

基于二维直方图重建的 Otsu 图像分割算法

龚 勰 付云凤 叶剑英 姚玉敏

(重庆大学数学与统计学院 重庆 401331)

摘要 针对二维 Otsu 算法因区域误分而产生的抗噪性差和计算量较大这一问题,提出了一种基于二维直方图重建的 Otsu 图像分割算法。该算法首先分析了原始算法中二维直方图所存在的误分和不足;然后重建二维直方图,以此来减弱噪声的干扰;最后将二维直方图区域划分由原来的四分法改为二分法,从而提高了计算速度。实验结果表明,本算法具有更强的抗噪性,分割效果也更为理想。

关键词 二维 Otsu, 图像分割, 阈值, 二维直方图

中图分类号 TP391.41 文献标识码 A

Otsu Image Segmentation Algorithm Based on Rebuilding of Two-dimensional Histogram

GONG Qu FU Yun-feng YE Jian-ying YAO Yu-min

(College of Mathematics & Statistics, Chongqing University, Chongqing 401331, China)

Abstract Concerning the poor anti-noise performance in two-dimensional Otsu's method due to the obviously wrong region division and its huge calculation, this paper proposed an Otsu image segmentation algorithm based on rebuilding of the two-dimensional histogram. This method firstly analyzes the obviously wrong region division of two-dimensional histogram and its shortage, then rebuilds the two-dimensional histogram for reducing the noise interference, finally transfers the region division in two-dimensional histogram from four partitions into two partitions, thus reducing the search space of threshold, which saves a lot of processing time. The experimental results show that the proposed algorithm has better anti-noise performance and better segmentation result.

Keywords Two-dimensional Otsu, Image segmentation, Threshold, Two-dimensional Otsu's histogram

1 引言

图像分割是指将一幅图像分解为若干个互不交叠的、有意义的、具有相同性质的区域^[1,2]。其主要的目的是从一幅图像中提取感兴趣的目标,它是图像分析和图像理解的基础。至今,提出的分割算法已有上千种,其中最经典的方法是基于灰度阈值的分割方法。在图像阈值化分割计算中,Otsu 法^[3]因计算简单、实时性高等优点被广泛使用^[4,5]。但是,一维 Otsu 方法只考虑了图像灰度信息,对噪声较为敏感,抗噪性较弱。为此,刘健庄等人^[6]在像素灰度和邻域平均灰度的基础上提出了二维 Otsu 方法,其效果较一维方法有明显改善。但由于二维 Otsu 算法计算复杂度为 $O(L^4)$,导致了其难以用于实时处理。随后,学者们陆续提出了多种二维 Otsu 法的快速算法^[7-10],取得了不同程度的效果。

但是目前基于二维直方图选取阈值的方法几乎都是用分别与两坐标轴平行的相互垂直的十字线将二维直方图分成 4 个矩形区域,计算时仅仅考虑分别对应于目标内部和背景内部的两个沿对角线的矩形区域,忽略了远离对角线的两个区域,而位于阈值向量附近且像素灰度级与其邻域平均灰度级相差不大的区域也简单地认为出现的概率为零。显然这一假设与实际不符合,因此分割结果并不够准确,抗噪性较弱。

本文针对二维 Otsu 算法因区域误分而产生的抗噪性差和计算量较大这一问题,提出了一种基于二维直方图重建的二维 Otsu 图像分割算法。本文最后给出了算法的分割结果和运行时间,并与二维 Otsu 算法、二维 Otsu 快速算法、二维 Otsu 分解算法进行了对比。实验结果表明,本文算法具有更强的抗噪性能,且分割效果更为理想,是一种有效、可行的图像分割算法。

2 传统二维 Otsu 算法

设原图像 $f(x, y)$ 的灰度级为 L , 其邻域平滑图像 $g(x, y)$ (以 3×3 邻域均值作为该像素灰度值) 的灰度级也为 L , 对于图像中的任何一个像素,就有了一个二进制组: 像素灰度值 i 和邻域平均灰度值 j 。假设像素灰度值为 i 且邻域平均灰度值为 j 的像素点个数为 f_{ij} , 图像总像素个数为 M , 则二维联合概率密度为:

$$p_{ij} = f_{ij} / M, \text{ 且 } \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} f_{ij} = M$$
$$\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} p_{ij} = 1 \tag{1}$$

任意给定一个阈值 (s, t) , s 为灰度阈值, t 为邻域灰度阈值,这样就可以将图像的二维直方图分割成图 1 所示的 4 个区域: A, B, C, D。其中, 对角线上的两个区域 B 和 C 分别对

