

# 基于塔型结构的多分辨率模糊边缘检测\*

王志刚 王伟 许晓鸣

(上海交通大学智能控制研究室, 上海, 200030)

**摘要** 结合数学形态学、塔型数据结构及模糊技术, 提出一种新的非监督多分辨率边缘检测方法. 该方法利用数学形态学滤波构造塔型结构, 将相邻层边缘点的父子连接关系看成是一种模糊模型, 可使粗糙、低分辨率的边缘图通过这个模型在塔型结构中前传和精提, 得到高分辨率、准确的目标边缘. 并分别就人工图像及实际图像与其他方法做了对比实验, 结果证明了本算法的有效性.

**关键词** 数学形态学, 塔型结构, 模糊技术, 边缘检测.

## MULTIRESOLUTION FUZZY EDGE DETECTION BASED ON PYRAMID STRUCTURE\*

WANG Zhi-Gang WANG Wei XU Xiao-Ming

(Research Group of Intelligent Control, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract** A new unsupervised multiresolution edge detection technique was presented, which combines the morphological filtering, pyramid data structure and fuzzy technique. The algorithm first constructed a pyramid by morphological filtering, then it considered the parent-child linking relationship of edge nodes between the two adjacent levels as fuzzy model. Via this model, the coarse and low-resolution edge map was propagated and refined in the pyramid, thus the map with fine and high-resolution edge was obtained. Finally, some experiments on synthetic and real-world images were given with satisfactory results.

**Key words** mathematic morphology, pyramidal structure, fuzzy technique, edge detection.

### 引言

近年来基于塔型结构的多分辨率分析方法受到越来越多的重视. 就塔型结构的构造及使用方式的不同该方法可以分为两类, 第一类如文献<sup>[1-3]</sup>, 它们把塔型作为一种特殊的数据结构, 其中每个父节点含有与之相连的下层子区域的复杂信息. 这类塔型方法需要反复计算父节点值并改变父子节点的连接关系, 直至这种塔型结构趋于稳定, 最后根据根节点及父子连接关系可以在底层原始图像上得到分割或检测结果; 第二类塔型方法如文献<sup>[4-6]</sup>, 它们把塔型结构作为一个图像簇, 而后一幅图像是由前一幅图像经过低通滤波后下采样得来的, 图像分割或边缘检测首先在最低分辨率的顶层图像上进行, 然后以此为指导进行下一层的分割或检测, 直到底层原始图像. 显然, 前一类塔型方法计算量大, 耗时长,

容易产生过分割, 后一类塔型方法则克服了这种缺点, 其关键在于寻找适当的相邻层节点连接关系来指导下一层的处理. 本文中提出的方法正是基于后一种塔型的方法, 首先在顶层用常规方法检测出一个粗糙、低分辨率的边缘图, 通过引入边缘点模糊连接模型, 大大改善了下一层边缘检测结果. 实验证明该方法对于检测较大尺度的目标边缘有很好的性能, 并在噪声环境下表现出了很好的稳健性.

### 1 建立基于数学形态学的塔型结构

本文提出模糊边缘检测算法的一步是需要建立一个基于数学形态学的塔形结构. 我们采用文献[7]提出的灰度级数学形态运算来构造该塔型结构. 基于结构元素  $B$  的灰度级图像  $I$  腐蚀定义为

$$(I \ominus B)(x, y) = \min \{ I(x+k, y+l) \mid (k, l) \in B \}, \quad (1)$$

\* 国家发展计划委员会数字高清晰度电视测试与转播试验系统——信源编码专题资助项目

稿件收到日期 2001-05-08, 修改稿收到日期 2002-08-02

\* The project supported by HDTV project of State Development and Planning Committee, China

Received 2002-05-08, revised 2002-08-02

同样,基于结构元素  $B$  的灰度级图像  $I$  膨胀定义为

$$(I \oplus B)(x, y) = \max_{(k, l) \in B} \{I(x - k, y - l)\} \quad (2)$$

由上面的灰度级腐蚀与膨胀运算,我们可以得到灰度级开和闭运算分别为

$$(I \circ B)(x, y) = (I \ominus B) \oplus B \text{ 和 } (I \cdot B)(x, y) = (I \oplus B) \ominus B \quad (3)$$

