

# 图象分割的自适应模糊阈值法

金立左 夏良正 杨世周  
(东南大学自动控制系, 南京 210096) (电视与电声研究所, 北京 100015)

**摘要** 该文研究了海面舰船图象的模糊阈值分割问题. 首先介绍了模糊阈值分割的基本原理, 在讨论了隶属函数的分布特性及其窗宽对阈值选取的影响后, 提出了一种在预先给定隶属函数的情况下, 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. 其应用于智能电视跟踪系统, 对不同距离、不同对比度的海面舰船图象进行了阈值分割实验, 结果表明该方法具有较强的场景适应能力.

**关键词** 图象处理 图象分割 模糊集 阈值选取 自适应

中图法分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2000)05-0390-06

## Histogram Adaptive Thresholding Using Index of Fuzziness

JIN Li-zuo, XIA Liang-zheng  
(Department of Automatic Control Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

YANG Shi-zhou  
(Research Institute of Television and Electroacoustics, Beijing 100015)

**Abstract** A novel approach for adaptive threshold selection from gray level histogram using index of fuzziness is presented. The principle of threshold selection through minimizing index of fuzziness is described first, and then how to choose the membership function and window size is illustrated. Based on the object-background-contrast computed from the distance between the object and the camera, a new method for the automatic choice of window size of a predetermined membership function is provided. Also an algorithm to obtain object-background-contrast from the distance between the naval vessel and the camera is suggested. The experiment is conducted over three images of a target warship with different distance between the object and the camera and with different contrast. The results show that the approach proposed herein has better performance on adapting the scenario variance.

**Keywords** Image processing, Image segmentation, Fuzzy sets, Threshold selection, Adaptive

## 0 引言

由 Zadeh 于 1965 年提出的模糊集合论现已成功用于自动控制、图象处理、模式识别、机器视觉等领域. 一般认为图象天生具有模糊性, 这由多种因素引起: (1) 三维目标投影为二维图象时有信息损失; (2) 边缘、边界、区域、纹理等的定义存在模糊性; (3) 对图象低层处理结果的解释带有模糊性, 所以在图象处理中常采用模糊数学方法.

模糊阈值法<sup>[1]</sup>由 Pal 等人于 1983 年提出, 文献 [1] 引入灰度图象的模糊数学描述, 通过计算图象的模糊率或模糊熵来选取图象分割阈值(下简称阈值), 并定性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<sup>[2-4]</sup>, 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 and 对称性条件.

从上述图象模糊阈值分割的文献可见, 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, 但当图象变化使直方图分布改变时, 预选窗宽就可能失效, 因此必须随图象变化自动选取窗宽. 本文以海面舰船图象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.

### 1 模糊阈值法基本原理

设图象  $X$  大小为  $M \times N$ , 有  $L+1$  级灰度  $\{0, 1, \dots, L\}$ .  $\mu(x)$  是定义在  $L+1$  级灰度上的隶属函数, 若像素  $(m, n)$  灰度为  $x_{mn}$ , 则隶属度为  $\mu(x_{mn})$ ,  $m=1, 2, \dots, M, n=1, 2, \dots, N$ , 表示像素  $(m, n)$  具有明亮特性的程度. 图象  $X$  的模糊率  $\mathcal{Y}(X)$ 、模糊熵  $E(X)$  及非模糊率  $\eta(X)$  定义如下(它们是对图象  $X$  的模糊性度量, 基本反映了灰度图象与二值图象的相似程度)

模糊率

$$\mathcal{Y}(X) = \frac{2}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \min\{\mu(x_{mn}), 1 - \mu(x_{mn})\} \quad (1)$$

模糊熵

$$E(X) = \frac{1}{MN \ln 2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N S_n(\mu(x_{mn})) \quad (2)$$

非模糊率

$$\eta(X) = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [1 - |2\mu(x_{mn}) - 1|] \quad (3)$$

式(2)中 Shannon 函数

$$S_n(\mu(x_{mn})) = -\mu(x_{mn}) \log \mu(x_{mn}) - (1 - \mu(x_{mn})) \log(1 - \mu(x_{mn}))$$

$$\text{由 } 1 - |2\mu(x_{mn}) - 1| = \begin{cases} 2\mu(x_{mn}), & \mu(x_{mn}) \leq 0.5 \\ 2(1 - \mu(x_{mn})), & \mu(x_{mn}) \geq 0.5 \end{cases}$$

可得  $\mathcal{Y}(X)$  与  $\eta(X)$  等价.

