

图像局部方向均值边缘检测算法

郑秀清^{1,2}, 何 坤¹, 周激流¹

(1. 四川大学计算机科学学院 成都 610065; 2. 四川师范大学计算机科学学院 成都 610066)

【摘要】根据图像边缘形成的光学原理, 将图像边缘分为斜坡形边缘和三角形边缘, 提出了一种新的基于方向均值的图像边缘检测方法。该方法以图像像素点为中心, 沿不同方向将邻域内的像素分割成两个半圆, 分别计算出半圆内像素的样本均值及其差值, 再根据均值差值最大值和最小值的方向与两种不同边缘之间的关系, 设计边缘幅度响应函数, 判断边缘类型, 计算边缘幅度响应值和方向, 结合漏检概率设计了边缘检测评价函数, 并利用评价函数分析平滑尺寸与邻域半径之间的关系。实验结果表明, 本文算法具有较好的检测精度, 在一定程度上抑制了噪声对边缘检测的影响。

关键词 边缘方向; 边缘评价; 边缘幅度响应; 边缘类型; 方向均值

中图分类号 TP751

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.05.024

Novel Image Edge Detection Algorithm Based on Local Orientation Average

ZHENG Xiu-qing^{1,2}, HE Kun¹, and ZHOU Ji-liu¹

(1. School of Computer Science, Sichuan University Chengdu 610065; 2. College of Computer Science, Sichuan Normal University Chengdu 610066)

Abstract According to the principle of the image edge formation, the image edges consist of the triangle edge and the ramp edge. Based on orientation average, this paper proposes a new image edge detection algorithm which segments the neighborhood of the center pixel into two semicircles along different direction and then calculates the difference of the mean values of the two semicircles. With the directions of maximum difference and the minimum difference, an edge magnitude response function is designed to judge the edge type of the pixel, the triangle edge or the ramp edge. For inhibiting the effects of the noise, this method adopts Gauss-smooth pre-filter which inhibits the noise in images effectively. The edge-detection fitness function combining omission ratio is designed. By utilizing the fitness function, the algorithm analyzes the relationship of the size of the smoothing filter and the radius of the neighborhood of the center pixel. Experimental results show that the algorithm has good precision, and to a certain extent, inhibits the effects of noise on edge detection.

Key words edge direction; edge evaluation; edge magnitude response function; edge type; orientation average

从图像边缘形成的光学机理来看, 边缘表现为灰度突变^[1]。根据该特性而提出的边缘检测方法很多, 总结起来归为3类。1) 基于微分的边缘检测方法, 如Prewitt方法、Laplace方法等^[2-5], 该类方法运算简单, 对阶跃边缘能够准确定位, 但对其他边缘定位存在偏移^[6], 易受噪声影响。为克服噪声对边缘检测的影响, 常常先采用Gauss函数对图像进行平滑处理, 但平滑处理在降低噪声的同时, 也模糊了边缘, 造成边缘定位不准确^[7-10]。2) 基于像素灰度分布的边缘检测方法^[11-13]。该类算法存在两个不足: 一是根据邻域像素分析概率密度函数, 由于邻域像

素个数是有限的, 利用有限样本点估计的概率密度误差较大; 二是图像一般均受到噪声的污染, 并没有考虑噪声对密度估计的影响。3) 基于像素聚类的边缘检测方法。最早通过像素聚类的边缘检测是SUSAN算子, 该算法运用中心像素与邻域像素之间的关系计算USAN值作为边缘点的度量^[14], 对方波边缘定位准确; 对灰度图像运用设定阈值计算USAN值, 不同的阈值计算的USAN值不同, 得到不同的检测结果。

本文根据图像边缘形成的光学机理, 将边缘分为阶跃、斜坡、方波和三角形边缘类型, 为了克服

噪声对边缘检测的影响，常对图像进行平滑处理，平滑处理将阶跃转化为斜坡边缘；方波转化为三角形边缘。本文通过分析斜坡边缘和三角形边缘与左右邻域均值和边缘像素之间的关系，设计了边缘点的幅度响应函数，提出了图像局部方向均值的边缘检测方法。