文献[7]中已经证明了式(3)定义的灰度级开和闭运算具有递增、平移不变及等幂等性质,而且还具有低通及良好的边缘信息保护等特性,因此,它们是构造塔型结构的理想滤波器.在构造塔型数据结构时,首先把第  $L$  层数据按上述定义作形态学滤波,然后下采样而得到第  $L + 1$  层数据,其中底层初始数据为原图像.在本方法中采用  $3 \times 3$  的菱形结构元素和形态学闭运算滤波器,水平和垂直方向的下采样间隔  $s$  都为 2.假设在边缘图中我们需要出现的最小尺度目标的最短轴长为  $d_1$ ,而需要去掉的物体最大纹理的最长轴长为  $d_2$ ,则塔型的层数可以按下式确定:

$$\log_s d_2 < N \leq \log_s d_1 \quad (4)$$

式(4)中  $s$  为下采样间隔,本方法中取 2.

## 2 建立塔型边缘节点的模糊连接

本文模糊边缘检测算法的另一个重要步骤是建立边缘节点间的连接关系.首先把相邻层中对应边缘点的父子连接关系看成是一种模糊模型,并从数据中进行学习.然后只要在顶层中用常规的边缘检测算子,如 Sobel 算子,得到一个低分辨率、粗糙的物体边缘即可根据学习得到的模型,把此边缘在每层中前传、精提,最后得到一个高分辨率、精确的物体边缘.对于  $k$  层中的每个父边缘点,我们只在  $k - 1$  层中对应的一个  $3 \times 3$  候选子节点区域内搜索与此父边缘点相似的子边缘点.为此,需要经过如下的步骤来得到这个连接模型.

### 2.1 定义模糊变量

第 1 个模糊输入变量  $x_1$  代表该节点与物体边缘的逻辑距离,即

$$x_1(i, j) = \begin{cases} 0.5/f(i - i', j - j'), & \text{if } i = 2i' \text{ and } j = 2j' \\ \max(|i - 2i'|, |j - 2j'|)/f(i - i', j - j'), & \text{if } i \neq 2i' \text{ or } j \neq 2j' \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中  $(i, j)$  和  $(i', j')$  分别表示候选子节点与父节点的坐标,且  $i \in \{2i' - 1, 2i', 2i' + 1\}$ ,  $j \in \{2j' - 1, 2j', 2j' + 1\}$ .  $f(a, b)$  表示父边缘图上的方向滤

波,为此定义 4 个方向模板(假设父边缘图上的边缘点用“1”表示,非边缘点用“0”表示)为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

如果  $a \neq i'$  或  $b \neq j'$ ,即节点  $(a, b)$  不是父节点,则可以根据节点  $(a, b)$  在父节点  $(i', j')$  的方位选择上述对应的一个方向模板,  $f(a, b)$  即为该方向模板在该点上的卷积;否则  $f(a, b)$  为 4 个方向模板在该点的卷积和减 3 后所得的值.显然,模糊变量  $x_1$  和候选子节点与对应父节点的距离及候选子节点邻域内在对应父节点方向上的边缘点数目有关,且  $x_1$  越小,即该候选子节点距物体边缘的逻辑距离越近,该节点为边缘点的可能性越大.

第 2 个模糊输入变量  $x_2$  代表父节点、候选子节点间的灰度相似性,

$$x_2(i, j) = \frac{|I_p - I_c|}{\Delta I_{\max}} \quad (6)$$

式(6)中  $I_p$  与  $I_c$  分别表示父节点、候选子节点的灰度值,  $\Delta I_{\max}$  表示该父节点与所有候选子节点间的最大灰度差.显然,  $x_2$  越小,表示该候选子节点与父边缘点越相似,从而为边缘点的可能性越大.

