

基于顺序形态学的图像边缘检测快速算法的研究

赵继印¹, 徐艳蕾^{2,3}, 焦玉斌⁴

(1. 大连民族学院机电工程学院, 辽宁大连 116600; 2. 吉林大学通信工程学院, 吉林长春 130022;
3. 吉林农业大学信息技术学院, 吉林长春 130118; 4. 装甲兵技术学院控制系, 吉林长春 130117)

摘 要: 图像边缘检测是图像处理的关键技术, 边缘检测的结果直接决定了后续图像处理的性能. 数字图像的边缘检测主要要求就是边缘定位准确, 运算速度快. 以此要求为依据, 本文在深入研究了数学形态学和顺序形态学的基础上, 提出了一种基于顺序形态学的优化边缘检测算法, 该算法能够快速准确的提取图像的边缘, 对于尺寸较大的图像效果尤为明显. 通过仿真实验表明该算法是一种准确快速的边缘检测方法.

关键词: 图像边缘检测; 顺序形态变换; 结构元素; 快速算法

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 11-2195-05

The Fast Arithmetic Study of Image Edge Detection Based on the Order Morphology

ZHAO Ji-yin¹, XU Yan-lei^{2,3}, JIAO Yu-bin⁴

(1. College of Electromechanical and Information Engineering, Dalian Nationalities University, Dalian, Liaoning 116600, China;
2. School of Communication Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130022, China;
3. College of Information and Technology, Jilin Agriculture University, Changchun, Jilin 130118, China;
4. Department of Automatization, Armored Forces Technology Institute, Changchun, Jilin 130117, China)

Abstract: The image edge detection is important tools of image processing and the results decide the later processes. Therefore, precise and fast edge detection is required for image analysis, evaluation and recognition techniques. According to this, this paper proposes a fast arithmetic of edge detection based on the order morphology, which can achieves the image edge fast and precisely, especially to the large-size images. By simulation, the arithmetic is proved a fast and precise method.

Key words: image edge detection; order morphology transform; structure element; fast arithmetic

1 引言

图像边缘检测是图像处理系统的关键技术, 边缘检测的结果直接决定了后续图像处理的性能^[1]. 数字图像的边缘检测主要要求就是边缘定位准确, 运算速度快. 传统的边缘检测方法已经提出了一些较好的基于模板和梯度的算法, 理论分析和实验表明, 这些检测器对含有噪声的图像边缘检测效果并不理想, 边缘定位不准确, 不能有效的抑制噪声, 而且当图像尺寸较大时, 运算速度明显减慢^[2,3]. 数学形态学是一种以严格数学理论为基础的用于非线性图像处理和分析的理论^[4]. 形态学图像处理已经成为计算机数字图像处理的一个主要研究领域^[5,6].

顺序形态变换理论在数学形态学的基础上引入统计方法. 近年来, 基于顺序形态学理论发展起来的图像

边缘检测方法得到了广泛的应用, 特别是对于有噪声的图像, 顺序形态学更是显示了它的优越性^[7~10]. 但是顺序形态学实质上可以看作是一种卷积的运算, 算法的实时性是一个关键问题, 特别是当图像维数较大, 或者结构元素较大时运算速度受到了很大的制约. 针对此问题, 本文在深入研究了数学形态学和顺序形态学理论的基础上, 提出了一种基于顺序形态学的快速边缘检测算法, 该算法能够快速准确的提取图像的边缘.

2 顺序形态变换

2.1 顺序形态变换的基本理论

为了研究基于顺序形态变换的边缘检测算法, 首先给出顺序形态变换的定义及其性质^[8,10], 为构建顺序形态变换的边缘检测算法奠定基础.

