

基于类间最大交叉熵的坎尼边界扫描

王卫星^{1,2}, 王李平², 赖均², 李婷婷²

(1. 福州大学物理与信息工程学院 福州 350108; 2. 重庆邮电大学计算机科学与技术学院 重庆 南岸区 400065)

【摘要】分析了传统坎尼边界扫描算法中阈值和高斯滤波器对边缘闭合的影响, 首先采用当前像素点8个方向的自适应滤波器代替原有的高斯滤波器对图像进行滤波, 得到的梯度图像不会出现过度光滑现象; 然后将最大类间交叉熵准则和有关人工智能理论相结合来确定高、低阈值。自适应滤波器是根据当前像素点邻域内的最小方差确定使用的模板, 将方差最小的模板的均值设置为当前像素点的灰度值得到滤波后的图像。实验证明, 该方法能得到较低的高阈值和较高的低阈值, 既避免了引入伪边缘又尽可能多的检测出边缘像素点; 同时具有很强的抗噪性。

关键词 贝叶斯; 类间方差; 交叉熵; 边界扫描

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.02.017

Edge Detection Algorithm of Canny Based on Maximum Cross Entropy between-Classes

WANG Wei-xing^{1,2}, WANG Li-ping², LAI Jun², and LI Ting-ting²

(1. College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University Fuzhou 350108;

2. College of Computer Science and Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications Nan'an Chongqing 400065)

Abstract The analysis of the influence of the thresholds and Gauss filter on edge closure in contradi-tional Canny algorithm is presented. Firstly image was filtered of eight directions of the current pixel replaced the Gauss filter, there is no over-smoothing pixels in Gradient image; Secondly, combined maximized cross entropy criterion with the relative artificial intelligence theory to obtain the high and low thresholds. The adaptive filter was to setup models in the eight directions around the processing pixel, then defined template that will be used according to minimized variance in the neighborhood of the current pixel, the gray value was replaced by the mean value of the template which had minimized variance, then obtained smoothed image. Experiments proved that this algorithm may obtain higher low-threshold and lower high-threshold, and not only avoided the introduction of pseudo-edge but also detected more edge pixels as soon as possible, and meantime it has strong anti-noise performance.

Key words Bayesian; between class variation; cross entropy; edge detection

边缘是图像最基本的特征, 为目标识别和图像解释提供了一种有价值的特征参数。传统的边界扫描方法有Prewitt^[1]、Sobel^[2]和Laplace^[3]等。这些算法的优点是形式简单、容易实现、速度快; 缺点是定位精度差, 且是基于整数阶微分的算子, 一般都对噪声比较敏感。文献[4]提出了最佳边界扫描算子, 即坎尼边界扫描算法。

但该算法有其自身的缺陷: (1) 高斯滤波器会对图像造成过度光滑, 产生缓变边缘, 求导后变得更小甚至丢失; (2) 需要人为设置高低阈值, 但高低阈值控制着检测到的边缘点的个数, 所以不能根据不同的内容自适应地调整高低阈值, 会丢失边缘信息, 或者产生伪边缘信息。文献[5]提出了梯度幅度直方

图和类内方差最小化自适应地确定高低阈值方法, 可以针对不同的图像实现双阈值的自动获取, 不需要人为地设定任何参数, 采用模糊控制技术提取边缘像素, 取得了很好的效果。但该方法使用的分段函数的分界点是由经验确定的, 不具有鲁棒性。

本文用自适应滤波器代替原有的高斯滤波器对图像进行平滑, 首先根据均方差的大小选用对应的模板进行平滑; 而后利用类间最大交叉熵等人工智能技术方法求得梯度图像的高阈值和低阈值。实验表明该方法边界扫描效果令人满意。

1 坎尼算子及其缺陷

文献[6]提出了判断边缘检测算子的信噪比准则、定位精度准则及单边缘相应准则3个准则。

(1) 为了抑制噪声的影响,使用一个一维高斯函数分别对图像行和列进行滤波,高斯函数为:

