

文章编号:1001-5078(2007)05-0474-04

基于 Canny 算子的红外图像边缘检测研究

刘怀贤,姚晓东,常 青
(华东理工大学,上海 200237)

摘 要:在红外图像处理中,提出了尺度相乘的 Canny 边缘检测器,定义了尺度相乘函数,该函数是两个尺度检测滤波器响应的乘积。通过确定尺度相乘后的梯度图像,采用非最大值抑制方法得到边缘图像。实验结果表明,该算子提高了传统 Canny 检测算子的性能,具有良好的检测精度,在定位和噪声抑制两方面得到了较好的折中。

关键词:边缘检测;尺度相乘;图像处理;Canny 算子

中图分类号:TP751.1;TP319.41 **文献标识码:**A

Study of Infrared Image Edge Detection Based on Canny Operator

LIU Huai-xian, YAO Xiao-dong, CHANG Qing
(East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: A Canny edge detector by scale multiplication is proposed in infrared image processing, a scale multiplication function is defined as the product of the responses of the detection filter at two scales. Using the non-maximal suppression method, the edge map is obtained by confirming the gradient map of the scale multiplication. It can be demonstrated that the performance of the traditional Canny detection operator is improved through the experiment and the detection accuracy is better. A good trade-off effect can be attained at the localization and the noise suppression.

Key words: edge detection; scale multiplication; image processing; Canny operator

1 引 言

边缘是图像最基本的特征,在机器视觉领域,人们对边缘检测开展了大量的研究,并取得了一系列成果。在数字图像处理中,有很多算法是用来检测平面图像中物体边缘的^[1-6],最常用的方法则是利用图像的一阶或二阶导数,然后取局部极值或零交叉点来得到边缘图像。Canny^[1]首次提出了众所周知的边缘检测的三大准则:好的信噪比、好的定位性能、对单一边缘仅有唯一响应,并指出孤立阶跃边缘的最佳检测器是高斯分布函数的一阶导数。

然而,在对红外图像进行边缘检测时,由于红外图像具有低对比度、低信噪比等特点,传统的边缘检测方法应用到红外图像上,难以得到理想的边缘图像。因此,要想很好的检测出红外图像的边缘,必须

提高其检测后的信噪比。

在边缘检测器的准则方面,Canny^[1]和 Koplowitz 等^[2]都做出过相应的工作,在其工作的基础上,本文定义了尺度相乘的检测准则。通过理论分析,证明了尺度相乘后的算子提高了红外图像边缘检测的信噪比;实验仿真也可以说明,用尺度相乘的算子所得到的检测效果比单尺度算子的检测效果要好,它具有两个相乘的算子在其单尺度下的优点。

2 Canny 边缘检测器原理

假设 FIR 滤波器为 $f(x)$,其边界为 $[-T, T]$ 。检测信号为含噪声信号: $w(x) = g(x) + n(x)$,其中,

作者简介:刘怀贤(1978-),男,研究生,主要研究方向是模式识别及图像处理。E-mail:weibei10@163.com

收稿日期:2006-09-13

$n(x) \sim N(0, \sigma^2)$ 是高斯白噪声, $g(x)$ 是理想信号。 $g(x)$ 对 $f(x)$ 的响应为 $H_g(x) = \int_{-T}^T g(x-t)f(t)dt$, $n(x)$ 的响应为 $H_n(x) = \int_{-T}^T n(x-t)f(t)dt$, $w(x)$ 的响应为 $H_w(x) = H_g(x) + H_n(x)$ 。考虑到边缘为 $H_w(x)$ 的局部极值, Canny^[1] 给出了评估边缘检测器的三准则。

2.1 好的信噪比

好的信噪比 (signal-to-noise, SNR) 准则, 即将非边缘点判为边缘点的概率要低, 将边缘点判为非边缘点的概率要低。其数学表达式为:

$$\text{SNR} = \left| \int_{-T}^T E(-x)f(x)dx \right| / \left(\sigma_n \sqrt{\int_{-T}^T f^2(x)dx} \right) \quad (1)$$

其中, $E(x)$ 代表边缘; σ_n 是高斯噪声的均方根。信噪比高, 则边缘提取质量好。

2.2 好的定位性能

检测到的边缘应当尽可能的接近实际边缘的中心。Canny 给出了定位性能公式:

$$L = \left| \int_{-T}^T E'(-x)f'(x)dx \right| / \left(\sigma_n \sqrt{\int_{-T}^T f'^2(x)dx} \right) \quad (2)$$