到稿日期: 2012-10-18 返修日期: 2013-03-14 本文受中央高校基本科研业务费基金项目(CDJXS11100032)资助。

龚 勰(1963—),女,博士,教授,主要研究方向为图像处理、小波分析;付云凤(1988—),女,硕士,主要研究方向为图像处理, E-mail: fuyun-feng626@163.com;叶剑英(1984—),女,硕士生,主要研究方向为图像处理;姚玉敏(1982—),女,硕士生,主要研究方向为图像分割。

应于目标和背景,而远离对角线的区域 A 和 D 则对应于边界和噪声。假设目标和背景分别记为 C_1 和 C_0 ,其出现的概率分别为:

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} p_{ij} \\ \omega_1 &= \sum_{i=s+1}^{L-1} \sum_{j=t+1}^{L-1} p_{ij} \end{aligned} \quad (2)$$

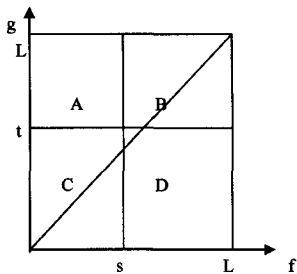


图1 二维直方图四分法

两类对应的均值矢量为:

$$\mu_0 = (\mu_{0i}, \mu_{0j})^T = \left(\sum_{i=0}^{s-1} \sum_{j=0}^{t-1} i p_{ij}, \sum_{i=0}^{s-1} \sum_{j=0}^{t-1} j p_{ij} \right)^T \quad (3)$$

$$\mu_1 = (\mu_{1i}, \mu_{1j})^T = \left(\sum_{i=s+1}^{L-1} \sum_{j=t+1}^{L-1} i p_{ij}, \sum_{i=s+1}^{L-1} \sum_{j=t+1}^{L-1} j p_{ij} \right)^T \quad (4)$$

总体均值矢量为:

$$\mu_T = (\mu_{Ti}, \mu_{Tj})^T = \left(\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} i p_{ij}, \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} j p_{ij} \right)^T \quad (5)$$

在大多数情况下,远离对角线的概率可以忽略不计,即假设图1中的 A 和 D 两部分的概率为 0。此时,可以证明:

$$\omega_0 + \omega_1 \approx 1; \mu_T \approx \omega_0 \mu_0 + \omega_1 \mu_1 \quad (6)$$

定义离散度矩阵为:

$$Sb = \sum_{k=0}^1 \omega_k [(\mu_k - \mu_T)(\mu_k - \mu_T)^T] \quad (7)$$

用离散度矩阵的迹作为目标和背景类的离散度的测度:

$$\begin{aligned} T_{mcc}(Sb) &= \omega_0 [(\mu_{0i} - \mu_{Ti})^2 + (\mu_{0j} + \mu_{Tj})^2] + \\ &\quad \omega_1 [(\mu_{1i} - \mu_{Tj})^2 + (\mu_{1i} - \mu_{Tj})^2] \end{aligned} \quad (8)$$

当这个离散矩阵的迹为最大值时,取得的分割阈值就是最优阈值(s^*, t^*),即

$$\begin{aligned} (s^*, t^*) &= \arg \max \{T_{mcc}(Sb)\} \\ 0 \leq s^*, t^* &\leq L-1 \end{aligned} \quad (9)$$

3 本文算法

3.1 二维直方图存在的错分与不足

定义 1 如图 2 所示,在二维直方图中,将与对角线 OM 垂直并将二维直方图区域分成了背景和目标的一系列直线,定义为二维直方图的分割线。

定义 2 经过最佳阈值点的分割线,定义为二维直方图的阈值线。

二维 Otsu 算法分割过程中存在着如下错分与不足:

(1)如图 1 所示,对区域 A 和 D 的忽略不计与实际不符合,区域 A 和 D 里像素点分布虽极少,但刻画了图像的大量边缘信息,忽略容易影响分割的准确度。

(2)对噪声的处理不统一,抗噪性弱。虽然忽略了区域 A 和区域 D 内的噪声,但区域 B 和区域 C 中仍然可能存在着噪声,二维 Otsu 算法并没有对其进行处理。另外,在获取最佳阈值后,二值化图像是对包括区域 A 和区域 D 的整个区域进行分割。由于噪声分布的随机性,致使本应属于背景区域的噪声点在二值化却被误认为是目标点,导致在黑色背景区中形成“白点”;同样,本应属于目标区域的噪声点在二值化时被误认为是背景点,导致在白色区域中形成“黑点”。