定义 1 设数字图像 $f: 0 \leq f(x) \leq m$ (m 为灰度

值), $B = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ 为结构元素, $0 \leq \mu(B) = k < +\infty$, $\mu(\cdot)$ 为测度, 即对 B 点计数. $f(x)$ 在集合 B 上的 k 个值依次排序为: $f(x_1^*) \leq f(x_2^*) \leq \dots \leq f(x_k^*)$, 定义在结构元素 B 上的 d 阶顺序量 (d 为阶数):

$$\text{order}(d; f/B) = f(x_d^*), \quad (d = 1, 2, \dots, k) \quad (1)$$

定义 2 $f(x)$ 在结构元素 B 上的 d 阶顺序量 ($d = (k-1)p + 1$ 为阶数) 定义为 f 关于结构元素 B 的顺序形态变换, 记为 $f \oplus B$, 即:

$$g_{ij}^{(d)} = f \oplus B = \text{order}(d; f/B) \\ = f(x_d^*) \quad (p = 0, 1, (k-2)/2, (k-1) \dots 1) \quad (2)$$

根据以上所述, 顺序形态变换可以看作是一个滤波器, 具有天然的滤波特性. 使用不同的 p 值对灰度图像进行不同的顺序形态变换, 并将它们进行相应的运算, 可以实现灰度图像的多种处理. 具体方法就是先将结构元素下对应的像素灰度值进行排序, 再根据某一个确定的 p 值选取序列中相应的像素值赋给对应模块中心位置的像素. p 值取 1 就是最大值滤波器, 可用于检测图像中最亮的点; 取 0 就是最小值滤波器, 可用于检测图像中最暗的点; 取 $1/2$ 即为中值滤波. 顺序形态变换不仅具有滤波的性质, 而且还具有单调性、扩展性和反扩展性.

(1) 单调性 1: 如果 $p \leq q$, 则 $f \oplus B \leq f \oplus B$

(2) 扩展性: $f \leq f \oplus B$, 由于

$$f \oplus B = f \oplus B = \max\{f(u), u \in B\}$$

(3) 反扩展性: $f \oplus B \leq f$, 由于

$$f \oplus B = f \oplus B = \min\{f(u), u \in B\}$$

(4) 单调性 2: $B \subset C$, 则 $f \oplus B \leq f \oplus C$, $f \oplus C \leq f \oplus B$

2.2 基于顺序形态学的边缘检测方法

由上可知, 顺序形态变换实际为局部排序运算, 反映的是图像中以某一像素为中心的邻域范围内的图像形态. 当顺序形态变换的结构元素 B 位于平坦区时, 由于窗口内平坦区域像素点的灰度值相差不大, 所以平坦区经变换的输入和输出没有什么差别; 但是当 B 进入灰度跳变区时, 由于各像素点的灰度值差别较大, 所以变换后的输出图像在灰度跳变的地方有一个降低 ($p < 1/2$), 或升高 ($p > 1/2$) 即变换前后的差别较大, 因而可以识别灰度跳变区域 (即边缘). 例如 $f - f \oplus B$ 在平坦

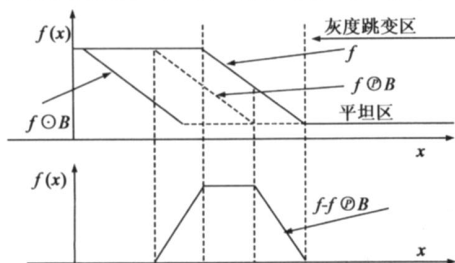


图1 顺序形态学边缘检测几何解

区域上的差接近于零, 在灰度跳变的区域差值较大. 这样, 差图像便反映了原图的边缘信息, 如图 1 所示^[8,11]

3 快速边缘检测算法

3.1 顺序形态学算法的通用方法

传统的顺序形态学运算的实现方法是: 结构元素在图像上平移, 对结构元素覆盖范围内的各个像素点的灰度值进行排序, 然后选取第 d 个灰度值赋给中心位置的像素. 传统方法的时间复杂度很大, 对于 $H \times M$ 的结构元素处理 $N \times N$ 的图像, 一个像素点的赋值需要进行其时间复杂度为 $O(H^2 M^2)$, 且结构元素或图像较大时, 时间复杂度越大, 甚至会因为图像处理的速度过低而使得某些构想无法实现, 因此必须寻找有一种能降低时间复杂度的方法, 提高顺序形态学图像处理的速度, 以达到图像边缘高精度检测的实时处理.

