

文章编号 1004-924X(2012)10-2315-09

基于 Otsu 准则和直线截距直方图的阈值分割

何志勇¹, 孙立宁¹, 黄伟国^{2*}, 陈立国¹

(1. 苏州大学 机电工程学院, 江苏 苏州, 215021;

2. 苏州大学 城市轨道交通学院, 江苏 苏州, 215021)

摘要:对二维 Otsu 法中类间离散度测度进行了分析,发现按该算法对被噪声污染图像的二维直方图进行划分时,所得两类的类内均值点容易远离主对角线,因而抗噪声能力不足。针对以上情况,本文提出了一种新算法,该算法基于二维直方图中直线阈值分割的思想,利用像素点的二维信息直接建立阈值直线的截距直方图;然后应用 Otsu 准则对该一维直方图求解最佳截距阈值,并应用该阈值和二维信息完成图像分割。对提出的算法与传统二维 Otsu 法进行了比较和分析,结果表明:提出的算法可以有效避免传统算法在抗噪方面的缺陷,当实验图像的噪声方差大于 0.003 且逐渐增加时,提出的算法抗噪表现稳健;另外,提出的算法计算阈值的速度比基于二维 Otsu 法的直分法和直线阈值法快 2 个数量级以上,占用内存空间更少。因而提出的算法是一种抗噪稳健且快速有效的阈值分割算法,更适于实时应用。

关键词:图像分割;Otsu 准则;阈值选取;直线截距直方图

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122010.2315

Thresholding segmentation algorithm based on Otsu criterion and line intercept histogram

HE Zhi-yong¹, SUN Li-ning¹, HUANG Wei-guo^{2*}, CHEN Li-guo¹

(1. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China;*

2. *School of Urban Rail Transportation, Soochow University, Suzhou 215021, China*)

* *Corresponding author, E-mail: wghuang@suda.edu.cn*

Abstract: Two-dimensional (2-D) Otsu algorithm is analyzed. It is shown that when a 2-D histogram is segmented by 2-D Otsu threshold method, the within-class means is easily far from the main diagonal, so that the algorithm isn't robust enough to noises. This paper proposes a new algorithm. The new algorithm establishes a line intercept histogram directly from the 2-D information of images based on the line threshold segmentation concept. Then, it uses the Otsu criterion to find the best intercept threshold from the histogram. Furthermore, the 2-D information of images and the intercept threshold are adopted to implement the image segmentation. Compared the new algorithm with the 2-D Otsu algorithm, it demonstrates that the new algorithm can avoid both disadvantages of 2-D Otsu algorithm. Firstly, it improves the anti-noise ability. When the noise variance is more than 0.003 or step-up, it shows robustness to noises. Secondly, the processing speed of the new algorithm is faster than

收稿日期:2012-05-27; **修订日期:**2012-06-28.

基金项目:苏州市科技支撑计划(No. SG201241); 国家科技重大专项资助项目(No. 2011ZX04004-061); 国家自然科学基金资助项目(No. 61070169); 江苏省高校自然科学基金资助项目(No. 10KJD510008)

the fast Otsu algorithms based on 2-D histogram by two orders of magnitude, and it takes up more less memory. In conclusion, the proposed algorithm is robust anti-noise, more accurate segmentation and is suitable for applications in real time.

Key words: image segmentation; thresholding segmentation; Otsu criterion; thresholding selection; line intercept histogram

1 引言

图像分割是机器视觉工程中的一项关键任务,图像分割算法的效率和质量对图像系统的性能有重要影响。阈值法因为简单、快速而在图像分割中应用十分广泛^[1]。在阈值分割算法中,Otsu 法^[2]作为一种经典方法,因分割质量稳定、自适应性强而倍受关注^[1,3-4]。近些年虽然也有人提出很多新的有效阈值法,例如分形法^[5]等,但 Otsu 法仍因其计算量小而广泛应用^[6],同时还有一些新的 Otsu 法阈值快速搜索方法^[7]被提了出来。不过基于一维灰度直方图的传统 Otsu 法对被噪声污染的图像进行分割时效果不佳,鉴于此,刘建庄等提出了二维 Otsu 法^[8]。该算法因基于二维直方图而比传统 Otsu 法有最佳的抗噪能力,但由于其采用穷举方法计算二维最佳阈值因而运算量非常大,难以应用于实时处理。有些学者提出一些基于二维直方图的 Otsu 快速算法^[9-15]。文献[9-12]的类间离散度测度与文献[8]一样均为类间离差矩阵的迹,并都采用递推策略计算最佳阈值;文献[9]为针对文献[8]的快速算法;文献[8-9]中关于忽略二维直方图中边界区域概率分布的假设并不合理,文献[10-11]中分别提出的直线阈值法及斜分法避免了上述假设并大幅提高了二维最佳阈值的计算效率,且二者均计算在二维直方图中与主对角线垂直的一条倾斜直线用以划分目标区域和背景区域。文献[10-11]中算法所计算的本质上是同一条直线,二者的区别在于计算类间离散度测度的阈值空间不同;但二者均需要遍历二维直方图以计算每条阈值直线上的概率、零阶矩,并计算类间离差矩阵的迹,这些都影响了计算效率。对二维 Otsu 法的类间离散度测度的分析也表明,依该法分割所得两类的二维均值点容易偏离二维直方图的主对角线,其抵抗噪声能力存在不足。