当  $\mu(x_{mn}) = 0.5$  时,  $\mathcal{Y}(X)$  与  $E(X)$  取最大值; 偏离该值时,  $\mathcal{Y}(X)$  与  $E(X)$  取值下降. 令  $h(l)$  为图象  $X$  中灰度取  $l$  的像素个数, 将式(1)与式(2)写为如下形式

$$\text{模糊率 } \mathcal{Y}(X) = \frac{2}{MN} \sum_{l=0}^L T(l) h(l) \quad (4)$$

$$\text{模糊熵 } E(X) = \frac{1}{MN \ln 2} \sum_{l=0}^L S_n(\mu(l)) h(l) \quad (5)$$

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

本文通过计算模糊率  $\mathcal{Y}(X)$  来选取阈值, 利用模糊熵  $E(X)$  也能得出同样结论.

确定图象  $X$  的模糊率  $\mathcal{Y}(X)$  取决于隶属函数

$\mu(X)$ , 若取隶属函数  $\mu(X)$  为 S 函数(图 1)

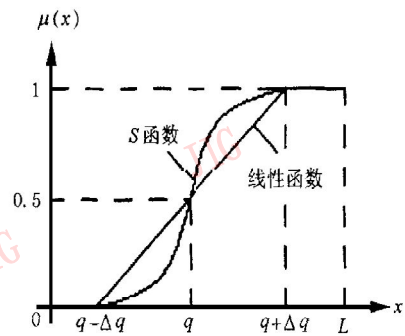


图 1 阈值分割的隶属函数

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x < q - \Delta q \\ 2[(x - q + \Delta q) / 2\Delta q]^2, & q - \Delta q \leq x \leq q \\ 1 - 2[(x - q - \Delta q) / 2\Delta q]^2, & q < x \leq q + \Delta q \\ 1, & q + \Delta q < x \leq L \end{cases} \quad (6)$$

则此时  $\mu(x)$  由窗宽  $c = 2\Delta q$  及参数  $q$  决定. 一旦选定了窗宽  $c$ ,  $\mathcal{Y}(X)$  就只与参数  $q$  有关, 此时将使  $\mathcal{Y}(X)$  获极小值的参数  $q$  取为阈值,  $q$  一般对应直方图的谷点. 用式(4)计算  $\mathcal{Y}(X)$  时, 起作用的仅是灰度值分布在区间  $[q - \Delta q, q + \Delta q]$  上的像素. 当参数  $q$  变化时,  $\mathcal{Y}(X)$  随之变化, 记  $\mathcal{Y}_q(X)$  为参数取  $q$  时的图象  $X$  的模糊率. 当图象灰度直方图为双峰分布时, 则需对每个  $q$  计算  $\mathcal{Y}_q(X)$ . 理论上讲, 总能找到某个  $q_0$ , 使  $\mathcal{Y}_{q_0}(X)$  极小, 因而可取  $q_0$  为阈值; 当  $q$  为其它值时,  $\mathcal{Y}_q(X)$  都会大于  $\mathcal{Y}_{q_0}(X)$ . 当图象灰度直方图为多峰分布时, 用上述方法可以获得多个能使  $\mathcal{Y}(X)$  取极小值的参数  $q$ , 将它们取为阈值就能实现多阈值分割.

