上的图像特征相同，处于同一区域。为了抑制噪声和加强图像的细节信息，首先分别计算像素点 8 个方向的模糊导数值，然后选择其中最大的模糊导数值作为结果来替换该像素点的邻域均值。

假设像素点 (i, j) 为目标像素，而其方向 D 的像素均被椒盐噪声所污染。当噪声为胡椒噪声时， $g(i, j) = x/3, y = x/9$ ，此时得到 $g(i, j) > y$ ，即方向模糊导数可以将前景像素的值较好地保留下来，避免胡椒噪声的影响。当像素点 (i, j) 位于图像的弱光部位时，方向模糊导数也可以将细节信息更好地保留下来。当噪声为盐粒噪声时， $g(i, j) = (255 - x)/3, y = (255 \times 8 + x)/9$ ，此时 $g(i, j) < y$ ，即方向模糊导数值对盐粒噪声起到了更好的平滑效果，其结果值相对于邻域均值偏离真实值的程度更小。由上面分析可以得出，使用方向模糊导数值替代邻域均值可以对图像有更好的降噪效果，有利于分割出图像弱光部分的更多细节信息。

令 $[x, g(i, j)]$ 表示由像素的灰度值及其方向模糊导数值组成的二元组，设图像中满足 $x + g(i, j) = k$ 的像素的概率为 p_k 。在截距直方图中，由阈值 T 对图像进行分割可以将图像分为 $C_0(T)$ 和 $C_1(T)$ ，将其均值分别记为 $\mu_0(T)$ 和 $\mu_1(T)$ 。令

$$\omega_0(T) = \sum_{k=0}^T p_k, \omega_1(T) = 1 - \omega_0(T), \mu(T) = \sum_{k=0}^T k p_k,$$

类间方差为 $\sigma^2(T)$ ，则可以得到

$$\sigma^2(T) = \omega_0(T)\omega_1(T) [\mu_0(T) - \mu_1(T)]^2. \quad (4)$$

设最佳阈值为 T^* ，则

$$\sigma^2(T^*) = \max_{0 \leq T \leq 2L-2} \sigma^2(T), \quad (5)$$

在获得最佳阈值 T^* 后，即可按照以下规则对图像中的像素点进行分类：

$$f(i, j) = \begin{cases} 0 & x + g(i, j) \leq T^* \\ 1 & x + g(i, j) > T^* \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $f(i, j)$ 表示分割后的图像。

2.3 阈值分割结果融合

对图 3(a) 分别使用 Otsu 阈值分割和基于方向模糊导数的直线截距阈值分割进行处理, 结果如

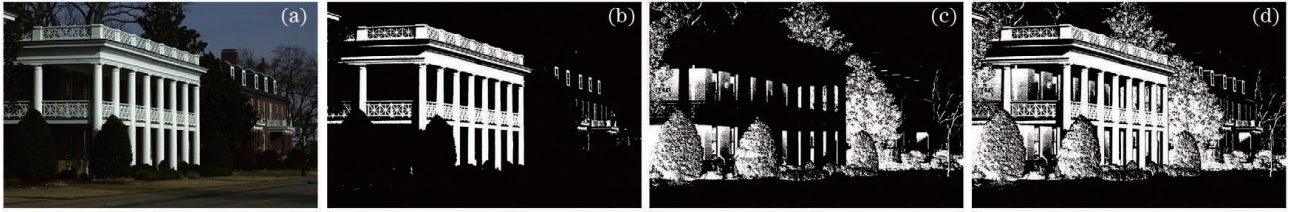


图 3 算法分割结果。(a) 原始图片; (b) Otsu 所得结果; (c) 方向模糊导数所得结果; (d) 融合结果

Fig. 3 Algorithm segmentation results. (a) Original image; (b) result obtained by Otsu; (c) result obtained by directional fuzzy derivative; (d) fusion result