3.2 顺序形态学的快速优化方法

3.2.1 优化算法的设计思想

一般方法中结构元素每在图像上移动一个像素就要对新的像素点作一次新的运算, 而实际上两次相邻的运算之间有很大的重叠区域 (如图 2 中), 在这样的重叠区域反复计算是导致时间上延长的直接原因. 因此, 改进算法的目的就是要在程序的运算中使得前一次的运算结果能够被下一次的运算利用或者尽量减少需要计算的区域, 从而提高计算速度^[12].

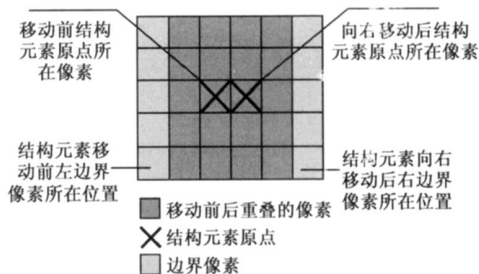


图2 结构元素在图像上移动时区域会产生重叠

假设结构元素是 H 行 M 列的, 左上角在第 i 行第 j 列的结构元素为 $W_0(i, j)$, 则 $W_0(i, j)$ 的矩阵形式为

$$W_0(i, j) = \begin{bmatrix} f(i, j) & f(i, j+1) & \dots & f(i, j+M-1) \\ f(i+1, j) & f(i+1, j+1) & \dots & f(i+1, j+M-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(i+H-1, j) & f(i+H-1, j+1) & \dots & f(i+H-1, j+M-1) \end{bmatrix}$$

顺序形态变换就是将结构元素中心的像素用窗口内 $H \times M$ 个像素值的第 d 个值替代. 结构元素移动的次序是扫描线顺序, 从上至下逐行移动, 每行内部又是从左至右逐列移动. 现将结构元素中各列分别排序, 将每个排好序的列看成一个 $H \times 1$ 的向量, 针对 $N \times N$ 图像共 N 个向量. 结构元素图像的第一行移动时, 向量初

始建立,每右移一列就新纳入一列像素,用传统排序方法将之排序;从第二行开始,每列像素比上一行同列已排好序的向量相差一个值,从原向量删除旧值,再插入新值即完成了向量的更新。下一步就是在排序好的各个列向量中寻找整个结构元素内的第 d 个值(百分比 $p = \frac{d-1}{H \times M - 1}$),寻找第 d 个值的过程没有必要从头到尾,找到第 d 个值即可停止。对于每一个列向量来说,要寻找的百分比与整个结构元素内百分比相同,设这个值为 x ,那么 x 应该满足下式:

$$\frac{d-1}{H \times M - 1} = \frac{x-1}{H} \quad (3)$$

则 $x = \left\lceil \frac{H(d-1)}{H \times M - 1} + 1 \right\rceil$ (x 取整数) (4)
 将一个结构元素内各个向量的元素都分成了小于第 $\left\lceil \frac{H(d-1)}{H \times M - 1} + 1 \right\rceil$ 值和大于等于 $\left\lceil \frac{H(d-1)}{H \times M - 1} + 1 \right\rceil$ 值两部分,如图 3 所示。