(3)时间复杂度较大,达到了 $O(L^4)$,使得计算时间较长。因此,本文不再将二维直方图分为 4 个区域,而采用分割线将其划分为两个区域(见图 2)。这样不仅可以充分考虑平面内每一个信息点,而且还可将寻找二维最佳阈值转化为寻找一维最佳阈值(阈值线),即将算法的复杂度从 $O(L^4)$ 降到 $O(\sqrt{2}L) = O(L)$,减少了运算时间。

3.2 二维直方图重建

通过上面的分析可以看出,二维 Otsu 算法虽然综合考虑了像素点信息及其空间邻域信息,但并没有从根本上达到去噪目的。所以本文从去噪的目的出发,将原始二维直方图进行重建,矫正二维直方图中的某些信息点,使其分布恢复到正常状态,以减弱噪声的影响。

通常情况下,像素点基本都分布在对角线 OM 附近。在图 2 中,首先通过位于主对角线两侧且与其平行的 4 条斜线 L_1, L_2, L_3, L_4 ,将直方图区域分成一个内点区、两个边界点区和两个噪声点区^[11]; L_1 和 L_2 之间的区域由于像素点灰度级和邻域平均灰度级接近,认为是目标和背景区; L_1 和 L_3, L_2 和 L_4 之间的两个区域因像素点灰度级和邻域平均灰度级有一定差别,视为目标和背景之间过渡的边界点区; L_3 和 L_4 以外的两个区域由于像素点灰度级和邻域平均灰度级差别较大,视为噪声点区。在二维直方图中,内点区和边界点区仍然保留其原有的像素点位置,不进行矫正,而只是对两个噪声点区域进行矫正。

图 2 所示的分割线 L_5 ,将二维直方图区域分割成了目标和背景两部分,分别表示为 Ob 和 Ba 。对于 L_3 以外的噪声点区域,像素点灰度级较小而邻域平均灰度级较大,是目标区域上的噪声点,采用下面的办法进行矫正:令 g 保持不变,同时 $f=g$ 。而对于 L_4 以外的噪声点区域,像素点灰度级较大而邻域平均灰度级较小,是背景区域上的噪声点,采用下面的办法进行矫正:令 g 保持不变,同时 $f=g$ 。这样就将所有的噪声点都矫正到了对角线 OM 上,同时使得二维直方图中所有的像素点都分布在内点区和边界点区,即 L_3 和 L_4 之间,从而大大地减少了噪声的干扰。在本文算法中,直线 L_3 和直线 L_1 、直线 L_1 和直线 OM、直线 OM 和直线 L_2 、直线 L_2 和直线 L_4 之间的距离均为 10。

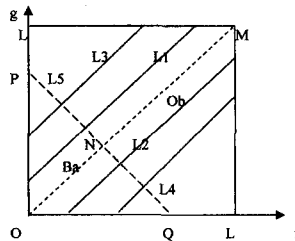


图2 二维直方图二分法

3.3 二维直方图降维

重建二维直方图后,像素点将更严格、更紧密地沿着对角线方向分布,减少了噪声的干扰,从而使处于同一分割线上的点非常接近中心点。因为这些点的分布相对比较集中,每个点位于且只位于一条分割线上,故可用原点 O 到该分割线的距离来度量处于同一分割线的点。因此,二维直方图中的任意一点 (f, g) 的分布均可用原点到该点所在的分割线的距离 d 来度量,其中 $d \in [0, \sqrt{2}L)$ 。而对于每一分割线,因为与对角线 OM 垂直,故可以用方程表示为: $f + g = C$, 其中 C 为一个常数。由此可以将二维 Otsu 分割算法从求二维最佳阈值

(s^*, t^*) 转化为求一维最佳阈值 d^* 。具体的转化方法如下：首先建立一个与图像大小相同的二维数组 $dis(x, y)$ ，这里仍然将其看作一幅图像，灰度级为 $\sqrt{2}L$ 。然后利用像素点 (x, y) 的灰度值 f 和邻域均值 g 计算出原点到其所在分割线的距离 d ，此距离作为转换后图像中该点的灰度值，即 $dis(x, y) = d$ 。

如图 2 所示，假设某一像素点 (x, y) 处的灰度值为 f ，邻域均值为 g ，那么该点所在的分割线 PQ 的方程表示为： $f + g = C$ 。在 $\text{Rt}\triangle ONQ$ 中， $ON = OQ/\sqrt{2}$ ，而 $d = ON$ ， $OQ = C$ ，故 $dis(x, y) = (f + g)/\sqrt{2}$ 。所有的像素点转换完后，再利用一维 Otsu 准则来获取最佳阈值 d^* 。这样就可以将原算法的时间复杂度从 $O(L^4)$ 降到 $O(L)$ ，节省了计算时间，提高了运算的速度。