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

该高斯函数的尺度 σ (方差)控制平滑程度。

(2) 采用 2×2 邻域一阶偏导的有限差分计算平滑后的数据阵列的梯度幅值和梯度方向。

(3) 为了提取单像素宽边缘,必须对梯度幅值图的幅值进行非极大值抑制。

(4) 经过梯度计算及非极大值抑制后的结果设定阈值,阈值的设定直接涉及哪些像素点可能为边界点。

(5) 根据设定的阈值,利用函数寻找边缘的起点,之后从一个像素点进行搜索,搜索以该像素为边界起点的一条边界的所有边界点。

传统坎尼算法存在的缺陷有:(1) 影响边缘闭合的因素;(2) 对图像滤波时过渡平滑;(3) 高低阈值需要人为设定,致使算法缺乏自适应性。本文主要针对后两个缺陷进行讨论:(1) 对图像进行滤波主要是为了提高图像的信噪比,然而高斯滤波器对图像进行滤波时过度平滑,使一些边缘变得平缓,求导后变得更小,致使在非极大值抑制后丢失边缘信息,在最后的边缘图像中产生边缘不闭合现象。(2) 在算法中,高阈值控制着梯度图中作为边缘检测的起点,高阈值越小,检测到的边缘点就越多。但有可能会引入伪边缘信息,如果增大高阈值,虽然可以抑制伪边缘的引入,但会丢失边缘信息;低阈值控制着边缘检测的中止点性质,低阈值越小,保留的边缘信息越多,边缘越连续;增加低阈值,可见的目标边缘特征就减少,边缘表现为不闭合。

针对上面的对传统算法缺陷的讨论,本文提出了相应的改进方法。

2 本文对坎尼算子的改进

2.1 滤波器的改进

为了避免高斯滤波造成的图像模糊性,根据图像边缘区域的一致性和方向性,本文提出了边缘保持滤波器,模板如图1所示。滤波器充分考虑当前区域中心像素点的8个方向的边缘轨迹,当某个方向与边缘轨迹重合时,当前方向上的均方差较小;当边缘轨迹与某个方向垂直时,则必定与另外一个方向重合,均方差还是较小。若当前邻域为平滑区,无论使用哪个方向的滤波器,均方差都比较小;若噪

声点不在滤波器的某个方向上,则对均方差没有影响;若噪声点在滤波器的某个方向上(不是成片出现时),邻域内均值与当前像素点灰度值差别较大,均方差较大。不论当前像素点是否是噪声点,均值都是对噪声的减弱,所以滤波器有对噪声消弱的作用,再经过求导运算和非极大值抑制后,噪声点被抑制。所以本文滤波器具有很强的抗噪性。取邻域内均方差最小的方向的模板的均值作为当前像素点的灰度值,如果当前邻域为平滑区或者边缘轨迹与某个方向重合,则邻域内均值赋给当前中心像素点,对当前中心像素点的灰度影响较小;如果当前邻域里有噪声且与模板某方向重合,则邻域内均值是对噪声的一种消弱。

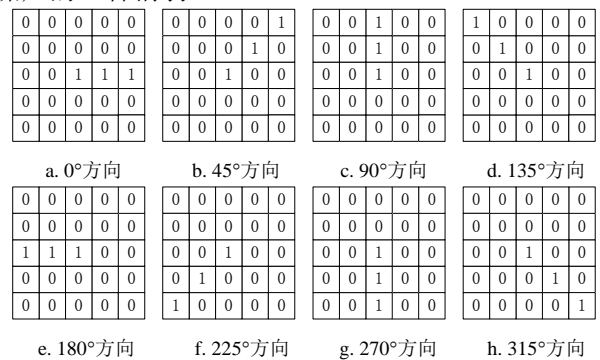


图1 边缘保持的滤波器

2.2 梯度图中高、低阈值的优化确定

图像阈值化是图像分割中常用的一种方法,该方法一般认为分割得到的目标和背景应该有尽可能大的差异。图像阈值化研究方法利用类间最大交叉熵获得目标和背景之间的阈值分割图像,可以得到很好的梯度图像效果。

信息熵-信息量表示一个信源所携带的信息的多少,它是基于信息整体的统计特性从平均意义上表征信源的总体信息测度。对于某一特定的信源,其信息是一个确定的数值^[7]。设一个信源可用函数为 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_M\}$,则信息熵为:

$$H(S) = E \left[\log_2 \frac{1}{P(s_i)} \right] = - \sum_{i=1}^N P(s_i) \log_2 P(s_i) \quad (2)$$