图 3 中各列都是从上至下为排序的向量,实线为分界线,它代表了一个分界值,实线上方的值都小于分界值,实线下方的值都大于等于分界值。当下方像素个数刚好比上方像素个数多 1 时,那么下方像素临近分界线的 M 个值(即图 3 中 A 位置上的值)中最小的值即为整个窗口的第 d 个值;当上方像素个数刚好比下方像素个数多 1 时,那么上方像素临近分界线的 M 个值(即图 3 中 S 位置上的值)中最大的值即为整个窗口的第 d 个值。查找第 d 个值的过程就是调整边界使得上下方数目仅差 1 的过程,若上方数目过多,则需要将上方的像素下移。窗口右移时,将最左边的向量去除,其余各向量及其分界线位置保留,新纳入最右边的向量用前一个窗口的第 d 个值作为分界值,定出其分界线位置。

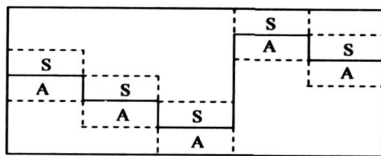


图3 结构元素内分界线

值,实线下方的值都大于等于分界值。当下方像素个数刚好比上方像素个数多 1 时,那么下方像素临近分界线的 M 个值(即图 3 中 A 位置上的值)中最小的值即为整个窗口的第 d 个值;当上方像素个数刚好比下方像素个数多 1 时,那么上方像素临近分界线的 M 个值(即图 3 中 S 位置上的值)中最大的值即为整个窗口的第 d 个值。查找第 d 个值的过程就是调整边界使得上下方数目仅差 1 的过程,若上方数目过多,则需要将上方的像素下移。窗口右移时,将最左边的向量去除,其余各向量及其分界线位置保留,新纳入最右边的向量用前一个窗口的第 d 个值作为分界值,定出其分界线位置。

3.2.2 优化算法的实现

图像中除了最上边一行和最左边一列的结构元素外的其他结构元素内的顺序形态变换过程,优化算法大概可以分为如下几个步骤:(1)删除最左边向量,更新最右边向量,并且以上一窗口的第 d 个值作最右边向量的分界线,分别计算分界线上下像素个数为 N_1 , N_2 ;(2)如果分界线上下像素个数恰好相差一个像素,那么就寻找整个窗口的第 d 个值,具体见步骤 3;否则,调整分界线上下像素的个数,具体见步骤 4;(3)如果分界线上方的像素个数 N_1 多于下面的像素个数 N_2 ,那么分界线上 M 个像素中的最大值即为整个窗口的第

d 个值;如果分界线上方的像素个数 N_1 少于下面的像素个数 N_2 ,那么分界线下 M 个像素中的最小值即为整个窗口的第 d 个值;(4)如果分界线上方的像素个数 N_1 多于下面的像素个数 N_2 ,那么分界线上 M 个像素中的最大值移到分界线的下方,分界线上调一位,即 N_1 减 1 而 N_2 增加 1,然后再回到步骤 2 中;如果分界线上方的像素个数 N_1 少于下面的像素个数 N_2 ,那么分界线下 M 个像素中的最小值移到分界线的上方,分界线下调一位,即 N_1 增加 1 而 N_2 减 1,然后再回到步骤 2 中。快速的顺序形态变换流程图如图 4 所示。

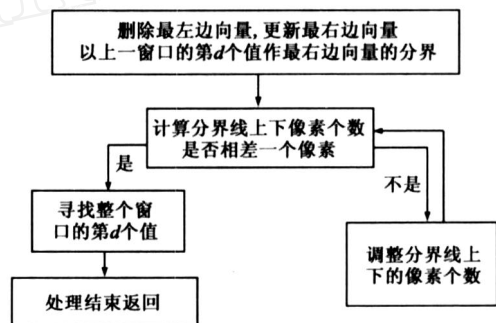


图4 快速算法的框架结构图

3.3 快速边缘检测算子

根据以上分析构造几个顺序形态边缘检测算子:

$$f \oplus B - f \oplus C (p < 1/2 \text{ 时}), f \oplus C - f \oplus B (p > 1/2 \text{ 时})$$