4 实验结果与分析

为了验证本文算法的有效性和可行性，实验选取了 3 幅噪声图像，并与文献[3]算法、文献[6]算法、文献[7]算法、文献[10]算法进行了比较。实验环境为 Windows XP 操作系统，系统配置 1. 96GB 内存，3. 19GHz，Mat lab 7. 5. 0 (R2007b)。需要强调的是，在重建二维直方图时，内点区和边界点区仍然保留其原有的像素点位置，不进行矫正，而只是对两个噪声点区域进行矫正。



图 3 Cameraman 椒盐噪声图像的分割效果(噪声参数:0.02)

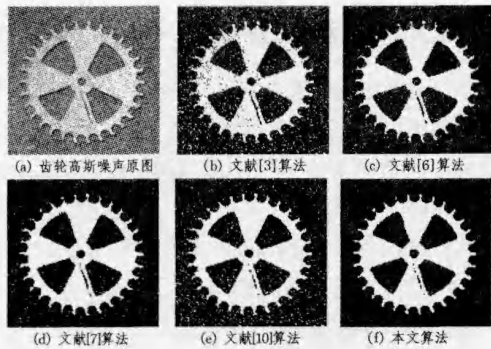


图 4 齿轮高斯噪声图像的分割效果(噪声参数:0.02)



图 5 车牌椒盐噪声图像的分割效果(噪声参数:0.04)

从图 3—图 5 可以看出，文献[6]算法、文献[7]算法、文献[10]算法的分割结果中明显含有大量的噪声，影响了分割的准确度，而本文算法的分割结果几乎不含噪声，分割效果有了极大的改善。这是因为其他 3 个算法存在区域误分导致其抗噪性较弱，而本文算法在分析二维直方图区域的基础上，对噪声区域进行了直方图重建，减少了噪声点的干扰。此外，在计算复杂度方面，本文提出了将二维直方图的四分法改为二分法，使计算复杂度从 $O(L^4)$ 降到了 $O(\sqrt{2}L)$ ，提高了算法的实用性。表 1 给出上述各个算法的阈值和时间对比。

表 1 各个算法的阈值和时间对比(时间单位:s)

图例	Cameraman 图像	齿轮图像	车牌图像
文献[6]算法	(87,169) 26.6400	(166,149) 26.6088	(145,255) 26.6193
文献[7]算法	(86,168) 0.3292	(162,149) 0.2011	(144,226) 0.3765
文献[10]算法	(89,91) 0.0219	(143,144) 0.0235	(154,144) 0.0222
本文算法	127 0.1646	202 0.0558	204 0.2065

结束语 本文分析了二维直方图图中所存在的区域误分，通过对二维直方图的分析，提出了一种二维直方图重建的二维 Otsu 算法。本文算法通过重建二维直方图，有效地降低了噪声点的干扰，同时充分考虑了二维直方图中的每一个像素点信息，将原区域四分法改为了二分法，从原来寻找二维最佳阈值降低到只需寻找一维最佳阈值，降低了计算复杂度，减少了运算时间，提高了算法的计算速度。需要指出的是，本文算法在滤除噪声和细节保持上还有待改善，如何保持图像的细节并达到良好的去噪效果将是笔者进一步的研究方向。

参考文献

- [1] 冈萨雷斯. 数字图像处理(第二版)[M]. 北京:电子工业出版社, 2003:460-521
- [2] 姚敏. 数字图像处理[M]. 北京:机械工业出版社, 2006:243-253
- [3] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66
- [4] Farrahi Moghaddam R, Cheriet M. A multi-scale framework for adaptive binarization of degraded document images [J]. Pattern Recognition, 2010, 43(6): 2186-2198
- [5] Yang Wen-zhu, Li Dao-liang, Zhu Liang, et al. A new approach for image processing in foreign fiber detection [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 68(1): 68-77
- [6] 刘健庄, 栗文青. 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
- [7] 景晓军, 蔡安妮, 孙景鳌. 一种基于二维最大类间方差的图像分割算法[J]. 通信学报, 2001, 22(4): 71-76
- [8] Gong J, Li L Y, Chen W N. Fast recursive algorithms for two-dimensional thresholding [J]. Pattern Recognition, 1998, 31(3): 295-300
- [9] 郝颖明, 朱枫. 二维 Otsu 自适应阈值的快速算法[J]. 中国图像图形学报, 2005, 10(4): 484-488
- [10] 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
- [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): 77-89