

一种基于改进 Canny 的边缘检测算法

许宏科, 秦严严, 陈会茹

(长安大学 电子与控制工程学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 鉴于传统 Canny 边缘检测算法在高斯滤波方差和高低阈值选取上需要人工干预, 不具备自适应能力, 以及其在梯度计算上的缺陷。提出了一种改进的 Canny 边缘检测算法。改进算法使用自适应平滑滤波代替高斯滤波, 在平滑图像的同时锐化了边缘; 使用水平、垂直、45°和 135°四个方向梯度模板计算图像梯度, 改善了传统 Canny 算法在计算梯度时对噪声的敏感性; 引进 Otsu 算法自适应地根据图像灰度生成高低阈值, 避免了人为设定高低阈值的难题。实验结果表明, 改进算法在检测到更多边缘细节的同时, 也具备较强的自适应性。特别地, 在噪声环境中, 改进算法比传统 Canny 算法检测效果更优。

关键词: 边缘检测; 改进 Canny; 自适应滤波; Otsu; 梯度模板

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2014)03-0210-05

An Improved Algorithm for Edge Detection Based on Canny

XU Hong-ke, QIN Yan-yan, CHEN Hui-ru

(School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Because the variance of gaussian filter and the high and low thresholds should be determined artificially, Canny algorithm has no adaptive capacity. What is more, it has defect in calculation of gradient amplitude. An improved edge detection algorithm was put forward based on Canny. Adaptive smooth filter was used to smooth image instead of gaussian filter, which could overcome noise influence and sharpen image edge effectively. The improved algorithm also used 4 gradient templates in x-axis direction, y-axis direction, 45° direction and 135° direction to calculate gradient amplitude. Finally, Otsu algorithm was used to get high and low thresholds adaptively based on the gray. The experimental results show that the improved algorithm can detect more edge details with strong adaptability. Particularly, it has much better effect of edge detection than traditional Canny algorithm in the noise environment.

Key words: edge detection, improved Canny, adaptive smooth filter, Otsu, gradient templates

0 引言

图像边缘是指周围像素灰度值有阶跃变化或屋顶变化的像素点集合, 反映了图像灰度的不连续性。边缘检测^[1]的实质是采用某种算法提取图像中目标与背景之间的边界线, 通常可以由一阶梯度最大值或者二阶导数过零点检测得到图像边缘。常用的一阶梯度算子^[2]有 Roberts、Prewitt、Sobel; 基于二阶导数过零点检测的边缘检测算子中最具代表性的是由 Marr 和 Hildreth 提出的 LoG 算子^[3]。这些算子都是局域窗口梯度算子, 优点是计算量较小, 但在一定程度上丢失

了一些边缘信息, 检测效果不理想。

John Canny 的 Canny 算子^[4]是一种含有最优化思想的算子, 它具有较大的信噪比和较高的检测精度, 所以被广泛地应用^[5]。但是其高斯函数的方差和高低阈值的选择都是人工设定, 自适应能力较差; 而且它计算梯度使用的是 2×2 邻域内的有限差分均值, 对噪声比较敏感^[6]。本文分析了传统 Canny 边缘检测算法, 在此基础之上, 对其进行了改进。首先使用自适应平滑滤波代替原算法中的高斯滤波, 这样一方面解决了高斯函数的方差需要人工设定的缺陷, 另一方面在滤波图像的过程中锐化了图像边缘, 对最终的边缘

提取有着积极作用; 然后使用水平、垂直、 45° 和 135° 四个方向模板计算图像梯度, 降低了噪声敏感度, 提高了边缘定位精度; 在非最大值抑制步骤后, 引入 Otsu 算法, 根据图像灰度信息自适应地生成高、低阈值, 避免了人为设定阈值的难题。