1 边缘分类及其特性

边缘在图像中表现为图像灰度的急剧变化。引起图像灰度不连续性的物理过程可能是几何方面的，也可能是光学方面的。几何方面的，如深度的不连续性，表面取向，颜色和纹理的不同；而光学方面的，如表面反射，非目标物体产生的阴影以及内部倒影等。如图1给出了4类边缘图像。

斜坡边缘两侧邻域像素的均值不同，且图像像素值位于两侧均值之间。设图1b所示的斜坡边缘的数学模型为：

$$f(x) = \begin{cases} -0.5 & x < -\frac{1}{2k} \\ kx & -\frac{1}{2k} \leq x \leq \frac{1}{2k} \\ 0.5 & x > \frac{1}{2k} \end{cases} \quad (1)$$

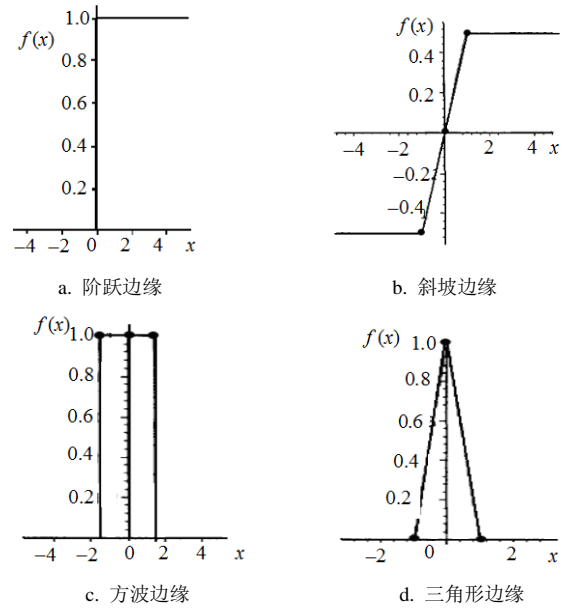


图1 边缘类型

以任意点 x_0 为中心， R 为半径的左右两侧邻域均值分别为 $E^1(x_0)$ 、 $E^2(x_0)$ 。边缘点 x_0 的值 $f(x_0)$ 与左右两侧邻域均值 $E^1(x_0)$ 、 $E^2(x_0)$ 之间满足：

$$\min\{E^1(x_0), E^2(x_0)\} < f(x_0) < \max\{E^1(x_0), E^2(x_0)\} \quad (2)$$

左右两侧邻域均值差的绝对值为：

$$\Delta E(x_0) = |E^1(x_0) - E^2(x_0)| = \begin{cases} 0 & x_0 < -\frac{1}{2k} - R \text{ 或 } x_0 > \frac{1}{2k} + R \\ \frac{k}{2R} \left(R + \frac{1}{2k} - |x_0| \right)^2 & -\frac{1}{2k} - R \leq x_0 \leq -\frac{1}{2k} \text{ 或 } \frac{1}{2k} \leq x_0 < \frac{1}{2k} + R \\ \frac{k}{2R} \left[\left(R + \frac{1}{2k} - |x_0| \right)^2 - 2 \left(\frac{kx_0 + 0.5}{k} \right)^2 \right] & -\frac{1}{2k} < x_0 \leq -\frac{1}{2k} + R \text{ 或 } \frac{1}{2k} - R \leq x_0 < \frac{1}{2k} \\ kR & -\frac{1}{2k} + R < x_0 < \frac{1}{2k} - R \end{cases} \quad (3)$$

传统边缘检测是在局部区域上针对“像素点”的运算，比较点 x_0 邻域(加权)均值的差值 $\Delta E(x_0)$ ，如果差值较大， x_0 点位于边缘上。从式(2)可知：当半径 $R < 1/2k$ 时，使得 $\Delta E(x_0)$ 取得最大(为 kR)，检测为边缘点 x_0 满足：

$$-1/2k + R \leq x_0 \leq 1/2k - R \quad (4)$$

此时，传统算法检测出的边缘大于1个像素，当半径 $R \geq 1/2k$ 时，才能对边缘进行准确定位。对斜坡边缘定位时，邻域半径 R 越大定位越准确。对图像而言，邻域半径 R 取值较大，只能检测出大尺度的边缘，而忽略小尺度边缘。本文运用邻域均值的差值结合中心像素 $f(x_0)$ 与左右两侧邻域均值之间的关系，设计斜坡边缘的幅度响应为：

$$\text{edge}(x_0) = \begin{cases} \frac{\min\{|f(x_0) - E^1(x_0)|, |f(x_0) - E^2(x_0)|\}}{\max\{|f(x_0) - E^1(x_0)|, |f(x_0) - E^2(x_0)|\}} \Delta E(x_0) & \max\{|f(x_0) - E^1(x_0)|, |f(x_0) - E^2(x_0)|\} \neq 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