第 3 个模糊输入变量  $x_3$  代表该候选子节点的局部梯度比率,

$$x_3(i, j) = \frac{G(i, j)}{G_{\max \text{Loc}}} \quad (7)$$

式(7)中  $G(i, j)$  表示该候选子节点的梯度值,  $G_{\max \text{Loc}}$  表示所有候选子节点中的梯度局部最大值.

第 4 个模糊输入变量  $x_4$  代表该候选子节点的全局梯度比率,

$$x_4(i, j) = \frac{G(i, j)}{G_{\max \text{Glob}}} \quad (8)$$

式(8)中  $G(i, j)$  与式(7)相同,  $G_{\max \text{Glob}}$  表示子节点层中梯度的全局最大值.显然,模糊变量  $x_3$  与  $x_4$  表征了该节点梯度的局部及全局信息,  $x_3$  与  $x_4$  越大,该候选子节点成为边缘点的可能性越大.然后,我们定义 1 个模糊输出变量  $y \in [0, 1]$ ,表示该候选子节点与父边缘点的相似度.当  $y > 0.5$  时,该候选子节点为该父边缘点的一个真正子节点,即为子边缘点;否则,该节点不是子边缘点.

### 2.2 准备实例数据

首先,我们用 1 节中方法为所有的实例图像建立塔型结构,然后用基于梯度的自动或半自动边缘检测方法提取塔型中每层边缘图.为了确定实例塔型结构中各层边缘点的父子连接关系,事先定义一

个简单的模糊连接参考模型,它具有与上面相同的模糊变量,但在每个变量上只有较少的模糊集及较少的模糊规则.当运用该参考模型在各子层中搜索时,只把各子边缘点连向最相似的父边缘点,即此时模糊参考模型输出值最大,并为这个连接构造一对模糊实例数据(输出值为1),而对于那些非最相似的子边缘点,不构造实例数据.但对于搜索到的每个非边缘点,都构造一对实例数据(输出值为0).

### 2.3 训练模糊连接模型

我们采用 Wang<sup>[8]</sup>提出的表格查询学习算法来训练模型,可以分为如下步骤.

#### 2.3.1 输入输出空间模糊化.

在上述4个模糊输入变量  $x_i$  的主体区域[1,0]内定义  $N_i$  个模糊集  $A_i^l, i = 1, 2, 3, 4, l = 1, 2, \dots, N_i$ . 每个模糊集对应的成员函数及形状可以相同,也可以不同.本方法中采用三角形成员函数.同样,对于输出变量  $y$  定义  $N_y$  个模糊集  $B^l, l = 1, 2, \dots, N_y$ , 并采用梯形成员函数.定义在每个模糊变量上的模糊集都是完全的,即对于主体区域内的每一个点,都至少有1个模糊集上的成员函数输出不为0.

#### 2.3.2 构造模糊规则库.

对于每对实例数据,选择隶属程度最大的模糊集生成一条模糊规则.例如第  $k$  条生成规则可表示为

$$R^k: IF x_1^k \text{ is } A_1^l \text{ and } x_2^k \text{ is } A_2^m \text{ and } x_3^k \text{ is } A_3^n \text{ and } x_4^k \text{ is } A_4^q, THEN y^k \text{ is } B^l, \quad (9)$$

其中  $A_1^l, A_2^m, A_3^n$  与  $A_4^q$  分别为定义在输入变量  $x_i$  上的模糊集,  $B^l$  为定义在输出变量上  $y$  的模糊集.最后,根据置信度舍弃有冲突的规则,合并可以合并的规则,以加快运算速度.