本文提出了一种新的利用二维信息及 Otsu

准则进行分割的算法,该算法并不建立二维直方图,而是基于二维直方图中直线阈值分割的思想,利用像素点的二维信息直接建立阈值直线的截距的直方图,并对该一维直方图应用 Otsu 准则求解最佳截距阈值,使用该阈值直接对含二维信息的图像进行分割。新算法抗噪性能稳健,比二维 Otsu 法中的直分法^[8-9]和直线阈值法^[10-11]占用内存空间更少;新算法所消耗的总时间少于建立二维直方图的时间,因而快于文献[9-15]的算法及其他基于二维直方图的 Otsu 快速算法。

2 二维 Otsu 法中的直分法及直线阈值法

2.1 二维直方图及其划分

对于灰度等级为 L 的图像,其像素的邻域平均灰度等级亦为 L ,像素点的灰度及其邻域平均灰度可组成一个二元组并以 (i, j) 表示。以 f_{ij} 表示图像中 (i, j) 出现的频数, N 为图像中总的像素点数,二元组 (i, j) 在图像中的概率密度用 p_{ij} 表示:

$$p_{ij} = f_{ij} / N, \quad (1)$$

其中: $\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} p_{ij} = 1$ 。

假定二维直方图中存在两类 C_0 和 C_1 分别对应目标区域和背景区域,于是 C_0 和 C_1 的概率分别为:

$$\omega_0 = \sum_{(i,j) \in C_0} p_{ij}, \quad (2)$$

$$\omega_1 = \sum_{(i,j) \in C_1} p_{ij}, \quad (3)$$

两类对应的均值矢量为:

$$\boldsymbol{\mu}_0 = (\mu_{0i}, \mu_{0j})^T = \left(\sum_{(i,j) \in C_0} ip_{ij} / \omega_0, \sum_{(i,j) \in C_0} jp_{ij} / \omega_0 \right)^T, \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\mu}_1 = (\mu_{1i}, \mu_{1j})^T = \left(\sum_{(i,j) \in C_1} ip_{ij} / \omega_1, \sum_{(i,j) \in C_1} jp_{ij} / \omega_1 \right)^T, \quad (5)$$

二维直方图上总的均值矢量为:

$$\boldsymbol{\mu}_T = (\mu_{Ti}, \mu_{Tj})^T = \left(\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} ip_{ij}, \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} jp_{ij} \right)^T. \quad (6)$$

2.2 直分法

文献[8-9]在二维直方图中以一对点对阈值 (s, t) 划分出 4 个区域,如图 1 中(a)图所示,其中 $i \leq s$ 且 $j \leq t$ 区域为 C_0 ; $i \geq s$ 且 $j \geq t$ 区域为 C_1 。假设在其余两个区域二元组的概率密度为 0,于是可得:

$$\omega_0 + \omega_1 = 1, \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\mu}^T = \omega_0 \boldsymbol{\mu}_0 + \omega_1 \boldsymbol{\mu}_1. \quad (8)$$

类间离散度测度表示为:

$$trS_B = \omega_0 [(\mu_{0i} - \mu_{Ti})^2 + (\mu_{0j} - \mu_{Tj})^2] + \omega_1 [(\mu_{1i} - \mu_{Ti})^2 + (\mu_{1j} - \mu_{Tj})^2], \quad (9)$$

最佳阈值 (s^*, t^*) 应满足下式:

$$trS_B(s^*, t^*) = \max\{trS_B(s, t)\}. \quad (10)$$

2.3 直线阈值分割法

文献[8-9]中的假设与实际二维直方图并不一定相符,该假设会导致分割时忽略在二维直方图对角线附近接近点对阈值的一些区域的概率分布,进而影响分割的准确性。为避免直分法的不合理假设,文献[10-11]分别提出了直线阈值法和斜分法,二者都是在二维直方图中以一条垂直于主对角线的斜线划分出目标区域和背景区域。