三角形边缘两侧邻域均值几乎相同, 边缘上的像素值大于或小于两侧均值。设图1d所示的三角形边缘的数学模型为:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x < -\frac{1}{k} \\ kx+1 & -\frac{1}{k} \leq x < 0 \\ -kx+1 & 0 \leq x < \frac{1}{k} \\ 0 & x \geq \frac{1}{k} \end{cases} \quad (6)$$

以该模型上任意点 x_0 为中心, R 为半径的左右两侧邻域均值分别为 $E^1(x_0)$ 、 $E^2(x_0)$ 。边缘点 x_0 的值 $f(x_0)$ 与左右两侧邻域均值 $E^1(x_0)$ 、 $E^2(x_0)$ 间满足:

$$\begin{cases} f(x_0) > \max\{E^1(x_0), E^2(x_0)\} \text{ 或 } \\ f(x_0) < \min\{E^1(x_0), E^2(x_0)\} \\ \min\{E^1(x_0), E^2(x_0)\} \leq f(x_0) \leq \\ \max\{E^1(x_0), E^2(x_0)\} \end{cases} \quad \begin{matrix} -R < x_0 < R \\ \text{其他} \end{matrix} \quad (7)$$

左右两侧邻域均值差的绝对值为:

$$\Delta E(x_0) = |E^1(x_0) - E^2(x_0)| = \begin{cases} 0 & x_0 < -\frac{1}{k} - R \text{ 或 } x_0 > \frac{1}{k} + R \\ \frac{k}{2R} \left(R + \frac{1}{k} - |x_0| \right)^2 & -\frac{1}{k} - R \leq x_0 \leq -\frac{1}{k} \text{ 或 } \frac{1}{k} \leq x_0 < \frac{1}{k} + R \\ \frac{k}{2R} \left[\left(R + \frac{1}{k} - |x_0| \right)^2 - 2 \left(\frac{kx_0 + 1}{k} \right)^2 \right] & -\frac{1}{k} < x_0 \leq -\frac{1}{k} + R \text{ 或 } \frac{1}{k} - R \leq x_0 < \frac{1}{k} \\ kR & -\frac{1}{k} + R < x_0 < -R \text{ 或 } R \leq x_0 < \frac{1}{k} - R \\ -\frac{k}{R} x^2 + 2k|x| & -R \leq x_0 < R \end{cases} \quad (8)$$

如果点 x_0 邻域(加权)均值的差值 $\Delta E(x_0)$ 较大, x_0 点位于边缘上。当 $\Delta E(x_0)$ 取得最大(为 kR)时, x_0 满足:

$$-1/k + R < x_0 < -R \text{ 或 } R \leq x_0 < 1/k - R \quad (9)$$

但是 x_0 不是三角形边缘的真正边缘点。三角形边缘的真正边缘点满足:

$$\begin{cases} f(x_0) > \max\{E^1(x_0), E^2(x_0)\} \text{ 或 } f(x_0) < \min\{E^1(x_0), E^2(x_0)\} \\ \Delta E(x_0) = 0 \\ \min\{E^1(x_0), E^2(x_0)\} > 0 \end{cases} \quad (10)$$

本文根据三角形边缘的条件设计其边缘的幅度响应为:

$$\text{edge}(x_0) = \begin{cases} \frac{\min\{|f(x_0) - E^1(x_0)|, |f(x_0) - E^2(x_0)|\}}{\max\{|f(x_0) - E^1(x_0)|, |f(x_0) - E^2(x_0)|\}} & f(x_0) > \max\{E^1(x_0), E^2(x_0)\} \text{ 或 } \\ & f(x_0) < \min\{E^1(x_0), E^2(x_0)\} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

