

边缘检测器性能的客观定量评价¹

李向吉 丁润涛 蔡 靖

(天津大学电子信息工程学院 天津 300072)

摘 要 本文提出了一种新的边缘检测器的客观评价方法。该方法既能反映边缘检测器对图像轮廓的检测性能,又能对图像细节处的边缘检测能力进行正确的评价。由于该方法将整个测试图区分成三个不同性质的区域,不同的区域用不同的参数来反映边缘检测器的不同性能。因此,能准确反映噪声对边缘检测器的影响。同时,它将整个边缘检测器的性能分解成边缘提取能力和噪声抑制能力两部分,便于我们全面、准确和客观地评价不同特性的边缘检测器,以适应不同应用场合的需要。

关键词 边缘检测器,客观定量评价法

中图分类号 TP391.41

1 引 言

边缘检测是图像处理和模式识别中的重要课题,已经提出了许多边缘检测方法^[1-3]。必须有一个客观的评价方法去比较它们的性能。然而,由于这些算法往往是基于不同的机理和数学理论的,这就给客观评价带来了很大的困难。为了能正确评价边缘检测算法的性能,应考虑以下几个因素:边缘连续性和漏检的影响、边缘的定位精度和边缘的粗细以及由于噪声引起的虚假检测的影响。目前,已有一些客观评价方法^[4-6]被提出,它们都是围绕如何定量描述上述几个因素而展开的,但大多只能部分或近似地描述这些因素,不能对边缘检测器的性能进行全面和准确的评价。

Pratt 提出的品质因素 (figure of merit) 法^[4]是一种具有代表性的客观评价方法,是一个较全面的评价参数。但它存在以下几个缺陷:(1)Pratt 采用的测试图只代表了阶跃状边缘,只能反映边缘检测器对图像较大轮廓的检测,而不能对图像细节处的边缘进行正确的评价。(2)从品质因素中不能看出边缘检测器的边缘提取能力和噪声抑制能力的高低,只能得出一个较模糊的评价。

2 新的客观评价方法

2.1 测试图的改进

理想边缘大致可分为阶跃状边缘和屋顶状边缘两类。若设边缘检测器所使用的窗口的宽度为 M , 则:

定义 1 理想阶跃状边缘是位于邻接的、有显著不同灰度值的、两个恒值区域之间,并且这两个恒值区域的宽度均大于(或等于)窗口宽度 M 。如图 1(a) 所示。

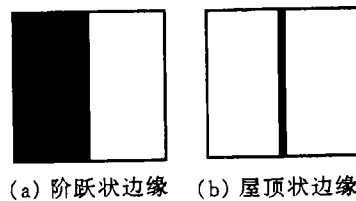
定义 2 理想屋顶状边缘是指它位于灰度值从增加到减少(或减少到增加)的变化转折点,并且其灰度发生变化所持续的宽度小于窗口宽度 M 。如图 1(b) 所示。

阶跃状边缘是图像较大的灰度区的变化,反映了图像的轮廓;而屋顶状边缘处于图像的细节处,体现了图像的细节。因此,采用了如图 1 所示的两幅测试图以期正确评价边缘检测

¹ 1998-01-04 收到, 1998-11-30 定稿

国家自然科学基金(编号 69772041)和高校博士学科点基金(编号 98005610)资助项目

器性能。实际边缘的灰度可能有各种分布规律, 可用边缘增强算法^[7-8]使之变成近似理想边缘。



(a) 阶跃状边缘 (b) 屋顶状边缘

图 1 测试图

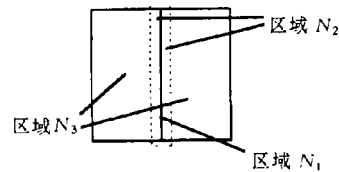


图 2 测试图的划分

2.2 品质因素的改进

好的评价方法应能准确反映边缘检测器的边缘连续性、边缘移位、边缘的粗细和噪声虚检等方面的性能。其中, 前三项属于检测器对图像的边缘提取能力, 而最后一项属于检测器对噪声的抑制能力。因此, 将边缘检测器的性能分解成对图像边缘的提取能力和对噪声的抑制能力两部分。测试图在进行边缘提取后, 可被区分成如图 2 所示的三个区域: 理想边缘区、准边缘区和非边缘区。