直线阈值法和斜分法对二维直方图的区域划分如图 1 中(b)图所示。在二维直方图中,斜线下方区域为 C_0 ,斜线上方区域为 C_1 。由于 C_0 和 C_1 完整覆盖了二维直方图,因此式(7)和式(8)亦成立。类间离散度测度的计算式同式(9)。

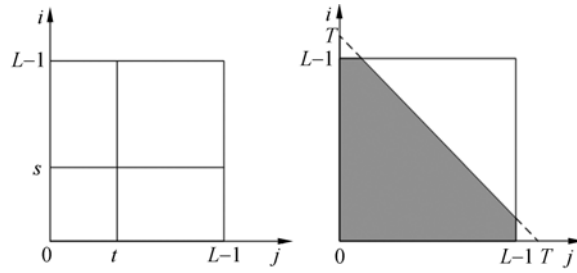
$$\begin{aligned} trS_B &= \omega_0 (\mu_{0i} - \mu_{Ti})^2 + \omega_1 (\mu_{1i} - \mu_{Ti})^2 + \omega_0 (\mu_{0j} - \mu_{Tj})^2 + \omega_1 (\mu_{1j} - \mu_{Tj})^2 = \omega_0 (\mu_{0i}^2 - 2\mu_{0i}\mu_{Ti} + \mu_{Ti}^2) + \omega_1 (\mu_{1i}^2 - \\ & 2\mu_{1i}\mu_{Ti} + \mu_{Ti}^2) + \omega_0 (\mu_{0j}^2 - 2\mu_{0j}\mu_{Tj} + \mu_{Tj}^2) + \omega_1 (\mu_{1j}^2 - 2\mu_{1j}\mu_{Tj} + \mu_{Tj}^2) = \omega_0 \mu_{0i}^2 + \omega_1 \mu_{1i}^2 - 2(\omega_0 \mu_{0i} + \\ & \omega_1 \mu_{1i}) \mu_{Ti} + (\omega_0 + \omega_1) \mu_{Ti}^2 + \omega_0 \mu_{0j}^2 + \omega_1 \mu_{1j}^2 - 2(\omega_0 \mu_{0j} + \omega_1 \mu_{1j}) \mu_{Tj} + (\omega_0 + \omega_1) \mu_{Tj}^2 = \omega_0 \mu_{0i}^2 + \omega_1 \mu_{1i}^2 - \\ & (\omega_0 \mu_{0i} + \omega_1 \mu_{1i})^2 + \omega_0 \mu_{0j}^2 + \omega_1 \mu_{1j}^2 - (\omega_0 \mu_{0j} + \omega_1 \mu_{1j})^2 = \omega_0 (1 - \omega_0) \mu_{0i}^2 + \omega_1 (1 - \omega_1) \mu_{1i}^2 - 2\omega_0 \omega_1 \mu_{0i} \mu_{1i} + \\ & \omega_0 (1 - \omega_0) \mu_{0j}^2 + \omega_1 (1 - \omega_1) \mu_{1j}^2 - 2\omega_0 \omega_1 \mu_{0j} \mu_{1j} = \omega_0 \omega_1 [(\mu_{0i} - \mu_{1i})^2 + (\mu_{0j} - \mu_{1j})^2], \end{aligned} \quad (14)$$

令:

$$d = \sqrt{[(\mu_{0i} - \mu_{1i})^2 + (\mu_{0j} - \mu_{1j})^2]}, \quad (15)$$

则 d 可以表示二维直方图中 C_0 的均值点 (μ_{0i}, μ_{0j}) 到 C_1 的均值点 (μ_{1i}, μ_{1j}) 的距离。

式(14)表明,二维 Otsu 法的类间离散度测度分别与 $\omega_0 \omega_1$ 和 d^2 成正比。对于 $\omega_0 \omega_1$ 项,当 C_0 和 C_1 的概率越接近,其取值越大。由二维 Otsu



(a) 直分法 (b) 直线阈值法
(a) Vertical segmentation (b) Line thresholding

图 1 二维直方图中的区域

Fig. 1 Regions in 2D histogram

文献[10]中国值直线的表示形式为 $i + j = s + t$,其最佳阈值的判定依据同式(10),在获得 s^* 和 t^* 后,即确定了最佳阈值直线 $i + j = s^* + t^*$ 。文献[7]中将阈值直线表示为 $i + j = T$ 的形式,相应地,最佳阈值直线 $i + j = T^*$ 按 T^* 能使下式成立的原则确定:

$$trS_B(T^*) = \max\{trS_B(T)\}. \quad (11)$$

显然,由斜分法求得的阈值直线与直线阈值法求得的阈值直线为同一条直线,因此斜分法的分割结果与直线阈值法是相同的。文献[10]与文献[11]的区别仅在于采用了不同的快速递推算法求取最佳阈值直线。