2 方向均值

本文根据斜坡边缘和三角形边缘的特性对图像的像素点进行分类, 设有图像 $f(x, y)$, 取以 (i, j) 像素点为中心、 R 为半径的圆形邻域, 并沿 θ 方向将圆形邻域内的像素点分割成两个半圆, 分别标记为 D^1 区(图2中的实心圆表示)和 D^2 区(图2中的空心圆表示)。

本文根据图像像素邻域之间的空间关系^[15], 以高斯函数作为像素的权重系数 $p(x, y)$, 用统计理论分别计算 D^1 区和 D^2 区内像素样本加权均值^[16]为:

$$E_{R,\theta}^k(i, j) = \sum_{(x,y) \in D^k} f(x, y) p(x, y) \quad k=1,2 \quad (12)$$

其中:

$$p(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x-i)^2 + (y-j)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (13)$$

两个半圆内像素样本加权均值差为:

$$\Delta E_{R,\theta}(i, j) = |E_{R,\theta}^1(i, j) - E_{R,\theta}^2(i, j)| \quad (14)$$

为了保证圆形邻域内各个可能的方向均被分析, 本文选择相邻方向之差为 $\Delta\theta$, 将以像素点 (i, j) 为中心的圆形邻域内像素按不同的 θ_i 方向分割成两类像素样本:

$$\theta_k = k\Delta\theta \quad k=0,1,2,\dots,N-1 \quad (15)$$

计算各个方向的两个半圆内像素样本加权均值差 $\Delta E_{R,\theta_k}(i,j)$, (i,j) 半圆内均值差值最大和最小的方向分别为 $\alpha(i,j)$ 和 $\beta(i,j)$, 有:

$$\begin{cases} \alpha(i,j) = \max_{\theta_k} \{\Delta E_{R,\theta_k}(i,j)\} \\ \beta(i,j) = \min_{\theta_k} \{\Delta E_{R,\theta_k}(i,j)\} \end{cases} \quad (16)$$

根据最大方向的邻域均值和中心像素之间的关系, 判断中心像素是否位于斜坡边缘上。如果是, 运用式(5)计算边缘的幅度响应并将最大方向 $\alpha(i,j)$ 作为边缘方向; 反之, 根据最小方向的邻域均值和中心像素之间的关系, 判断中心像素是否位于三角形边缘上, 如果是, 运用式(12)计算边缘的幅度响应并将最小方向 $\beta(i,j)$ 作为边缘方向^[17]。

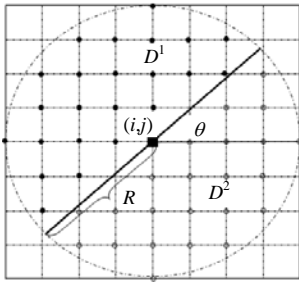


图2 像素邻域

3 边缘细化及连接

本文边缘幅度响应与圆形邻域有关, 检测出的边缘宽度与邻域半径有关。半径较大, 则选取邻域较大, 检测出大尺度的边缘, 对噪声和纹理的抑制能力较强; 半径较小, 检测出小尺度的边缘, 对噪声和纹理的抑制能力较弱^[18]。为了抑制噪声对边缘检测的影响, 对图3所示的阶跃边缘进行高斯平滑处理, 得到斜坡边缘, 运用本文方法分析的边缘幅度响应如图4所示, 垂直于边缘方向的邻域像素(图4中白色圈内过粗直线的像素)的幅度响应分布如图5所示。从图5可知, 边缘两侧的像素幅度响应分布为抛物线形状^[19]。

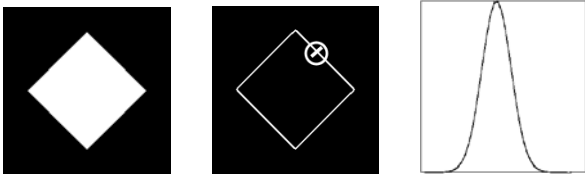


图3 原始图像

图4 边缘幅度

图5 局部幅度分布

本文根据上述分布特性进行边缘细化: 过像素点 (x_0, y_0) 且垂直该点边缘方向 ϑ 的 $2R+1$ 邻域像素的幅度响应拟合抛物线函数为:

$$\rho(x_0, y_0) = ad^2(x, y) + bd(x, y) + c \quad (17)$$

其中:

$$d(x, y) = (x - x_0) \sin \vartheta + (y - y_0) \cos \vartheta \quad (18)$$

当抛物线的对称轴 $|\sigma| \leq 0.5$ 时, 像素点 (x_0, y_0) 位于边缘上, 否则不在边缘上。运用抛物线函数对边缘进行细化得到宽度为一个像素点的边缘图像。