定义 3 理想边缘区 (区域 N_1) 定义为理想边缘所形成的区域。

在该区域内, 边缘的连续性体现了边缘检测算子的性能的好坏。边缘连续性参数 CE:

$$CE = N_{1A} / N_{1I}, \quad (1)$$

其中 N_{1A} 为区域 N_1 内实际检测出来的边缘的点数, N_{1I} 为理想边缘的点数。

定义 4 准边缘区 (区域 N_2) 的大小由边缘检测算子所使用的窗口的大小决定。其范围包括从 (理想边缘区左边界 $-[M/2]$) 处到理想边缘区左边界的区域和从理想边缘区右边界到 (理想边缘区右边界 $[M/2]$) 处的区域。 ($[N]$) 为不小于 N 的整数。

在该区域内检测出来的边缘点, 是理想边缘受噪声影响而发生偏移的反映。其与理想边缘点的距离体现了边缘发生偏移的程度。用边缘移位参数 ES 来度量某点发生偏移的程度:

$$ES = 1 / (1 + d_i^2), \quad (2)$$

其中 d_i 为在区域 N_2 内, 第 i 个检测到的边缘点与理想边缘点的距离。

由于噪声的影响, 将导致边缘发生错检。图 3 列出了几种边缘错检的形式。因此, 在评价某种边缘检测器的边缘提取能力时, 对这几种情形都应给出准确的评估。可为图 1 所示的测试图的第 j 行 ($0 \leq j \leq N$) 定义等效边缘点 Q_j 。

$$Q_j = \begin{cases} \frac{1}{N_{1A}^j + N_{2A}^j} \sum_{i=1}^{N_{1A}^j + N_{2A}^j} \frac{1}{1 + d_i^2}, & N_{1A}^j + N_{2A}^j \neq 0; \\ 0, & N_{1A}^j + N_{2A}^j = 0; \end{cases} \quad (3)$$

其中 N 为测试图的行数, N_{1A}^j 和 N_{2A}^j 分别为理想边缘区和准边缘区的第 j 行内实际检测到的边缘点数。等效边缘点的物理意义如下: (1) 当理想边缘区检测到边缘点, 而准边缘区没有检测到边缘点时, 此时是图 3(a) 所示的理想边缘, 其 Q_j 值为 1; (2) 当理想边缘区和准边缘区都没有检测到边缘点时, 此时是图 3(b) 所示的断裂边缘, 在断裂处 Q_j 值为 0; (3) 当理想边缘区没有检测到边缘点, 而准边缘区检测到边缘点时, 此时是图 3(c) 所示的偏

移边缘, 偏移点有助于边缘的形成, 它对边缘的贡献由其移位参数 ES 来决定, 因此, 其 Q_j 值小于 1; (4) 当理想边缘区和准边缘区都检测到边缘点时, 此时是图 3(d) 所示的模糊(或加粗的)边缘, 偏移点对边缘点有负面的影响, 其 Q_j 值也小于 1。

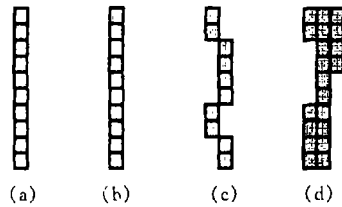


图 3 几种错误检测的边缘
(a) 理想的边缘 (b) 断裂的边缘 (c) 偏移的边缘 (d) 模糊的边缘

因此沿着理想边缘, 逐行计算总的等效边缘点 Q_j , 就可得出边缘提取力 EE:

$$EE = \frac{1}{N_{1I}} \sum_{j=1}^{N_{1I}} \left[\frac{1}{N_{1A}^j + N_{2A}^j} \sum_{i=1}^{N_{1A}^j + N_{2A}^j} \frac{1}{1 + d_i^2} \right] \quad (4)$$