2.4 二维 Otsu 法类间离散度测度的分析

二维 Otsu 法中,当满足式(7)、式(8)时,有:

$$\mu_{Ti} = \omega_0 \mu_{0i} + \omega_1 \mu_{1i}, \quad (12)$$

$$\mu_{Tj} = \omega_0 \mu_{0j} + \omega_1 \mu_{1j}. \quad (13)$$

于是由式(7)、(9)、(12)、(13),有:

法的阈值选取准则可知,二维 Otsu 法所选取阈值有使 C_0 与 C_1 概率接近的趋势,同时也有使 C_0 与 C_1 均值点之间距离最大的趋势。

对于绝大多数图像,当其未受噪声干扰时,由于其像素灰度值与其邻域平均灰度接近,因而图像在二维直方图中的概率分布主要集中于主对角线附近区域。

考虑当图像受到高斯噪声污染时,图像在二维直方图中的概率分布区域将不仅局限于主对角线附近区域,在主对角线上下两侧更广的区域也有分布,且噪声越强,概率分布区域越大。此时,若按使 C_0 与 C_1 均值点之间距离最大的原则选取分割阈值,则 C_0 与 C_1 均值点之间的直线将容易偏离二维直方图主对角线方向,即 C_0 与 C_1 的均值点容易偏离主对角线方向,分割结果受到了干扰噪声较大程度的影响,未能很好地抵抗噪声。

3 直线截距直方图的建立及阈值分割

3.1 直线截距直方图的建立

若以 (i, j) 表示由像素点的灰度及其领域平均灰度组成的二元组,则 $i + j = k$ 可以表示二维直方图中与主对角线垂直且直线截距为 k 的直线,二维直方图中共有与主对角线垂直的直线 $2L$ 条。

定义 1:以 f_k 表示二元组符合 $i + j = k$ 的频数,图像中像素点符合 $i + j = k$ 的概率密度为:

$$p_k = \sum_{i+j=k} p_{ij} = f_k / N, k = 0, 1, \dots, 2L-1, \quad (16)$$

式中: $\sum_{k=0}^{2L-1} p_k = 1$ 。由上述方法获得的直方图定义为直线截距直方图。

对于 f_k 的计算,可直接由遍历图像中所有像素点的 $i + j$ 值并加以统计获得,无需先计算图像的二维直方图。显然,直线截距直方图为一维直方图。

图 2 所示为 Lena 图像的直线截距直方图。

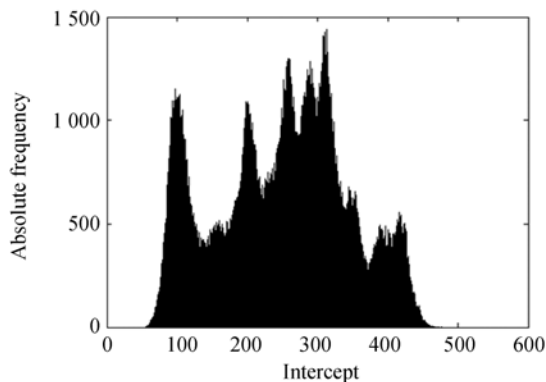


图 2 Lena 的直线截距直方图

Fig. 2 Line intercept histogram of Lena

3.2 新阈值分割算法

采用与主对角线垂直的阈值直线对二维直方图进行分割时,由直线的截距可唯一确定阈值直线,以表示阈值直线的截距。求最佳直线阈值的实质就是确定最佳截距阈值 T^* ,求解过程可基于 Otsu 准则和直线截距直方图进行。

令 $\mu_T = \sum_{k=0}^{2L-1} kp_k$,在直线截距直方图中由阈值 T 对直线截距进行分割可得两类 $C_0(T)$ 和 $C_1(T)$, $C_0(T) = [0, \dots, T]$, $C_1(T) = [T+1, \dots, 2L-1]$ 。 $C_0(T)$ 和 $C_1(T)$ 的均值分别记为 $\mu_0(T)$ 和 $\mu_1(T)$ 。令 $\omega_0(T) = \sum_{k=0}^T p_k$, $\omega_1(T) = 1 - \omega_0(T)$,

$\mu(T) = \sum_{k=0}^{2L-1} kp_k$,则可得:

$$\mu_0(T) = \sum_{k=0}^T kp_k / \omega_0(T) = \mu(T) / \omega_0(T), \quad (17)$$

$$\mu_1(T) = \sum_{k=T+1}^{2L-1} kp_k / \omega_1(T) = \frac{\mu_T - \mu(T)}{1 - \omega_0(T)}. \quad (18)$$