4 实验结果及边缘评价

4.1 边缘评价

为了抑制噪声对边缘检测的影响, 常常对图像进行预处理, 本文利用方差为 σ_1 的高斯函数对图像进行去噪处理; 利用方差为 σ_2 的高斯函数确定邻域的半径大小; 利用边缘先验信息, 结合漏检概率 p_1 和误检概率 p_2 设计边缘检测置信度 α :

$$\begin{cases} p_1 = 1 - \frac{\text{Number}(A \cap B)}{\text{Number}(B)} \\ p_2 = 1 - \frac{\text{Number}(A \cap B)}{\text{Number}(A)} \\ \alpha = p_1 + p_2 \end{cases} \quad (19)$$

式中, $\text{Number}(\cdot)$ 表示运用 (\cdot) 方法检测到的边缘像素点个数。

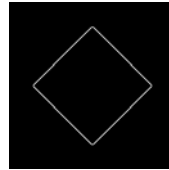


图6 Canny算子

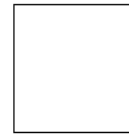


图7 方波边缘

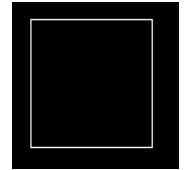


图8 SUSAN算子

对于图3所示的阶跃型边缘, 采用Canny算子检测的边缘作为标准边缘, 如图6所示。对于图7所示的方波边缘, 采用SUSAN算子检测的边缘作为标准边缘, 如图8所示。运用评价函数分析的平滑窗口尺寸与圆形邻域尺寸之间的关系, 如表1所示。从表1可知, 当平滑窗口尺寸与圆形邻域尺寸之比等于0.5时, 其漏检概率和误检概率最小。

表1 边缘评价与平滑窗口尺寸和邻域尺寸之比的关系

σ_1/σ_2	阶跃边缘		三角形边缘	
	漏检概率	误检概率	漏检概率	误检概率
2	0.015	0.25	0.01	0.08
1	0.01	0.1	0.008 7	0.067
1/2	0.005	0.002 5	0.003 4	0.002 1
1/3	0.03	0.008	0.045	0.008 7
1/4	0.03	0.01	0.08	0.01

4.2 方向个数对边缘检测的影响

为了分析离散方向个数对边缘检测结果的影响, 对图9a所示的“Lena”图像选用高斯函数的方差 $\sigma_2 = 1$ 进行边缘检测, 检测结果如图9所示。从图

9可以看出, 当方向个数较小时, 检测出的边缘光滑性较差, 且存在漏检, 随着方向个数增大, 检测出的边缘光滑性较好, 但是系统运算时间增大, 方向数为8、16时检测出的边缘光滑性从视觉上变化。本文选择方向数为8。Canny算子^[20]检测的结果如图9f所示。

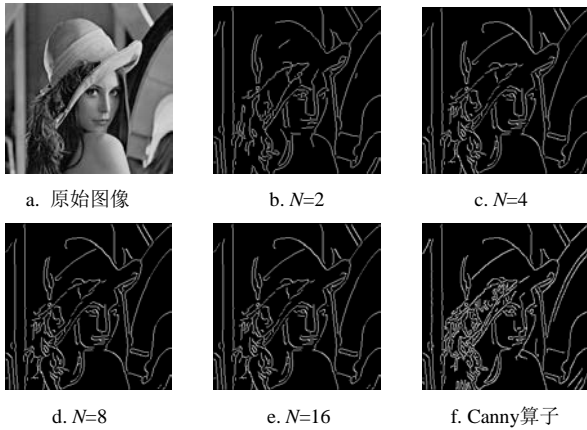


图9 方向个数对边缘检测的影响

4.3 与传统算法的对比

对图10a所示的“peppers”图像, 本文选用高斯函数, 方差 $\sigma_2 = 1$, 方向数为8进行边缘检测, 检测结果如图10b所示。Canny算子的检测结果如图10c所示。从图10中可以看出, 本文算法提取的边缘明显优于Canny算子, 视觉效果更加清晰, 也更能反映原图的信息。