从图 3(c) 中可以看出, 使用方向模糊导数对图像进行阈值分割可以将图像中弱光部分的细节很好地分割出来, 如建筑物的墙体纹理、树木的细节等。从图 3(b) 和图 3(c) 的对比可以看出, 尽管使用方向模糊导数的直线截距阈值可分割出图像弱光部分的细节, 但是由于其是根据全局灰度值进行分割, 将图像根据灰度值的大小分为背景和前景两类, 其对图像偏亮的部分不能进行很好的分割。因此可以将基于方向模糊导数的直线截距阈值分割结果与 Otsu 阈值分割结果进行融合, 以得到更好的图像分割效果。

假设大小为 $M \times N$ 的图像由像素值 I 组成的二维数组表示, $I = \{I(s) \in [0, 1], s \in S\}$, S 是由图像坐标 (x, y) 所定义的矩形网格区域, 即 $S = \{(x, y) : 1 \leq x \leq M, 1 \leq y \leq N\}$ 。图像的阈值分割就是为了分割图像的两个部分: 背景区域 I_B 和目标区域 I_C , 它们满足

$$\begin{cases} I_B \cap I_C = \emptyset \\ I_B \cup I_C = I \end{cases} \quad (7)$$

假设使用方向模糊导数分割后的背景区域和目标区域为 I_{B1} 和 I_{C1} , Otsu 阈值分割的背景区域和目标区域为 I_{B2} 和 I_{C2} , 以图 3 为例, 对于图 3(b) 和图 3(c), 当 Otsu 阈值分割结果 $I_2(x, y)$ 满足

$$I_2(x, y) \in I_{C1} \cap I_2(x, y) \in I_{B2}, \quad (8)$$

式中: $I_2(x, y) = 1$, 融合后的结果如图 3(d) 所示。当将方向模糊导数改进的直线截距直方图分割结果作为目标区域, 而将 Otsu 分割结果作为背景区域时, 将 Otsu 分割结果的对应部位替换为目标区域。从图 3(d) 可以看出, 将所提算法的分割结果与 Otsu 阈值分割的结果进行融合后可以得到很好的分割结果。

图 3(b) 和图 3(c) 所示。其中采用本文的方法对图 3(a) 进行处理得到的最佳阈值为 11, 使用 Otsu 得到的最佳阈值为 115。

3 实验和结果分析

由于一些图像的分割结果难以被直观地区分, 因此本文除了对所提出的算法进行主观性评价, 同时也采用了均方根误差 (RMSE)、结构相似性指数 (SSIM) 和峰值信噪比 (PSNR) 等客观评价标准来定量比较本文算法与其他算法的分割性能。

RMSE 用于测量预测值与实际值的差异。差值越小则实际值与预测值越一致, 分割的效果越好。RMSE 的计算式为

$$R_{MSE} = \sqrt{M_{SE}(\hat{\theta})} = \sqrt{E[(\hat{\theta} - \theta)^2]}, \quad (9)$$

式中: $\hat{\theta}$ 是预测值; θ 是实际值; E 是期望值。

SSIM 用于测量原始图像与分割结果之间的相似度, 相似度越高, 分割结果越接近于原始图像, 分割质量越好。在每个 8×8 的像素邻域上, SSIM 的计算式为

$$R_{SSIM} = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}, \quad (10)$$

式中: x 和 y 分别为原始图像和分割后的图像; μ_x 和 μ_y 分别是图像 x 和图像 y 的灰度均值; σ_x^2 和 σ_y^2 是图像 x 和图像 y 的方差; σ_{xy} 是协方差; C_1 和 C_2 是常数。

PSNR 是评价阈值质量的重要指标。PSNR 值越大则分割的结果越好。PSNR 可以定义为

$$P_{SNR} = 20 \log \frac{255}{\sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [x(i, j) - y(i, j)]^2}}, \quad (11)$$

式中: $M \times N$ 表示图像的大小。

本文算法与所对比算法的分割结果如图 4~6 所示, 其中图 4~6 使用 Otsu 得到的最佳阈值分别



图 4 算法分割结果。(a)原始图像 1;(b)Otsu;(c)二维最大熵;(d)文献[18]中算法;(e)文献[23]中算法;(f)本文算法
Fig. 4 Algorithm segmentation results. (a) Original image 1; (b) Otsu; (c) 2D maximum entropy; (d) algorithm in Ref. [18]; (e) algorithm in Ref. [23]; (f) proposed method



