

# 基于纹理基元的图象分割

张蓬 赵书斌 彭思龙

(中国科学院自动化研究所集成电路设计工程中心, 北京 100080)

**摘要** 纹理分割是图象处理的基本问题之一。针对广泛的纹理图象, 需要一个高效、鲁棒的分割方法, 因此提出了一种基于纹理基元的纹理图象分割算法。首先, 以 Harr 小波为变换工具, 得到具有方向性的纹理子图象; 然后给出了一种新的纹理基元提取方法, 并在此基础上, 应用统计方法和矢量场, 对纹理区域进行由粗到细的分割。通过这种方法不仅可以对纹理图象进行分割, 还可以对同一区域的纹理结构进行描述, 从而有利于在这种分割方法基础上, 进行更高层次的图象处理。

**关键词** 计算机图象处理(520·6040) 纹理分割 小波变换 纹理基元 矢量场

**中图法分类号:** TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2003)08-0896-06

## A Texton-Based Algorithm of Texture Image Segmentation

ZHANG Peng, ZHAO Shu-bin, PENG Si-long

(National ASIC Design Engineering Center, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract** Texture segmentation is one of fundamental problems in image processing. An efficient and robust method is needed for various texture samples. Consequently, this paper presents a texton-based algorithm of texture image segmentation. At first, Harr wavelet is utilized as a transform tool so that texture subimages of different directions are produced. And then, we use double threshold technology to get edges and propose a new method to extract textons of four directions. Thereafter, textons are simplified to one dimension vector and reduced to twelve kinds. At last, Statistics and vector field are applied respectively in order to separate texture images from coarse to fine. The algorithm is simple and effective for a wide of textures. Through this way, texture images are not only separated, but also texture structure can be described, which is useful for high-level image processing tasks.

**Keywords** Computer image processing, Texture segmentation, Wavelet transform, Texton, Vector field

## 0 引言

所谓纹理分割, 就是找到不同纹理区域之间边界的过程。纹理分割是图象处理领域中的基本问题之一, 许多人在这方面做了大量的工作, 所使用的方法和理论也很多<sup>[1]</sup>。从分割的角度来说, 可分为基于边界的<sup>[2]</sup>和基于区域的<sup>[3]</sup>两种分割方法, 也可以将二者结合在一起使用<sup>[4]</sup>; 从纹理分析的角度来说, 主要分为基于统计的<sup>[4]</sup>、基于随机过程的<sup>[5]</sup>和基于结构的<sup>[3]</sup>3类方法。尽管分割方法很多, 但没有一种通用方法适合于所有纹理图象分割, 每种方法都是针对特定的问题而设计的。

对于纹理, 至今还没有一个统一完整的定义, 也没有一个定量的模型, 只能说, 纹理在一定的区域内具有某些统计特性。从这个描述中可以看到, 首先, 纹理是针对具有一定面积的区域而言的, 如果区域面积太小, 从宏观上来讲难以构成纹理; 其次, 纹理的特征具有一定的统计特性。所以, 对这些纹理进行统计时, 选择合适的窗口尺度就成为一个重要问题。尺度太小, 则统计难以反映纹理的真实特征; 尺度太大, 又不利于纹理之间边界的精确定位。

从结构化纹理的角度看, 纹理是由不同纹理基元按一定方式组成的图案。基于这种假设, 在1966年, Beck以不同的英文字母作为纹理基元进行观察<sup>[6]</sup>, 发现纹理基元按不同方向分布影响着人们对

基金项目: 国家自然科学基金项目(60272042)

收稿日期: 2002-10-18; 改回日期: 2003-02-21

纹理的区分。1983年, Bergen 和 Julesz 又在此基础上, 进行了一系列的精神物理实验<sup>[7]</sup>。通过实验发现, 不仅是纹理基元的方向, 纹理基元的密度也显著影响着人们对不同纹理之间的区分。1988年, Bergen 和 Adelson 又发现, 纹理基元的大小以及尺寸之间的对比, 也对纹理的区分有着重要的影响<sup>[8]</sup>。这一系列的实验, 从生理和心理的角度说明, 纹理图象可以分解为纹理基元, 从而奠定了以纹理基元的不同统计特征来分割纹理图象的基础。

