

An Improved Canny Edge Detection Algorithm

Tao Ke, Ruidong Zhang

College of Mechanical & Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, China

Abstract: Focused on that the vary of the illumination intensity and the disturb of noise can cause large differences in the edges and the weak edges may undetected based on the gradient magnitude double threshold method for image processing. A method for edge detection and connection based on gradient magnitude and edge direction is proposed. Make full use of the difference between the noise and edge points in the edge direction and the consistency of the edge points in the edge direction to protect the weak edge when suppressed the noise. Meanwhile, the sensitivity of the isolated noise is reduced through the way that calculated the gradient amplitude within 8 neighborhoods. The effectiveness of the improved Canny algorithm is verified by experimental results.

Keywords: image process; canny edge detection algorithm; gradient magnitude; edge direction angle; weak edge detection

一种改进型 Canny 边缘检测算法

柯涛, 张瑞栋

重庆交通大学机电与车辆工程学院, 重庆, 中国, 400074

摘要: 针对传统 Canny 算子对图像边缘进行检测时, 因光照强度的变化和噪声的干扰使得处理后图像的边缘产生较大差异, 采用梯度幅值双阈值法检测存在弱边缘漏检的现象, 提出了一种基于梯度幅值和边缘方向的边缘点检测和连接。充分利用噪点与边缘点在边缘方向上的差异性以及边缘点在边缘方向上的一致性, 在抑制噪声的同时能够很好地保护弱边缘。同时, 采用 8 邻域内梯度幅值计算方法降低了对孤立噪点的敏感性。实验结果验证了改进型 Canny 算法的有效性。

关键词: 图像处理; Canny 边缘检测算法; 梯度幅值; 边缘方向角度; 弱边缘检测

1 引言

边缘检测是数字图像处理的重要内容。图像的边缘是指其周围像素灰度急剧变化的像素点的集合。边缘存在于目标、背景和区域之间, 所以, 它是图像分割最重要的依据, 也是图像匹配的重要特征^[1]。

在经典的图像边缘检测算法中, 常用的微分算子有 Roberts 算子、Prewitt 算子、Sobel 算子以及 Log 算子等。这些算子简单具有良好的实用性, 但同时存在对噪声敏感性强、边缘精度差的缺陷^[2-5]。相比于传统微分算子, Canny 于 1986 年提出了边缘检测最优算子三准则: 信噪比准则、定位精度准则以及单边缘准则, 并推导出了 Canny 边缘检测算子。Canny 算子首先使用一个二维高斯函数平滑图像, 计算经过平滑后图像的梯度, 使用梯度幅值和方向来估计每一点处的边缘强度和方向, 然后对梯度图像进行非极大抑制以细化边缘, 最后采用双阈值的方法选取边缘点并进行

连接。Canny 算子具有低错误率、边缘点能够很好的定位以及单一的边缘点相应等优点, 因此被广泛应用并作为其他检测算子的评价标准。目前, 已有许多学者提出了基于 Canny 算子的改进型边缘检测算子, 对传统 Canny 算子在滤波阈值设定、梯度幅值计算、高低阈值选取以及边缘细化连接等方面均有所改进^[6-10]。然而在实际应用中, 由于机器设备本身和光照强度变化等因素引起的图像存在噪声、模糊边缘或者整幅图像内边缘强度差异较大的现象, Canny 算子采用高斯滤波和高低阈值选取边缘点的方法往往存在噪声点的误检测和弱边缘的漏检测问题。

为此, 本文提出一种改进型 Canny 边缘检测算子, 充分利用噪点与边缘点在边缘方向上的差异性以及边缘在边缘方向上的一致性, 在抑制噪声的同时能够很好地保护弱边缘细节。

2 传统 Canny 边缘检测算法

2.1 理论基础

Canny 提出了边缘检测最优算子三准则：
信噪比准则

$$SNR = \frac{\left| \int_{-w}^{+w} G(-x) f(x) dx \right|}{\sigma \sqrt{\int_{-w}^{+w} f^2(x) dx}} \quad (1)$$