图 5 算法分割结果。(a)原始图像 2;(b)Otsu;(c)二维最大熵;(d)文献[18]中算法;(e)文献[23]中算法;(f)本文算法
Fig. 5 Algorithm segmentation results. (a) Original image 2; (b) Otsu; (c) 2D maximum entropy; (d) algorithm in Ref. [18]; (e) algorithm in Ref. [23]; (f) proposed method



图 6 算法分割结果。(a)原始图像 3;(b)Otsu;(c)二维最大熵;(d)文献[18]中算法;(e)文献[23]中算法;(f)本文算法
Fig. 6 Algorithm segmentation results. (a) Original image 3; (b) Otsu; (c) 2D maximum entropy; (d) algorithm in Ref. [18]; (e) algorithm in Ref. [23]; (f) proposed method

为 89,23,115;使用二维最大熵得到的最佳阈值分别为 149,25,66;使用文献[18]算法得到的最佳阈值分别为 72,30,95;使用文献[23]得到的最佳阈值分别为 86,23,112;使用本文方法得到的最佳阈值分别为 22,6,20。从图 4~6 的分割结果可以观察到,本文提出的算法可以将图 4(a)中展示架中的船体模型细节及背景信息细节、图 5(a)中办公场景细节和图 6(a)中树木、房屋信息更好地分割出来。因此本文提出的算法对图像弱光部位的分割结果优于其他算法。图 7 为模糊导数分割结果。

为方便对本文提出的算法进行客观的定量评价,本文将各算法对不同亮度的 cDNA 人造微阵列的分割结果与专家手动分割的结果从 RMSE、SSIM、PSNR 三个指标进行比较。分割结果如

图 8~12 所示。图 8~12 中:使用 Otsu 得到的最佳阈值分别为 59,59,29,44,60;使用二维最大熵得到的最佳阈值分别为 66,62,35,59,82;用文献[18]中算法得到的最佳阈值为 3,2,3,3,3;使用文献[23]

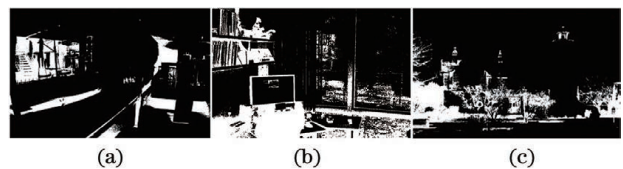


图 7 模糊导数分割结果。(a)图 4(a)的分割结果;
(b)图 5(a)的分割结果;(c)图 6(a)的分割结果
Fig. 7 Fuzzy derivative segmentation results.
(a) Segmentation result of Fig. 4(a);
(b) segmentation result of Fig. 5(a);
(c) segmentation result of Fig. 6(a)

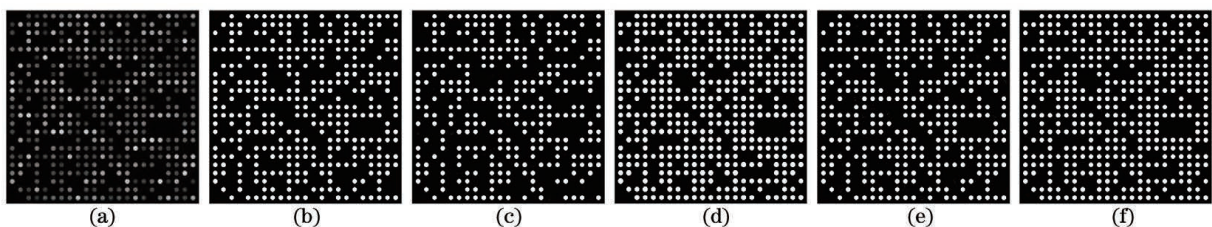


图 8 图像 1 的分割结果。(a)原始图像;(b)Otsu;(c)二维最大熵;(d)文献[18]算法;(e)文献[23]算法;(f)本文算法
Fig. 8 Algorithm segmentation results of image 1. (a) Original image; (b) Otsu; (c) 2D maximum entropy;
(d) algorithm in Ref. [18]; (e) algorithm in Ref. [23]; (f) proposed method