### 2 阈值与隶属函数的关系

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  $[0, L]$  上滑动, 再通过计算模糊率  $\mathcal{Y}_q(X)$ , 以获得模糊率曲线  $\Gamma(q)$ . 该曲线的谷点, 即是使  $\mathcal{Y}_q(X)$  取极小值的参数  $q$ , 也就是待分割图象的阈值. 由于  $q$  在灰度区间  $[0, L]$  上是遍历的, 当  $c$  取值不同时才影响  $\Gamma(q)$ , 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. 由图 1 可见,  $c$  取值越小,  $\mu(x)$  曲线越陡峭, 当其作用于  $h(l)$  所得到的模糊率曲线  $\Gamma(q)$  在灰度直方图的谷点附近就可能产生振荡, 从而产生假阈值;  $c$  取值越大,  $\mu(x)$  曲线越平坦, 在  $\Gamma(q)$  上就可能会平滑掉直方图上的谷点, 造成阈值丢失. 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  $c$  大于直方图上两峰间的距离时, 在  $\Gamma(q)$  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<sup>[2]</sup> 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  $\mathcal{Y}_{q_0}(X)$ , 因而可取  $q_0$  为阈值, 若窗宽  $c$  大于两峰间的距离时, 则不能保证能求出其间的阈值.

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. Murthy 等人<sup>[3,4]</sup> 证明了仅当隶属函数  $\mu(x)$  满足边界条件  $h_1(x)$ 、 $h_2(x)$

$$h_1(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x < \frac{c}{4} \\ \frac{x}{c} - \frac{1}{4}, & \frac{c}{4} \leq x \leq c \end{cases}$$

$$h_2(x) = \begin{cases} \frac{x}{c} + \frac{1}{4}, & 0 \leq x \leq \frac{3}{4}c \\ 1, & \frac{3}{4}c < x \leq c \end{cases}$$

和对称性条件  $\mu(x) = 1 - \mu(c - x)$ ,  $x \in [0, c]$  ( $c$  为窗宽) 时, 模糊阈值法才适用. 这里,  $\mu(x)$  定义为: (1)  $\mu: [0, c] \rightarrow [0, 1]$  是连续的; (2)  $\mu(0) = 0, \mu(c) = 1$ , 且  $\mu(x)$  是单调函数, 而且  $\mu(x)$  分布在  $h_1(x)$  与  $h_2(x)$  之间 (图 2). 文献 [2] 则指出当隶属函数  $\mu(x)$  集中分布于窗口的左端、右端、两端或窗口中央的某个小邻域时不满足边界条件, 即使窗宽  $c$  大于直方图上两峰间的距离也可能求出假阈值.

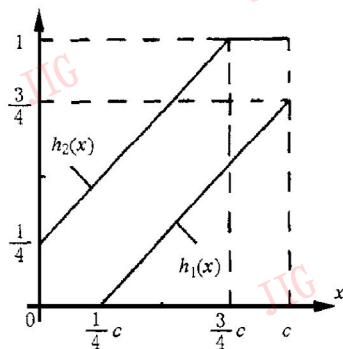


图 2 隶属函数的边界条件

为了减少计算  $\mathcal{Y}(X)$  的运算量, 取隶属函数  $\mu(x)$  为区间  $[q - \Delta q, q + \Delta q]$  上的线性函数 (图 1), 表示图象  $X$  中象素具有亮特性的程度, 显然  $\mu(x)$  满足上述边界条件与对称性条件

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x < q - \Delta q \\ \frac{1}{2\Delta q}(x - q + \Delta q), & q - \Delta q \leq x \leq q + \Delta q \\ 1, & q + \Delta q < x \leq L \end{cases} \quad (7)$$

将  $\mu(x)$  代入式 (4), 令  $c = 2\Delta q$ , 得

$$\mathcal{Y}(X) = \frac{2}{MN} \sum_{l=0}^L T(l) h(l)$$

$$= \frac{2}{MN} \left| \sum_{t=0}^{\frac{c}{2}} \frac{t}{c} h\left(q - \frac{c}{2} + t\right) + \sum_{t=\frac{c}{2}+1}^c \left(1 - \frac{t}{c}\right) h\left(q - \frac{c}{2} + t\right) \right| \quad (8)$$

由式 (8) 可见, 本文算法本质上是对直方图在有限窗宽  $[q - \Delta q, q + \Delta q]$  上作加权滑动平均.