其中：f(x)为边界滤波器的脉冲响应；G(-x)为边缘函数；σ为高斯噪声的标准差。输出的信噪比最大，非边缘点判定为边缘点或者边缘点判定为非边缘点的概率最小，即误检率最小。

定位精度准则

$$Localization = \frac{\left| \int_{-w}^{+w} G'(-x) f'(x) dx \right|}{\sigma \sqrt{\int_{-w}^{+w} f'^2(x) dx}} \quad (2)$$

其中：G'(-x)和 f'(x)分别为 G(-x)和 f(x)的一阶导数；Localization 的值越大，表明检测边缘点与实际边缘点的距离越小，即定位精度越高。

单边缘响应准则：要保证边缘有且只有一个像素点响应，检测算子的脉冲响应导数的零交叉点平均距离 D(f)应满足。

$$D(f) = \Pi \left\{ \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} f'^2(x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} f''^2(x) dx} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

其中：f''(x)为 f(x)的二阶导数。

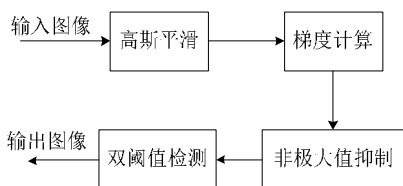


Figure 1. Algorithm flow chart of Canny
图 1. canny 算子流程图

基于以上三准则，Canny 推导出了一最佳边缘检测算子，其算子的流程如图 1 所示。

2.2 传统 Canny 边缘检测算子实现

2.2.1 平滑图像

构造高斯滤波器 G(x,y)对图像 I(x,y)进行卷积操作的到平滑后的图像 I'(x,y)，即：

$$I'(x, y) = I(x, y) * G(x, y) \quad (4)$$

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

其中:*为卷积操作；σ为高斯滤波函数标准差，它控制着图像平滑的程度。对于σ值较小的滤波器，滤波模板较小，其定位精度较高，但信噪比低；σ值较大则情况相反；因此需要适当的选取σ值。

2.2.2 计算梯度幅值和方向

Canny 算子采用 2×2 邻域内一阶梯度算子来计算平滑后图像 I'(x,y)的梯度幅值 M(x,y)和方向 θ(x,y)。

$$M(x, y) = \sqrt{g_x^2 + g_y^2} \quad (5)$$

$$q(x, y) = \arctan \left[\frac{g_y}{g_x} \right]$$

$$f_x = \begin{bmatrix} -0.5 & 0.5 \\ -0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \quad f_y = \begin{bmatrix} -0.5 & -0.5 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中，g_x和 g_y是图像 I'(x,y)经滤波器 f_x和 f_y沿行、列作用的结果。

2.2.3 对梯度幅值非极大值抑制

在局部最大值周围通常包含更宽的范围，为精确定位需细化边缘，只保留像素点梯度方向上梯度幅值的局部极大值，将局部梯度幅值极大值像素点标记为候选边缘点，这样得到了候选边缘图像 N。

2.2.4 双阈值法边缘点检测和边缘连接

Canny 算子通过使用高阈值 Th 和低阈值 Tl（建议高低阈值的比率应为 2:1 或 3:1）进行边缘点选取和连接。扫描候选边缘图像 N，对于梯度幅值大于高阈值 Th 的候选边缘点标记为边缘点，对于梯度幅值小于低阈值 Tl 的候选边缘点标记为非边缘点；如果候选边缘点的梯度幅值大于低阈值 Tl 而小于高阈值 Th，则标记为可疑边缘点，进一步通过 8 邻域内连通性判断其是否为边缘点。若可疑边缘点连通邻域内存在边缘点，则标记该点为边缘点，否则为非边缘点。

3 改进型 Canny 边缘检测算子

在实际图像采集过程中，因机器设备本身和光照强度变化等因素引起的图像存在噪声或者边缘强度差异较大的现象是难以避免的。传统 Canny 边缘检测算子在 2×2 邻域内求有限差分的方法计算像素点的梯度幅值，该方法具有定位精度高的特点，但同时对于噪声过于敏感，在实际检测中容易出现假边缘的误检现象。另外，对于因光照变化或者阴影引起的整幅图像