其中, $E'(x)$ 和 $f'(x)$ 分别为 $E(x)$ 和 $f(x)$ 的一阶导数。

2.3 单边响应

单边响应准则, 即单个边缘产生的多个响应的概率要低, 并且虚假边缘的响应应得到最大抑制。这要求在 $f(x)$ 对噪声的响应中, 两个相邻最大值间的距离为 $x_{\max}(f)$, $f'(x)$ 的零交叉点平均距离为 $x_{zc}(f)$ 。两者间的关系为:

$$x_{\max}(f) = 2x_{zc}(f)$$

其中, $x_{zc}(f) = \pi \sqrt{\int_{-T}^T f'^2(x)dx} / \sqrt{\int_{-T}^T f''^2(x)dx}$ (3)

Canny 认为最佳边缘检测器应当在单边响应的限制下, 使得 SNR 和 L 的乘积最大化。但 Demigny^[3] 指出低虚假边缘响应准则并不是本质所在, 并进一步证明这种影响可以通过阈值选取来大大削减, 好的滤波器可以仅优化 SNR 和 L 的乘积就能得到。

3 尺度乘积分析

Canny 检测方法也可以认为先用高斯分布函数平滑图像, 再对平滑后的图像求一阶导数。滤波时就会设计到滤波器的尺度问题。大尺度的滤波器虽能最大程度地滤出噪声, 但同时会使边缘模糊, 使得

检测出的边缘会偏离实际边缘, 并且随着尺度的增加, 这种现象越是明显。小尺度滤波后检测出的边缘定位准确, 但受噪声的影响, 会产生较多的虚假边缘, 尺度越小, 虚假边缘就越多。用单一尺度检测时, 不能较好地做到在定位和噪声间进行折中。考虑到大小尺度的优缺点, 本文提出了尺度相乘的方法。

对于阶跃形边缘, Canny 推导出的最优边缘检测器的形状与高斯函数的一阶导数类似, 因此 Canny 边缘检测器就是由高斯函数的一阶导数构成。

3.1 尺度相乘

我们用一小尺度 σ_1 和一大尺度 σ_2 来检测阶跃边缘。两个尺度下阶跃边缘 $g(x)$ 的响应分别为 $H_w^{\sigma_1}(x)$ 和 $H_w^{\sigma_2}(x)$, 则尺度乘积可定义为 $H_w^{\sigma_1}(x)$ 和 $H_w^{\sigma_2}(x)$ 的乘积, 即:

$$P_w(x) = H_w^{\sigma_1}(x) \cdot H_w^{\sigma_2}(x) \quad (4)$$

由于相邻尺度响应具有相似性, 可以保证相乘后在边缘位置仍具有最大响应。

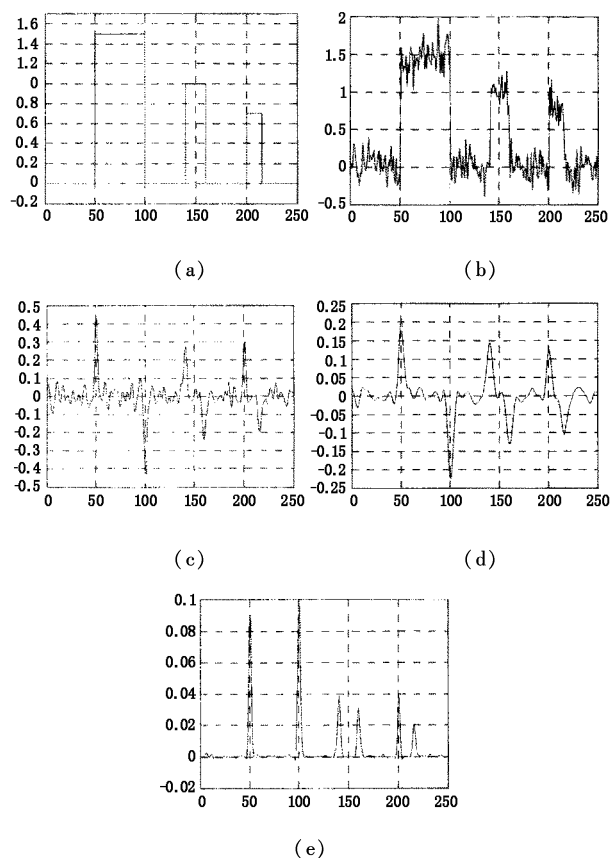


图1 一维阶跃信号及其响应曲线

(a) 阶跃边缘; (b) 含噪阶跃边缘 SNR=15; (c) 尺度 $\sigma_1=1$ 的检测器的响应曲线; (d) 尺度 $\sigma_1=2$ 的检测器的响应曲线; (e) 两不同尺度乘积的响应曲线