文献[9]中的方法正是基于以上假设。该方法首先对图象中每个像素的  $3 \times 3$  邻域进行判断, 以中心点为基准点, 邻域中, 大于中心点的值赋为 1, 小于中心点的值赋为 0; 然后对此  $3 \times 3$  矩阵进行编码, 形成这一点的特征值, 并对这些值进行直方图统计; 最后通过传统的分割融合算法进行纹理图象的分割。这种方法有两个主要的缺点, 即计算量大和分割方法粗糙。计算量大主要包括两方面: 其一是纹理结构单元有 256 种, 特征量太多, 导致计算复杂度增加; 其二是对图象中每一个像素点都要进行计算, 没有针对不同的区域加以区分, 使数据计算时存在冗余。至于其所用的分割方法, 为传统的分割融合算法, 因此难以对图象进行精确的分割。

针对以上缺点, 首先提出了一种纹理基元的描述方法, 然后选择少量具有一定代表性的纹理基元进行统计, 从而极大减少了纹理基元的数量; 随后挑选合适的窗口尺度对纹理进行统计, 找到粗分割的边界, 以指导以后的精确分割, 由于以后的计算只在边界区域进行, 因此减小了计算量; 最后, 使用矢量场对纹理之间的边界进行精确定位, 其分割精度要优于传统的分割融合算法。

## 1 小波滤波器的选择

纹理区域可以由不同的纹理基元按照不同的组成方式而构成, 纹理基元不同或构成方式的不同都会造成纹理之间的差别。纹理基元的尺寸可以根据纹理的不同而有所差别, 而大的基元可以由小的基元组合而成。因此, 可以考虑用一种滤波器来帮助提取纹理基元, 然后在此基础上进行纹理分割。

选取滤波器的唯一标准就是要有利于纹理基元的提取。根据 Julesz 的视觉试验<sup>[10]</sup>, 人类的视觉系统只能提取不超过二阶的统计信息, 所以滤波器必须有利于提取图象中的一阶或二阶的信息。同时, 为了避

免因为纹理基元太多而导致计算量过大, 必须将纹理基元进行简化, 这里将其简化为  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  4 个方向, 即水平, 垂直和按对角线倾斜 4 个方向。至于其他方向的纹理基元, 可以分解为这几个方向的纹理基元。显然乘积型小波滤波器符合以上条件。

随后, 通过实验将 Harr 小波与其他 daubechies 小波以及一种非乘积型小波<sup>[11]</sup>相比较, 发现 Harr 小波更符合以上要求。因为 Harr 小波与其他 daubechies 小波相比, 滤波器更短, 更容易刻画小的纹理基元。与非乘积型小波相比较, Harr 小波具有更明确的方向性, 有利于纹理基元的种类简化, 所以, 在算法中选择了 Harr 小波滤波器。

## 2 构造纹理基元图象

从 Brodatz 标准纹理库中选取图象, 作为纹理分割实验的样本。现在以图 1 为例, 纹理图象经过 Harr 小波变换后, 分解为一个低频图象和 3 个高频图象, 然后在 3 个高频图象的上进行特征单元的提取。

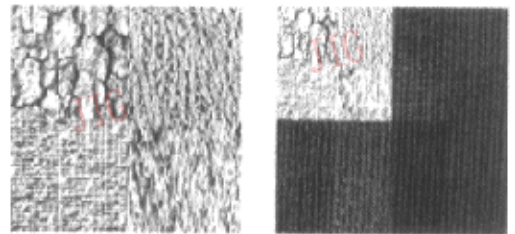


图 1 (a) 原始纹理图象 (b) 经过 Harr 小波分解后的图象

### 2.1 寻找边缘点

在图 1(b) 的高频图象中, 纹理最显著的特征就是按一定规律分布的正负边缘, 这些边缘点就是提取纹理基元的基础。将边缘点的寻找与纹理特征点的提取相结合, 分别在 3 个高频图象中寻找水平、垂直和对角线方向的边缘。

经过滤波后, 通常在边缘点附近的值较大, 如果用一个固定阈值对图象中的边缘点进行提取, 那么当阈值较高时, 就会漏掉一些真正的边缘点, 而反之就会提取出一些非边缘点。为解决这个问题, 将采用一种双阈值技术。

通过对 Brodatz 标准纹理库中纹理边缘点进行统计得出经验数据, 在一幅纹理图象中, 真正有意义的边缘点数不会超过图象像素点总数的 15%, 而边

缘点总数基本不会超过图象像素点总数的30%。于是,设所有像素点集合为 $S$ ,其中正值像素点集合定义为 $S_1$ ;负值像素点集合定义为 $S_2$ ;为0的像素点集合定义为 $S_0$ ,则有 $S=S_1 \cup S_2 \cup S_0$ 。在 $S_1$ 和 $S_2$ 中,分别按绝对值从大到小排列,取前15%的点构成基本边缘图象 $I_1$ ,前30%的点构成备选边缘图象 $I_2$ 。以 $I_1$ 为基本图象,在备选边缘图象 $I_2$ 中按照边缘的方向进行搜索,连接所有与基本边缘 $I_1$ 相连的边缘

