

属性直方图及其在声纳图像模糊增强中的应用¹

郭海涛 孙大军 田 坦

(哈尔滨工程大学水声工程系 哈尔滨 150001)

摘 要 提出了属性直方图的概念, 分析了一种模糊增强算法的实质, 并将它们应用于沉底小目标声纳图像增强过程, 给出了模糊增强的实现过程和实验结果. 直方图是图像处理中最重要的基本概念之一, 该文提出的属性直方图的概念, 是对图像处理中直方图概念的发展.

关键词 直方图, 模糊集, 图像增强, 声纳图像

中图分类号 TN911.73, TN958.99

1 引言

直方图是图像处理中最重要的基本概念之一, 它反映了图像像素灰度值方面的统计信息, 它在图像增强、图像分割和计算积分光密度等方面有广泛的应用. 本文提出了属性直方图的概念, 分析了一种模糊增强算法的实质, 并将它们应用于沉底小目标声纳图像的模糊增强过程中, 给出了模糊增强的实现过程和实验结果.

2 概念与原理

2.1 属性直方图的概念 本文将灰度级为 L 大小为 $M \times N$ 的图像的所有像素视为论域 $X = \{(i, j) | 0 \leq i \leq M - 1, 0 \leq j \leq N - 1\}$. 设 Q 为论域 X 上的某种属性集, $(i, j) \in Q$ 表示像素 (i, j) 具有属性 Q . 对于图像 X , Q 上的属性直方图定义为由 $p_Q(k) - k$ (或 $n_Q(k) - k$) 形成的离散图线, $p_Q(k)$ 表示为

$$p_Q(k) = n_Q(k) / N_Q \quad (1)$$

其中 $n_Q(k)$ 表示图像 X 中具有属性 Q 且灰度值为 k 的像素数目, N_Q 表示图像 X 中具有属性 Q 的像素总数. 由 (1) 式有 $\sum_{k=L_1}^{L_2} p_Q(k) = 1$. 其中 L_1 , L_2 分别为属性集 Q 中像素的最小灰度值和最大灰度值.

属性直方图仅仅考虑了图像中具有某种属性的像素, 从某种意义上说它是一种残缺的直方图, 但正是因为这种残缺性, 使属性直方图能够舍弃通常意义的直方图中一些具有一定先验知识的干扰成分或具体问题不关心的成分, 而简化直方图, 从而使基于直方图的图像处理方法得到简化和变得可行. 对于同一幅图像, Q 不同, 相应的属性直方图也不同, 因此同一幅图像可以对应多个属性直方图, 这一点与通常意义的直方图不同; 但正是由于这种不同, 可以通过改变 Q 而得到同一幅图像的不同的属性直方图, 所以属性直方图的使用较通常意义的直方图更为灵活; 如果 $Q = \Omega$ (Ω 为论域 X 上的全集), 属性直方图则变为通常意义的直方图, 可见通常意义的直方图仅仅是属性直方图的一种特例. 利用属性直方图解决问题的关键是如何确定它, 而确定它的关键是根据具体问题和先验知识构造 Q .

2.2 模糊增强算法 设高亮度集 A 是论域 X 上的一个模糊集, 其隶属函数值 $\mu_A(i, j)$ 与像素灰度值 $x(i, j)$ 间的映射 f 为^[1,2]

$$\mu_A(i, j) = f[x(i, j)] = \sin \left\{ \frac{\pi}{2} \left[1 - \frac{x_{\max} - x(i, j)}{D(x_c)} \right] \right\} \quad (2)$$

其中 x_{\max} 表示最大灰度值 $L - 1$, x_c 是 $\mu_A(i, j) = 0.5$ 时对应的 $x(i, j)$, 称为映射 f 的分界点, $D(x_c)$ 是一个随 x_c 变化的因变量, 由 x_c 的定义不难得到

¹ 2001-01-15 收到, 2001-08-02 定稿

$$D(x_c) = 3(x_{\max} - x_c)/2 \quad (3)$$

在应用 (2) 式时, 首先根据实际情况或具体要求选择合适的 x_c , 然后由 (3) 式求 $D(x_c)$, 即可确定 (2) 式. 为了确保 $0 \leq \mu_A(i, j) \leq 1$ 且 $\mu_A(i, j)$ 随 $x(i, j)$ 单调变化, x_c 的选择应满足 $0 \leq x_c \leq x_{\max}/3$.