$$f \oplus B - f \oplus B (p > q) \quad , \text{其中 } B \subset C$$

在此对图像 f 进行顺序形态学变换时,采用前面所述的快速算法来实现,可以提高处理的速度,实时性能够得到提高。对此算法的快速性下面进行理论上的分析:(1)在进行更新最右边的向量的工作时,工作实质是在有序序列中删除一个值、再插入一个值,使用二分查找^[13]需要 $2\lg H$ 次比较;(2)在以上一个窗口的第 d 个值作分界值定位最右边向量的分界线位置的工作实质是在有序序列中定位一个值,使用二分查找需要 $\lg H$ 次比较;(3)调整分界线直至找到第 d 个值。新窗口的初始分界值是上一个窗口的第 d 个值,此分界值在上一个窗口是能使上下两部分数目平衡的。相邻窗口仅有一列像素不同,最极端的情况是移出的一列像素值均小于(大于)上个窗口的第 d 个值,而移入的一列像素值均大于(小于)上个窗口的第 d 个值,这样新窗口的初始分界情况离平衡状态最多可能差 H 个像素。也就是说,边界调整每次移动一个像素,也就是在 M 个元素中查找一次最值,共要进行 H 次,此时共需 $H(M-1)$ 次比较。对一个结构元素来说,总的比较次数最多为 $2\lg H + \lg H + H(M-1) = 3\lg H + H(M-1)$,显然比传统算法的 $O(H^2 M^2)$ 有了很大改进。

因为快速算法的基本原理以及边缘提取的检测方法与顺序形态学是相同的,边缘提取的快速算法与形

态学方法具有相同的检测精度,只不过快速算法在时间上更有优势,具有实时性.

4 仿真实验及结果分析

为了验证此算法的优越性进行仿真实验,实验采用 MATLAB7.0 在 Pentium4 主频 2.66GHz、内存 512M 的 PC 机上进行.

实验 1 对一幅 172 ×172 的 lena 图像分别用 Prewitt 算子、Sobel 算子、Canny 算子和文中顺序形态变换边缘检测算子(结构元素采用 3 ×3)进行边缘提取,结果如图 5 所示,所用时间对比见表 1.

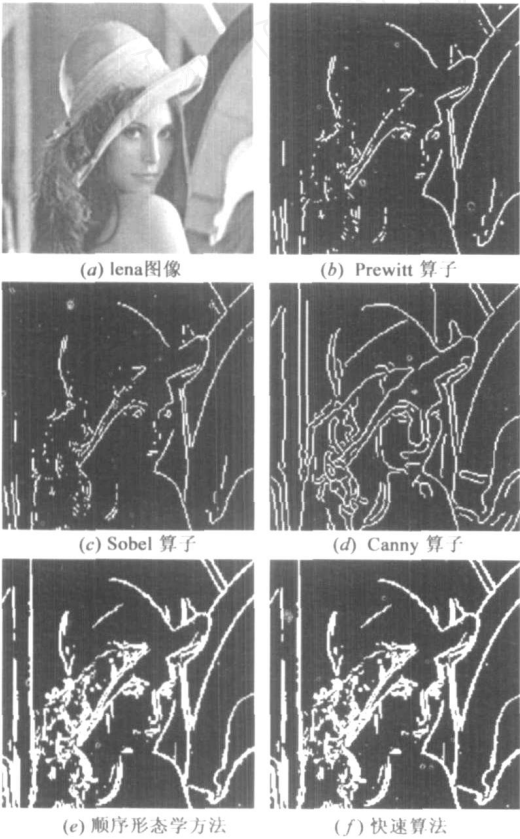


图5 仿真结果

表1 各种边缘检测算子的运算量比较

图 像	大 小	运算时间(单位:秒)				
		prewitt	sobel	canny	顺序形态学	快速算法
lena	172 ×172	0.1410	0.1100	0.2500	0.2350	0.2100
leaf	1024 ×768	0.7810	2.1560	4.9530	1.1570	0.5610

实验 2 对一幅 1024 ×768 的 leaf 图像分别用 Prewitt 算子、Sobel 算子、Canny 算子和文中顺序形态变换边缘检测算子(结构元素采用 3 ×3)进行边缘提取,结果如图 6 所示,运算量对比见表 1.