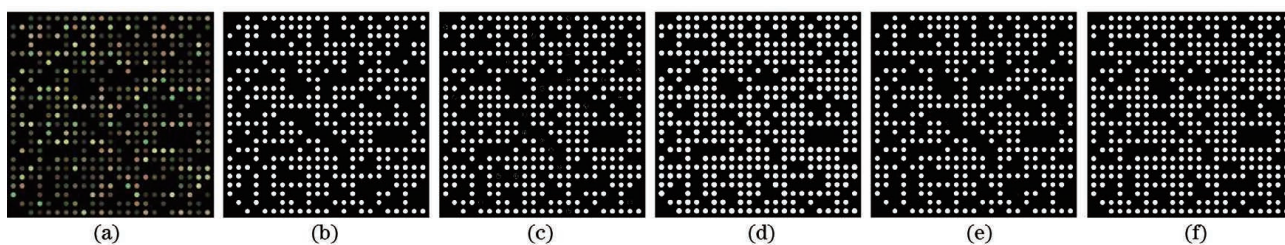


图 9 图像 2 的分割结果。(a)原始图像;(b)Otsu;(c)二维最大熵;(d)文献[18]算法;(e)文献[23]算法;(f)本文算法
Fig. 9 Algorithm segmentation results of image 2. (a) Original image; (b) Otsu; (c) 2D maximum entropy;
(d) algorithm in Ref. [18]; (e) algorithm in Ref. [23]; (f) proposed method

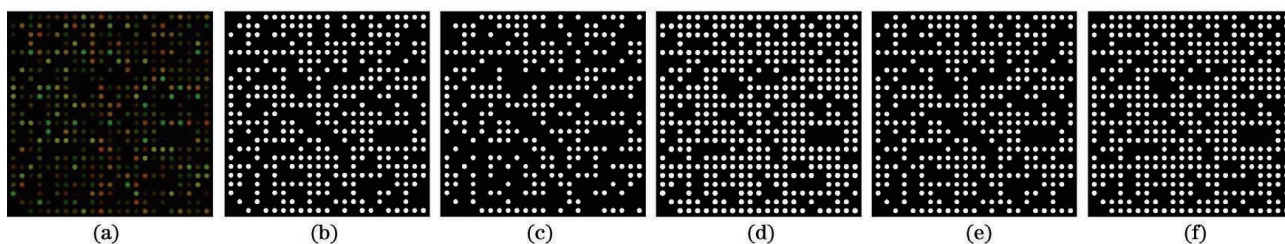


图 10 图像 3 的分割结果。(a)原始图像;(b)Otsu;(c)二维最大熵;(d)文献[18]算法;(e)文献[23]算法;(f)本文算法
Fig. 10 Algorithm segmentation results of image 3. (a) Original image; (b) Otsu; (c) 2D maximum entropy;
(d) algorithm in Ref. [18]; (e) algorithm in Ref. [23]; (f) proposed method

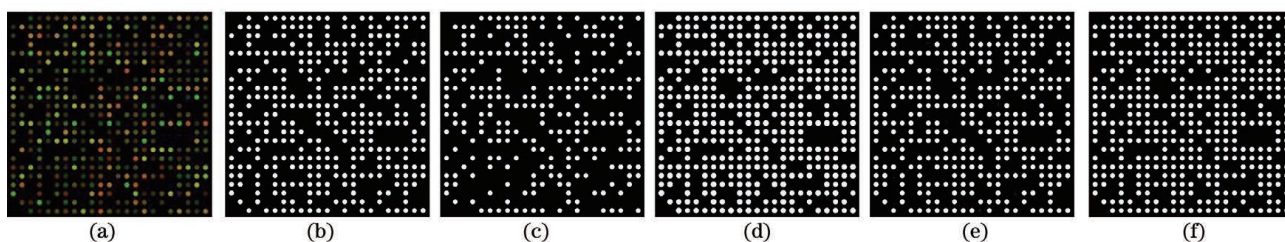


图 11 图像 4 的分割结果。(a)原始图像;(b)Otsu;(c)二维最大熵;(d)文献[18]算法;(e)文献[23]算法;(f)本文算法
Fig. 11 Algorithm segmentation results of image 4. (a) Original image; (b) Otsu; (c) 2D maximum entropy;
(d) algorithm in Ref. [18]; (e) algorithm in Ref. [23]; (f) proposed method