图1(a)为一维阶跃边缘, (b)为含噪阶跃边

缘,信噪比为 15,(c)、(d)分为用小尺度和大尺度检测时的响应曲线,可以看出小尺度下滤波器对噪声敏感,(e)为两不同尺度乘积的响应曲线。从图 1 可以看到两尺度相乘滤波能够很好地使边缘得到增强,同时也大大抑制了噪声的影响。可以明显地看出,在边缘点附近,两尺度响应的乘积具有局部最大值。

3.2 尺度相乘的检测准则

与 Canny 定义的准则相似,对 SNR 准则我们考虑 $P_w(x)$ 在 $x=0$ 处的 SNR。如果输入没有噪声的信号 $g(x)$,则 $P_w(0) = H_g^{\sigma_1}(0) \cdot H_g^{\sigma_2}(0)$;如果输入为噪声信号 $n(x)$, $P_w(0) = H_n^{\sigma_1}(0) \cdot H_n^{\sigma_2}(0)$ 。我们

定义 SNR 准则为: $SNR' = \frac{|H_g^{\sigma_1}(0) \cdot H_g^{\sigma_2}(0)|}{\sqrt{E[(H_n^{\sigma_1}(0) \cdot H_n^{\sigma_2}(0))^2]}}$,

由于 $H_g^{\sigma}(0)$ 是不随尺度 σ 变化的并且 $H_g^{\sigma}(0) = A$, 则:

$$SNR' = A^2 / \sqrt{E[(H_n^{\sigma_1}(0) \cdot H_n^{\sigma_2}(0))^2]} \quad (5)$$

$H_n^{\sigma_1}(0)$ 和 $H_n^{\sigma_2}(0)$ 分别用 k_1 和 k_2 表示,Canny^[1]指出 $H_n^{\sigma}(0)$ 是高斯随机变量,并且有 $E[H_n^{\sigma}(0)] = \sigma_n^2 \int f^2(x) dx$,所以 k_1 和 k_2 的联合分布概率可表示为:

$$Pr(k_1, k_2) = \frac{1}{2\pi s_1 s_2 \sqrt{1-\rho^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left(\frac{k_1^2}{s_1^2} - \frac{2\rho k_1 k_2}{s_1 s_2} + \frac{k_2^2}{s_2^2}\right)\right\} \quad (6)$$

$$s_1^2 = \sigma_n^2 \int f_{\sigma_1}^2(x) dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sigma_1} \cdot \sigma_n^2, \text{同理 } s_2^2 = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sigma_2} \cdot \sigma_n^2, k_1$$

和 k_2 的相关系数为:

$$\rho = \frac{\int f_{\sigma_1}(x) f_{\sigma_2}(x) dx}{\sqrt{\int f_{\sigma_1}^2(x) dx} \sqrt{\int f_{\sigma_2}^2(x) dx}} = \sqrt{\frac{2^3 \sigma_1^3 \sigma_2^3}{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^3}} \quad (7)$$

则 $E[|k_1 \cdot k_2|] = 2s_1 s_2 (\cos\alpha + \alpha \sin\alpha) / \pi$, $\sin\alpha = \rho$, $-\pi/2 < \alpha < \pi/2$,最终可得:

$$SNR' = \frac{2A^2}{\sigma_n^2} \sqrt{\frac{\sigma_1 \sigma_2}{\pi(1-\rho^2)}} \quad (8)$$

当 $\beta = \sigma_2 / \sigma_1$ 固定时, ρ 为常数。可以证明,当 $A / \sigma_n > C$ (C 为一常数) 且为固定时, SNR' 将优于两单尺度