设模糊集 A 上的模糊增强算子 T , 令模糊集 $A' = T(A)$, 其隶属函数表示为^[1-3]

$$\mu_{A'}(i, j) = \begin{cases} 2[\mu_A(i, j)]^2, & 0 \leq \mu_A(i, j) < 0.5 \\ 1 - 2[1 - \mu_A(i, j)]^2, & 0.5 \leq \mu_A(i, j) \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

这里将 (4) 式视为一个递归变换式, 将递归变换 (一般递归 2-3 次) 最终得到的 $\mu_{A'}(i, j)$ 视为 $\mu_A(i, j)$, 由 (2) 式的逆映射 f^{-1} 求 $x(i, j)$, 即得到增强后的图像 (如果 $x(i, j) < 0$ 则令 $x(i, j) = 0$). 由 (4) 式可以看出模糊增强的实质: 将原图像中灰度值小于 x_c 的像素的灰度值变得更小, 大于 x_c 的变得更大, 而等于 x_c 的不变; 这也是分界点 x_c 的“分界”意义. 使用模糊增强算法时, 分界点 x_c 的选择是关键. 增强的目的不同, x_c 选择的原则也不同. x_c 不同, 增强的结果和效果也不同.

3 属性直方图在声纳图像模糊增强中的应用

3.1 沉底小目标声纳图像简介 声纳系统以一定的俯仰角和扇面向海底探测区域发射声波, 接收采集回波. 先采集的数据对应于离接收基阵较近的海底区域, 后采集的数据对应于较远的海底区域. 每次采集同一距离某一扇面的若干个波束的数据, 内插成 P 个, 作为每一行的数据, 共采集 p 行. 根据显示放大倍数的需要, 分别从 p 行中每 8 行, 4 行, 2 行取 1 行或逐行取形成 $m(\text{行}) \times n(\text{列})$ 的方位-距离-幅度二维图像. 图 1(a) 是从一幅放大倍数为 8 大小为 $m \times n = 376 \times 120$ 的沉底小目标声纳图像中截取的最有可能含有目标的部分, 称为可疑区子图像, 其方位 (水平方向) 范围为 $0^\circ \sim 3^\circ$, 距离范围为 $53.4\text{m} \sim 57.9\text{m}$, 大小为 $M \times N = 90 \times 60$; 关于可疑区子图像截取的方法, 详见文献 [4]. 本文声纳图像的处理是针对可疑区子图像进行的 (为叙述方便, 下文将可疑区子图像也称为声纳图像). 图 1(a) 中较大的亮区对应于回波较强的区域, 是小目标或海底石头的回波形成的, 称为目标亮区; 目标亮区后面与之相邻的暗区是小目标或海底石头的声学阴影形成的, 称为阴影暗区, 它的形状在一定程度上反映了目标的形状^[5]. 图 1(a) 其余部分由更小的亮区和暗区混杂一起组成, 是海底混响形成的, 称为海底混响区. 阴影暗区的清晰度与混响噪声比 RNR 有关, 图 1(a) 所示图像的 RNR 大约为 5dB. 声纳图像对比度差, 分辨率低, 干扰强, 阴影暗区像素少, 边缘恶化. 为了提高视觉效果, 突出阴影暗区, 图像增强是必要的.

图 1(a) 所示图像的直方图如图 1(b) 所示, 经 3×3 矩形窗口中值滤波与均衡化后的图像和直方图分别如图 2(a) 和图 2(b) 所示, 从直方图 1(b) 和 2(b) 可以看出, 声纳图像的直方图不是典型的双峰形状, 可以认为它近似于莱斯分布^[5].