点,形成边缘图象 $I_3$ 。为保证 $I_3$ 中的点为真实的边缘点,必须对 $I_3$ 中的点进行局部极大值判断,即以 $I_3$ 中的边缘点为基本点,在原图 $S$ 中按照纹理方向的法线方向进行比较,得到真正的边缘点。于是生成改进后的边缘图象 $I_4$ 。

按照以上算法进行计算,得到不同方向纹理的边缘图象如图2所示。

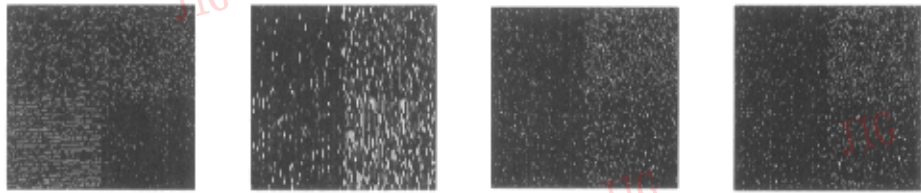


图2 4个方向的纹理边缘图象

图2 4个方向的纹理边缘图象

## 2.2 构造纹理基元

经过以上处理后,原图象已经分解为4个方向的边缘图象,这使以后纹理基元的定义大大简化了。以水平方向为例来定义纹理基元。纹理基元一律为 $3 \times 3$ 的矩阵,对于水平纹理来说,只考虑水平方向的边缘,所以将 $3 \times 3$ 的矩阵按行分为3个元素,设每行的标志为 $N_i$ ,每行中包含1的数量为 $N_i^{(1)}$ ,包含-1的数量为 $N_i^{(-1)}$ ,其中 $i$ 为矩阵中的行号,则规定

$$N_i = \begin{cases} 1 & \text{若 } N_i^{(1)} \geq 2 \\ -1 & \text{若 } N_i^{(-1)} \geq 2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

根据式(1)将 $3 \times 3$ 的矩阵简化为一维的向量。

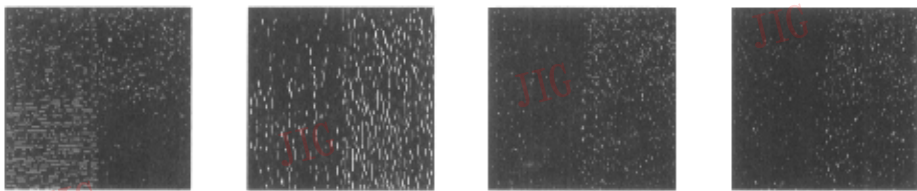


图3 4个方向的纹理基元分布图象

图3 4个方向的纹理基元分布图象

由于边缘可以有正负,所以水平纹理基元共有27种。实际上,在求取局部极大值后,不可能出现法线方向连续为1或-1的情况,并且 $(1,0,0)$ 与 $(0,1,0)$ 和 $(0,0,1)$ 之间存在很大的冗余,所以实际计算时纹理基元的种类只有12种。垂直以及对角线方向纹理基元的定义与水平方向纹理基元的定义近似。对不同纹理基元的数量进行直方图统计,选取数量较大的几种作为有代表性的纹理基元。

规定了纹理基元后,分别在4个高频图象中按照其滤波器主方向进行边缘搜索,形成4个方向的纹理基元提取图象。图3所示分别为 $(0,1,0)$ 在4个方向的纹理基元分布图象。

## 3 图象分割

从图3中可以十分明显地看到,不同纹理区域之间的纹理基元分布是不同的,最明显的区别之一就是纹理基元的分布密度不同。所以,将纹理基元的

分布密度作为重要的参数加以统计,并据此进行纹理分割。

### 3.1 基于特征单元的统计,对图象进行粗分割

进行统计的函数是一个方窗函数,记为

$$B_{x,y}(c) = \begin{cases} 1 & |x| \leq w; |y| \leq w \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $w$  为窗口尺度的大小, 下面进行窗口尺度的选择.