若有两个概率分布:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$$

$$B = \{b_1, b_2, \dots, b_N\}$$

交叉熵度量它们之间的信息量差异^[5],其对称形式对称交叉熵CE(cross entropy)为:

$$CE(A:B) = \sum_{i=1}^N a_i \log_2 \frac{a_i}{b_i} + \sum_{i=1}^N b_i \log_2 \frac{b_i}{a_i} \quad (3)$$

将图像中的像素分为目标(a)和背景(b)两类像

素,并假设图像服从正态分布,目标和背景像素灰度的条件分布服从正态分布:

$$p(s/i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left\{-\frac{(s-\mu_i(t))^2}{2\sigma_i^2(t)}\right\} \quad i=o,b \quad (4)$$

类内均方差估计、目标类和背景类的先验概率、类内均值都可以通过直方图估计出来。由贝叶斯后验概率公式可以求出后验概率:

$$p(i/s) = P_i p(s/i) / \sum_{i=o,b} P_i p(s/i) \quad (5)$$

利用类间交叉熵度量目标和背景间的差异,并依据贝叶斯理论,用原始图像中各像素点 s 到目标和背景两类区域的两个后验概率 $p(o|s)$ 和 $p(b|s)$ 之间的交叉熵的平均值表示类间差异性,然后迭代获取像素点到目标和背景不同区域的最大交叉熵求取最优阈值。

单个像素基于后验概率的类间交叉熵为:

$$\begin{aligned} CEP(o,b:s) = & \{[1+p(o|s)]\log_2 \frac{1+p(o|s)}{1+p(b|s)} + \\ & [1+p(b|s)]\log_2 \frac{1+p(b|s)}{1+p(o|s)}\} / 3 \end{aligned} \quad (6)$$

由式(6)可以推导出整幅图像的类间交叉熵为:

$$\begin{aligned} CE(o:b) = & \sum_{s \in o} \frac{p(s)}{P_o} CEP(o,b:s) + \\ & \sum_{s \in b} \frac{p(s)}{P_b} CEP(o,b:s) \end{aligned} \quad (7)$$

最后穷举搜索整幅图像获取类间最大交叉熵的最优阈值 T^* 。

3 算法实现及结果评价和分析

本文算法首先使用自适应滤波器对图像进行平滑,计算方向导数和梯度幅值,最后利用类间最大信息交叉熵获取高、低阈值对图像进行分割。具体算法步骤如下:(1)输入原图像 I 。(2)使用自适应滤波器对原图像 I 进行滤波,得到平滑后的图像 M (迭代两次)。若当前点在平滑区,则均方差较小,邻域内像素均值与当前像素点的灰度值接近;若当前点在边缘上,邻域内像素均值与当前像素点的灰度值接近,均方差亦较小;若当前点邻域内有噪声,则邻域内像素均值和当前像素灰度值相差较大,均方差较大。找出方差最小的模板,计算出均值赋给当前像素点。由于不存在过渡平滑现象,所以在平滑后的图像中不会存在缓变的像素点。(3)求得图像 M 的方向导数和梯度幅度,并对梯度幅值进行非极大值抑制。(4)由最大类间交叉熵优化算法和贝叶斯判断

理论迭代获取高、低阈值。(5)基于高、低阈值,利用函数递归搜索图像边界起始点,根据边界起始点搜索结果从一个像素点开始搜索,搜索以该像素点为边界起点的一条边界的所有边界点。(6)将搜索到的边界点的灰度值设置为255,其他像素点灰度值为0,输出最后结果。

3.1 边界扫描结果主观评价分析

从图2的Lena实验效果图可以看出,传统的坎尼算法得到的效果图(图2b)所标示的B、C、F处没有很好地闭合,且A、B、D和E处原本该有双边缘,也没有检测出来;在文献[9]的效果图(图2c)中,对图2b中的B、C、E和F处有了很大的改善,但是图2b中的D和B处的双边缘仍然没有被检测出来,且(帽子)C处的复杂纹理信息也没有被检测出来;文献[10]检测出来的效果图边缘明显不闭合,且边缘不是单像素边缘;文献[11]是基于形态学的边缘检测,没有对边缘进行非极大值抑制,所以检测到的边缘不是单像素边缘。在本文算法的检测结果中,边缘不仅连续,是单像素边缘,且图2b中所标记之处都得到了明显的改善,更能体现边缘细节信息。