1 传统 Canny 算法原理及分析

1.1 Canny 算法基本原理

Canny 边缘检测算法^[1]基于三个基本目标: 1) 低错误率: 所有边缘都应被找到, 并且没有伪响应, 也就是检测到的边缘必须尽可能地是真实边缘; 2) 边缘点应被很好地定位: 已定位边缘必须尽可能地接近真实边缘, 也就是由检测器标记为边缘的点和真实边缘的中心之间的距离应该最小; 3) 单一边缘响应: 对于真实的边缘, 检测器仅应返回一个点, 也就是真实边缘周围的局部最大数应该是最小的, 这意味着在仅存一个单一边缘点的位置, 检测器不应指出多个边缘像素。Canny 算子边缘检测步骤如下^[7]:

- 1) 使用高斯滤波器对原图像进行滤波, 其中高斯函数的方差人为设定;
- 2) 对滤波后的图像求梯度幅值以及梯度向量;
- 3) 对梯度图像进行非最大值抑制操作, 剔除非最大值的像素点;
- 4) 确定高、低阈值并结合连接分析方法确定图像最终的边缘, 高、低阈值大小的选择, 对检测得到的边缘质量有着关键性影响。

1.2 Canny 算法缺陷分析

1) 在边缘检测前为了滤除图像中的噪声, 传统 Canny 算法借助于高斯滤波器对原图像进行平滑滤波。其中的高斯函数如公式(1)所示:

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

式中: σ 为高斯滤波器参数, 边缘定位精度随着 σ 值的增加而降低; 而信噪比随着 σ 值的增加而增强。所以 σ 值的大小对平滑效果有着决定性的影响。由于 σ 的值并不是自动确定而需要人为设定, 所以使得传统 Canny 算法在提取不同图像的边缘时, 有很大的局限性。

2) 传统 Canny 算法在计算梯度幅值时, 使用的是 2×2 邻域内一阶偏导数的有限差分, 使得对噪声比较敏感, 容易造成误检和漏检。

3) 传统 Canny 算法在确定高、低阈值时也是事先通过人为设定。这使得伪边缘和边缘的连续性之间存在着矛盾, 同一组高、低阈值对于不同的图像来说, 边缘检测质量差异很大。寻求一种方法使得高、低阈

值的选取可以根据图像本身像素信息自适应确定, 是提高 Canny 算法自适应能力的一种有效途径。

本文提出的改进算法对传统 Canny 算法的这三个缺陷进行改进, 并取得了良好的实验效果。

2 传统 Canny 算法的改进

2.1 自适应平滑滤波

为了克服传统 Canny 算法中高斯函数的方差需要人为设定的难题, 以及考虑到一般的滤波方法会在滤波图像的同时模糊原图像, 所以本文使用自适应平滑滤波取代高斯滤波平滑输入图像。自适应平滑滤波的基本思想^[8]是用一种小的平均加权模板与原图像进行迭代卷积, 每次迭代时自适应地改变各像素加权系数。这种自适应平滑滤波的迭代运算在抑制噪声的过程中锐化了图像的边缘, 对边缘检测的后续过程产生积极地影响。设 $f(x, y)$ 为输入图像, 则一次迭代的计算步骤如下:

- 1) 梯度分量 $G_x(x, y)$ 、 $G_y(x, y)$ 由公式(2)、(3)确定

$$G_x(x, y) = \frac{1}{2} [f(x+1, y) - f(x-1, y)] \quad (2)$$

$$G_y(x, y) = \frac{1}{2} [f(x, y+1) - f(x, y-1)] \quad (3)$$

- 2) 模板系数由公式(4)确定

$$w(x, y) = \exp\left[-\frac{G_x^2(x, y) + G_y^2(x, y)}{2k^2}\right] \quad (4)$$

- 3) 使用公式(5)对图像 $f^{(n)}(x, y)$ 进行加权平均

$$f^{(n+1)}(x, y) = \frac{\sum_{i=-1}^{+1} \sum_{j=-1}^{+1} f^{(n)}(x+i, y+j) w^{(n)}(x+i, y+j)}{\sum_{i=-1}^{+1} \sum_{j=-1}^{+1} w^{(n)}(x+i, y+j)} \quad (5)$$

式(4)中的参数 k 在计算之前需要设定, k 值的大小对保留的突变边缘幅值进行了约束, 本文实验中 k 的取值为 10; $f^{(n)}(x, y)$ 为第 n 次迭代后的图像, 本文实验中迭代次数取为 5。