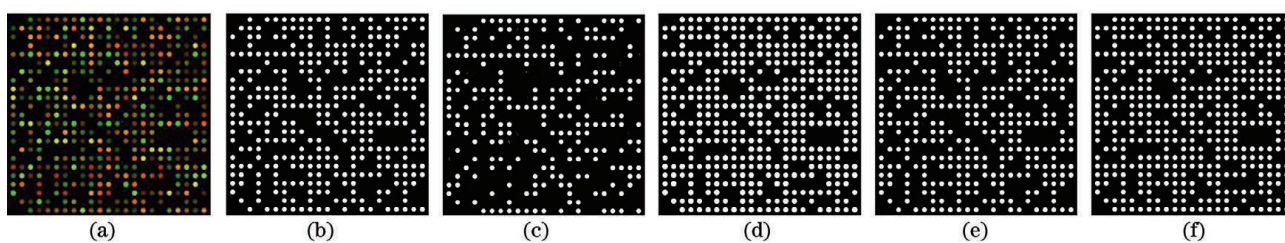


图 12 图像 5 的分割结果。(a)原始图像;(b)Otsu;(c)二维最大熵;(d)文献[18]中算法;(e)文献[23]中算法;(f)本文算法
Fig. 12 Algorithm segmentation results of image 5. (a) Original image; (b) Otsu; (c) 2D maximum entropy;
(d) algorithm in Ref. [18]; (e) algorithm in Ref. [23]; (f) proposed method

得到的最佳阈值分别为 56, 57, 28, 43, 60; 使用本文方法得到的最佳阈值分别为 38, 38, 21, 27, 38。

为了验证本文提出的算法的鲁棒性, 在原始图像中添加噪声密度为 0.02 的椒盐噪声, 使用各阈值方法对其进行阈值分割的结果如表 2 所示。

从图 8~12 的分割结果可以看出: 本文提出的基于方向模糊导数的直线截距直方图方法可以对

cDNA 人造微阵列进行较好的分割, 不存在误分割和漏分割的现象; 而其他算法在对 cDNA 人造微阵列进行分割时, 存在着漏分割的现象, 该现象在 cDNA 微阵列的弱光部分尤其明显。另外从表 1 和表 2 可以看出, 本文提出的算法在对未添加噪声的图像和添加椒盐噪声后的图像进行分割得到的 SSIM 值和 PSNR 值与其他算法相比均为最大, 而

表 1 各种分割方法的定量比较

Table 1 Quantitative comparison of various segmentation methods

Algorithm	Parameter	Fig. 8	Fig. 9	Fig. 10	Fig. 11	Fig. 12
Otsu	RMSE	0.1852	0.1856	0.1878	0.1863	0.1898
	SSIM	0.9964	0.9964	0.9964	0.9964	0.9964
	PSNR	29.2957	29.2540	29.0510	29.1909	28.8709
2D maximum entropy	RMSE	0.2356	0.1516	0.2586	0.2781	0.2970
	SSIM	0.9940	0.9977	0.9927	0.9915	0.9902
	PSNR	25.1105	32.7700	23.4933	22.2315	21.0909
Algorithm in Ref. [18]	RMSE	0.1686	0.1816	0.1520	0.2124	0.1954
	SSIM	0.9989	0.9986	0.9992	0.9979	0.9983
	PSNR	30.9219	29.6318	32.7314	26.9148	28.3674
Algorithm in Ref. [23]	RMSE	0.1838	0.1842	0.1852	0.1843	0.1885
	SSIM	0.9964	0.9964	0.9964	0.9964	0.9963
	PSNR	29.4301	29.3874	29.2908	29.3744	28.9850
Proposed method	RMSE	0.0292	0.0221	0.0435	0.0416	0.0416
	SSIM	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998
	PSNR	61.3895	66.2616	54.4424	55.2410	55.2410

