

一种基于 Canny 理论的自适应边缘检测方法

王 植 贺赛先

(武汉大学电子信息学院测试计量技术与通讯工程重点实验室, 武汉 430079)

摘 要 基于 Canny 算子, 提出了一种 Canny 自适应的边缘检测方法。Canny 自适应算法在保持了 Canny 算子原有的定位准确, 单边响应和信噪比高等优点的基础上, 提高了 Canny 算子在提取图像边缘细节信息和抑制假边缘噪声方面的性能。Canny 自适应算法将整幅图像分割为若干子图像, 并根据各子图像的边缘梯度信息, 结合全局边缘梯度特征信息自适应地生成动态阈值, 提高了边缘检测的自动化程度, 在实际的应用中获得了很好的效果。通过数学分析和试验结果证明了 Canny 自适应算法是一种有效的边缘检测改善方法。

关键词 图像处理 边缘检测 Canny 算子 自适应阈值

中图分类号: TP391.41 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2004)08-0957-06

An Adaptive Edge-detection Method Based on Canny Algorithm

WANG Zhi, HE Sai-xian

(Measuring & Testing Technology and Communication Engineering Ministerial Key Laboratory,
School of Electronics Information, Wuhan University, Wuhan 430079)

Abstract This paper is based on Canny algorithm. An adaptive Canny algorithm of edge-detection method is proposed. This algorithm not only keeps the Canny's excellent performance in good localization, only one response to a single edge and good detection, but also improves the performance in the detail edge-detection and good detection. Canny adaptive algorithm divides image into sub-images and detects them with adaptive threshold value according to the whole image edge information, that improves the automaticity of edge-detection. With the mathematic analysis and test result, it is demonstrated that the adaptive edge-detection method is an efficient improving approach on edge-detection.

Keywords image processing, edge-detection, Canny algorithm, adaptive threshold

1 引 言

边缘检测是数字图像处理、图像分析和识别领域中重要的课题。传统的边缘检测算子如 Roberts、Sobel、Prewitt、Kirsch 和 Laplacian 等算子^[1]都是局部窗口梯度算子, 由于它们对噪声敏感, 所以在处理实际图像中效果并不理想。1986 年, Canny 提出边缘检测算子应满足以下 3 个判断准则: 信噪比准则; 定位精度准则; 单边缘响应准则, 并由此推导出了最佳边缘检测算子——Canny 算子^[2]。Canny 算子在边缘检测方面获得了良好的效果, 很快就成为评价其他边缘检测方法的标准。近年来, 很多学者提出了基于 Canny 算子的改善算法^[3~6], 然而在实际应用中发现, 像片在拍摄过程中要受各方面因素的影响, 例如: 受光源照度和

相机本身的影响, 图像中存在噪声, 以及模糊的边缘, 或者整幅像片范围内对比度不一致。在这种情况下, 如果简单的使用 Canny 算子进行边缘检测, 一方面很难设定高、低阈值参数, 另一方面无法消除局部噪声干扰, 在检测出假边缘的同时还会丢失一些灰度值变化缓慢的局部边缘。为此, 提出一种基于 Canny 理论的自适应阈值算法, 其可以根据图像边缘的不同特征自适应地生成动态阈值, 从而解决了以上问题, 并在实际应用中获得了良好的效果。

2 传统的 Canny 边缘检测算法

2.1 平滑图像

Canny 边缘检测算法是高斯函数的一阶导数, 是对信噪比与定位精度之乘积的最优化逼近算子。

Canny 算法首先用二维高斯函数的一阶导数,对图像进行平滑^[7],设二维高斯函数为

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

其梯度矢量为

$$\nabla G = \begin{bmatrix} \partial G / \partial x \\ \partial G / \partial y \end{bmatrix} \quad (2)$$

用分解的方法提高速度,把 ∇G 的2个滤波卷积模板分解为2个一维的行列滤波器:

$$\frac{\partial G}{\partial x} = k_x \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) = h_1(x)h_2(y) \quad (3)$$

$$\frac{\partial G}{\partial y} = k_y \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) = h_1(y)h_2(x) \quad (4)$$