2.2 梯度幅值计算改进

传统 Canny 算法使用 2×2 邻域内有限差分来计算图像梯度幅值。其缺点是受噪声环境影响较大, 不能得到很好的检测效果。文献[9]对此进行了改进, 在像素 8 邻域内通过计算 x 方向、 y 方向、 45° 方向和 135° 方向的一阶偏导数的差分来计算图像梯度幅值。虽然文献[9]利用了四个方向偏导数, 但由于其仍然在传统 Canny 算法框架下简单计算方向偏导数, 对噪声的抑制仍然有限。本文在此基础上, 借鉴 Sobel 算子的一阶梯度模板, 来求图像的梯度幅值, 并将其扩展为水

平、垂直、 45° 和 135° 四个方向上一阶梯度模板，如图1所示。实验中取得了良好的效果。

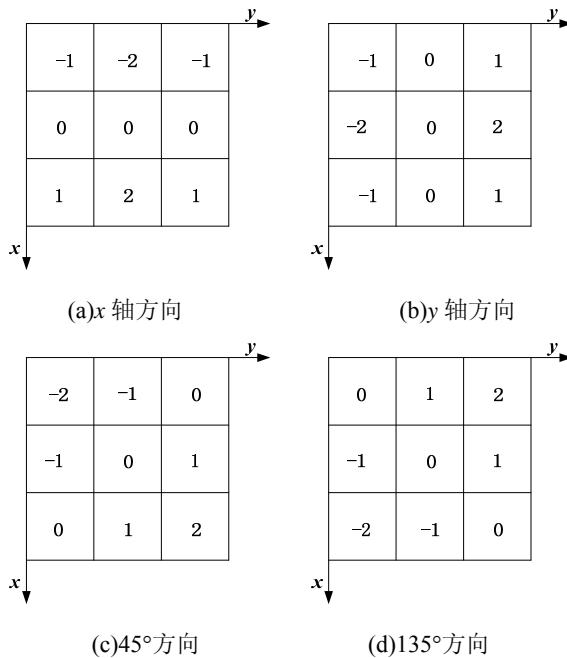


图1 梯度方向模板

Fig.1 Gradient direction templates

四个方向上的一阶梯度分量 $G_x(x, y)$ 、 $G_y(x, y)$ 、 $G_{45}(x, y)$ 和 $G_{135}(x, y)$ 可由图1中的四个一阶梯度模板分别对滤波后的图像进行卷积得到。

梯度幅值和梯度角度可以由四个方向一阶梯度分量求得，即：

$$M(x, y) = \sqrt{G_x^2(x, y) + G_y^2(x, y) + G_{45}^2(x, y) + G_{135}^2(x, y)} \quad (6)$$

$$\theta(x, y) = \arctan\left(\frac{G_y^2(x, y)}{G_x^2(x, y)}\right) \quad (7)$$

2.3 Otsu 算法求取阈值

Otsu 算法，即最大类间方差法^[10]，其可以自适应地确定阈值。利用图像的灰度信息，把图像分类成目标和背景，目标与背景之间的类间方差越大，那么分类越正确。而当目标和背景存在一定程度的错分时，相应的类间方差会变小，所以当类间方差最大时，目标与背景错分的概率就最小。假设 $\{0, 1, 2, \dots, L-1\}$ 表示大小为 $M \times N$ 的图像中的 L 个不同的灰度级， n_i 表示灰度级为 i 的像素数，则存在以下关系。

$$MN = n_0 + n_1 + n_2 + \dots + n_{L-1} \quad (8)$$

图像归一化的直方图分量 $p_i = n_i/MN$ 。假设选择一个阈值 k ， $0 < k < L-1$ ，并使用它把输入图像处理为两类 C_1 和 C_2 。其中 C_1 由图像中灰度值在 $[0, k]$ 范围内的所有像素组成， C_2 由灰度值在 $[k+1, L-1]$ 范围内所有像素组成。由阈值 k ，像素被分到类 C_1 中的概率