### 3 隶属函数窗宽的自动选取

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, 但当图象改变而使直方图分布变化时 (如图象的对比度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象的特性自动选取窗宽.

#### 3.1 隶属函数窗宽的自动选取

在智能电视跟踪系统的研究中, 我们分析了大量海面舰船图象及其直方图的分布特性. 这类图象可认为仅由目标 (即舰船) 和背景 (视场中除目标以外的部分, 即天空与海面) 组成, 其直方图通常具有明显的双峰或三峰分布. 目标一般出现在低灰度级范围, 背景一般出现在高灰度级范围, 极端情况下, 背景中的天空与海面会出现在同样的灰度级范围内. 地面坦克图象与空中飞机图象也有类似的直方图分布特性. 可以认为上述图象的直方图上灰度分布相对集中的部分 (即分布峰) 对应着目标或背景所处的灰度级范围. 假设目标与背景处于同样的光照条件, 视场中目标与背景的灰度均服从正态分布, 且方差相同, 那么在视场大小固定的情况下, 分布峰幅度比的变化, 对应于目标与背景在视场中成象面积比的变化, 因而可以根据目标与背景在视场中的成象面积比来估计直方图上分布峰的幅度比.

**定义** 目标-背景对比度是在视场大小固定的情况下, 目标与背景的成象面积比.

若已知视场中目标-背景对比度为  $r$ , 且视场大小固定, 那么可认为直方图上目标峰-背景峰的幅度比近似为  $r$ , 从分布峰幅度比  $r$  可以确定目标与背景相互交迭的灰度区间  $[a, b]$  (图 3), 阈值一般位于这个