图10 不同算法的检测效果

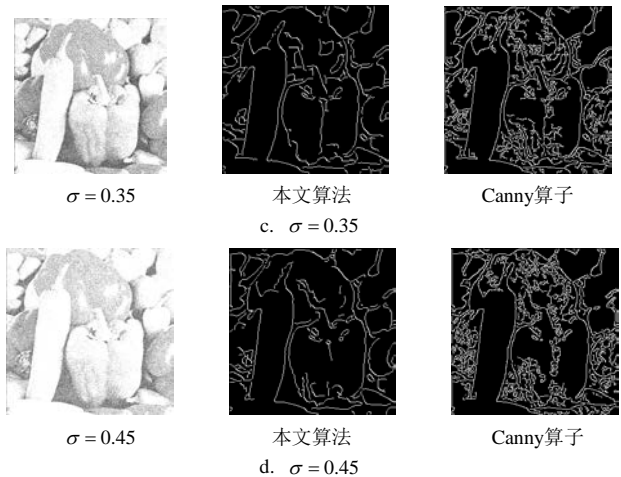
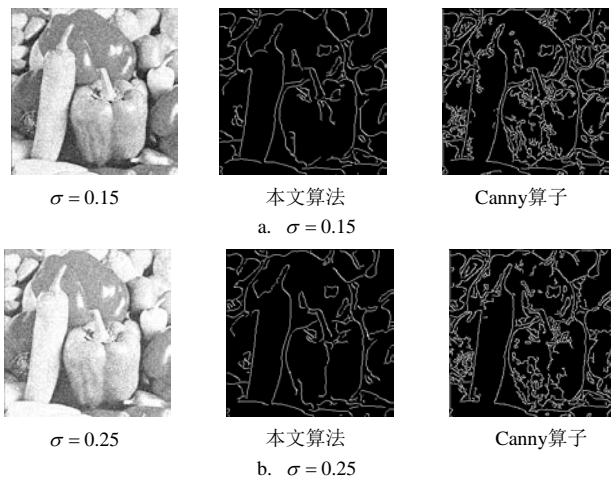


图11 噪声对算法的影响

对该图像分别加入高斯白噪声, 本文算法和Canny算子的检测结果如图11所示。从图11可以看出, 本文方法抑制噪声的能力明显优于Canny算子, 对噪声有良好的鲁棒性。

5 结论

本文根据图像边缘形成的光学机理, 将边缘进行分类。分析了斜坡边缘和三角形边缘左右邻域均值和边缘像素之间的关系, 设计了斜坡边缘和三角形边缘的幅度响应函数。以图像像素点为中心, 按不同方向将邻域像素分割成两个半圆, 计算出两个半圆内像素样本均值的差值, 以及均值差值最大和最小的方向, 根据最大和最小值方向的邻域均值和中心像素之间的关系, 判断该像素点的边缘类型; 分析像素点的边缘幅度响应和方向, 利用边缘幅度响应的分布规律进行细化, 并结合边缘的方向信息进行边缘连接; 运用边缘先验信息, 结合漏检概率和误检概率设计边缘检测评价函数, 运用评价函数讨论平滑尺寸与邻域半径之间的关系。实验结果表明, 本文算法能在一定程度上抑制噪声对边缘检测的影响。

参 考 文 献

[1] YI Sheng, LABATE D, EASLEY G R, et al. A shearlet approach to edge analysis and detection[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(5): 929-941.
 [2] 张虹, 杨平乐, 孔莉芳. 图像边缘提取技术的分析及优化[J]. 微计算机信息, 2007, 23(11): 710-732.
 ZHANG Hong, YANG Ping-lei, KONG Li-fang. The analyzing of algorithms for image edge detection[J]. Microcomputer Information, 2007, 23(11): 710-732.
 [3] 赵芳, 栾晓明, 孙越. 数字图像几种边缘检测算子检测比较分析[J]. 自动化技术与应用, 2009, 28(3): 68-72.
 ZHAO Fang, LUAN Xiao-ming, SUN Yue. Edge detection