#### 2.3.3 建立模糊模型

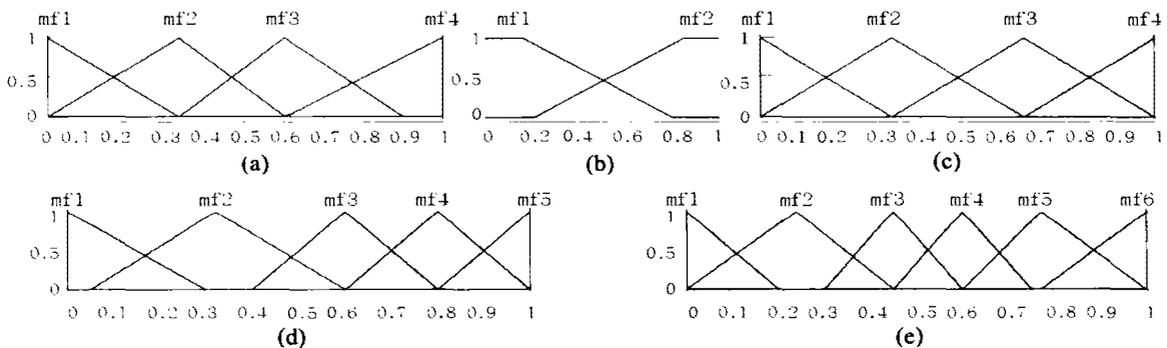


图1 各模糊变量的隶属函数.(a)~(e)分别为  $x_1, y, x_2, x_3$  和  $x_4$  的隶属函数

Fig.1 The membership functions of all fuzzy variables. (a)~(e) are the membership functions of  $x_1, y, x_2, x_3$  and  $x_4$ , respectively

基于上文生成规则库,我们采用单模糊器、乘积推理引擎和中心平均去模糊器,则输出  $y$  可以表示为

$$y = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}^l \left[ \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i) \right]}{\sum_{l=1}^M \left[ \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i) \right]} \quad (10)$$

式(10)中,  $n$  为输入变量的个数,  $M$  为规则数,  $\bar{y}^l$  是模糊集  $B^l$  的质心,  $\mu_{A_i^l}(x_i)$  为变量  $x_i$  在模糊集  $A_i^l$  上的隶属度.

## 3 实验

按照2.2节中的方法,首先定义一个简单的模糊参考模型,对于每个输入变量,分别定义了3个模糊集,成员函数都取高斯函数;对于其输出变量,定义了2个模糊集,即分别表示了边缘点集和非子边缘点集,取成员函数为梯形函数.所有的模糊集都均匀分布在每个变量的主体区域上.同时我们为参考模型定义了26条规则.共用了10幅图像来产生实例数据.对于待训练的模糊连接模型,选用图1所示的隶属函数.经过训练后共得到359条合并后的规则.

图2~4示出了用本文中的方法及所得到的模糊模型对真实图像进行边缘检测的实验结果.为了得到较细的边缘,仅取在水平或垂直方向  $1 \times 3$  的邻域内相似度  $y$  最大的边缘点作为最终输出的边缘.便于比较,图中列出了 Sobel 边缘检测子及另一种基于形态学塔型结构(MP)的多分辨率检测算法<sup>[4]</sup>的检测结果.

图2(a)中的原图曾用于产生实例数据.图3示出了采用3种不同的检测方法所得的结果.图3(a)是 Sobel 边缘检测子检测的结果;3(b)是用文献<sup>[4]</sup>中的方法检测出的边缘图,其中塔型层数  $N$  取8;3