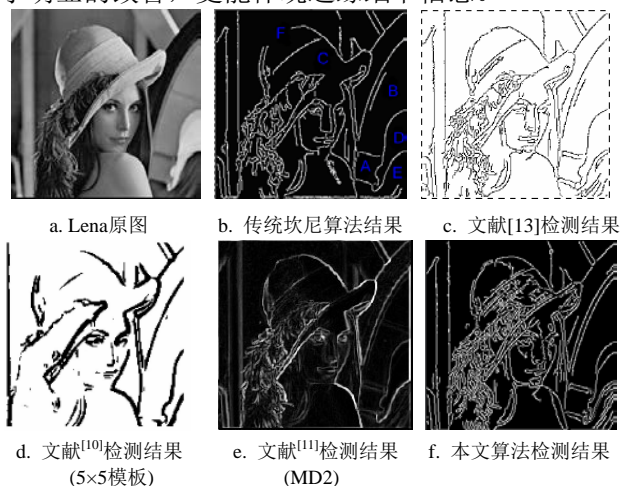


图2 Lena图实验效果

对Lena图像增加强噪声后再使用传统Canny算法、改进算法^[9]、文献[10]算法和本文算法等4种算法进行试验。(1)传统算法的效果图(图3b)虽然对噪声比较敏感,但还是可以隐约地看出目标的轮廓;(2)文献[9]的效果图(图3c)很难分辨出目标和背景,检测效果没有传统算法的效果好;(3)文献[10]的检测效果(图3d)抑制噪声效果非常好,但边缘闭合问题仍然没有得到解决;(4)本文算法不仅在抑制噪声方面有了很大的改善,检测出来的目标轮廓也很清晰,效果图如图3e所示。

使用传统Canny算法、改进算法和本文算法对

cameraman图像进行实验。摄像者实验效果图如图4所示。从图4可以看出:(1)传统的算法对噪声比较敏感,不仅在摄像者的衣服上检测出了噪声,天空和建筑物中也检测出了噪声;(2)文献[9]的检测效果图很好地抑制了噪声,但摄像者的手和背景中的建筑物的轮廓没有很好地闭合;(3)本文算法的效果图(图4d)虽然比图4c噪声明显些,但是目标的轮廓清晰可见,而且闭合也很好;(4)图4c中没有闭合的摄像者的手和建筑物的轮廓都已经很好地改善。