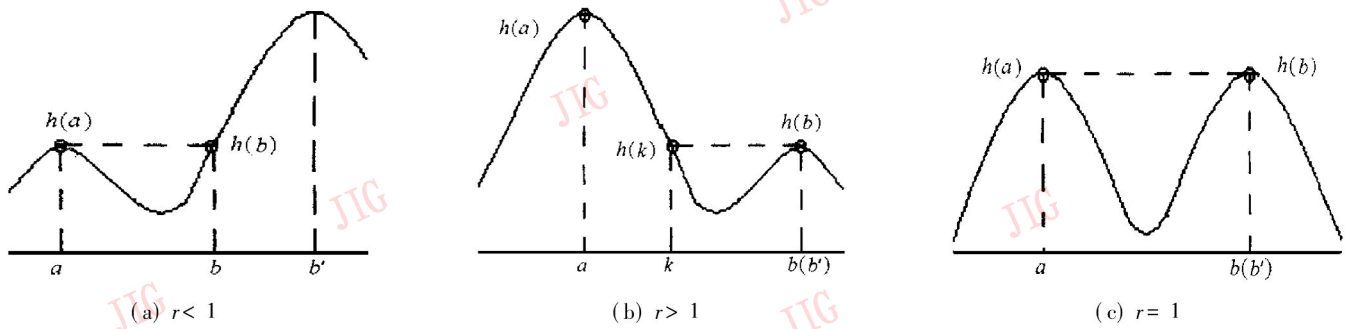


图 3 目标与背景灰度交迭区间

区间. 考虑黑目标-白背景的情况, 通常直方图上第一个分布峰对应着目标, 故将区间左界  $a$  定义为直方图上左起的第一个分布峰, 可通过从左往右搜索第一个极大值点获得. 但直方图通常极不平滑(见第 4 节图 4), 对具有明显的双峰或多峰分布的直方图而言, 目标峰与背景峰间一般有较多尺度不一的波动, 很难找到某个统一尺度将其平滑掉, 因而无法通过在平滑后的直方图上直接搜索背景峰的方法来确定区间右界, 而目标-背景对比度的引入则避免了这个问题. 现分三种情况来估算区间右界  $b$ (图 3): (a)  $r < 1$  时, 将直方图的幅度值减去幅度最大值的  $r$  倍, 从左往右搜索第一个零交叉点即为  $b$ ; (b)  $r > 1$  时, 将直方图的幅度值减去幅度最大值的  $r^{-1}$  倍, 从右往左搜索第一个零交叉点  $k$ , 设它在直方图上对应的幅度值为  $h(k)$ , 从  $k$  起往右搜索幅度值与  $h(k)$  最接近的第一个点即为  $b$ ; (c)  $r = 1$  时, 设区间左界  $a$  对应的幅度值为  $h(a)$ , 从  $a$  起往右搜索幅度值与  $h(a)$  最接近的第一个点即为  $b$ . 在搜索区间边界  $a, b$  之前, 必须对直方图作归一化处理, 即首先搜索直方图上的幅度最大值, 然后用其对其余幅度进行归一化.

根据目标与背景的灰度交迭区间  $[a, b]$  就可以估算隶属函数窗宽  $c$ , 理论上只要  $c$  小于目标峰与背景峰的距离  $b' - a$ , 就能检测出其间的阈值. 但由于目标的成象面积在多数情况下小于背景的成象面积 ( $r < 1$ ), 如果进一步考虑  $r$  的计算误差, 那么区间右界一般在  $b$  与  $b'$  之间, 其它情况下区间右界一般在  $b'$  附近. 因此可采用线性式  $c = \lambda(b - a)$  来估算窗宽, 并通过仿真得出参数  $\lambda$  取值范围  $0.3 \leq \lambda \leq 0.8$ , 而窗宽估算原则是既不能由于窗变  $c$  估算过小而检测出假阈值; 也不能过大而平滑掉阈值. 确定窗宽  $c$  后, 可利用式(8)计算图象的模糊率  $\mathcal{Y}(X)$ . 由于阈值位于区间  $[a, b]$  内, 所以只需在这个区间内进行计算. 在对有限长序列作卷积时, 为消除边界效应的影响, 首先应将区间  $[a, b]$  上的局部直方图分别以  $a, b$

为对称中心作镜像延拓, 然后在区间  $[a, b]$  上计算模糊率  $\mathcal{Y}(X)$ , 以求出局部模糊率曲线  $\Gamma(q)$ , 再取  $\Gamma(q)$  的谷点所在的位置为阈值.

### 3.2 目标-背景对比度的估计

隶属函数窗宽取决于目标-背景对比度  $r$ , 依据成象几何的有关理论可以导出  $r$ . 以针孔模型来考虑目标在摄像机内的成象情况, 假设目标离镜头的距离为  $d$ , 且目标平面与光轴垂直, 摄像机的焦距为  $f$ , 且固定, 目标的面积为  $s_0$ , 目标在焦平面上的成象面积为  $s$ , 则有  $s = \rho \frac{1}{d^2} s_0$ , 其中  $\rho$  是与摄像机焦距有关的常数. 当目标远离或靠近摄像机  $\alpha$  倍时, 其成象面积缩小或放大  $\alpha^2$  倍. 对海面舰船图象而言, 各类舰船目标在摄像机内的成象面积  $s$  与它们同摄像机的相对距离  $d$  及成象视角  $\theta$  有关. 当摄象方向即成象视角  $\theta$  确定后, 目标在摄像机内的成象面积完全取决于二者间相对距离  $d$ , 只要知道相对距离  $d$ , 就能估算出目标在视场(设视场面积为  $v$ , 且大小固定)内成象面积  $s$  的大小, 进而估计出目标-背景对比度  $r$ :

$$r = \frac{s}{v - s} = \frac{1}{\frac{v}{s_0 \rho d^2} - 1} = \frac{1}{\rho' d^2 - 1} \quad (9)$$