内边缘强度差异较大的图像检测过程中, 使用固定的高低阈值对图像边缘点选取的 Canny 算子会引起强度较弱边缘的丢失, 导致目标轮廓断续, 出现漏检现象。

3.1 3×3 邻域内梯度幅值计算方法

针对传统 Canny 算子在像素点 2×2 邻域内计算梯度幅值对噪声较为敏感的不足, 本文采取在像素点 3×3 邻域内通过计算 x 方向、y 方向、45°方向以及 135°方向上偏导的方法来计算梯度幅值, 由于待检测点不直接参与运算, 保证边缘定位精度的同时降低了算子对噪声的敏感程度。具体算法如下:

X 方向偏导数:

$$P_x(i, j) = I(i+1, j) - I(i-1, j) \quad (7)$$

Y 方向偏导数

$$P_y(i, j) = I(i, j+1) - I(i, j-1) \quad (8)$$

45°方向偏导数:

$$P_{45^\circ}(i, j) = I(i-1, j+1) - I(i+1, j-1) \quad (9)$$

135°方向偏导数:

$$P_{135^\circ}(i, j) = I(i+1, j+1) - I(i-1, j-1) \quad (10)$$

水平方向的差分

$$f_x(i, j) = P_x(i, j) + [P_{45^\circ}(i, j) + P_{135^\circ}(i, j)]/2 \quad (11)$$

垂直方向的差分:

$$f_y(i, j) = P_y(i, j) + [P_{45^\circ}(i, j) - P_{135^\circ}(i, j)]/2 \quad (12)$$

像素点的梯度幅值和梯度方向用直角坐标到极坐标的转化公式来计算, 用二阶范数来计算梯度幅值。

$$M(i, j) = \sqrt{f_x(i, j)^2 + f_y(i, j)^2} \quad (13)$$

像素点的梯度方向

$$q(i, j) = \arctan\left(\frac{f_y(i, j)}{f_x(i, j)}\right) \quad (14)$$

3.2 基于梯度幅值和边缘方向的边缘点检测连接

通过计算 3×3 邻域内像素点的梯度幅值和梯度方向, 我们得到了图像的梯度幅值阵列和梯度方向阵列。理想情况下, 图像的边缘应该仅出现在邻域内梯度幅值最大的像素点集合中。Canny 算法便是通过邻域内梯度幅值非极大值抑制细化边缘和全局内的双阈值检测连接边缘。实际上, 由于噪声、光照强度变化引起的弱边缘和边缘间断现象使得这些像素点并不能

完全描述边缘特征。边缘作为像素灰度急剧变化的像素点的集合, 具有梯度幅值信息, 同时具有方向角度信息, 像素点的边缘方向垂直于该点处的梯度向量方向。对于存在弱边缘和边缘间断的图像, 梯度方向阵列可以作为用梯度幅值从图像中提取的信息的补充。

3.2.1 算法原理

根据上文分析, 用于确定边缘像素相似性的两个主要准则是: (1) 边缘梯度幅值强度; (2) 边缘方向角度。令 $I(x, y)$ 表示一幅以点 (x, y) 为中心的一个邻域的坐标集合。如果

$$\begin{aligned} |M(s, t) - M(x, y)| &\leq E \\ |q(s, t) - q(x, y)| &\leq A \end{aligned} \quad (15)$$

其中, E 为一个正梯度阈值; A 为一个角度阈值, 则称坐标 (s, t) 处的像素有与中心点像素 (x, y) 相似的梯度幅值强度和边缘方向角度性质。

采用全局固定高低阈值的方法判断边缘点的方法具有局限性, 因此梯度阈值 E 的选取也往往面临无法兼顾全局的缺陷。为此, 我们引入边缘方向梯度幅值标准差作为考量像素点间相似性的指标取代传统的固定高低阈值和梯度阈值。为了更精确的计算像素点间梯度幅值标准差, 本文采用半像素差值的方法扩展像素点间梯度幅值, 同时为了降低算法的复杂程度, 我们将边缘方向梯度幅值标准差作如下简化。