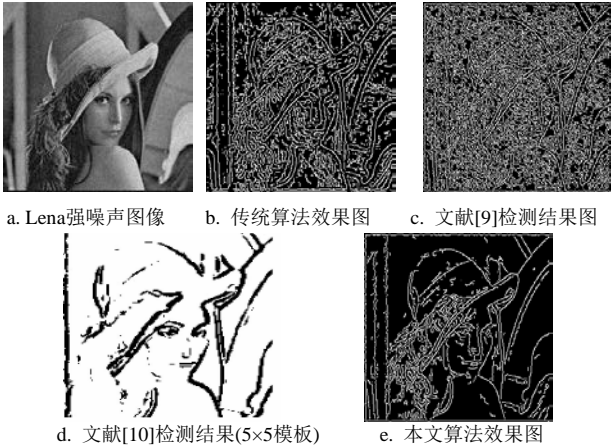


图3 Lena强噪声图像实验结果

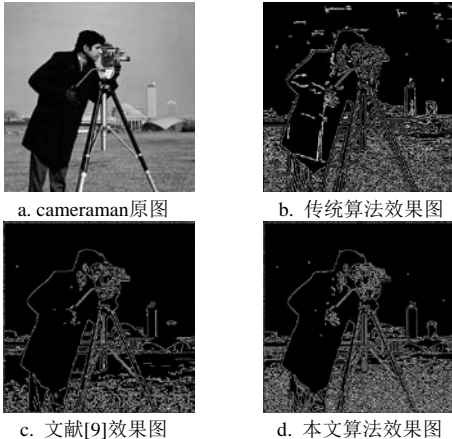


图4 摄像者实验效果图

3.2 边界扫描结果客观评价分析

(1)文献[12]介绍了一种基于边缘局部相关性的评价图像边缘检测效果的方法:检测到的边缘点数用 A 表示,边缘图中8连通的数目用 B 表示,则 B/A 的大小反映了边缘线性连接程度,而边缘的线性连接程度对总体的边缘评价的影响体现在错检和漏检中,当边缘连接程度很差时,错检、漏检就很多;反之,边缘连接程度越高,错检、漏检越少,提取的边缘效果越好。数值 B/A 越小,线性连接程度越好,提取的边缘效果越好。使用图5给出的4幅图像做试验,得到表1~3的实验数据。

(2)文献[5]利用梯度幅度直方图和类内方差最

小自适应的原则获取高、低阈值,取得了较好的检测效果。表4中的数据是本文算法和文献[5]及传统坎尼算法不同参数的结果比较。图6a和图7a分别是原图,图6b和图7b是采用传统的坎尼算子自适应地确定阈值所检测的结果,采用的高、低阈值比例系数为0.7和0.4。为了说明采用传统坎尼算子时,高、低阈值比例系数的波动会对检测有一定的影响,特采用一组数值为0.8和0.5的高、低比例系数对两幅图像的原图实施传统的坎尼边缘检测,图6c和图7c即是检测结果。图6d和图7d是用文献[5]方法检测的结果,图6e和图7e是用本文方法的检测结果。

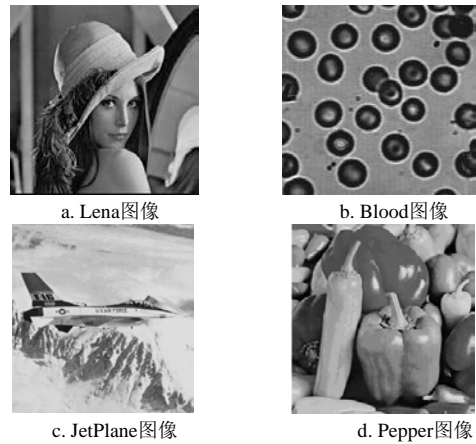


图5 实验用图

表1 传统坎尼算法的实验数据

图片	边缘点数A	8连通数B	4连通数C	B/A
Lena	6 099	123	661	0.020 2
Blood	5 798	87	618	0.015 0
Jetplane	47 430	1 132	5 951	0.023 9
Pepper	5 457	169	753	0.031 0

表2 文献[9]的实验数据

图片	边缘点数A	8连通数B	4连通数C	B/A
Lena	9 490	166	2 470	0.017 4
Blood	8 951	157	1 494	0.175 0
Jetplane	34 442	814	8 433	0.023 9
Pepper	9 215	194	2 338	0.023 6

表3 本文算法的实验数据

图片	边缘点数A	8连通数B	4连通数C	B/A
Lena	9 498	151	998	0.015 9
Blood	9 532	134	1 051	0.014 0
Jetplane	27 912	556	2 722	0.019 9
Pepper	13 624	228	1 036	0.016 7

文献[5]改进算法、传统坎尼算法及本文算法所计算的双阈值结果如表4所示。经对比发现,采用相同的高、低阈值比例系数,针对不同的图像由计算机算出的高、低阈值是不同的,如图6b和图7b所示;同一幅图像采用不同的高、低阈值比例系数,实验结果是不同的,如图6b和图6c所示。说明人为设定

的高、低阈值比例系数比靠人工试凑的方法有一定的灵活性。图6b的检测效果虽然丢失了一些细节，但整体检测效果很好；图7b的检测效果很好，但是在图像中女孩的肩膀处增添了一些冗余(噪声)，说明对于不同的图像，采用一致的比例系数是不科学的，会影响检测效果。图6c和图7c的效果图明显漏掉了一些细节信息。图6e和图7e、图6d和图7d，虽然都用算法自适应获取阈值，不需要人为设定阈值，但本文算法的效果图(图6e和图7e)具有更好的检测结果。