于是可得类间方差 σ_B^2 :

$$\sigma_B^2(T) = \omega_0(T)[\mu_0(T) - \mu_T]^2 + \omega_1(T)[\mu_1(T) - \mu_T]^2 = \omega_0(T)\omega_1(T)[\mu_0(T) - \mu_1(T)]^2, \quad (19)$$

最佳阈值 T^* 的选取原则即为:

$$\sigma_B^2(T^*) = \max_{0 \leq T < 2L-1} \sigma_B^2(T). \quad (20)$$

获得 T^* 后,即可按如下规则对图像中的像素点进行归类:

$$f(x, y) = \begin{cases} 0 & i + j \leq T^* \\ L-1 & i + j > T^* \end{cases}, \quad (21)$$

式(21)中 $f(x, y)$ 表示分割后的图像。

4 算法性能分析与比较

4.1 算法抗噪能力分析比较

本文算法中的任一截距阈值,都可对应二维直方图中一条阈值直线 $i + j = T$,用该直线对二维直方图进行区域划分时,可在二维直方图中得到 $0 \leq i + j \leq T$ 和 $T < i + j \leq 2L-1$ 两个区域,分别为 C_0 和 C_1 。考虑式(2)、(3),有:

$$\omega_0(T) = \sum_{k=0}^T p_k = \sum_{i+j=0}^T p_{ij} = \sum_{(i,j) \in C_0} p_{ij} = \omega_0, \quad (22)$$

$$\omega_1(T) = \sum_{k=T+1}^{2L-1} p_k = \sum_{i+j=T+1}^{2L-1} p_{ij} = \sum_{(i,j) \in C_1} p_{ij} = \omega_1, \quad (23)$$

由式(17)、式(22)及式(4),可得:

$$\begin{aligned} \mu_0(T) &= \sum_{k=0}^T kp_k / \omega_0(T) = \sum_{i+j=0}^T (i+j) p_{ij} / \omega_0(T) = \\ &= \sum_{(i,j) \in C_0} (i+j) p_{ij} / \omega_0 = \sum_{(i,j) \in C_0} ip_{ij} / \omega_0 + \\ &= \sum_{(i,j) \in C_0} jp_{ij} / \omega_0 = \mu_{0i} + \mu_{0j}, \end{aligned} \quad (24)$$

类似地,可得:

$$\mu_1(T) = \mu_{1i} + \mu_{1j}, \quad (25)$$

进一步地,有:

$$\begin{aligned} \sigma_B^2(T) &= \omega_0(T) \omega_1(T) [\mu_0(T) - \mu_1(T)]^2 = \\ &= \omega_0 \omega_1 [(\mu_{0i} + \mu_{0j}) - (\mu_{1i} + \mu_{1j})]^2 = \\ &= \omega_0 \omega_1 [(\mu_{0i} - \mu_{1i}) + (\mu_{0j} - \mu_{1j})]^2 = \\ &= \omega_0 \omega_1 [(\mu_{0i} - \mu_{1i})^2 + (\mu_{0j} - \mu_{1j})^2 + \\ &= 2(\mu_{0i} - \mu_{1i})(\mu_{0j} - \mu_{1j})], \end{aligned} \quad (26)$$

d 的定义同式(15),二维直方图中角度 θ 的定义如图 3 所示,可得:

$$\mu_{1j} - \mu_{0j} = d \cos \theta, \quad (27)$$

$$\mu_{1i} - \mu_{0i} = d \sin \theta, \quad (28)$$

将式(15)、(27)、(28)代入式(26),可得:

$$\sigma_B^2(T) = \omega_0 \omega_1 d^2 (1 + \sin 2\theta), \quad (29)$$

由式(29)可知,本文算法的类间离散度测度与二维 Otsu 法相比,增加了一项 $(1 + \sin 2\theta)$,该项的值在 $\theta = 45^\circ$ 时取得最大值,即当 C_0 与 C_1 均值点之间的直线方向与二维直方图主对角线方向一致时取得最大值。

考虑图像被高斯噪声污染的情况,该项的作用将使得 C_0 与 C_1 均值点之间的直线不易偏离二维直方图主对角线,可以比二维 Otsu 法有更好的抵抗噪声的能力。特别地,在同一直线阈值下,二维 Otsu 法中的直线阈值法与本文算法的类间离散度测度中的 $\omega_0 \omega_1$ 项相等,而对于类间离散度测度的其余项,显然 $d^2 (1 + \sin 2\theta)$ 项比 d^2 项有更强的抗噪能力。