其中, k 为常数, σ 为高斯滤波器参数,它控制着平滑程度。对于 σ 小的滤波器,虽然定位精度高,但信噪比低; σ 大的情况则相反,因此要根据需要适当的选取高斯滤波器参数 σ 。

2.2 计算梯度的幅值和方向

传统 Canny 算法采用 2×2 邻域一阶偏导的有限差分^[7]来计算平滑后的数据阵列 $I(x, y)$ 的梯度幅值和梯度方向。其中, x 和 y 方向偏导数的2个阵列 $P_x[i, j]$ 和 $P_y[i, j]$ 分别为

$$P_x[i, j] = (I[i, j+1] - I[i, j] + I[i+1, j+1] - I[i+1, j]) / 2 \quad (5)$$

$$P_y[i, j] = (I[i, j] - I[i+1, j] + I[i, j+1] - I[i+1, j+1]) / 2 \quad (6)$$

像素的梯度幅值和梯度方向用直角坐标到极坐标的坐标转化公式来计算,用二阶范数来计算梯度幅值为

$$M[i, j] = \sqrt{P_x[i, j]^2 + P_y[i, j]^2} \quad (7)$$

梯度方向为

$$\theta[i, j] = \arctan(P_y[i, j] / P_x[i, j]) \quad (8)$$

2.3 对梯度幅值进行非极大值抑制

为了精确定位边缘,必须细化梯度幅值图像 $M[i, j]$ 中的屋脊带,只保留幅值局部变化最大的点,这一过程就是非极大值抑制。在非极大值抑制过程中,Canny 算法使用 3×3 大小,包含8方向的邻域对梯度幅值阵列 $M[i, j]$ 的所有像素沿梯度方向进行梯度幅值的插值。在每一个点上,邻域的中心像素 $m[i, j]$ 与沿梯度方向的2个梯度幅值的插值结果进行比较, $\zeta[i, j]$ 是像素邻域中心处沿着梯度方向的扇形区域,非极大值抑制在此区域进行。如果邻域中心点的幅值 $m[i, j]$ 不比梯度方向上的2个插

值结果大,则将 $m[i, j]$ 对应的边缘标志位赋值为0,这一过程把 $M[i, j]$ 宽屋脊带细化为一个像素宽,并且保留了屋脊的梯度幅值。非极大值抑制(non-maxima suppression, NMS)过程的数学表示为

$$N[i, j] = \text{NMS}(M[i, j], \zeta[i, j]) \quad (9)$$

2.4 检测和连接边缘

双阈值算法是对经过非极大值抑制和梯度直方图分类的子图像 $N[i, j]$ 分别使用高、低2个阈值 τ_h 和 τ_l 分割得到2个阈值边缘图像 $T_h[i, j]$ 和 $T_l[i, j]$ 。由于图像 $T_h[i, j]$ 是由高阈值得到,因此它应该不含有假边缘,但 $T_h[i, j]$ 可能在轮廓上有间断。因此双阈值算法要在 $T_h[i, j]$ 中把边缘连接成轮廓,当达到轮廓端点时,该算法就在由低阈值得到的边缘图像 $T_l[i, j]$ 的8邻域位置寻找可以连接到轮廓上的边缘,这样,利用递归跟踪的算法不断地在 $T_l[i, j]$ 中搜集边缘,直到将 $T_h[i, j]$ 中所有的间隙都连接起来为止。

2.5 Canny 算法的缺陷

(1)传统 Canny 算子在 2×2 的邻域内求有限差分均值来计算梯度幅值的算法,对边缘的定位比较准确,但对噪声过于敏感,容易检测出假边缘和丢失一些真实边缘的细节部分,实验效果不好。