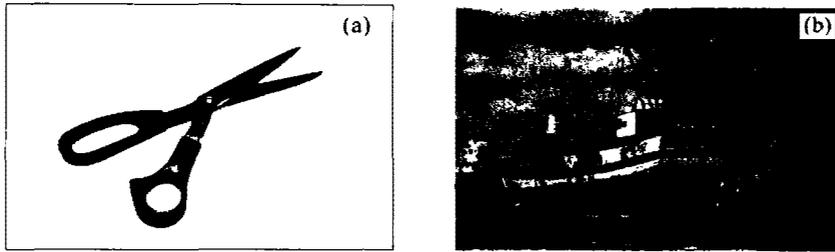


图 2 两幅试验图像原图  
Fig.2 Two original experimental images

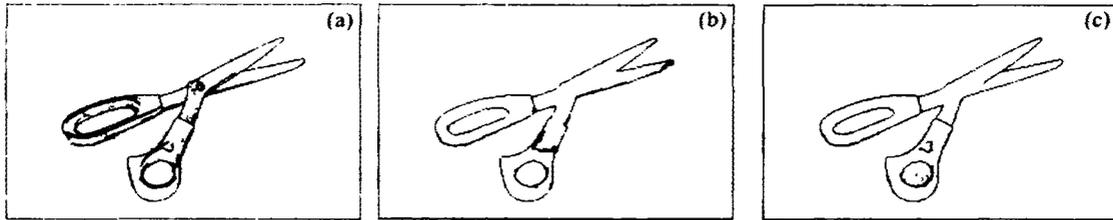


图 3 3 种边缘检测方法用于图 2(a)的结果  
(a) Sobel 方法, (b) 基于 MP 的检测方法, (c) 本文的方法  
Fig.3 The edge maps for the picture Fig.2(a) obtained with  
(a) the Sobel edge detector. (b) the MP-based edge-detector. (c) the proposed method

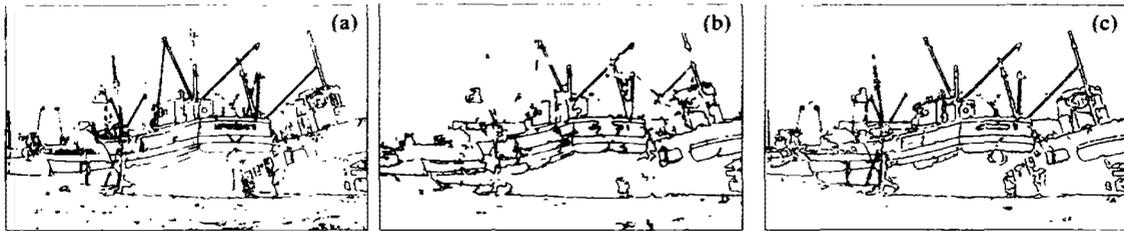


图 4 3 种边缘检测方法用于图 2(b)的结果  
(a) Sobel 方法, (b) 基于 MP 的检测方法, (c) 本文的方法  
Fig.4 The edge maps for the picture Fig.2(b) obtained with  
(a) the Sobel edge detector. (b) the MP-based edge-detector. (c) the proposed method

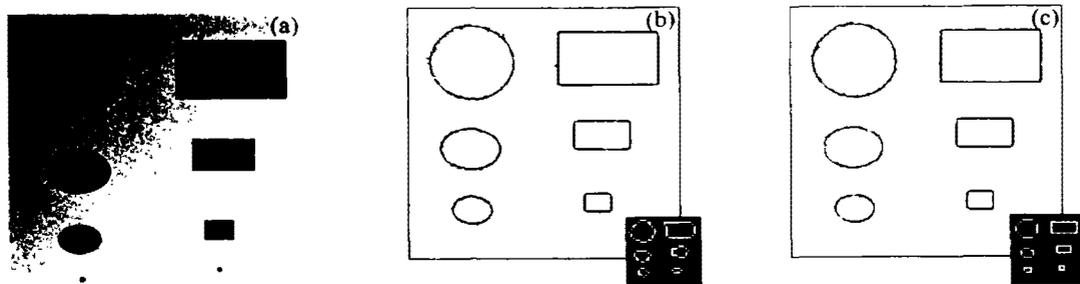


图 5 人工图像用于试验本文中方法的检测精度  
(a) 原图, (b) 检测结果及顶层初始边缘图(来自 Sobel 检测子),  
(c) 检测结果及顶层初始边缘图(来自阈值分割图)  
Fig.5 An artificial image for verifying the detecting accuracy of the proposed method  
(a) the original image, (b) the detecting result and the initial top edge map(from Sobel detector),  
(c) the detecting result and the initial top edge map(from thresholding segmentation image)

(c)是本文中的方法检测结果,其中塔型层数  $N$  取 4,顶层中用 Sobel 方法检测.显然,本文中的方法比单独的 Sobel 方法检测出较少的内部纹理和更清晰的外部边沿,比文献<sup>[4]</sup>中的方法产生了更光滑的边缘图且有更高的定位精度.图 4 示出了同样的 3 种方法对图 2(b)中原图的检测结果.在图 4(b)中,塔型层数  $N$  取 5;4(c)中,塔型层数  $N$  取 4,顶层中仍用 Sobel 方法检测.同样,对于更接近自然的图像,本文中的方法对于大尺度的目标更易产生较一致的边缘和较少的内部纹理信息.从实验结果可以看出,由于形态学滤波较强的边缘保持能力及模糊连接模型对边缘点良好的前传、精提能力,该方法与其他方法比较,表现出优越的检测性能.