边缘方向梯度幅值标准差:

$$e = \frac{\sum |M_{ij} - M'_{ij}|}{N} \quad (16)$$

其中, 梯度幅值标准差表示在像素点边缘方向上, 各点梯度幅值的差异程度。该标准差越小, 说明边缘方向上点的梯度幅值差异越小, 即该边缘方向越合理。

根据梯度幅值相似程度选取边缘点可以视为增加了邻域内候选边缘点的个数, 在一定程度上会造成粗边缘现象。边缘方向梯度幅值标准差的引入能够使边缘点的选取沿梯度幅值差异程度最小的方向进行, 达到了细化边缘的效果。

将与边缘点有相似性质的边缘候选点标记为边缘点。对于噪声点, 与其邻域内像素点的梯度幅值和边缘方向角度差异性较大, 因此通过合适的阈值选取能够有效的区分噪点和边缘点。同时, 由于边缘方向角度准则的引入, 对于有着相似边缘方向角度的弱边缘起到了保护作用。

3.2.2 算法实现

根据上述算法原理，基于边缘方向的边缘点检测和边缘连接步骤如下：

(1) 输入梯度幅值阵列经非极大值抑制后的候选边缘图像；

(2) 扫描候选边缘图像，对于边缘点 $N(x, y)$ ，判断其 8 邻域内是否存在候选边缘点，若没有，标记该点为假边缘点，转向第 6 步；否则

(3) 据边缘方向准则计算点 $N(x, y)$ 与其 8 邻域内扫描到的第一个候选边缘点所对应的 A ，若 A 满足设定阈值，则转向第 5 步；否则

(4) 继续扫描点 $N(x, y)$ 8 邻域内为标记为边缘点的候选边缘点，若找到满足 A 设定阈值的候选边缘点则转向第 5 步；否则转向第 6 步

(5) 计算满足边缘方向的各候选边缘点与边缘点 $N(x, y)$ 间的边缘方向梯度幅值标准差 e ，将边缘方向梯度幅值标准差最小的点标记为边缘点，并以该点为种子点进行边缘连接，直到所有种子点 8 邻域内不存在未被标记的候选边缘点，转第 4 步

(6) 继续扫描候选边缘图像，寻找新的候选边缘点，若该点被标记，转第 2 步；否则继续扫描候选边缘图像，直到没有新的未被标记的候选边缘点出现；算法结束。

4 实验结果与分析

本文使用 MATLAB 平台，在 Canny 算法程序基础上分别对梯度幅值计算方法和边缘点检测连接进行修改。改进型算法所涉及到的参数角度阈值 A ，由试验及分析可知，过小的 A 值会导致图像边缘出现不连续现象，对于不同的图像， A 值选取在 5° - 30° 时有较为良好的效果，本文选取 $A=20^\circ$ 。此外，对于实际应用过程中由于光的衍射等原因引起的部分无意义边缘，可根据实际需求在程序中引入一个较小的梯度幅值阈值并结合形态学处理去除，防止这类无意义边缘的出现，达到更好的检测效果。为检测改进算法抑制噪声水平，引入图像峰值信噪比(PSNR)，图像峰值信噪比是衡量图像失真或是噪声水平的客观标准，普遍基准为 30dB，基准值以下的图像劣化较为明显。定义为：

$$PSNR = 10 \lg \left(\frac{255^2}{MSE} \right) \quad (17)$$

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m \|K(x, y) - f(x, y)\|^2$$

这里， $f(x,y)$ 和 $K(x,y)$ 分别表示原图像和处理后图像检测值。

图 2、图 3 为传统 Canny 算子和改进 Canny 算子对 cameraman 图像和道路图像边缘检测效果。表 1 为两种检测算子对添加不同密度椒盐噪声图像检测后图像的峰值信噪比。