(2)传统 Canny 算法的高、低门限修补不连续轮廓的思想,对整幅图像使用固定的高、低阈值进行分割,无法顾及图像中的局部特征信息,一方面无法消除局部噪声干扰,另一方面会丢失灰度值变化缓慢的局部边缘,导致目标物体的轮廓边缘不连续,使分割效果受到影响。此外,因为传统 Canny 算子高、低阈值的参数不是由图像边缘的特征信息决定,而是需要人为设定,因此不具有自适应能力,自动化程度低。本文提出的 Canny 自适应边缘提取算法针对传统 Canny 算法的两个缺陷进行改进,取得了良好的试验效果。

3 Canny 自适应边缘提取算法

3.1 改进的图像梯度幅值计算方法

针对传统 Canny 算法在梯度幅值计算上的缺陷,提出了一种在像素8邻域内通过计算 x 方向, y 方向, 135° 方向, 45° 方向一阶偏导数有限差分来确定像素梯度幅值的方法,这种方法兼顾了梯度幅值计算中,边缘定位准确和抑制噪声的要求,在试验中取得了很好的效果,具体算法如下:

x 方向偏导数:

$$P_x[i, j] = I[i+1, j] - I[i-1, j] \quad (10)$$

y 方向偏导数:

$$P_y[i, j] = I[i, j+1] - I[i, j-1] \quad (11)$$

135°方向偏导数:

$$P_{135}[i, j] = I[i+1, j+1] - I[i-1, j-1] \quad (12)$$

45°方向偏导数:

$$P_{45}[i, j] = I[i-1, j+1] - I[i+1, j-1] \quad (13)$$

像素的梯度幅值和梯度方向用直角坐标到极坐标的坐标转化公式来计算,用二阶范数来计算梯度幅值为

$$M[i, j] = \sqrt{P_x[i, j]^2 + P_y[i, j]^2 + P_{135}[i, j]^2 + P_{45}[i, j]^2} \quad (14)$$

可以简化为

$$M[i, j] = |P_x[i, j]| + |P_y[i, j]| + |P_{135}[i, j]| + |P_{45}[i, j]| \quad (15)$$

梯度方向为

$$\theta[i, j] = \arctan(P_y[i, j]/P_x[i, j]) \quad (16)$$

3.2 自适应的动态阈值方法

针对传统 Canny 算法在高、低阈值设定上的缺陷,提出了一种自适应动态阈值方法,将整幅图像分割为若干子图像,为了使轮廓连续,可以令子图像之间有一定的重叠区域,重叠区域占子图像的比例参数为 ρ ,再根据非极大值抑制后的结果自适应地设定各子图像的高、低阈值。

3.2.1 梯度直方图

由式(15)可知,梯度的最大值应小于 $4 \times L$ (L 为图像的灰度级),统计经过非极大值抑制后的图像 $N[i, j]$ 中边缘标志位不为 0 的像素的梯度幅值,形成描述边缘强度的梯度直方图,如图 1 所示。

