

图像的自适应模糊阈值分割法¹⁾

陈 果 左洪福

(南京航空航天大学民航学院 南京 210016)

(E-mail : cgzyx @263. net)

摘 要 针对目前图像模糊阈值分割法所存在的窗口宽度自动选取困难的问题,在预先给定隶属函数和图像像素类别数的情况下,提出了图像模糊阈值分割法的自适应窗宽选取方法。同时,针对用模糊阈值方法难于分割的具有单峰或双峰差别很大的直方图的图像,提出了一种直方图变换方法,对变换后的直方图,利用自适应模糊阈值分割法可以获取有效的分割。最后,算例表明了文中所提方法的简洁性、有效性和很好的鲁棒性。

关键词 图像分割,模糊集,阈值选取,自适应,直方图
中图分类号 TP391.4;V233.4;V263.6

The Image Adaptive Thresholding by Index of Fuzziness

CHEN Guo ZUO Hong-Fu

(Civil Aviation College, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

(E-mail : cgzyx @263. net)

Abstract The problem of automatic selection of window size is investigated for image thresholding by index of fuzziness. Under a predetermined membership function and given the class numbers of image pixels, an adaptive window size selection method for image thresholding by index of fuzziness is put forward. At the same time, images which are difficult to be segmented using thresholding by index of fuzziness because of histograms possessing one mode or two modes with great disparity in between are studied. A histogram transformation method is presented, and through the transformed histogram, images can be segmented effectively using the adaptive thresholding by index of fuzziness. Finally, examples show that the method put forward in this paper is simple, effective, and robust.

Key words Image segmentation, fuzziness sets, threshold selection, adaptive, histogram

1) 南京航空航天大学民航科研基金(Y0202-MH)资助

Supported by Civil Aviation Research Fund of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics(Y0202-MH)

收稿日期 2001-03-20 收修改稿日期 2001-11-22

Received March 20, 2001; in revised form November 22, 2001

1 引言

图像的模糊阈值分割法^[1]由 Pal 等人于 1983 年提出,文献[1]引入灰度图像的模糊数学描述,通过计算图像的模糊率或模糊熵来选取图像分割阈值,并定性地讨论了隶属函数窗宽对阈值选取的影响. Murthy 等人对此又作了进一步研究^[2~4],指出阈值不仅与隶属函数窗宽有关,还与隶属函数的分布特性有关,文献[3]证明了隶属函数应满足的边界条件和对称性条件.文献[5]以海面舰船图像的阈值分割为研究对象,提出一种利用目标-背景对比度自动选取窗宽的方法,并给出了根据目标与摄像机间的相对距离估计目标-背景对比度的算法.

从上述关于图像模糊阈值分割的文献中可见,选定满足约束条件的隶属函数后,理论上总能找到对某种直方图分布适用的窗宽,但当图像变化使直方图分布改变时,预选窗宽就可能失效,因此必须随图像变化自动选取窗宽.文献[5]虽然详细研究了模糊阈值分割法的自适应窗宽选取技术,但它所需要的先验知识太多,而且针对性很强,难于普遍使用.同时,模糊阈值分割法对具有明显单峰特性和双峰差别很大的直方图的图像通常将导致分割失败.有鉴于此,本文将在预先给定满足约束条件的隶属函数和图像像素类别数的情况下,提出一种普遍适用的自适应模糊阈值分割法,该方法将解决自适应窗宽选取的问题.同时,结合目前的直方图变换技术,提出了一种新的直方图变换方法,使自适应模糊阈值法能有效地分割具有单峰或双峰差别很大的直方图特性的图像.

2 图像模糊阈值分割法

设图像 X 大小为 $M \times N$,有 L 级灰度($0 \sim L - 1$), $\mu(X)$ 是定义在 L 级灰度上的隶属函数.若像素 (m, n) 灰度为 x_{mn} ,则隶属度为 $\mu(x_{mn})$, $m = 1 \sim M$, $n = 1 \sim N$,表示像素 (m, n) 具有明亮特性的程度.图像 X 的模糊率 $\mu(X)$ 是对图像的模糊性度量,令 $h(k)$ 为图像 X 中灰度取 k 的像素个数,则 $\mu(X)$ 定义如下:

$$\mu(X) = \frac{2}{MN} \sum_{k=0}^{L-1} T(k) h(k) \quad (1)$$

其中 $T(k) = \min\{\mu(k), 1 - \mu(k)\}$.