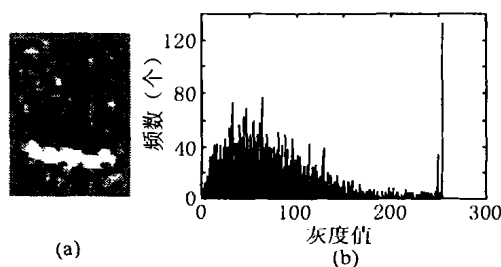


图 1 放大倍数为 8 的声纳图像及其直方图

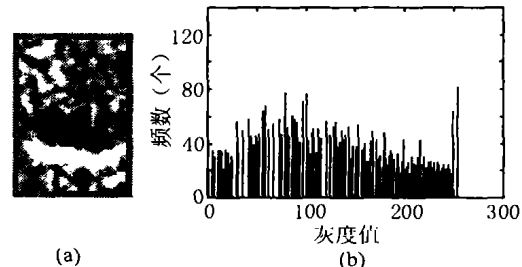


图 2 中值滤波与均衡后的声纳图像及其直方图

3.2 属性集 Q 的构造和分界点 x_c 的选择 模糊增强的关键是分界点 x_c 的选择。因为要突出阴影暗区, 显然选择阴影暗区与海底混响之间的最佳分割阈值 x'_c 作为参考分界点, 在 x'_c 附近利用交互方式来选择最合适的分界点 x_c 是一种合理和实用的选择 x_c 的方法 (在要求不很严格或要求自动处理时, 可令 $x_c = x'_c$)。由直方图 1(b) 和 2(b) 知, 要准确地选择 x'_c 是困难的, 作者根据这两个直方图利用 Otsu 法、熵函数法等^[6,7] 求 x'_c , 均与实际情况不符合; 其原因是声纳图像中干扰过多致使直方图中存在过多的干扰成分。因为属性直方图能够舍弃具有一定先验知识的干扰, 这里在属性直方图上确定模糊增强的参考分界点 x'_c :

对于灰度级为 L 大小为 $M \times N$ 的声纳图像 X , 考虑其灰度方面的特点, 按下式构造属性集 Q

$$Q = \{(i, j) | x(i, j) \leq \bar{x}, 0 \leq i \leq M - 1, 0 \leq j \leq N - 1\} \quad (5)$$

式中 \bar{x} 表示声纳图像 X 像素的灰度均值, 此处 $x(i, j)$ 和 \bar{x} 一般要在去噪声与直方图均衡化处理后的图像上考查。可以认为 Q 是由阴影暗区和部分或全部海底混响区 (也有可能包括小部分目标亮区) 构成的集合。由 (1) 式确定 Q 上的属性直方图, 在属性直方图上利用 Otsu 法确定 x'_c 。

模糊增强的目的是突出阴影暗区, 对于绝大多数声纳图像阴影暗区的像素灰度值都远小于 $x_{\max}/3$ (本文 $x_{\max} = 255$), 即使对于增益过大而已经过限幅的声纳图像, 经直方图均衡化后, 阴影暗区的像素灰度值也较 $x_{\max}/3$ 小得多。因此, 本文映射 f 所限定的 x_c 的范围足以满足声纳图像模糊增强的需要。如果在其它应用中, 所需要的 x_c 超过 $x_{\max}/3$, 则可用下面的映射代替映射 f ^[1,3]

$$\mu(i, j) = \left[1 + \frac{x_{\max} - x(i, j)}{F_d} \right]^{-F_e} \quad (6)$$

式中 F_d 和 F_e 分别为指数型和倒数型模糊因子。

3.3 实验结果 声纳图像模糊增强的实现过程与结果如下:

(1) 对于图 1(a) 所示图像, 首先利用保边性能较好的中值滤波 (选 3×3 矩形窗口) 去除尖脉冲噪声, 然后进行直方图均衡化处理, 均衡化后的图像及其直方图见图 2(a) 和图 2(b)。