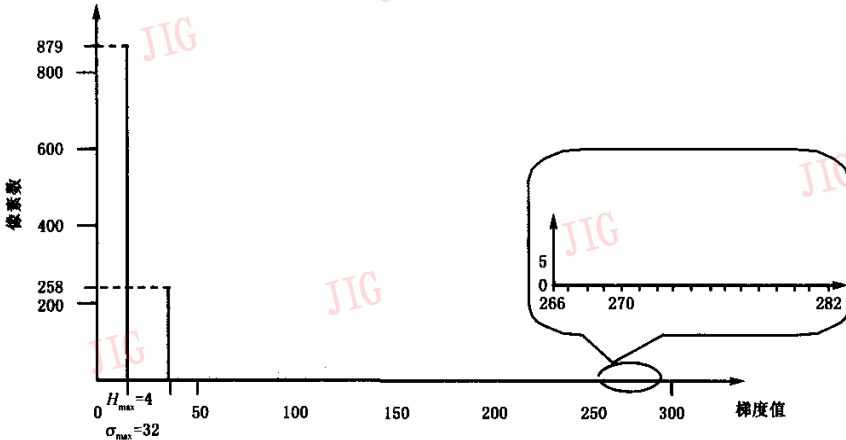


图 1 Lena 图像梯度直方图

3.2.2 对子图像梯度直方图分类

因为梯度直方图描述的是边缘强度信息,而在一幅图像中边缘只占很小的一部分,因此描述图像边缘强度的梯度直方图同原图像的灰度直方图有很大的不同。梯度直方图没有明显的双峰,梯度直方图只在对应图像中非边缘部分有一个很高的尖峰,反映了图像中非边缘的区域占了图像的绝大部分;梯度直方图中对应原图像中边缘的区域没有显示出明显的尖峰,而是处于近似均匀递减分布的状态;在梯度直方图中非边缘和边缘区域之间没有很明显的谷底界限,因此不能简单地用灰度直方图判断双峰的方法分割梯度直方图。

根据梯度直方图的特性,提出了一种自适应分

割非边缘区域和边缘区域的方法。

首先,要根据梯度直方图的形态特征对其进行分类,子图像梯度直方图可能的情况如下:

(1)全部是背景 如果子图像完全对应了原图像中的非边缘区域,而不包含任何边缘,则应将整个子图像区域的边缘数目设置为 0,这样就可以抑制动态阈值产生的局部噪声。

(2)全部是边缘 因为在梯度直方图中,边缘所占比例很小,所以不可能全部为边缘。

(3)既有背景又有边缘 大部分子图像都是处于既包含大量背景,又包含少量边缘的状态。

由先验知识可知,图像中非边缘所占比例远大于边缘所占比例,因此梯度直方图中单峰峰顶对应

的像素集合一定是非边缘像素集合。将梯度直方图中拥有最多像素数的梯度值称为像素最值梯度 H_{\max} ，计算子图像内全部像素的梯度相对于像素最值梯度 H_{\max} 的方差，称之为像素最值梯度方差 σ_{\max} 。

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\sum_{i=0}^k (H_i - H_{\max})^2 / N} \quad (17)$$

其中, k 为像素数不为 0 的梯度最大值, N 为像素总数。

当梯度直方图只存在单峰的时候, 像素的梯度值都集中在最值梯度 H_{\max} 附近, 像素最值梯度方差 σ_{\max} 很小。当梯度直方图不但存在非边缘像素梯度的单峰, 还存在边缘像素梯度的分布时, 边缘像素梯度分布在距离最值梯度 H_{\max} 相对远的位置, 因此像素最值梯度方差 σ_{\max} 很大, 所以可以据此设定门限进行判断(例如可以设定最值梯度方差门限为 1)。当最值梯度方差小于门限时, 认为子图像全部为非边缘的背景, 将其对应的梯度幅值 $N[i, j]$ 全部赋值为 0, 这样就不需要再对其进行边缘跟踪, 节省了运算时间和降低了计算复杂度; 如果最值梯度方差大于门限, 则认为子图像既包含非边缘又包含边缘, 需要进一步处理。

3.2.3 产生高、低阈值

通过前文对传统 Canny 算法的描述可知, 高阈值 τ_h 必须在梯度直方图中非边缘区域以外选取, 否则将给最终结果带来很多的假边缘噪声。本文的方法是自适应地设定高阈值 τ_h 的门限, 像素最值梯度 H_{\max} 反映了非边缘区域在梯度直方图中分布的中心位置, 而像素最值梯度方差 σ_{\max} 则反映了梯度直方图中梯度分布相对于像素最值梯度 H_{\max} 的离散程度, 也就是相对于非边缘区域的离散程度, 因此可以用像素最值梯度 H_{\max} 和像素最值梯度方差 σ_{\max} 计算出非边缘区域的范围, 当高阈值 τ_h 大于像素最值梯度 H_{\max} 一倍最值梯度方差 σ_{\max} 时, 就可以认为 τ_h 在非边缘区域以外, 这样可以很好地防止假边缘在轮廓图中出现, 计算 τ_h 的公式为

$$\tau_h = H_{\max} + \sigma_{\max} \quad (18)$$

自适应动态阈值是相对于常规的固定阈值而言的, 是在全局最优原则下, 根据不同子图像的梯度直方图特征, 确定出各个子图像不同的阈值。以全局阈值为基础, 并利用子图像的梯度分布特征, 对其进行调整, 所得阈值即为动态自适应阈值。对任一幅图像, 设 τ_h 和 τ_l 分别为本文方法确定的整幅图像的全局高、低阈值, 而 τ_h 和 τ_l 为子图像区域上本文方