确定图像的模糊率 $\mu(X)$ 取决于隶属函数 $\mu(x)$,若取隶属函数为 S 函数,即

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x < q - q \\ 2 \left[\frac{x - q + q}{2q} \right]^2, & q - q \leq x < q \\ 1 - 2 \left[\frac{x - q - q}{2q} \right]^2, & q < x < q + q \\ 1, & q + q \leq x < L \end{cases} \quad (2)$$

则此时 $\mu(x)$ 由窗宽 $c = 2q$ 及参数 q 决定,一旦选定了窗宽 c , $\mu(X)$ 就只与参数 q 有关.模糊阈值法的求解过程是预先设定窗宽 c ,通过改变 q ,使隶属函数 $\mu(x)$ 在灰度区间 $[0, L - 1]$ 上滑动,再通过计算模糊率 $\mu_q(X)$,以获得模糊率曲线.该曲线的谷点,即是使 $\mu_q(X)$ 取极小值的参数 q ,也就是待分割图像的阈值.由于 q 在灰度区间上是遍历的,当取值不同时才影响模糊率曲线,进而影响阈值选取,所以 c 的大小对分割结果的好坏起决定作用. c 取

值越小, $\mu(x)$ 曲线越陡峭, 当其作用于 $h(k)$ 所得到的模糊率曲线在灰度直方图的谷点就可能出现振荡, 从而产生假阈值; c 取值越大, $\mu(x)$ 曲线越平坦, 在模糊率曲线上就可能会平滑掉直方图上的谷点, 选成阈值丢失. 如何正确选取窗宽 c , 历来是人们关心的问题, 如文献 [4] 就指出窗宽大于直方图上两峰间的距离时, 在上就可能会丢掉其间的谷点, 反之必能求出与该谷点对应的阈值; Murthy 等人 [2] 则进一步证明了窗宽 c 小于两峰间距离时, 必定存在最小模糊率, 因而可取得正确阈值, 若窗宽 c 大于两峰间的距离时, 则不能保证能求出正确阈值.

3 自适应模糊阈值分割法

3.1 自适应窗宽选取

隶属函数选定后, 阈值的选取完全取决于给定的窗宽, 目前有关文献介绍的隶属函数窗宽的选取, 是通过观察直方图峰值的分布情况, 人为给定的. 对已知直方图分布, 用这种方法总能找到合适的窗宽, 但当图像改变而使直方图分布变化时 (如图像的目标大小在较宽的范围上变化), 预设窗宽就可能失效, 造成误分割, 严重时甚至会丢失目标, 所以必须根据待分割图像的特性自动选取窗宽. 文献 [5] 以海面舰船图像的阈值分割为研究对象, 提出一种利用目标-背景对比度自动选取隶属函数的方法, 并给出了根据目标与摄像机间的相对距离估计目标-背景对比度的算法, 但是该方法针对性太强, 难于普遍适用.

通过上述分析, 从式 (2) 可以看出, 模糊阈值分割的实质是对图像直方图进行加权平均, 平滑后的直方图即为模糊率曲线, 其极小值对应于分割阈值. 显然, 当图像像素的类别数事先知道后, 通过加权平滑后得到的模糊率曲线应该有 -1 个极小值点. 所以, 可以通过判断模糊率曲线的极小值点数目是否等于 -1 来实现模糊阈值法的窗宽自动选取. 其具体选取方法: 首先设定窗宽 c 的初始值为最小值 4; 按给定的隶属函数和确定的窗宽进行计算得到模糊率曲线; 判断曲线的极小值点数目 n , 如果 $n = -1$, 则停止, 此时对应窗宽 c 即为所选取的最佳窗宽; 如果 $n > -1$, 则 $c = c + 2$, 返回 继续计算.

上述计算对直方图呈明显双峰的图像比较合适, 但是当图像中目标较小或较少时, 直方图上将表现不出明显的双峰, 此时, 双峰差别很大或双峰间的谷比较宽广而平坦, 甚至为明显的单峰情形. 如果直接用图像的原始直方图来进行模糊阈值分割, 必将导致分割失败. 因此, 为了让模糊阈值分割法能适应小目标图像的分割, 必须要对原始直方图进行一定的变换处理, 使在原始直方图上的谷充分表现出来.