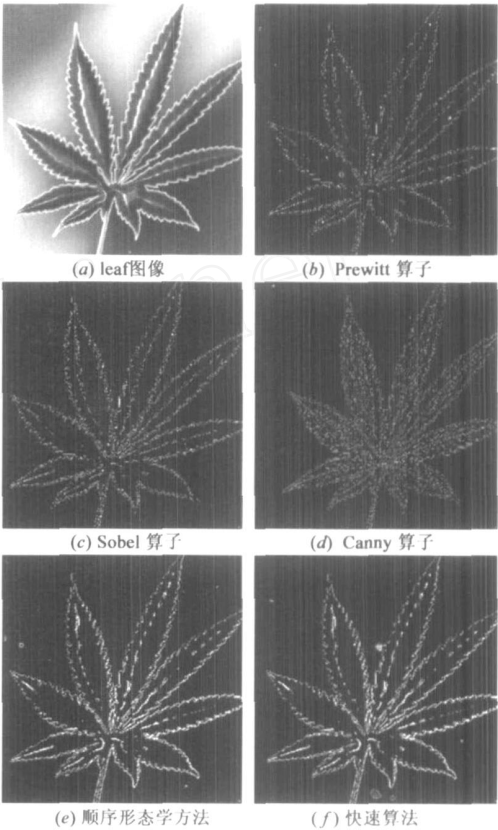


图6 仿真结果

由图 5、图 6 和表 1 比较分析表明快速的顺序形态学算法具有以下优点:

(1) 边缘检测精度高. 从图中可以看出 Prewitt 算子、Sobel 算法和 Canny 算法存在虚假边缘,顺序形态学算法和快速算法没有虚假边缘,边缘定位准确. Canny 算法一些锐角边缘被钝化,而顺序形态学的算法和快速算法锐角边缘得到很好的保持. 这些都表明快速顺序形态学边缘检测算子具有更高的边缘检测精度.

(2) 边缘连续性好. 从图中可看出 Prewitt 算子和 Sobel 算法边缘连续性不好(在 lena 图像中较明显),存在断裂边缘. 而顺序形态学算法和快速算法相差不大,边缘连续性好,不存在断裂边缘,边缘光滑.

(3) 快速实时. 从表 1 各种算法运算量的统计可以看出在图像尺寸较小的时候,本文算法和顺序形态学所用时间相差不大,显示不出其优越性,反而比常规算法更费时间,但是当图像尺寸较大的时候,顺序形态学算法比 Sobel 算法和 Prewitt 算法快了将近 2 倍,比 Canny 算法快将近 5 倍,而本文算法比常规的顺序形态学算法快了近 2 倍,并且与顺序形态学具有基本相同的边缘检测效果.

综上所述,本文提出的快速顺序形态学算法能够快速准确的检测出精确、光滑的边缘,实时性好. 快速算法从理论和实验两个方面都显示出它的优越性.

5 结论

本文针对传统边缘检测算法对噪声敏感,不能有效地提取图像边缘,而且在图像尺寸较大时运算速度比较慢的特点,在对数学形态学和顺序形态学进行了深入研究的基础上,采用循环再递推的结构优化算法,构建了一种快速的边缘检测方法.这种方法的时间复杂度比一般顺序形态学方法的时间复杂度要小很多,不仅能够检测出较好的边缘,而且具有速度快的优点,算法的实时性得到了很大的提高.