表 2 各种分割方法的定量比较

Table 2 Quantitative comparison of various segmentation methods

Algorithm	Parameter	Fig. 8	Fig. 9	Fig. 10	Fig. 11	Fig. 12
Otsu	RMSE	0.2275	0.2285	0.3065	0.2392	0.2275
	SSIM	0.9962	0.9961	0.9915	0.9959	0.9962
	PSNR	25.7245	25.6437	20.5404	24.8494	25.7172
2D maximum entropy	RMSE	0.2648	0.2007	0.2878	0.3047	0.3070
	SSIM	0.9941	0.9974	0.9927	0.9916	0.9907
	PSNR	23.0802	27.8986	21.6358	20.6448	20.5169
Algorithm in Ref. [18]	RMSE	0.2162	0.1841	0.1749	0.2286	0.2170
	SSIM	0.9980	0.9988	0.9990	0.9977	0.9980
	PSNR	26.6021	29.4007	30.2870	25.6402	26.5443
Algorithm in Ref. [23]	RMSE	0.2270	0.2265	0.3045	0.2307	0.2261
	SSIM	0.9962	0.9962	0.9916	0.9961	0.9962
	PSNR	25.7620	25.7962	20.6585	25.4761	25.8264
Proposed method	RMSE	0.1431	0.1395	0.1644	0.1673	0.1429
	SSIM	0.9995	0.9995	0.9993	0.9993	0.9995
	PSNR	33.7796	34.2118	31.3650	31.0643	33.7985

RMSE 值均为最小,即本文的算法优于所对比的其他分割算法。

4 结 论

针对阈值分割方法对图像弱光部分分割精度不高与抗噪性较差的问题,提出了一种基于方向模糊导数的直线截距直方图阈值分割方法。与其他算法相比,所提方法可以分割出更多的图像弱光部分细节信息,通过与 Otsu 阈值分割方法的融合可得到更好的阈值分割效果,并且可以在一定程度上提高直线截距直方图算法的抗噪性能。

参 考 文 献

- [1] Li J F, Tang W Y, Wang J, et al. Multilevel thresholding selection based on variational mode decomposition for image segmentation [J]. *Signal Processing*, 2018, 147: 80-91.
- [2] Mittal H, Saraswat M. An optimum multi-level image thresholding segmentation using non-local means 2D histogram and exponential Kbest gravitational search algorithm[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2018, 71: 226-235.
- [3] Zhao Q S, Wang Y Y, Wang X P, et al. Substation infrared image segmentation based on novel threshold selection method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(8): 0810002.
赵庆生, 王雨滢, 王旭平, 等. 基于新型阈值选择方法的变电站红外图像分割[J]. *光学学报*, 2019, 39(8): 0810002.
- [4] Meng L, Liu J, Cao H, et al. Retinal vessel segmentation based on Frangi filter and Otsu algorithm [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(18): 181004.
孟琳, 刘静, 曹慧, 等. 基于 Frangi 滤波器和 Otsu 视网膜血管分割[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(18): 181004.
- [5] Lü K, Wu J. Joint segmentation and registration of medical image based on B-spline and level set method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(10): 101007.
吕凯, 吴军. 基于 B 样条和水平集方法的医学图像联合分割与配准[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(10): 101007.
- [6] Mao L, Zhao L Q, Yu M A, et al. Hybrid level set model for parathyroid gland segmentation based on local entropy of images [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1217001.
毛林, 赵利强, 于明安, 等. 基于图像局部熵的混合
- 水平集模型甲状旁腺分割[J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1217001.
- [7] Ni K, Wu Y Q, Geng S. Segmentation of metallographic image based on improved CV model integrated with local fitting term [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0411009.
倪康, 吴一全, 庚嵩. 基于改进区域项 CV 模型的金相图像分割[J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0411009.
- [8] Wu X J. Review of theory and methods of image segmentation[J]. *Agricultural Biotechnology*, 2018, 7(4): 136-141.
- [9] Peng L. A brain nuclear magnetic resonance image segmentation algorithm based on non-rigid registration[J]. *Traitement Du Signal*, 2018, 35(3/4): 317-330.
- [10] Liu S. Image segmentation technology of the Otsu method for image materials based on binary PSO algorithm[M]//Jin D, Lin S. *Advances in computer science, intelligent system and environment. Advances in intelligent and soft computing. Heidelberg: Springer*, 2011, 104: 415-419.
- [11] Shahid M, Taj I A. Retracted: robust retinal vessel segmentation using vessel's location map and Frangi enhancement filter[J]. *IET Image Processing*, 2018, 12(4): 494-501.
- [12] Shen X J, Liu X, Chen H P. Fast computation of threshold based on multi-threshold Otsu criterion[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(1): 144-149.
申铨京, 刘翔, 陈海鹏. 基于多阈值 Otsu 准则的阈值分割快速计算[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(1): 144-149.
- [13] Liu J Z, Li W Q. The automatic thresholding of gray-level pictures via two-dimensional Otsu method [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1993, 19(1): 101-105.
刘健庄, 栗文青. 灰度图象的二维 Otsu 自动阈值分割法[J]. *自动化学报*, 1993, 19(1): 101-105.
- [14] Yang T, Tian H W, Liu X M, et al. Otsu image segmentation algorithm based on double intercept histogram[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2017, 38(6): 1409-1414.
杨陶, 田怀文, 刘晓敏, 等. 基于双截距直方图的 Otsu 图像分割法[J]. *小型微型计算机系统*, 2017, 38(6): 1409-1414.
- [15] Pan Z, Wu Y Q. The two-dimensional Otsu thresholding based on fish-swarm algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(8): 2115-2121.
潘喆, 吴一全. 二维 Otsu 图像分割的人工鱼群算法[J]. *光学学报*, 2009, 29(8): 2115-2121.
- [16] Wang F B, Pan X C. Image segmentation for somatic cell of milk based on niching particle swarm