法确定的局部高、低阈值, 则最终分割该子图像的高、低阈值为

$$\tau_{\text{High}} = (1 - \beta)\tau_h + \beta\tau_l \quad (19)$$

$$\tau_{\text{Low}} = (1 - \beta)\tau_l + \beta\tau_l \quad (20)$$

式中, $0 < \beta < 1$ 为阈值调整率。若 $\beta = 0$, 表示不调整, 说明图像分割按全局梯度直方图的特征来实施; 若 $\beta = 1$, 则表示完全按子图像局部特征进行分割, 可见动态阈值算法能够兼顾整体最优和不丢失局部细节。实际应用中 β 的取值可根据需要来确定, 子图像的大小可适当选取。由 τ_{High} 还可以进一步计算出高阈值参数 α_h , α_h 代表梯度幅值小于高阈值 τ_{High} 的像素所占比例。

3.3 边界跟踪

边界跟踪^[8]步骤如下:

(1) 对于包含边缘的子图像区域, 如果其中某一像素的梯度幅值高于高阈值 τ_{High} , 则将其作为轮廓的起始点, 开始跟踪。

(2) 如果该像素 8 邻域内有其他的梯度幅值高于高阈值 τ_{High} 的像素, 则将这样的邻域像素设为边缘, 并以此像素为起点继续跟踪。

(3) 如果像素点周围没有高于高阈值 τ_{High} 的像素, 此时在 8 邻域内寻找梯度幅值高于低阈值 τ_{Low} 的像素, 将其作为起点继续步骤 2。

(4) 如果步骤 2 和步骤 3 的情况都没有出现, 则认为到了轮廓端点, 跳至步骤 1。

3.4 剔除孤立点噪声

通过模板判断边缘是否连通, 如果是孤立点噪声, 则将其剔除。

4 试验结果及分析

试验用计算机配置为 P4 2G CPU, 64MB 显存, 256MB 内存, 用 VC++6.0 编程实现。设图像有 M 行 N 列 L 级灰度, 分别用传统 Canny 算法和本文提出的 Canny 自适应算法处理图 2(a)、图 2(d)、图 2(g), 算法复杂度和运算时间的比较如表 1、表 2 所示, 边缘检测的试验结果表明 Canny 自适应算法在保持了传统 Canny 算法优点的基础上, 检测出了更多的边缘细节, 检测细节边缘的能力优于传统 Canny 算法, 算法的复杂度和运算时间小于传统 Canny 算法, 同传统 Canny 算法需要设定高低阈值参数相比, Canny 自适应算法能够自动有效地检测出图像完整的边缘轮廓。



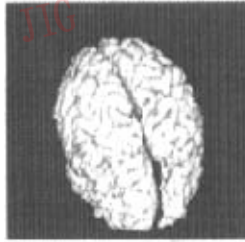
(a) Lena 图像(256×256×8bits)



(b) 传统 Canny 算法



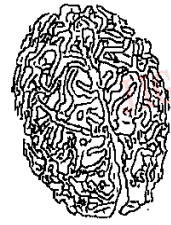
(c) Canny 自适应算法



(d) 脑部图像(256×256×8bits)



(e) 传统 Canny 算法



(f) Canny 自适应算法



(g) 辣椒图像(512×512×8bits)