图 5 中示出了本文中方法的另一个重要特性:边缘的逐层精提及很好的定位精度.当顶层中使用不同的检测方法而得到略有不同的低分辨率边缘图时,在底层中总能得到一个稳定的、较精确的边缘图.图 5(a)是一幅具有渐变的灰度背景并带有高斯白噪声的人工图像,5(b)和 5(c)示出了本文中的方法检测的结果(塔型层数  $N$  为 4)及各自所使用的顶层初始边缘图,其中 5(b)中的顶层图是由 Sobel 边缘检测子获得,而 5(c)中的顶层图是由阈值化方法分割后得到的.显然,这两个顶层边缘图有所不同,但通过我们的模糊连接模型,最终在底层得到的边缘图几乎没有差别.图 5 同时也说明了我们的方法即使在噪声环境下也同样有很好的稳健性.

#### 4 结果及讨论

本文中提出的多分辨率边缘检测方法结合了数学形态学滤波、塔型数据结构及模糊技术,除了在检测较大尺度的目标边缘有出色的性能外,还具有如下的优点:(1)该方法中使用的灰度形态学滤波与基于有序统计的滤波密切相关,它不仅具有很好的降噪功能,而且能保护边缘信息,从而使本方法比采用其他线性滤波更稳健、定位精度更高;(2)该方法是以塔型上层边缘点为指导,只在下层中相应的感兴趣区域搜索边缘点,从而大大地减少了计算量,这是文献<sup>[1~6]</sup>中的方法所无法比拟的.另外,一旦模

糊连接模型训练完成后,除了几个尺度信息外,该方法需要较少的选验知识.由于用于训练和测试模糊连接模型的图像只要求是对各种成像环境有一定代表性的简单实际图像,因此实验具有较好的可重复性.当然,怎样获得完全连续的边缘是任何边缘检测方法追求的目标,虽然本方法借助于灰度形态滤波的优点,使得顶层中的边缘点容易检测,但是顶层初始边缘图中多个连续的断点对最终的边缘图仍有较大的影响,该问题通过以下两条途径可以得到解决:一种是从顶层分割图像抽取连续的、非精确的边缘,另一种途径是建立另一种适当的模糊连接模型,以扩大子边缘点的搜索半径,后者是将来的一个研究方向.

#### REFERENCES

- [1] Yomori Z. Border detection of the object segmented by the pyramid linking method. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1995, 25(1):176—181
- [2] Rezaee M, R, P M J. van der Zwet, B P F. Lelieveldt, et al. A multiresolution image segmentation technique based on pyramidal segmentation and fuzzy clustering. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(7):1238—1248
- [3] Burt P J, Hong T, Rosenfeld A. Segmentation and estimation of region properties through cooperative hierarchical computation, *IEEE Trans. On Systems, Man, and Cybernetics*, 1981, 11(12):802—809
- [4] Chen W, Acton S T. Morphological pyramids for multiscale edge detection. *Proceedings of the IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation Apr 5-Apr 7, Arizona State University: IEEE press 1998:137—141*
- [5] Pachai C, Zhu Y M, Grimaud J, et al. A Pyramidal Approach for automatic segmentation of multiple sclerosis lesions in brain MRI. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 1998, 22:399—408
- [6] PEI Ji-Hong, YANG Xuan. Image segmentation method based on pyramid FCM clustering and region fuzzy merge. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (裴继红, 杨灶巨. 塔型模糊聚类及区域模糊合并图像分割方法. *红外与毫米波学报*), 1999, 18(1):83—88
- [7] Fitzpatrick j M Sonaka M. eds. *Handbook of Medical Imaging, Vol. 3: Progress in Medical Image Processing and Analysis*, Bellingham, WA: SPIE Optical Engineering Press, 1999
- [8] Wang L-X. *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1997