首先针对 Brodatz 纹理库中不同的纹理样本进行如下实验, 设尺度  $w$  为由小到大的一系列变量, 即  $w = \{w_i, |1 \leq w_i < w_2 < \dots \leq N\}$ , 其中  $N$  的大小将由纹理样本区域的大小来决定. 将纹理库中每一个纹理图象按照前述方法进行纹理基元的提取, 然后将基元提取图象与不同尺度的  $B_{x,y}(w)$  函数进行卷积, 得到一系列伪灰度图象. 对每一幅卷积后的图象进行直方图统计发现, 当窗口尺度  $w$  大于一定值时, 其统计直方图的分布都趋近于高斯分布. 设每个直方图高斯分布的中心点为  $c_i$ , 定义纹理密度函数为

$$\rho = \frac{c_i}{w_i^2} \quad (3)$$

根据实验发现, 当尺度  $w$  大于一定值后,  $\rho$  渐渐趋于稳定, 其直方图形式如图 4 所示.

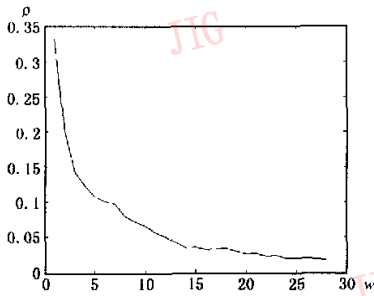


图 4

设  $|\Delta\rho/c_i| \leq 2\%$  时,  $\rho$  曲线进入稳定状态, 则对于每一种纹理基元, 不同的纹理图象都可以得到进入稳定状态时的尺度  $w_j$ , 其中  $j$  为不同种类纹理的标志. 于是, 对纹理基元进行统计时, 取一个统一的尺度为

$$w_{\max} = \sigma \times \max\{w_j\}, \sigma \geq 1 \quad (4)$$

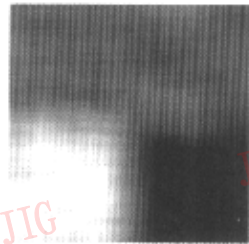
之所以将尺度中的极大值乘以一个参数  $\sigma$ , 是为了保证对纹理基元进行统计时的稳定性. 实际上, 在以后的实验中,  $\sigma$  的取值往往大于 1, 而且为保证对称性,  $w_{\max}$  取奇数. 当然,  $\sigma$  的取值也不可能太大, 因为  $w_{\max}$  太大, 不利于准确确定纹理区域之间的边界.

将纹理基元图象分别与函数  $B_{x,y}(w_{\max})$  卷积后, 形成的伪灰度图象如图 5(a) 所示. 对其进行直方图统计如图 5(b) 所示, 发现统计结果为双峰或多峰结构. 对于不同的纹理组合, 其直方图分类数  $n$  是未知的, 所以必须采用一种无监督的方法逐步得到

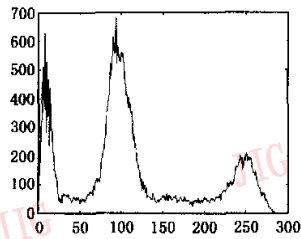
正确的分类数. 其算法描述如下: 设类别数为  $n$ ,  $n$  大于或等于纹理样本数, 分割的阈值为  $t_i$ , 与其对应的类内期望为  $u_i (i=1, \dots, n)$ , 直方图中每一个  $u$  对应的数量为  $f(u)$ , 全局类内方差为  $D$ , 则根据

$$D = \sum_{i=1}^n \int_{t_i}^{t_{i+1}} (u - u_i)^2 f(u) du \quad (5)$$

应用迭代算法, 可以求出优化的阈值  $t_i$ .



(a) 伪灰度图



(b) 图 5(a) 的直方图

图 5 水平纹理基元与  $B_{x,y}(w_{\max})$  卷积后的伪灰度图及其直方图

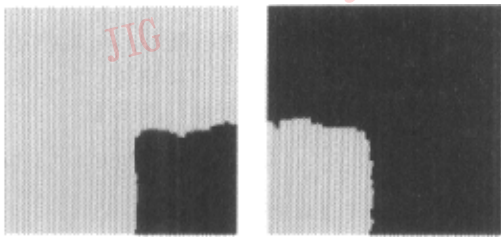
根据直方图每一个区间内峰值的大小和峰值之间的分离度, 求出峰值位置的总数  $n_{\max}$ . 若  $n_{\max} < n$ , 则将  $n$  减 1, 重复以上步骤直至  $n_{\max} = n$  时得到合适的分类数. 当算法不收敛时, 取第 1 次  $n_{\max} > n$  时的  $n$  为分类数.