3.2 直方图变换新方法

事实上, 直方图变换法也是一种图像阈值分割法 [6], 其基本思想就是利用像素邻域的局部性质变换原始的直方图为一个新的直方图. 这个新的直方图与原直方图相比, 或者峰之间的谷更深了, 或者谷转变为峰, 从而更易检测了.

本文通过详细研究发现, 对于具有双峰差别很大或双峰间的谷比较宽广而平坦, 甚至为明显的单峰情形直方图的图像, 用上述两种单一直方图变换方法均很难满足要求. 为此, 本文结合两种变换方法提出一种新的直方图变换方法. 事实上, 当直方图的双峰差别很大, 峰间的谷很宽或仅为单峰时, 第一种变换方法使峰间的谷更深, 但是对峰的大小无影响, 而运用第二种直方图的变换方法, 则使峰间的宽谷表现出峰. 为此, 本文结合两种直方图的变换

方法,首先用第一种方法使原始直方图的谷变深,并对变换后的直方图归一化;然后,用第二种变换方法使峰间的宽谷表现出峰来,同样对变换后的直方图作归一化处理;最后将两种方法得到的直方图相加得到新的直方图,并作归一化处理.显然,最后得到的直方图具有双峰特性,对该直方图进行模糊阈值分割,必将能得到正确的分割阈值.设原始直方图为 $h(k)$, 归一化为 $H(k)$, $k=0 \sim L-1$; 第一种方法变换后得到直方图 $h_{b1}(k)$, 归一化为 $H_{b1}(k)$, $k=0 \sim L-1$; 第二种方法变换后得到直方图 $h_{b2}(k)$, 归一化为 $H_{b2}(k)$, $k=0 \sim L-1$; 最后得到新的直方图 $h_{b0}(k)$, 归一化为 $H_{b0}(k)$, $k=0 \sim L-1$. 所以,设图像 X 大小为 $M \times N$, 并用 $f(i, j)$ 表示 (i, j) 处的灰度值, 则

$$h(k) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \{f(i, j) - k\} \quad (3)$$

$$h_{b1}(k) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} g\{e(i, j)\} \{f(i, j) - k\} \quad (4)$$

$$h_{b2}(k) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} e(i, j) \{f(i, j) - k\} / H(k) \quad (5)$$

其中 $e(i, j)$ 由梯度边缘算子得到, 在此采用形态差分算子, 取结构元素为 3×3 方阵, 即

$$e(i, j) = \max_{x, y=-1}^1 \{f(i-x, j-y)\} - \min_{x, y=-1}^1 \{f(i-x, j-y)\} \quad (6)$$

$g\{e(i, j)\}$ 为一单调下降函数, $g\{e(i, j)\} = [1 + e(i, j)]^{-2}$.

将 $h_{b1}(k)$ 和 $h_{b2}(k)$ 归一化后得到 $H_{b1}(k)$ 和 $H_{b2}(k)$, 最后得到的新的变换直方图为

$$h_0(k) = H_{b1}(k) + H_{b2}(k), \quad k = 0 \sim L-1 \quad (7)$$

将 $h_{b0}(k)$ 归一化后得到新的变换后的归一化直方图 $H_{b0}(k)$, 即为变换后得到的新直方图.