估算窗宽时, 只需目标-背景对比度  $r$  的近似值, 因为只要目标与背景的灰度交迭区间的右界落在  $b$  与  $b'$  之间, 即可保证估算出的窗宽满足条件, 即只要根据  $r$  对直方图在作幅度值向下平移操作时, 能去除目标峰且保留背景峰即可. 通过对某海面舰船目标作大量阈值分割实验后, 得出一组目标-背景对比度  $r$  的取值如表 1 所示:

表 1 根据目标-摄像机距离估计的目标-背景对比度

目标-摄像机 距离 $d$ (km)	0.3~ 1.5	1.5~ 2.5	2.5~ 3.5
目标-背景 对比度 $r$	0.6~ 0.3	0.3~ 0.1	0.1~ 0.05

## 4 实验结果

把上述算法用于智能电视跟踪系统,对海面舰船图象作阈值分割实验.图4为不同距离、不同对比度的海面舰船目标的原始图象、灰度直方图、采用本文方法分割出的二值图象及对应的局部模糊率曲线

线.原始图象大小为  $128 \times 128$  象素,具有 256 级灰度,用模拟摄像机拍摄后经数字化获得.作阈值分割实验时,对获取的原始图象未作任何预处理,这样能更好说明本文方法的场景适应能力.若对原始图象作线性拉伸,使其灰度充满整个灰度级范围  $[0, 255]$ ,尚可改善图象的视觉效果,而且并不影响阈值分割结果.

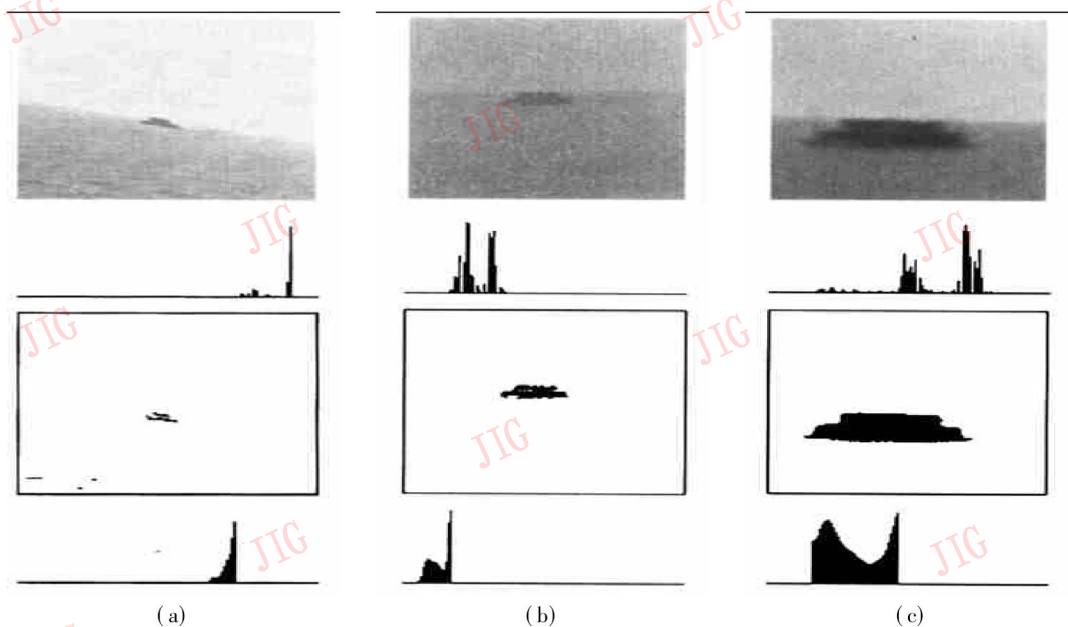


图4 不同距离不同对比度的海面舰船图象分割结果

第一行为原始图象;第二行为直方图;第三行为分割出的二值图象;第四行为局部模糊率曲线.