经过以上计算, 得到  $n$  个峰值位置, 记为  $p = \{p_i | 0 \leq p_1 < p_2 < \dots < p_n\}$ , 则每两个峰之间的谷为

$$v_i = \frac{p_i + p_{i+1}}{2}, i = 1, \dots, n - 1 \quad (6)$$

最后, 以  $v_i$  作为阈值进行多阈值分割. 对于图 5(a) 的图象来说, 存在两个谷值, 其分割后的结果如图 6 所示.

从图 6 可见, 分割的结果是比较粗糙的. 这是因为在直方图中, 当两峰之间的分离度较大时, 中间的谷比较平滑, 这样就很难准确地确定分割点. 所以, 由直方图得到的只是粗略的分割.



(a) 图 5(a)的低阈值分割图象 (b) 图 5(a)的高阈值分割图象

图 6 分割结果

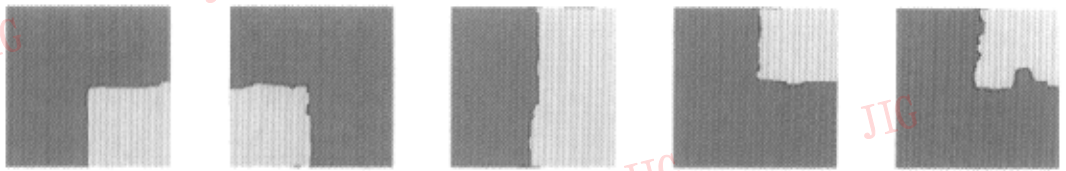
### 3.2 基于矢量场的精确分割

由于在直方图分割中难以找到准确的分割点,所以分割边界存在不同程度的侵入现象.同时,为保证统计的有效性而导致窗口尺度  $w_{max}$  的选取偏大,也造成在不同纹理区域交界处的分割不精确.为了进一步进行准确的纹理分割,引入矢量场<sup>[12]</sup>的概念.

设算子依然为  $w_{max}$  大小的窗函数  $B_{x,y}(w_{max})$ ,

因已经设  $w_{max}$  为奇数,所以  $B_{x,y}(w_{max})$  是中心对称的,设中心坐标为  $(0,0)$ ,则横坐标为  $i$ ,纵坐标为  $j \left( -\frac{w_{max}-1}{2} \leq i, j \leq \frac{w_{max}-1}{2} \right)$ ,设在  $B_{x,y}(w_{max})$  矩阵内每一点的值为 1,角度  $\alpha_{i,j}$  为  $\arctan(j/i)$  或  $\arctan(j/i) \pm \frac{\pi}{2}$ ,于是得到矢量算子  $B_{x,y}(w_{max})$ .

纹理基元图象的外边界,以  $\frac{w_{max}+1}{2}$  尺寸进行对称延拓,并对图象中每一点取出  $w_{max} \times w_{max}$  的区域,与矢量函数  $B_{x,y}(w_{max})$  进行点乘,然后计算矢量和.由于已经有了粗分割,所以没有必要计算纹理基元图象中的所有点,而只需计算粗分割边界两边尺度为  $w_{max}$  大小的区域即可,这将极大地节约计算时间.经过计算,在粗尺度的分割区域内形成了一个矢量场,按照矢量方向寻找局部极大值点.在粗分割边界的指导下,将这些点进行连接,得到新的准确分割边界如图 7 所示.

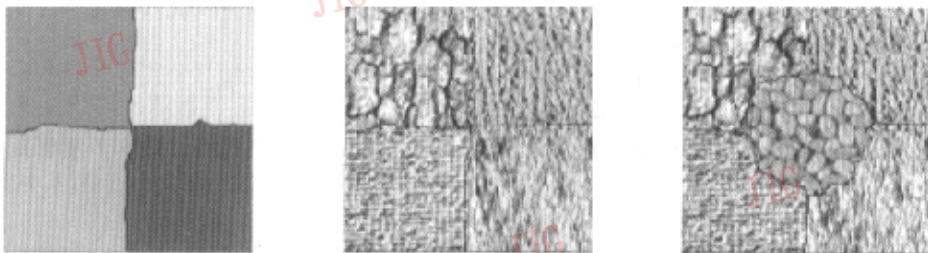


(a) 图 6(a)矢量分割结果 (b) 图 6(b)矢量分割结果 (c) 垂直方向纹理基元图象的分割结果 (d) 135°倾斜方向纹理基元图象的分割结果 (e) 45°倾斜方向纹理基元图象的分割结果