下各自的 SNR,其中, $C = \sqrt{\frac{(1-\rho^2)\sqrt{\pi}}{2\sigma_1}}$ 。

3.3 二维图像的尺度相乘

在二维图像中,我们用 $f_x^{\sigma}(x, y)$ 和 $f_y^{\sigma}(x, y)$ 分别

表示 x 和 y 方向上的滤波器,对图像 I 的响应分别为 $H_x^{\sigma}(x, y)$ 和 $H_y^{\sigma}(x, y)$,则乘积函数定义为:

$$P_{xl} = H_x^{\sigma_1}(x, y) \cdot H_x^{\sigma_2}(x, y) \quad (9)$$

$$P_{yl} = H_y^{\sigma_1}(x, y) \cdot H_y^{\sigma_2}(x, y) \quad (10)$$

由于邻近尺度响应具有相似性,对边缘点 (x_0, y_0) , $H_x^{\sigma}(x_0, y_0)$ 在 σ_1 和 σ_2 的邻近处的符号相同, $H_y^{\sigma}(x_0, y_0)$ 在 σ_1 和 σ_2 的邻近处的符号也相同,所以 $P_{xl}(x_0, y_0)$ 和 $P_{yl}(x_0, y_0)$ 均为非负值。在梯度方向上运用非极大值抑制时,会发现方向信息已经丢失了。我们必须从 $H_x^{\sigma_1}(x_0, y_0)$ 和 $H_y^{\sigma_1}(x_0, y_0)$ 中恢复方向信息。在非边缘点处,如果 $P_{xl}(x, y) < 0$ ($P_{yl}(x, y) < 0$),认为噪声点,则将其置 0。点 (x, y) 的幅值和方向角可定义为:

$$M_I(x, y) = \sqrt{P_{xl}(x, y) + P_{yl}(x, y)} \quad (11)$$

$$\alpha(x, y) = \arctan\left(\frac{\text{sgn}(H_y^{\sigma_1}(x, y)) \cdot \sqrt{P_{yl}(x, y)}}{\text{sgn}(H_x^{\sigma_1}(x, y)) \cdot \sqrt{P_{xl}(x, y)}}\right) \quad (12)$$

$M_I(x, y)$ 在方向 $\alpha(x, y)$ 上具有局部极值,梯度方向给出后,就可以应用非最大值抑制法进行边缘提取。

4 实验结果

采用本文方法,在尺度上让 $\sigma_2 = \beta \sigma_1$,通过大量的实验得出在系数 $\beta = 2$ 时效果最好。系数太小得不到两个不同尺度的足够信息,系数太大则会降低两个尺度的相关性。在实验中给出一组合成图像,这些合成图像的边缘是已知的,可用来测试边缘检测的性能。图 2 中,(a)为合成图像,灰度级范围为 0~255,(b)为含噪合成图像,噪声为标准方差为 25 的高斯白噪声,(c)、(d)分别为用尺度为 1 和 2 的 Canny 算子所检测出来的边缘图像,(e)为用本文方法检测出的边缘图像。可以看到,改进后的方法去除了大部分的虚假边缘并得到了非常高的边缘定位精度,从而图像的边缘被精确地检测出来。

为了能客观地比较合成图像的边缘检测结果,我们采用检测图像的品质系数^[7] R 来评估算法的性能:

$$R = \frac{1}{\max\{I_I, I_A\}} \sum_{i=1}^{I_A} \frac{1}{1 + \alpha d^2(i)} \quad (13)$$

其中, I_I 是真实边缘的数目; I_A 是检测出的边缘的数目; $d(i)$ 表示第 i 条边缘与响应的检测边缘的距离; α 为比例常数,可取值为 1/9,当精确地检测边缘时 $R = 1$ 。对于宽边缘和噪声边缘,品质因子的值较

低,反之则品质因子较高。因此, R 越大检测效果越好。

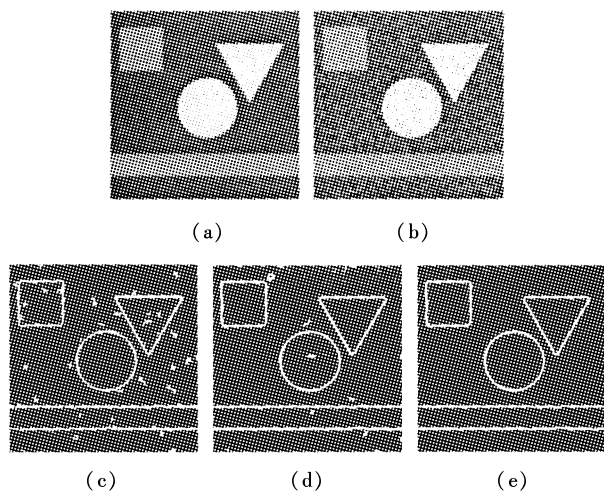


图2 合成图像及其响应结果

(a)合成图像;(b)含噪合成图像,噪声为标准方差为25的高斯白噪声;(c)用小尺度的 Canny 算子得到的边缘图像;(d)用大尺度 Canny 算子得到的边缘图像;(e)本文算子得到的边缘图像