- operators in digital image processing[J]. *Techniques of Automation and Applications*, 2009, 28(3): 68-72.
- [4] ZHANG Jun-ying. Edge detection in glass fragmentation images based on one order differential operator[C]//2010 Second International Conference on Hyperlink, Computer Engineering and Applications (ICCEA). [S.l.]: [s.n.], 2010, 2: 591-594.
- [5] AGAIAN S S, PANETTA K A, NERCESSIAN S C, et al. Derivatives with application to edge detection for imaging systems[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2010, 40(2): 371-382.
- [6] 杜海顺, 汪凤泉. 一种新的图像混合自适应滤波器[J]. *计算机应用研究*, 2009, 26(3): 1195-1120.
DU Hai-shun, WANG Feng-quan. New adaptive hybrid filter for image de-noising[J]. *Application Research of Computers*, 2009, 26(3): 1195-1120.
- [7] CHEN Xiang-tao, CHEN Yu-juan. An improved edge detection in noisy image using fuzzy enhancement[C]//2010 International Conference on Hyperlink, Biomedical Engineering and Computer Science. [S.l.]: [s.n.], 2010: 1-4.
- [8] 徐艳蕾, 赵继印, 焦玉斌. 噪声图像边缘检测方法的研究[J]. *计算机应用研究*, 2009, 26(1): 387-389.
XU Yan-lei, ZHAO Ji-yin, JIAO Yu-bin. Study of edge detection method for noisy image[J]. *Application Research of Computers*, 2009, 26(1): 387-389.
- [9] SUN Xi-kui, SUN Gen-yun. A new noise-resistant algorithm for edge detection[C]//2010 Second International Workshop on Education Technology and Computer Science (ETCS). [S.l.]: [s.n.], 2010: 47-50.
- [10] JIANG Li-xia, ZHOU Wen-jun, WANG Yu. Study on improved algorithm for image edge detection[C]//2010 the 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE). [S.l.]: [s.n.], 2010, 4: 476-479
- [11] YE Zhao-ming, HAN Xiu-lan, YUN Ke-li. Research on digital image edge detection with local entropy and fuzzy entropy algorithms[C]//2010 IEEE International Conference on Hyperlink, Information and Automation (ICIA). [S.l.]: IEEE, 2010: 2477-2482.
- [12] XIE Song-yun, XIE Yu-bin, YANG Wei, et al. Edge detection using advanced grey prediction model hyperlink, networking[C]//2010 International Conference on Sensing and Control (ICNSC). [S.l.]: IEEE, 2010: 486-490.
- [13] 孙达, 刘家锋, 唐降龙. 基于概率密度梯度的边缘检测[J]. *计算机学报*, 2009, 32(2): 299-307.
SUN Da, LIU Jia-feng, TANG Xiang-long. Edge detection based on density gradient[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2009, 32(2): 299-307.
- [14] SMITH S M, BRADY J M. SUSAN-a new approach to low level image processing[J]. *Compute Vision*, 1997, 23(1): 45-78.
- [15] WANG Jing-dong, WANG Fei, ZHANG Chang-shui, et al. Linear neighborhood propagation and its applications[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, 2009, 31(9): 1600-1615.
- [16] 刘晓石, 陈鸿建, 何腊梅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
LIU Xiao-shi, CHEN Hong-jian, HE Na-mei. *Probability theory and mathematical statistics*[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [17] CHEN Pei-yin, LIEN Chih-yuan, LU Chi-pin. VLSI implementation of an edge-oriented image scaling processor[J]. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2009, 17(9):1275-1284.
- [18] LEE Sang-keun. Edge statistics-based image scale ratio and noise strength estimation in DCT-coded images[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2009, 55(4): 2139-2144.
- [19] WANG Zhen-zhou, ZHANG Yu-ming. Brightness-based selection and edge detection-based enhancement separation algorithm for low-resolution metal transfer images[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2009, 6(1): 181-187.
- [20] CANNY J F. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, 8(6): 679-698.

编辑 漆蓉