4.2 算法计算复杂度分析与比较

建立截距直方图时与建立二维直方图一样需遍历图像中所有像素点的二维信息以统计频数。二维直方图需要 L^2 个存储单元,建立它时需对大小为 $L \times L$ 的二维数组操作,而直线截距直方图需要 $2L$ 个存储单元,建立它时只需操作大小为 $1 \times 2L$ 的一维数组。因此,建立直线截距直方图比建立二维直方图速度更快。

本文算法对概率密度只需计算 $2L$ 次,而二维 Otsu 法则需计算 L^2 次。

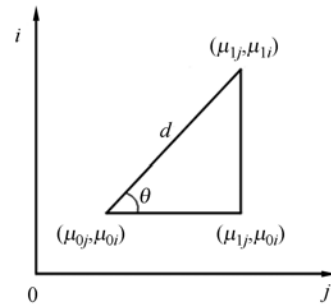


图 3 θ 的定义

Fig. 3 Definition of θ

本文算法求解最佳阈值时只需基于 $2L$ 空间上的一维直方图遍历计算类间方差。文献[10-11]的分析表明,二维 Otsu 法中的直线阈值法在求解最佳阈值时的计算复杂度低于直分法及其快速算法。但即使是直线阈值法,其求解过程中需遍历 L^2 大小的二维直方图以计算二维总均值矢量以及每条阈值直线上的 $\sum p_{ij}$, $\sum ip_{ij}$, $\sum jp_{ij}$,此外还需在 $2L$ 空间上遍历计算 3 个变量并进一步计算类间离散度矩阵的迹。

在计算类间离散度测度时占用的内存空间方面,文献[10]和[11]算法分别需要 $3 \times 2L + 4 \times L^2$ 个及 $4 \times 2L$ 个存储单元存储变量,而本文算法只需 $2 \times 2L$ 个存储单元存储变量。

5 实验结果

实验的硬件条件为 T7250 2.00G CPU, 3G 内存的笔记本电脑,软件采用 Matlab 7.1。实验中对算法程序生成 P 文件,并采用程序执行第二次以后的计时值,以避免 Matlab 解析程序和加载程序对计时的影响。

通过大量实验,对文献[9-11]中的算法与本文算法的性能进行了比较。实验中针对 Lena 清晰图像以及 Lena、建筑、电路板、大米的含噪图像应用不同算法进行分割。所添加噪声为均值为 0 的高斯噪声。

表 1 和表 2 中分别给出了上述不同图像分割时几种算法的分割阈值和所耗时间,其中图像所添加的噪声的方差为 0.1。文献[10-11]中的阈值本质上相同,故只列出文献[11]阈值。从表 1

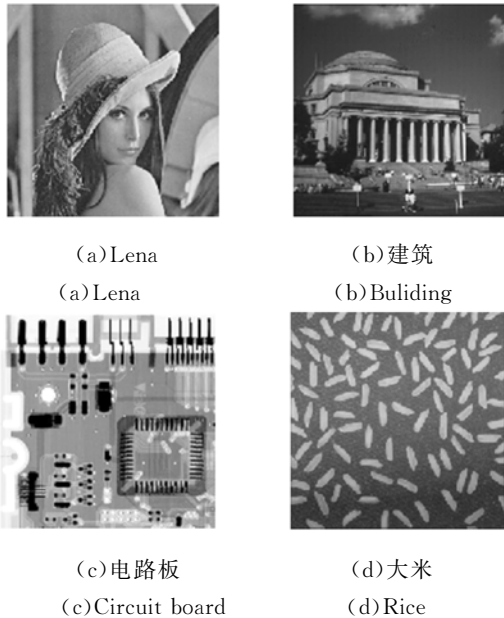


图 4 原始图像

Fig. 4 Initial images

表 1 算法分割阈值

Tab. 1 Threshold of algorithms

	Lena	有噪 Lena	有噪电 路板	有噪 建筑	有噪 大米
文献[8-9] 算法(点对)	121,118	124,131	113,122	110,109	139,138
文献[11] 算法(截距)	234	244	254	192	236
本文算法 (截距)	236	240	221	200	255

表 2 算法时间性能

Tab. 2 Time performance of algorithms (ms)

	Lena	有噪 Lena	有噪 电路板	有噪 建筑	有噪 大米
文献[9] 算法	93.18	97.38	95.14	92.28	93.61
文献[10] 算法	47.50	47.99	41.55	43.23	45.97
文献[11] 算法	19.82	20.91	20.05	19.88	18.23
本文算法	0.06	0.05	0.07	0.05	0.07
建二维直 方图	21.32	23.59	14.02	16.54	4.32
建截距直 方图	15.83	16.08	10.94	12.79	3.02