4 算例

4.1 单阈值分割实验

为了说明本文提出的自适应模糊阈值分割方法的有效性, 下面将针对具有不同特点的真实图像加以具体讨论. 为此, 本文选择了三幅有代表性的磨粒图像(其中的目标代表机械磨损微粒, 为图像的低灰度区域), 分别如图 1(a)、图 2(a) 和图 3(a) 所示, 其原始直方图分别如图 1(b)、图 2(b) 和图 3(b) 所示. 不难看出, 磨粒图像 1 的目标在整幅图所占的比例较大, 直方图有明显的双峰; 磨粒图像 2 较小, 直方图双峰差别很大, 且峰间的谷很宽; 磨粒图像 3 最小(已达到 1% 以下), 直方图已表现出明显单峰. 图 1(c)、图 2(c) 和图 3(c) 分别为磨粒图像 1, 2 和 3 按本文方法变换后的直方图. 从图中不难看出, 对于明显双峰的直方图, 变换后仍能保持其峰间谷, 不过变换后直方图的双峰性较原直方图要差; 但是对于无明显双峰或单峰直方图, 变换后在单峰的根部将产生明显的谷, 直方图将呈现明显的双峰. 图 1(d)、图 2(d) 和图 3(d) 分别为对变换后的直方图进行计算得到的模糊率曲线, 其中对磨粒图像 1, 2 和 3 的自适应窗宽分别为 68, 34, 12. 显然, 从模糊率曲线上很容易得到其极小值点, 从而得到图像的分割阈值. 图 1(e), (f)、图 2(e), (f) 和图 3(e), (f) 分别为用原始直方图和变换直方图对磨粒图像 1, 2, 3 的分割结果. 从图中可以看到, 在原始直方图上利用模糊阈值法分割时, 对于明显双峰直方图(磨粒图像 1), 能够实现正确分割; 对于双峰差别很大的直方图(磨粒图像 2), 在原始直方图上利用模糊阈值法基本能有效分割, 但此时分割的误差很大, 造成了部分目标失落; 对于明显单峰的直方图(磨粒图像 3), 在原始直方图上利用模糊阈值法则分割失败(如图 3(e)), 磨粒目标全部失落; 对比图 3(f) 的分割结果, 可见在变换后的直方图上运用模糊阈值法均实现了正确分割.

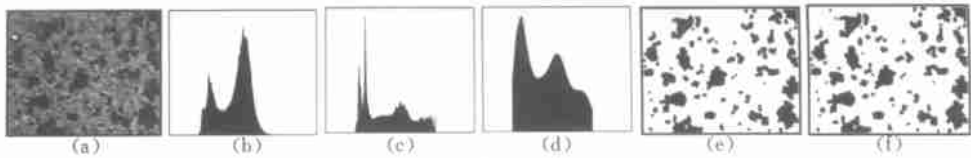


图 1 磨粒图像 1

Fig. 1 Wear particle image 1

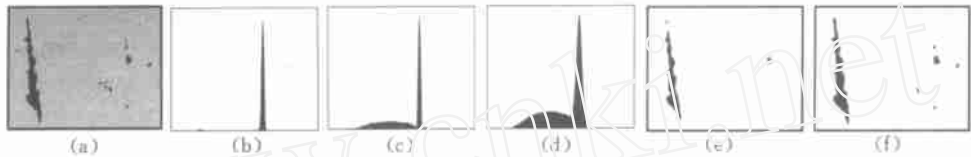


图 2 磨粒图像 2

Fig. 2 Wear particle image 2

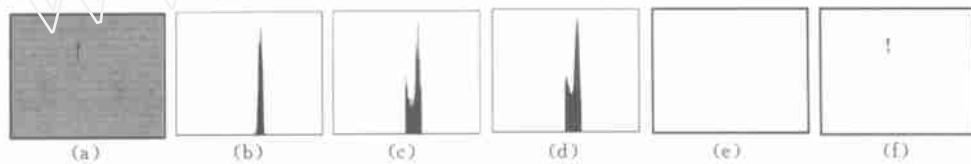


图 3 磨粒图像 3

Fig. 3 Wear particle image 3

综上所述,可以得出以下两个结论:1)分割实验充分表明了本文提出的自适应模糊阈值分割法不仅可以自动选取窗宽,而且具有很高的分割精度和很强的稳健性;2)可以通过对原始直方图的双峰特性进行判别,对于具有明显双峰特性直方图的图像,则不需进行直方图变换处理,对于具有双峰差别很大或双峰间的谷比较宽广而平坦,甚至为明显的单峰情形直方图的图像,运用本文提出的直方图变换法,则可以得到非常满意的分割效果。