表1 为图2中边缘图像的品质系数表。从表中可以看出,用单一小尺度检测时,由于受噪声影响比较大,其品质系数较低。用本文方法,由于兼顾了两个不同尺度的优点,其品质系数最高。

表1 图2中边缘图像的品质系数

边缘图像	图2(c)	图2(d)	图2(e)
R	0.8056	0.9003	0.9732

在图3中,测试对象为 256×256 大小的红外图像,灰度级范围为 $0 \sim 255$,加入标准方差为15的高斯白噪声,可以看出,在Canny算子小尺度下,图像

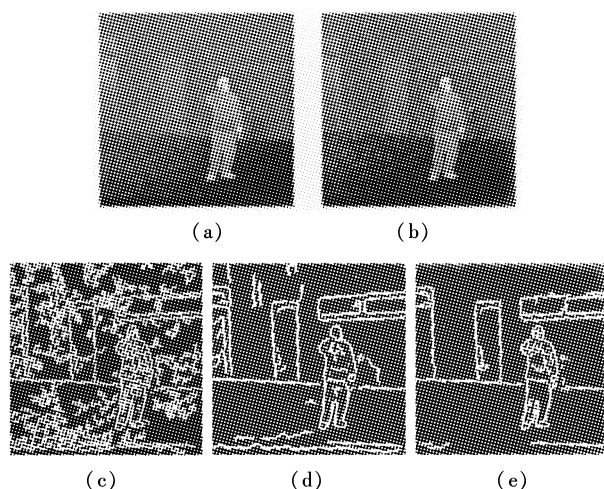


图3 红外图像及其响应结果

(a)原始图像;(b)含噪图像,噪声为标准方差为15的高斯白噪声;(c)用 Canny 方法得到的边缘图像, $\sigma=1$;(d) Canny 方法得到的边缘图像, $\sigma=2$;(e)用本文方法得到的边缘图像

的边缘绝大部分被检测出来,但由于噪声的影响,同时也产生了大量的虚假边缘,在大尺度下,由于具有较强的去噪能力,使部分真实边缘漏检;图3(e)为用改进后的算法处理得到的边缘图像,可以看到,人物脸部细节也被检测出来。改进后的算法,在最大程度检测出尽可能多的边缘的同时,噪声也得到了良好的抑制。

5 结 论

本文在尺度相乘基础上改进了传统的 Canny 算子,采用两个不同尺度滤波器的响应乘积作为一个新的尺度响应。利用滤波响应在邻近尺度上的相似性,给出了尺度相乘后的幅值和新的方向角,仍旧用非最大值抑制方法提取出边缘图像。理论分析和仿真实验均可以说明,改进后的算子的信噪比明显优于两单尺度下各自的信噪比。尺度相乘后的算子具有良好的噪声抑制作用,同时还兼顾了小尺度定位准确的优点。因此,改进后的算子提高了红外图像边缘检测的性能。

参考文献:

- [1] J Canny. A computational approach to edge detection [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679 - 698.
- [2] J Koplowitz, V Greco. On the edge location error for local maximum and zero-crossing edge detectors [J]. IEEE Transaction on. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 12(16): 1207 - 1212.
- [3] D Demigny. On optimal linear filtering for edge detection [J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2002, 7(11): 728 - 737.
- [4] Y Yitzhaky, E Peli. A Method for objective edge detection evaluation and detector parameter selection [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 8(25): 1027 - 1033.
- [5] J H Elder, S W Zucker. Local scale control for edge detection and Blur Estimation [J]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 6(20): 699 - 716.
- [6] G Deng, L W Cahill. An adaptive Gaussian filter for noise reduction and edge detection [J]. IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 1994: 1615 - 1619.
- [7] William K. Pratt. 数字图像处理 [M]. 邓鲁华, 张延恒, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2005: 330 - 332.