$P_1(k)$ 由公式(9)给出。

$$P_1(k) = \sum_{i=0}^k p_i \quad (9)$$

同理，类 C_2 发生的概率 $P_2(k)$ 为：

$$P_2(k) = \sum_{i=k+1}^{L-1} p_i = 1 - P_1(k) \quad (10)$$

分配到类 C_1 的像素的平均灰度值 $m_1(k)$ 为：

$$\begin{aligned} m_1(k) &= \sum_{i=0}^k i P(i / C_1) = \\ &= \sum_{i=0}^k i P(C_1 / i) P(i) / P(C_1) = \\ &= \frac{1}{P_1(k)} \sum_{i=0}^k i p_i \end{aligned} \quad (11)$$

同理，分配到类 C_2 中的像素的平均灰度值 $m_2(k)$ 为：

$$m_2(k) = \sum_{i=k+1}^{L-1} i P(i / C_2) = \frac{1}{P_2(k)} \sum_{i=k+1}^{L-1} i p_i \quad (12)$$

直至灰度级 k 的累加均值为：

$$m(k) = \sum_{i=0}^k i p_i \quad (13)$$

整个图像的平均灰度（全局均值）为：

$$m_G = \sum_{i=0}^{L-1} i p_i \quad (14)$$

由上面公式可求得类间方差 σ_B^2 为：

$$\begin{aligned} \sigma_B^2 &= P_1(k)[m_1(k) - m_G]^2 + P_2(k)[m_2(k) - m_G]^2 = \\ &= P_1(k)P_2(k)[m_1(k) - m_2(k)]^2 = \frac{[m_G P_1(k) - m(k)]^2}{P_1(k)[1 - P_1(k)]} \end{aligned} \quad (15)$$

最佳阈值即是类间方差最大时的 k 值，记为 $k = k^*$ ，满足： $\sigma_B^2(k^*) = \max_{0 \leq k \leq L-1} \sigma_B^2(k)$ 。若使得 $\sigma_B^2(k)$ 取最大

值时的 k 值不唯一，则用类间方差取最大值时所有 k 值的平均值作为最佳阈值 k^* 。令 Otsu 获得的最佳阈值为高阈值 T_h ，再由高阈值为低阈值的两倍这一关系求得低阈值 T_l 。

将 Otsu 算法引入 Canny 算法，使得改进的 Canny 算法可根据图像自身特点选择最合适的阈值，避免了人为设定高、低阈值的难题，增强了自适应能力。

3 实验结果分析

以 10 幅测试图像为对象，在无噪声和有噪声环境下分别对本文算法和传统 Canny 算法进行了对比实验。选取其中的 cameraman 图像和 lena 图像的实验效果，如图 2、3、4、5 所示。

图 2 和图 3 分别显示的是针对 cameraman 图像在

无噪声环境下和有高斯噪声的环境下, 两种算法的检测效果对比图; 图 4 和图 5 分别显示的是针对 lena 图像在无噪声环境下和有高斯噪声的环境下, 两种算法的检测效果对比图。其中传统 Canny 算法中高阈值设为 0.065, 低阈值设为 0.03。

对比图 2 中的(b)和(c)、图 4 中的(b)和(c), 可以看出本文改进算法检测出了更多的边缘细节, 检测边缘

细节的能力优于传统 Canny 算法, 例如在图 2 中, 传统 Canny 算法并未检测出图中远处楼房的外轮廓。从图 3 以及图 5 的对比中看出, 在噪声环境中本文改进算法表现出了更好的优越性, 这主要是因为本文改进算法使用了自适应平滑滤波, 它在滤除噪声的同时锐化了边缘, 对后续边缘检测过程产生了积极的影响。