- optimization Otsu [J]. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2019, 12(2): 141-149.
- [17] Li L, Liu J W, Ling M X, et al. Improved two-dimensional Otsu based on firefly optimization for low signal-to-noise ratio images[M]//Tan Y, Takagi H, Shi Y H. *Advances in swarm intelligence. Lecture notes in computer science*. Cham: Springer, 2017, 10385: 611-617.
- [18] Shen X J, Long J W, Chen H P, 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.
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.
- [19] Li Q, Tang H, Chi J N, et al. Gesture segmentation with improved maximum between-cluster variance algorithm[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(4): 528-537.
李擎, 唐欢, 迟健男, 等. 基于改进最大类间方差法的手势分割方法研究 [J]. *自动化学报*, 2017, 43(4): 528-537.
- [20] Wu Y Q, Pan Z, Wu W Y. Image thresholding based on two-dimensional histogram oblique segmentation and its fast recurring algorithm [J]. *Journal on Communications*, 2008, 29(4): 77-83, 89.
吴一全, 潘喆, 吴文怡. 二维直方图区域斜分阈值分割及快速递推算法 [J]. *通信学报*, 2008, 29(4): 77-83, 89.
- [21] Chen J W, Wu B. A Otsu threshold segmentation method based on rebuilding and dimension reduction of the two-dimensional histogram [J]. *Journal of Graphics*, 2015, 36(4): 570-575.
陈金位, 吴冰. 二维直方图重建和降维的 Otsu 阈值分割算法 [J]. *图学学报*, 2015, 36(4): 570-575.
- [22] He Z Y, Sun L N, Huang W G, et al. Thresholding segmentation algorithm based on Otsu criterion and line intercept histogram [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(10): 2315-2323.
何志勇, 孙立宁, 黄伟国, 等. 基于 Otsu 准则和直线截距直方图的阈值分割 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(10): 2315-2323.
- [23] Xiao L Y, Ouyang H L, Fan C D. An improved Otsu method for threshold segmentation based on set mapping and trapezoid region intercept histogram[J]. *Optik*, 2019, 196: 163106.
- [24] Nie F Y, Wang Y L, Pan M S, et al. Two-dimensional extension of variance-based thresholding for image segmentation [J]. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2013, 24(3): 485-501.