(2) 对图像 2(a), 利用 (5) 式确定属性集 Q , 利用 (1) 式确定 Q 上的属性直方图, 如图 3 所示。

(3) 按 3.2 节中的方法确定 $x'_c = 59$, 这里简单地取 $x_c = x'_c$; 按 (3) 式计算 $D(x_c) = 294$ 。

(4) 利用 (2) 式建立模糊集 A 。

(5) 利用 (4) 式进行 2 次递归操作。

(6) 由 (2) 式的逆映射 f^{-1} 求 $x(i, j)$, 即得模糊增强后的图像, 如图 4 所示。

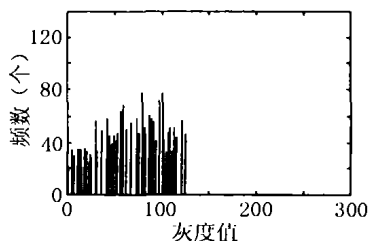


图 3 Q 上的属性直方图



图 4 模糊增强后的声纳图像

对于上述实现过程, 作如下说明: 在过程 (1) 中, 直方图均衡化不总是必需的; 如果有必要, 在进行过程 (3) 前, 可以对属性直方图平滑一次; 对于过程 (3), 如果增强效果达不到要求, 可在参考分界点 x'_c 附近利用交互方式选择最合适的分界点 x_c ; 属性集 Q 仅仅在确定 x_c 时使用, 过程 (4)-(6) 仍然是在声纳图像 X 的范围内进行。

4 结论

本文分析了一种模糊增强算法的实质, 提出了属性直方图的概念, 并将其应用于声纳图像的模糊增强过程中, 明显地改善了声纳图像视觉效果。直方图是图像处理中最重要的基本概念之一, 属性直方图具有简化问题的功能和使用灵活的特点, 通常意义的直方图是属性直方图的一个特例, 属性直方图概念的提出既有理论意义又有应用价值, 是对图像处理中直方图概念的发展。凡是应用直方图的问题中, 只要有某种先验知识, 都可以应用属性直方图。对于基于直方图的图像分割问题, 使用属性直方图, 将使分割问题变得易于解决并提高分割速度。本文中属性直方图在图像模糊增强中的应用也可以归结为在图像分割中的应用。

本文在确定属性直方图时利用了属性集简化复杂的直方图; 这种利用属性集简化复杂问题的思想, 可以不局限于直方图方面, 可以更广泛地应用于任何具有某种先验知识的复杂问题中, 因此, 它具有一定的方法论意义。

参 考 文 献

- [1] 陈珂, 陈华生, 一种图像增强的有效方法——模糊图像增强技术, 小型微型计算机系统, 1989, 10(2), 1-6.
- [2] 吴国雄, 陈武凡, 图像的模糊增强与聚类分割, 小型微型计算机系统, 1994, 15(11), 22-26.
- [3] 郭桂蓉, 庄钊文, 信息处理中的模糊技术, 长沙, 国防科技大学出版社, 1993, 189-192.
- [4] 郭海涛, 田坦, 孙大军, 张殿伦, 变尺寸组合窗口在声纳图像搜索定位中的应用, 哈尔滨工程大学学报, 2000, 21(5), 28-31.
- [5] 关浩, 水下沉底小目标探测与成像研究, [博士学位论文], 哈尔滨工程大学水声工程系, 1997.
- [6] 付忠良, 图像阈值选取方法—Otsu 方法的推广, 计算机应用, 2000, 20(5), 37-39.
- [7] 王润生编著, 图像理解, 长沙, 国防科技大学出版社, 1995, 93-98.

THE BOUNDED HISTOGRAM AND ITS APPLICATION IN THE SONAR IMAGE ENHANCEMENT WITH FUZZY SETS

Guo Haitao Sun Dajun Tian Tan

(Dept. of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering Univ., Harbin 150001, China)

Abstract This paper analyzes the essence of a sort of algorithm on image enhancement with fuzzy sets, presents the concept of the bounded histogram and applies them to the sonar image enhancement with fuzzy sets of a small target on the sea bed. The realizing process and experimental results on image enhancement with fuzzy sets are given. The concept of histogram is one of the most important basic concepts in digital image processing. The concept of the bounded histogram presented in the paper will develop the concept of histogram.

Key words Histogram, Fuzzy sets, Image enhancement, Sonar image

郭海涛: 男, 1965 年生, 工程师, 博士生, 主要研究方向: 水声图像处理与模式识别。

孙大军: 男, 1972 年生, 助理研究员, 主要研究方向: 水声信号处理、声成像和声纳设备。

田坦: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 水声信号处理、声成像和声纳设备。