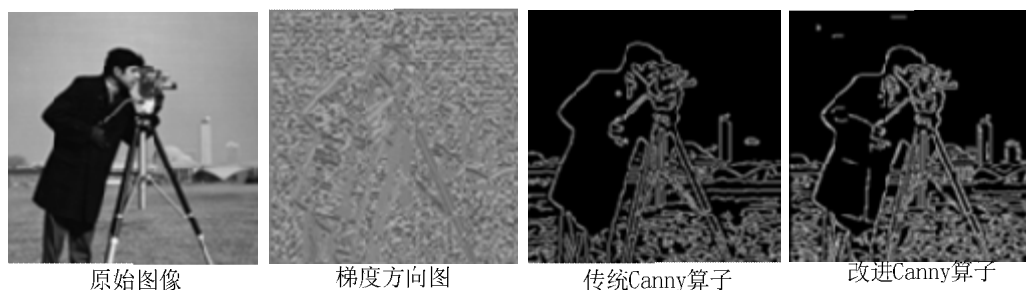


Figure 2. Edge detection results of cameraman image
图 2. Cameraman 图像边缘检测结果

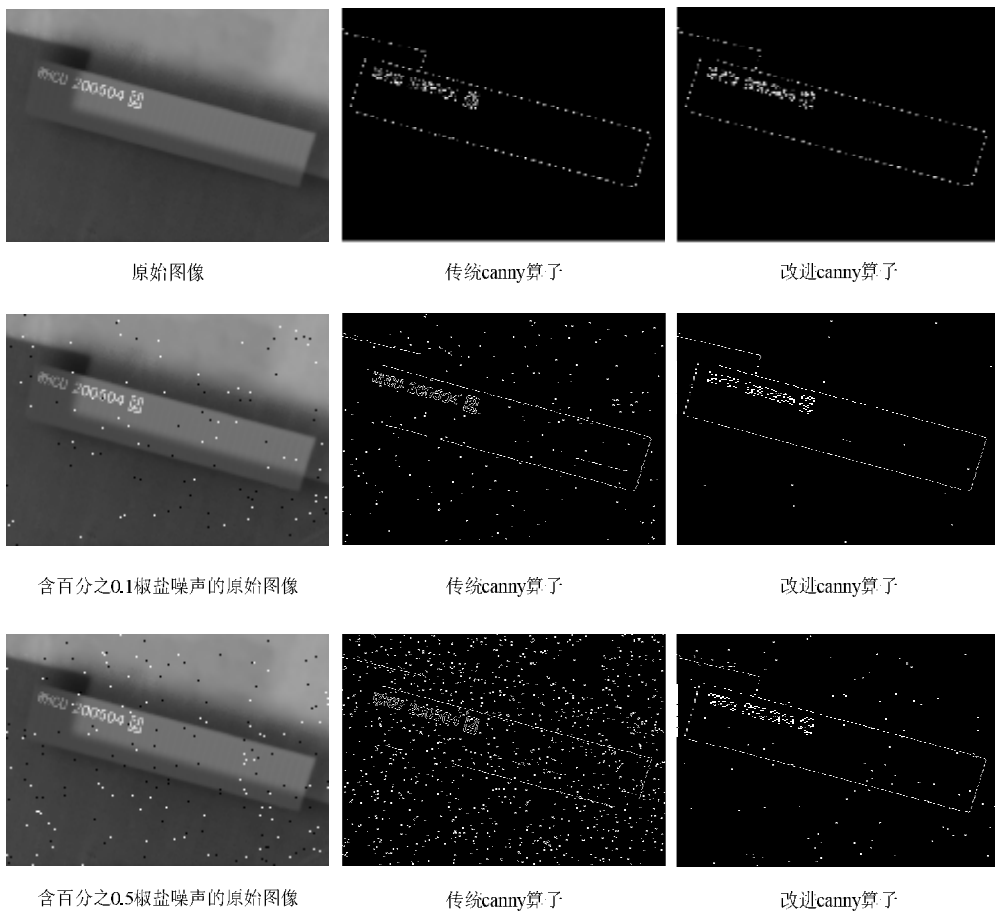


Figure 3. Edge detection results of container image
图 3. 集装箱图像的边缘检测结果

Table 1. PSNR of image
表 1. 图像峰值信噪比

椒盐噪声密度	1%椒盐噪声	0.1%椒盐噪声	0.5%椒盐噪声
传统 Canny 算子 PSNR 值/dB	27.3404	25.4833	25.0076
改进 Canny 算子 PSNR 值/dB	28.8645	27.9856	27.2208