表4 不同算法所计算的双阈值结果

图像	低阈值 比例系数	高阈值 比例系数	低阈值	高阈值
图像6b	0.4	0.7	6	13
图像6c	0.5	0.8	11	22
图像6d	无	无	6	12
图像6e	无	无	5	12
图像7b	0.4	0.7	5	11
图像7c	0.5	0.8	11	21
图像7d	无	无	5	9
图像7e	无	无	5	8

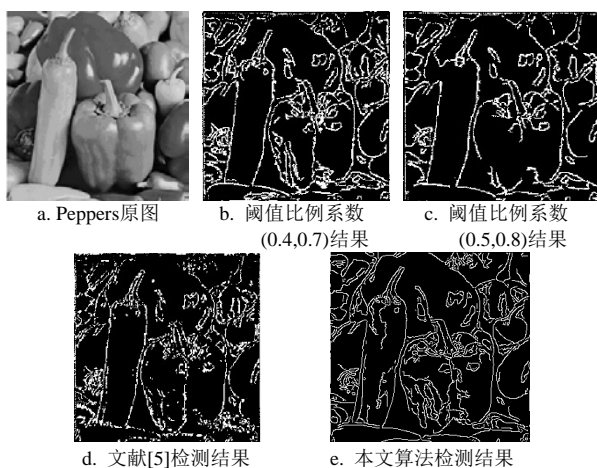


图6 Peppers图像实验结果

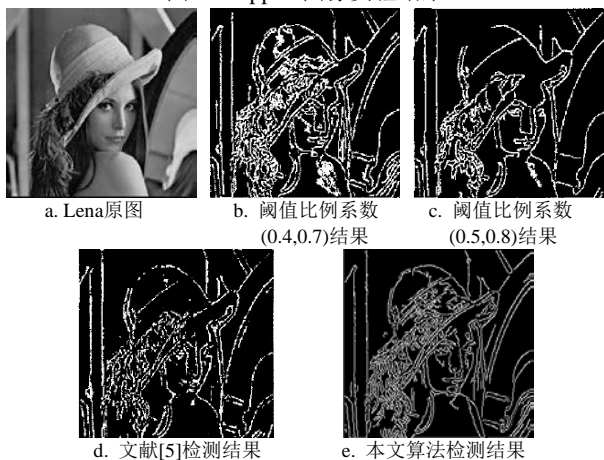


图7 Lena图像实验结果

4 总结

当采用传统的坎尼算法，使用高斯滤波器对图像进行平滑时，由于高斯函数自身的缺陷，平滑后的图像会丢失一些细节信息，影响边缘连接性和边界闭合；高、低阈值比例系数的人为设定具有一定的局限性，不能满足不同图像自适应调节的作用。本文通过采用当前像素点周围不同方向的自适应滤波器代替原有的高斯函数，能够根据图像内容自动地选择合适的滤波器进行滤波，利用信息交叉熵等人工智能理论和技术获取图像的高、低阈值。从对实验效果图和客观数据的分析可知，文中的边界扫描算法能够根据图像内容自动确定适当的滤波器和高、低阈值，不仅改善了一般算法(如坎尼算法)边界闭合方面的缺陷，而且还能很好地检测出边界细节信息。

参考文献

- [1] PREWITT J M S. Object enhancement and extraction[M]. New York: Academic Press, 1970
- [2] LYVERS E P, MITCHELL O R. Precision edge contrast and orientation estimation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and machine Intelligence, 1988, 10(6): 927-937.
- [3] MARR D, HILDRETH E. Theory of edge detection[J]. Proceedings of the Royal Society of London, (Series B: Biological Sciences), 1980, 207(1167): 187-217.
- [4] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679-698.
- [5] 李牧, 闫继红, 李戈, 等. 自适应Canny算子边缘检测技术[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(9): 1002-1007. LI Mu, YAN Ji-hong, LI Ge, et al. Self-adaptive canny operator edge detection technique[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(9): 1002-1007.
- [6] 章毓晋. 图像工程(中册)——图像分析[M]. (第二版). 北京: 清华大学出版社, 2006: 83-84. ZHANG Yu-jin. Image engineering(II)——Image analysis [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 83-84.
- [7] 傅祖芸. 信息论——基础理论与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001. FU Zu-yun. Theory of Information——Basic theory and application[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2001.
- [8] 章毓晋. 图像分割[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. ZHANG Yu-jin. Image segmentation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [9] 王光勇. 图像边缘检测方法研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2008. WANG Guang-yong. Study of image edge detection algorithm[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2008.