4.2 多阈值分割实验

本文提出的自适应图像模糊阈值分割法不仅适用于单阈值分割的情形,而且同样也可以用于解决多阈值分割问题,上面对单阈值分割问题用真实图像进行了详细验证,充分表明了本文方法的有效性.下面将以模拟图像为例,对本文方法进行多阈值分割实验,模拟图像的原始图像如图 4(a)所示,其中图中下面部分的矩形面和椭圆面组成第一类目标像素(低灰度区),上面的矩形面和椭圆面组成第二类目标像素(中灰度区),背景为第三类像素(高灰度区).图 4(b)为该图像的直方图,从直方图上可以明显地看出三类像素的分布,直方图具有三个明显的峰,分别代表了三类像素.利用本文提出的自适应图像模糊阈值分割法得到两个分割阈值,分别为 89 和 145,自适应窗宽为 54.图 4(c)为通过本文方法得到的模糊率曲线.图 4(d)为分割出的第一类像素(像素值小于阈值 89).图 4(e)为分割出的第二类像素(像素值大于阈值 89 而小于阈值 145).图 4(f)为同时分割出的两类像素(像素值小于阈值

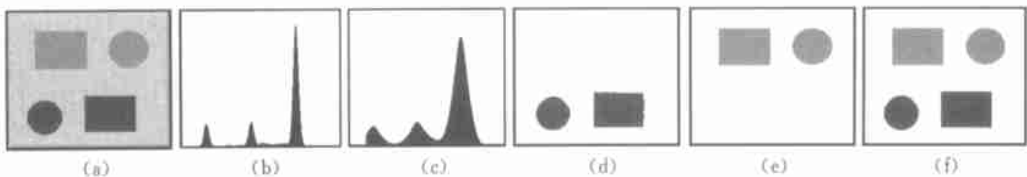


图 4 多阈值模拟图像及利用本文方法的分割结果

Fig. 4 Multi-threshold simulating image and segmentation results by the new method of this paper

145). 从分割结果可以看出本文方法实现了多阈值图像的有效分割,从而充分验证了本文提出的自适应图像模糊阈值分割法对分割多阈值图像的有效性.

5 结束语

在研究目前图像模糊阈值分割方法的基础上,提出了一种通用的自适应图像模糊阈值分割法.该方法克服了目前方法所存在的窗口宽度自动选取困难的问题,在预先给定隶属函数和图像像素类别数的情况下,实现了窗宽的自动选取.同时,针对用模糊阈值方法难于分割的具有单峰或双峰差别很大的直方图的图像,结合两种通用的直方图变换技术,提出了一种新的直方图变换方法,对变换后的直方图,利用自适应模糊阈值分割法可以实现有效的分割.最后,分别针对图像的单阈值分割和多阈值分割问题,对本文提出的自适应模糊阈值法进行了详细验证,实验结果充分表明了本文方法的有效性和其良好的鲁棒性.

References

- 1 Pal S K, King R A, Hashim A A. Automatic graylevel thresholding through index of fuzziness entropy. *Pattern Recognition Letters*, 1983, **1**:141 ~ 146
- 2 Murthy C A, Pal S K. Histogram thresholding by minimizing graylevel fuzziness. *Information Sciences*, 1992, **60**: 107 ~ 135
- 3 Murthy C A, Pal S K. Bounds for membership functions: A correlation-based approach. *Information Sciences*, 1992, **65**: 143 ~ 171
- 4 Murthy C A, Pal S K. Fuzzy thresholding mathematical framework, bound functions and weighted moving averages technique. *Pattern Recognition Letters*, 1990, **11**:197 ~ 206
- 5 Jin L Z, Xia L Z, Yang S Z. Histogram adaptive thresholding using index of fuzziness. *Journal of Image and Graphics*, 2000, **5**(5):390 ~ 395
- 6 Zhang Y J. Image Segmentation. Beijing: Science Press, 2001. 50 ~ 52

陈 果 南京航空航天大学民航学院博士后,主要从事图像处理、模式识别、信号分析与处理、机械振动以及故障诊断等研究工作.

(CHEN Guo Associate professor of Civil Aviation College Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His research interests include image processing, pattern recognition, signal analysis and processing, machine vibration, fault diagnosis.)

左洪福 南京航空航天大学民航学院教授、博士生导师,主要从事摩擦学、铁谱分析、机械设备故障诊断和磨损检测等研究工作.

(ZUO Hong Fu Professor with Civil Aviation College Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His research interests include tribology, ferrography analysis, machine fault diagnosis, wear monitoring.)