参考文献:

- [1] Madasu Hanmandlu, John See, Shantaram Vasikarla. Fuzzy edge detector using entropy optimization[A]. Proceedings of the International Conference on Information Technology: Coding and Computing (ITCC '04) [C]. Las Vegas, Nevada, USA, IEEE Computer Society, 2004. 1557 - 1562.
- [2] X Jiang, H Bunke. Edge detection in range images based on scan line approximation[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1999, 73(2) : 183 - 199.
- [3] 梅跃松, 杨树兴, 莫波. 基于 Canny 算子的改进的图像边缘检测方法[J]. 激光与红外, 2006, 36(6) : 501 - 503.
Mei Yue-song, Yang Shu-xing, Mo Bo. Improved Edge Detection Algorithm Based on Canny Operator[J]. Laser and Infrared, 2006, 36(6) : 501 - 503. (in Chinese)
- [4] 崔屹. 图像处理与分析—数学形态学方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 1 - 5.
Cui Yi. Image Processing and Analysis—Method and Application of Mathematics Morphology[M]. Beijing: Science Press, 2000. 1 - 5. (in Chinese)
- [5] S T Acton, D P Mukherjee. Scale space classification using area morphology[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(4) : 623 - 635.
- [6] 陈虎, 王守尊, 周朝辉. 基于数学形态学的图像边缘检测方法研究[J]. 工程图学学报, 2004, 25(2) : 112 - 115.
Chen Hu, Wang Shou-zun, Zhou Chao-hui. Research based on mathematics morphology image edge examination method[J]. Journal of Engineering Graphics, 2004, 25(2) : 112 - 115. (in Chinese)
- [7] Dong Hu, Xianzhong Tian. A multi-directions algorithm for edge detection based on fuzzy mathematical morphology[A]. Proceedings of the 16th International Conference on Artificial Reality and Telexistence Workshops (ICAT '06) [C]. Hangzhou, IEEE Computer Society, 2006. 2133 - 2136.
- [8] 严学强. 顺序形态学在图像边缘检测中的应用[J]. 信号与处理, 1997, 13(4) : 357 - 362.
- Yan Xue-qiang. Applications of order morphology to image edges detection[J]. Signal and Processing, 1997, 13(4) : 357 - 362. (in Chinese)
- [9] 赵春晖, 惠俊英, 王伟, 等. 一类自适应顺序形态滤波器[J]. 中国图像图形学报, 2000, 5(8) : 674 - 677.
Zhao Chun-hui, Hui Jun-ying, Wang Wei, et al. A class of adaptive ranked-order morphological filters[J]. Journal of Image and Graphics, 2000, 5(8) : 674 - 677. (in Chinese)
- [10] Arce G R, Foster R E. Detail preserving ranked-order based filters for image processing[J]. IEEE Trans. on ASSP, 1989, ASSP-37(1) : 83 - 98.
- [11] 迟健男, 方帅, 等. 基于多结构元孙旭形态变换的灰度图像边缘检测[J]. 中国图像图形学报, 2006, 11(1) : 41 - 46.
Cui Jiang-nan, Fang Shuai, et al. Gray-scale image edge detection based on multi-structuring elements order morphology transformation[J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11(1) : 41 - 46. (in Chinese)
- [12] 曹治华, 宋斌恒. 多种形状窗口下的快速中值滤波算法[J]. 计算机应用研究, 2006, 23(3) : 85 - 88.
Cao Zhi-hua, Song Bin-heng. A fast algorithm for median filtering in multiform window[J]. Application Research of Computers, 2006, 23(3) : 85 - 88. (in Chinese)
- [13] 严蔚敏, 吴伟民. 数据结构(C语言版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997. 150 - 196.
Yan Wei-min, Wu Wei-min. Data Structure (C Language Version) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. 150 - 196. (in Chinese)

作者简介:



赵继印 男, 1961 年出生于吉林省, 现为大连民族学院教授, 博士生导师. 现主要从事智能信息处理与传输方面的教学和研究工作.

E-mail: zhaojiyin2000@163.com



徐艳蕾 女, 1979 年出生于河北省, 博士研究生, 博士期间主要研究方向为数字图像处理. 通信作者

E-mail: yanleixu@163.com