(下转第434页)

- 北京: 机械工业出版社, 2006.
- HORSTMANN C S, CORNELL G. Core of Java 2 (Volume 2): Advanced features[M]. 7th ed. Translated by CHEN Hao-peng, WANG Hao, YAO Jian-ping, et al. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [4] ALLEN H. Taming Java threads[M]. New York: [s.n.], 2000.
- [5] DARBY C, GRIFFIN J, PASCAL de HAAN, 等. Java网络编程指南[M]. 邱仲潘译. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- DARBY C, GRIFFIN J, PASCAL de HAAN, et al. Guide of Java networking[M]. Translated by QIU Zhong-pan. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2002.
- [6] 柴平渲, 龚向阳, 程时端. 分布式入侵检测技术的研究[J]. 北京邮电大学学报, 2002, 25(2): 58-62.
- CHAI Ping-xuan, GONG Xiang-yang, CHENG Shi-duan. Research on distributed intrusion detection[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2002, 25(2): 58-62
- [7] 喻志虎, 邹 华, 杨放春. Parlay应用服务器的软件容错研究与设计[J]. 北京邮电大学学报, 2004, 27(增刊): 12-15
- YU Zhi-hu, ZOU Hua, YANG Fang-chun. The study and design on software fault-tolerance for parlay applica ti on server[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2004, 27(An Extra Edition): 12-15.
- [8] VENNERS B. Inside the Java virtual machine[M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Companies, 2003.
- [9] GAY S H, CORNELL G. Core Java 2 volume II advanced features[M]. 6th ed. New York: Prentice Hall PTR, 2006.
- [10] ECKEL B. Thinking in Java[M]. 3rd ed. New York: Prentice Hall PTR, 2005.

编辑 黄 莘

(上接第406页)

- [10] 才 辉, 张光新, 张 浩, 等. 一种新的基于多信息测度融合的边缘检测方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(10): 1671- 1675.
- CAI Hui, ZHANG Guang-xin, ZHANG Hao, et al. Novel edge detection method based on multiple information measures fusion[J]. 2008, 42(10): 1671-1675.
- [11] 傅茂沼. 基于形态灰度边缘检测算法的一种改进[J]. 电子科技大学学报, 2005, 34(2): 206-209.
- FU Mao-ming. Enhancement in detection operator extended from traditional image edge to morphology edge[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2005, 34(2): 206-209.
- [12] 林 卉, 赵长胜, 舒 宁. 一种新的基于连通成分的边缘评价方法[J]. 现代测绘, 2003, 26(2): 8-11.
- LIN Hui, ZHAO Chang-sheng, SHU Ning. A new edge evaluation method based on connection component[J]. Modern Surveying and Mapping, 2003, 26(2): 8-11.
- [13] WANG Xun, JIN Jian-qi. A edge detection algorithm based on improved canny operator[C]//Seventh International Conference on Intelligent Systems Designs and Applications. [S.l.]: [s.n.], 2007: 623-628.

编辑 蒋 晓

(上接第419页)

- [6] CHONG L, KUI W. Sensor localization with ring overlapping based on comparison of received signal strength indicator[C]//Proceedings of The 1st IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS04). Florida, USA: IEEE, 2004.
- [7] LAZOS L, POOVENDRAN R. Serloc: Robust localization for wireless sensor networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2005, 1(1): 73-100.
- [8] LAZOS L, POOVENDRAN R. HiRLoc: High-resolution robust localization for wireless sensor networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(2): 233-246.
- [9] VIVEKANANDAN V, WONG V. Concentric anchor beacon localization algorithm for wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56: 2733-2744.
- [10] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]//Proceeding of Hawaii International Conference on System Sciences. [S.l.]: IEEE, 2000: 10-19.
- [11] 汪 扬. 无线传感器网络定位技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.
- WANG Yang. A research on the localization technology of wireless sensor networks[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007.

编辑 漆 蓉