图4(a)原始图象灰度变化范围为  $[157, 236]$ ,目标与摄像机的相对距离约为 2.5km,隶属函数窗口左界为 157,右界为 196,窗宽为 11,阈值为 176;图4(b)原始图象灰度变化范围为  $[14, 94]$ ,目标与摄像机的相对距离约为 1.5km,隶属函数窗口左界为 14,右界为 46,窗宽为 9,阈值为 33;图4(c)原始图象灰度变化范围为  $[44, 205]$ ,目标与摄像机的相对距离约为 0.5km,隶属函数窗口左界为 46,右界为 119,窗宽为 21,阈值为 95.窗宽估计式  $c = \lambda(b-a)$  中的常数  $\lambda = 0.3$ .由图4可见,即使原始图象的对比度变化范围很宽,目标成像面积变化很大,用本文方法都能获得很好的分割结果,从二值图象可以看出,目标形状保持得很好.利用文献[1]、[2]的方法分割图象时,由于窗宽选定后就不变了,所以就无

法适应这种宽范围的变化.在目标成像面积大时所选取的窗宽,在用于分割目标成像面积小的图象时,可能会将部分背景误归为目标,严重时会造成目标丢失(即视场全白),而在目标成像面积小时所选取的窗宽,当用于分割目标成像面积大的图象时,则可能会将部分目标误归为背景,造成过分割,严重时也会丢失目标(即视场全黑).即使目标成像面积不变,但图象对比度变化时,预选窗宽也可能失效.分割结果说明,本文方法在场景适应能力上较文献[1]、[2]方法有很大提高.

## 5 结论

本文研究海面舰船图象的阈值分割问题.针对

目前已发展文献中介绍的根据直方图分布特性来人为选取隶属函数窗宽的不足, 提出一种根据目标-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. 通过其应用于智能电视跟踪系统, 对不同距离、不同对比度的海面舰船图象作阈值分割实验, 结果表明, 本文方法有较强的场景适应能力. 本文方法也可推广应用到有类似直方图分布特性的地面坦克图象、空中飞机图象的阈值分割.

### 参 考 文 献

- 1 Pal S K, King R A, Hashim A A. Automatic graylevel thresholding through index of fuzziness and entropy. Pattern Recognition Letter, 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 average technique. Pattern Recognition Letter, 1990, 11: 197~ 206.



**金立左** 1994 年和 1997 年分别在东南大学自动控制系与自动化研究所获工学学士和硕士学位. 现为该校自动控制系博士生, 发表论文 6 篇, 完成国防科技预研基金项目 1 项, 主要研究领域为图象处理、模式识别、计算机视觉.



**夏良正** 1964 年毕业于南京工学院自动控制专业, 现为东南大学自动控制系教授, 博士生导师, 完成鉴定科研项目十多项, 获国家科技进步二等奖 1 项, 省部级科研成果奖 3 项, 发表论文 40 余篇, 专著 2 部, 主要研究领域为图象处理、自动目标识别、计算机视觉.

## 敬 告 订 户

《中国图象图形学报》从今年起已正式改为半月刊, 其中下半月出版的学报为全彩色版. 并由本刊编辑部自己发行, 现已开始证订, 全年订费与月刊相同, 而且凡订上半月学报者, 赠送下半月学报, 订阅下半月学报者, 赠阅上半月学报. 由于部分在邮局订阅的读者, 本刊不掌握通信地址, 因此为了使邮局订户能收到全年的刊物, 麻烦您将通信地址( 邮编) 及订刊复印件寄到本编辑部, 以便给您及时寄刊. 同时也希望您能给学报多提些建议并提出您的要求.

通信地址: 北京市海淀区花园路 6 号( 100088)

《中国图象图形学报》编辑部 发行部收