对比两种检测算子边缘提取效果，图 2 梯度方向图显示沿着边缘方向梯度方向角度变化较为平缓，以梯度角度和梯度幅值标准差作为边缘检测对象对图像中的弱边缘有较为良好的保护作用，对人物衣服细节部分较弱边缘检测效果较为突出。传统 Canny 算子对集装箱左边阴影部分的边框线识别出现了较为严重的漏检现象，改进 Canny 算子则更多地保留了弱边缘信息。对添加不同密度的椒盐噪声图像检测效果来看，传统 Canny 算子表现出较强的敏感性，提取边缘细节

较为粗糙，相比之下改进算子对随机出现的椒盐噪声有良好的抑制作用，噪点也仅仅出现在弱边缘附近，对集装箱顶部字体识别也较为精准，较为完整地保护了有效边缘信息。两种算子 PSNR 值也表明基于梯度幅值和边缘方向边缘点检测连接的改进算子对随机分布的椒盐噪声有更好的效果。

5 结论

本文在 Canny 边缘检测算法的基础上，充分利用噪点和边缘点在边缘方向上的差异，改进了边缘检测

算子, 采用 3×3 邻域内梯度幅值计算和基于梯度幅值、边缘方向角度的边缘点连接的方法。实验结果表明, 改进算法在抑制噪声和弱边缘检测方面均优于传统 Canny 边缘检测算子, 在实际应用中具有更好的针对性和实用性。

致谢

重庆交通大学研究生科研创新项目 (编号: 20160117)。

References (参考文献)

- [1] Gonzalez R C, Woods R E. Digital Image Processing. 3rd.ed. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2010; 712—714
- [2] Canny J. A Computational Approach to Edge Detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986; 8(6): 679—698
- [3] Rajab M I, Woolfson M S, Morgan S P. Application of region-based segmentation and neural network edge detection to skin lesions. Computerized Medical Imaging and Graphics, 2004; 28(1): 61—68
- [4] Ziou D, Tabbone S. Edge detection techniques-an overview. International Journal of Pattern Recognition and Image Analysis, 1998; 8(4): 537—559
- [5] 段瑞玲,李庆祥,李玉和. 图像边缘检测方法研究综述. 光学科技, 2005; 31(3): 415—419
DuanRuiling, Li Qingxiang, Li Yuhe. Summary of image edge detection. Optical Technique, 2005; 31(3): 415—419
- [6] 周晓明,马秋禾,肖蓉,等. 一种改进的 Canny 算子边缘检测算法.测绘工程, 2008; 17(1): 28—31
Zhou Xiaoming, Ma Qiuhe, Xiao Rong, et al. An improved Canny edge detection algorithm. Engineering of surveying and mapping, 2008; 17(1): 28—31
- [7] 赵岩,周百灵,陈贺新. 一种改进的基于 Canny 算子边缘检测算法. 吉林大学学报(理学版), 2012; 50(4): 740—744
Zhao Yan, Zhou Bailing, Chen Hexin. An Improved Edge Detection Algorithm Based on Canny Operator. Journal of Jilin University(Science Edition), 2012; 50(4): 740—744
- [8] 张震,马骊良,张忠波,等. 一种改进的基于 Canny 算子的图像边缘提取算法. 吉林大学学报(理学版), 2007, 45(2): 244—248
Zhang Zhen, Ma Siliang, Zhang Zhongbo, et al. Improved Image Edge Extraction Algorithm Based on Canny Operator. Journal of Jilin University(Science Edition), 2007, 45(2): 244—248
- [9] 钟鑫,付俐. 一种基于 Canny 算法的自适应边缘提取方法. 科学技术与工程, 2007, 7(16): 4067—4069
Zhong Xin, Fu Li. Adaptive Edge-detection Method Based on Canny Alogrithm. Science Technology and Engineering, 2007, 7(16): 4067—4069
- [10] 闫丽丽,许长辉,高井祥,等. 基于数学形态学细化算子的改进 Canny 算法研究.测绘科学, 2010; 35(2): 82—84
Yan Lili, Xu Changhui, Gao Jingxiang, et al. Research on Improved Canny Algorithm Based on Thinning Operator of Mathematical Morphology Operators. Science of Surveying and Mapping, 2010; 35(2): 82—84