结果不难看出,二维 Otsu 法中,直分法的点对阈值并不在文献[11]算法所得的阈值直线上,而文献[11]中关于不同方法错分区域的讨论中却以阈值直线经过点对阈值为前提,该前提与实际计算结果并不一致。表 1 中,对 Lena 和有噪 Lena 的阈值,几种算法非常接近;但对剩余 3 幅图像,结果则相差较远,其中,本文算法阈值比文献[11]算法阈值距离文献[8-9]阈值的点对之和更近。

表 2 中,文献[9-11]算法的时间指从二维直方图计算出最佳阈值的时间,本文算法的时间指从截距直方图计算出最佳阈值的时间。表 2 中,本文算法求解最佳阈值时间仅为文献[9]算法的 0.064%、文献[10]算法的 0.133%、文献[11]算法的 0.305%。表 2 中还比较了建立截距直方图和建立二维直方图的时间,前者小于后者。从表 2 结果可得,新算法建立截距直方图与求解最佳阈值所耗时间之和平均仅为建立二维直方图时间的 74.15%,因此会快于包括文献[9-15]算法在内的任何基于二维直方图的快速 Otsu 算法。

虽然文献[11]中的实验结果似乎表明二维 Otsu 法中的直线阈值法比直分法有更好的抗噪结果,但该文献采用的直分法以图 1(a)的 $i \leq s$ 区域为目标区域,若如本文实验中采用传统二维 Otsu 法^[4]的直分法,实验结论则不同。图 5 所示为高斯噪声方差为 0.006 时的分割结果,文献[10-11]中的直线阈值法与文献[9]中的直分法相比,其保留目标信息更好,但是分割结果也包含了更多的噪声。究其原因,直线阈值法因考虑了二维直方图中的全部区域的概率分布而获得了更多的目标信息;同时,直线阈值法的两类完整覆盖了二维直方图,而直分法计算时忽略了偏离主对角线的两个以噪声为主的区域的概率,从而在计算其类间离散度测度中的 d^2 项时受噪声影响更小。进一步从图 5 可以看出,本文算法保留的目标信息与文献[10-11]的算法基本一致,但对建筑、电路板及大米的含噪图像所去除的噪声比二维 Otsu 法的直线阈值法和直分法更多。对所添加高斯噪声方差分别为 0.002、0.003、0.004、0.006、0.008、0.1 时的图像做了分割实验,发现在方差为 0.002、0.003 时几种算法的抗噪效果没有明显差异,随着噪声方差增大,前述不同算法抗噪能力的差异逐渐增大。



(a)原始图像

(a)Initial images



(b)文献[8-9]算法

(b)Algorithm in Ref. [8-9]



(c)文献[10-11]算法

(c)Algorithm in Ref. [10-11]



(d)本文算法

(d)Proposed algorithm

图 5 分割算法的结果比较

Fig. 5 Comparison of segmentation results

6 结 论

本文中针对二维 Otsu 法进行了分析,指出其在抗噪方面的弱点。文中提出了一种新算法,该算法从图像二维信息直接建立一维的直线截距直方图并应用 Otsu 准则求解最佳截距阈值,进而利用二维信息对图像进行分割。理论分析表明,新算法可以在一定程度上避免二维 Otsu 法在抗噪方面的缺点。在实验中采用均值为 0 的高

斯噪声污染图像。结果表明,当所实验图像的噪声方差大于 0.003 且逐渐增加时,不同算法的抗噪能力差异逐渐体现,本文算法抗噪表现稳健。实验中,新算法计算阈值的速度比二维 Otsu 法中直分法和直线阈值法的快速算法快 2 个数量级以上,占用内存空间则更少;从建立截距直方图至计算出阈值的时间平均仅为建立二维直方图时间的 74.15%,因而比基于二维直方图的 Otsu 法更适于实时应用。