图 7 矢量分割结果

通过以上计算,得到了不同纹理基元的分割图象.由于纹理基元的分布并不一定是均匀的,针对每一种纹理基元的分割都存在边界的侵入现象,因此,在进行多种纹理基元分割时,对于同一个边界在不同的纹理基元图象中,其对应的位置是不同的,但都接近于真实的分割边界,而且这些边界分布在很窄的带

状区域内.于是,通过形态学变换,提取这些带状区域并求取其中心线,得到最终的分割结果如图 8(a)、(b)所示.为检验算法的鲁棒性,将纹理区域的形状复杂化,并加入新的纹理,如图 8(c)所示,依然取得了很好的效果.随后,对 Brodatz 纹理库中的不同纹理样本进行组合试验,也都取得了较好的效果.



(a) 综合多个边界的分割结果 (b) 用最终结果分割的原始图象 (c) 加入新纹理后的分割结果

图 8

## 4 结 论

用这种算法对 Brodatz 纹理库中的不同纹理样本组合进行试验,都取得了较好的效果.从理论上分析,只有当两个纹理样本,在4个方向上的纹理基元密度统计完全一致时,才是不可分割的,但这种情况在小样本试验中很难发生.

当然,这种算法仍然有改进的余地.比如,针对不同的纹理组合,纹理基元的选取不一定是分布数量最大的,因为在考虑纹理基元数量多少的同时,还必须考虑其统计直方图各峰值之间的分离度,这样选出的纹理基元才具有代表性.另外,在用矢量场进行边缘的精确分割时,可以考虑针对不同纹理之间的边界,选取不同大小窗口的矢量函数,这样将会获得更好的分割效果.当然,这会在计算上付出更大的代价.

本文提出的算法,使人们可以对不同纹理类型进行定性和定量的描述,利用这种描述,不仅可以对纹理区域进行分割,还可以进行纹理分类,以及在分类的基础上进行基于内容的搜索,为以后进行更高层次的图象处理工作奠定了基础.

## 参 考 文 献

- 1 Tuceryan M, Jain A K. Texture analysis[A]. In: Handbook of Pattern Recognition and Computer Visions[C]. New Jersey: World Scientific, 1993:235~276.
- 2 Voorhees H, Poggio T. Computer texture boundaries in images[J]. Nature, 1988, 333(5):364~367.
- 3 Ma W Y, Manjunath B S. A texture thesaurus for browsing large aerial photographs [J]. Journal America Society Information Science, 1998,49(7):633~648.
- 4 Chen P C, Pavlidis T. Segmentation by texture using a co-occurrence matrix and a split-and-merge algorithm [J]. Computer Graphics Image Processing, 1979,10(1):172~182.
- 5 Manjunath B S, Simchony T, Chellappa R. Stochastic and deterministic networks for texture segmentation [J]. IEEE Trans. Acoustic Speech Signal Processing, 1990,38(6):1039~1049.

- 6 Percept J BeCK. Effect of orientation and of shape similarity on perceptual grouping[J]. Perceptual psychophysics, 1966,1(7): 300~302.
- 7 Bergen J R, Julesz B. Parallel versus serial processing in rapid pattern discrimination[J]. Nature, 1983, 303(7): 696~698.
- 8 Bergen J R, Adelson E. H. Early vision and texture perception [J]. Nature, 1988, 333(5): 363~364.
- 9 Ojala T, Pietikainen M. Unsupervised texture segmentation using feature distribution[J]. Pattern Recognition, 1999,32(3): 447~486.
- 10 Julesz B. Experiments in the visual perception of texture[J]. Scientific American, 1975, 232(4):34~43.
- 11 Silong Peng. Construction of two-dimensional compactly supported orthogonal wavelet filters with linear phase[J]. Acta Mathematica Sinica, 2002, 18(1):1~8.
- 12 Tabb M, Ahuja N. A transform of multiscale image segmentation by integrated edge and region detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996,18(12):1211~1235.



张 蓬 1970年生,中国科学院自动化研究所国家专用集成电路设计工程技术研究中心博士研究生.主要研究方向为纹理图象分割、纹理合成.



赵书斌 1968年生,中国科学院自动化研究所国家专用集成电路设计工程技术研究中心博士研究生.主要研究方向为模式识别与图象处理.



彭思龙 1971年生,1998年获得中国科学院数学所博士学位,现为中国科学院自动化研究所国家专用集成电路设计工程技术研究中心研究员、博士生导师.主要研究方向为小波理论及应用、模式识别、图象处理等.发表论文30余篇.