(h) 传统 Canny 算法



(i) Canny 自适应算法

图 2 试验结果

注:传统 Canny 算法是用 Matlab6.5 中的 Canny 算法对原图像进行边缘检测得到的结果

表 1 算法复杂度

算法	高斯滤波	计算梯度	非极大值抑制	产生高低阈值	边界跟踪
传统 Canny 算法	$2 \times M \times N$ 次乘法	$2 \times M \times N$ 次加减 $2 \times M \times N$ 次乘法 $M \times N$ 次开方	$2 \times M \times N$ 次乘法运算 $M \times N$ 次加减	$M \times N$ 次加减运算	由图像边缘复杂程度决定
Canny 自适应算法	$2 \times M \times N$ 次乘法	$8 \times M \times N$ 次加减运算	$2 \times M \times N$ 次乘法运算 $M \times N$ 次加减	$M \times N$ 次加减运算 $2 \times L$ 次乘法运算 (不包括重叠区域)	由图像边缘复杂程度决定

表 2 运算时间

		图 2(a)	图 2(d)	图 2(g)
传统 Canny 算法	参数	$\alpha_0=0.85$ $\alpha_1=0.4$ $\sigma=1.0$	$\alpha_0=0.85$ $\alpha_1=0.4$ $\sigma=1.0$	$\alpha_0=0.90$ $\alpha_1=0.4$ $\sigma=1.0$
	时间	63ms	62ms	328ms
		3×3 分割	3×3 分割	3×3 分割
Canny 自适应算法	参数	自适应的生成 α_0 $\rho=0.2$ $\alpha_1=0.4$ $\beta=0.5$ $\sigma=1.0$	自适应的生成 α_0 $\rho=0.2$ $\alpha_1=0.4$ $\beta=0.5$ $\sigma=1.0$	自适应的生成 α_0 $\rho=0.2$ $\alpha_1=0.4$ $\beta=0.5$ $\sigma=1.0$
	时间	47ms	31ms	313ms

5 结 论

Canny 自适应算法普遍适用于各类图像的阶跃边缘,本算法保持了传统 Canny 算子的优点,提高了抑制噪声的能力,而且在算法复杂度和计算时间上均小于传统 Canny 算子,得到的边缘轮廓图信噪比高,连通性好,更重要的是本算法能够自适应的生成高、低阈值检测图像边缘,自动化程度高,为实现自动匹配进行了有益的探索。Canny 自适应算法也存在如检测效果优于 Sobel、Laplacian 等简单算子,但是速度相对较慢等问题,这有待于进一步研究解决。

参 考 文 献

- 1 Gonzalez C Rafael, Woods E Richard. 数字图像处理(第二版)[M], 北京:电子工业出版社,2003:463~474.
- 2 Canny J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986,8(6):679~698.
- 3 Demigny D, Lorca F G, Kessal L. Evaluation of edge detectors performances with a discrete expression of Canny's criteria[A]. In:Proceedings of International Conference on Image Processing [C], Los Alamitos, CA, USA; IEEE, Computer SOC Press, 1995:169~172.
- 4 Demigny D, Kamle T. A discrete expression of Canny's criteria for step edge detector performances evaluation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997,19(6): 1199~1211.

- 5 Demigny D. Extension of Canny's discrete criteria to second derivative filters,towards a unified approach[A]. In:Proceedings of International Conference on Image Processing [C]. Los Alamitos, CA, USA; IEEE, Computer SOC Press, 1998:520~524.
- 6 Worthington P L. Enhanced Canny edge detection using curvature consistency [A]. In: Proceedings International Conference on Pattern Recognition[C]. Los Alamitos,CA,USA; IEEE,Computer SOC Press,2002:596~599.
- 7 贾云得. 机器视觉[M]. 北京:科学出版社,2000:97~100.
- 8 杨枝灵,王开,肖洪伟等. Visual C++ 数字图像获取处理及实践应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2003:568~569.



王 植 1979 年生。2001 年于武汉大学动力与机械学院获机械设计制造及自动化专业学士学位,2004 年于武汉大学电子信息学院获测试计量技术与仪器专业硕士学位,现为武汉大学博士研究生。研究方向为信号与信息处理。

E-mail:wangzhimail@21cn.com



贺赛先 1968 年生。教授。1989 年于武汉测绘科技大学光电学院获光学仪器学士学位,1992 年于武汉测绘科技大学光电学院获光学仪器硕士学位。研究领域为图像测量、机器视觉。