(a)cameraman 图像



(b)本文算法检测效果



(c)传统 Canny 算法检测效果

图 2 cameraman 图像无噪声效果对比图

Fig.2 Contrast without noise of cameraman image



(a)噪声图像



(b)本文算法检测效果



(c)传统 Canny 算法检测效果

图 3 cameraman 图像噪声环境下效果对比

Fig.3 Contrast with noise of cameraman image



(a)lena 图像



(b)本文算法检测效果



(c)传统 Canny 算法检测效果

图 4 lena 图像无噪声效果对比图 Fig.4 Contrast without noise of lena image



图 5 lena 图像噪声环境下效果对比

Fig.5 Contrast with noise of lena image

文献[11]提出一种 Canny 边缘检测算法评价方法, 即计算各种算法检测出的边缘像素总数、4 连通域数和 8 连通域数, 然后做比值比较。对图 2 和图 4 中情况作统计, 统计结果如表 1 和表 2 所示。其中, A1 代表本文改进算法, A2 代表传统 Canny 算法; A 代表边缘点数, B 代表 4 连通域数, C 代表 8 连通域数。若 C/A 的值越小, 表明边缘检测的连续性越好, 间断越少; C/B 的值越小, 表明单像素边缘所占比例越大, 越符合单一边缘响应准则。从表 1 和表 2 中可以看出, 本文改进算法的 C/A 和 C/B 的值均小于传统 Canny 算法检测结果。

表 1 cameraman 边缘图像统计结果表

Table 1 Statistical results of cameraman edge image

算法	A	B	C	C/A	C/B
A1	18552	7068	2184	0.118	0.309
A2	11403	5511	1985	0.174	0.360

表 2 lena 边缘图像统计结果表

Table 2 Statistical results of lena edge image

算法	A	B	C	C/A	C/B
A1	19690	15468	4549	0.231	0.294
A2	14040	10529	3501	0.249	0.333

将 10 幅测试图像的对比实验结果的平均值统计于表 3, 从表 3 中可以进一步看出, 本文改进算法在边缘连续性和单像素边缘方面要优于传统 Canny 算法。

表 3 测试图像统计结果平均值

Table 3 Average value of results of test edge images

算法	A	B	C	C/A	C/B
A1	20388	11853	3568	0.175	0.301
A2	13885	8257	2791	0.201	0.338

4 结论

本文针对传统 Canny 边缘检测算法存在的缺陷, 对其进行了改进, 取得了良好的边缘检测效果。实验表明, 改进算法可以检测出更多的边缘细节; 在抑制噪声和连接边缘方面优于传统 Canny 算法; 特别是在噪声环境中, 由于改进算法使用了自适应平滑滤波, 使得改进算法的检测效果更具有优越性。

参考文献:

- [1] Gonzalez R C, Woods R E. *Digital Image Processing (Third Edition)*[M]. Beijing Publishing House of Electronics Industry, 2011:445-465.
- [2] Health M, Sarkar S, Sanocki T, et al. Comparison of Edge Detectors: A Methodology and Initial Study[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1998, **69**(1): 38-54.
- [3] Marr D, Hildreth E. Theory of Edge Eetection [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]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 1986(6): 679-698.
- [5] 张斌, 贺赛先. 基于 Canny 算子的边缘提取改善方法[J]. 红外技术, 2006, **28**(3): 165-169.
- [6] Bao P, Zhang L, Wu X. Canny Edge Detection Enhancement by Scale Multiplication[J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 2005, **27**(9): 1485-1490.
- [7] 张素文, 陈志星, 苏义鑫. Canny 边缘检测算法的改进及 FPGA 实现[J]. 红外技术, 2010, **32**(2): 93-96.
- [8] 景晓军, 李剑峰, 熊玉庆. 静止图像的一种自适应平滑滤波算法[J]. 通信学报, 2002, **23**(10): 6-14.
- [9] 王植, 贺赛先. 一种基于 Canny 理论的自适应边缘检测方法[J]. 中国图象图形学报, 2004, **9**(08): 65-70.
- [10] 吴一全, 潘喆. 2 维最大类间平均离差阈值选取快速递推算法[J]. 中国图象图形学报, 2009, **14**(03): 471-476.
- [11] 林卉, 赵长胜, 舒宁. 基于 Canny 算子的边缘检测及评价[J]. 黑龙江工程学院学报, 2003, **17**(02): 3-6+16.