新算法在基于直方图计算 Otsu 阈值时未采

取快速搜索算法。而当噪声较弱时,新算法的抗噪性能与其它二维 Otsu 法相比没有明显差异。

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 Transactions on System Man and Cybernetic*, 1979,9(1):62-66.
- [3] SAHOO P K, SOLTANI S, WONG A K C, *et al.*. A survey of thresholding techniques[J]. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1988,41:233-260. (in Chinese)
- [4] REZA F M, MOHAMED C. AdOtsu: An adaptive and parameterless generalization of Otsu's method for document image binarization[J]. *Pattern Recognition*, 2012, 45:2419-2431.
- [5] 刘洋, 田小建, 王晴, 等. 采用局部分形的高效图像分割方法在红外云图处理中的应用[J]. *光学精密工程*, 2011,19(6):1367-1374.
- LIU Y, TIAN X J, WANG Q. Application of efficient image segmentation method based on local fractal in the infrared cloud image processing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(6):1367-1374. (in Chinese)
- [6] 姚峰林, 高世桥. 基于高速摄影动态测试微陀螺振动[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1):165-170.
- YAO F L, GAO S Q. Dynamic test of vibration for micro machined gyroscope based on high speed photography[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 165-170. (in Chinese)
- [7] 程万胜, 臧希祜, 赵杰. 面向 Otsu 阈值搜索的 PSO 惯性因子改进方法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(10):1907-1912.
- CHENG W S, ZHANG X K, ZHAO J. Modified strategy to inertia weight in PSO for searching threshold of Otsu rule[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10):1907-1912. (in Chinese)
- [8] 刘建庄, 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.
- 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. (in Chinese)
- [9] 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 H Y, PAN D L, XIA D S. A fast algorithm for two-dimensional Otsu adaptive threshold algorithm[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(9):968-971. (in Chinese)
- [10] 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.
- FAN J L, ZHAO F. Two-dimensional Otsu's curve thresholding segmentation method for gray-level images[J]. *Acta Electronic Sinica*, 2007,35(4):751-755. (in Chinese)
- [11] 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.
- 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. (in Chinese)
- [12] CHEN Q, ZHAO L, LU J, *et al.*. Modified two-dimensional Otsu image segmentation algorithm and fast realisation [J]. *IET Image Processing*, 2012,6(4):426-433.
- [13] 汪荣贵, 吴昊, 方帅, 等. 一种新的自适应二维 Otsu 图像分割算法研究[J]. *中国科学技术大学学报*, 2010,40(8):841-847.
- WANG R G, WU H, FANG S, *et al.*. A new adaptive two-dimensional Otsu image segmentation algorithm research[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2010, 40(8): 841-847. (in Chinese)
- [14] PUTHIPONG S, THITIWAN S. A two-stage Otsu's thresholding based method on a 2D histogram[C]. *2011 IEEE 7th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing*, 2011:345-348.
- [15] 张新明, 孙印杰, 郑延斌. 二维直方图准分的 Otsu 图像分割及其快速实现[J]. *电子学报*, 2011, 39

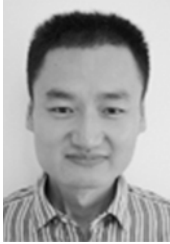
上述内容可以作为后续进一步提高算法性能工作的研究重点。

(8):1778-1784.

ZHANG X M, SUN Y J, ZHENG Y B. Precise two-dimensional Otsu's image segmentation and its

fast recursive realization[J]. *Acta Electronic Sinica*, 2011, 39(8):1778-1784. (in Chinese)

作者简介:



何志勇(1976—),男,内蒙古包头人,博士研究生,讲师,1998年、2003年于合肥工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事机器视觉、信号处理等方面的研究, E-mail: hezhiyong@suda.edu.cn



陈立国(1974—),男,辽宁葫芦岛人,教授,博士生导师,主要从事微纳米驱动及微操作机器人技术、生物操作机器人、微流控与微系统技术等方面的研究, E-mail: clg@hit.edu.cn



黄伟国(1981—),男,安徽休宁人,博士,讲师,2004年、2010年于中国科学技术大学分别获得学士、博士学位,主要从事振动信号处理、图像处理等方面的研究, E-mail: wghuang@suda.edu.cn

导师简介:



孙立宁(1964—),男,黑龙江鹤岗人,教授,博士生导师,1985年、1988年、1993年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事先进机器人技术、微纳操作技术与装备、基于 MEMS 技术的微纳器件与系统等方面的研究。 E-mail: lnsun@hit.edu.cn

● 下期预告

调幅式电容位移传感器的峰值检波电路设计

黄向东*, 刘立丰, 谭久彬, 马 标

(哈尔滨工业大学 超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

针对调幅式电容位移传感器解调过程中由系统不确定相移导致的信号解调不准确的问题,提出了一种基于改进的峰值保持电路的调幅式电容位移传感测量方法。首先,分析了调幅式电容位移传感器及其检测电路的工作原理,继而在研究调幅信号附加相移产生机理的基础上,提出了延迟反馈式峰值保持电路以去除附加相移对峰值解调的影响;然后,设计并制作了调幅式电容位移传感器,并对其各个性能指标进行了测试;最后,对实验结果和误差进行了分析。实验表明,本文提出的峰值保持电路的输出线性度优于 0.05%,制作的传感器在 0~25 μm 的数据稳定性优于 10 nm/30 min,传感器测量偏差最大值为 36 nm。采用延迟反馈型峰值保持电路能有效地解决系统不确定相移带来的峰值检波不准确的问题,所制作的电容传感器可以满足高精度测量的要求。