如果仅考虑理想边缘区, 边缘提取力 EE 将退化成边缘连续性参数 CE。

定义 5 非边缘区(区域 N_3) 是除去理想边缘区和准边缘区以外的全部区域。在非边缘区内, 检测到的边缘是由噪声引起的虚检。因此, 在非边缘区体现了边缘检测器的噪声抑制能力 FE。用等效边缘点在全部分实际检测到的边缘点中所占的比例来定义噪声抑制力 FE:

$$FE = \frac{1}{N_{1A} + N_{2A} + N_{3A}} \sum_{j=1}^{N_{1I}} \left[\frac{1}{N_{1A}^j + N_{2A}^j} \sum_{i=1}^{N_{1A}^j + N_{2A}^j} \frac{1}{1 + d_i^2} \right], \quad (5)$$

其中 N_{3A} 为非边缘区内实际检测到的边缘点数。

对测试图进行综合评价, 须同时考虑边缘提取力和噪声抑制力。综合评价参数 R :

$$R = K \cdot EE + (1 - K) \cdot FE, \quad (6)$$

其中 K 是控制参数。通过调节 K 可控制边缘提取力 EE 和噪声抑制力 FE 在评价边缘检测器性能中的比重。根据不同应用场合对边缘提取力和噪声抑制力的不同需要, 可选择不同的 K 值, 以获得最佳的综合评价参数, 一般 K 可取 0.5。

3 计算机模拟实验

(1) 施加范围为 0% ~ 20% 的正负脉冲噪声。非线性预滤波方法^[2]是目前对噪声图象进行边缘提取的一种较为流行的方法。这里选用 5×5 多层中值滤波器^[9] (MMF) 和 3×3 中值滤波器 (MED) 作为预滤波器, 拉普拉斯算子作为边缘检测算子。同时还选用 Lee 的最小钝化形态边缘提取算子 (Lee)^[3] 和膨胀型抗噪形态差分算子 (MNF)^[10]。测试结果如图 4 和图 5 所示, 其中横轴为脉冲噪声的概率, 纵轴为边缘检测的百分比。

(2) 施加高斯噪声, 信噪比 $\text{SNR}^{[6]}$ 范围为 5:1 ~ 100:1。除了上述四种边缘检测器以外, 还增加了 Sobel 算子 (Sobel)。测试结果如图 6 和图 7 所示, 其中横轴为高斯噪声的 σ , 纵轴为边缘检测的百分比。

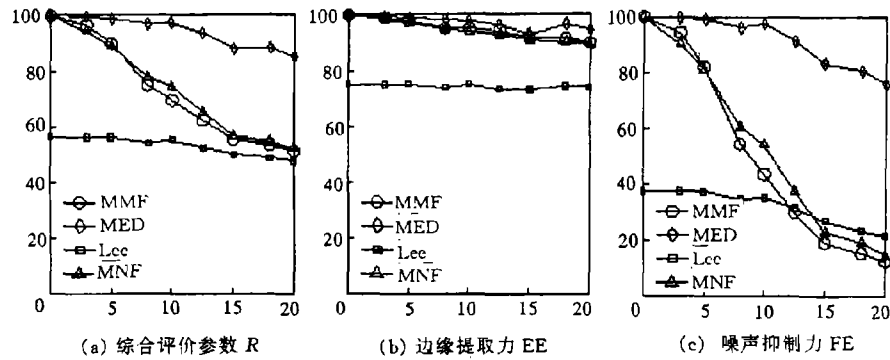


图 4 新的客观评价方法对各边缘检测器的图像轮廓检测性能的比较 (脉冲噪声下)

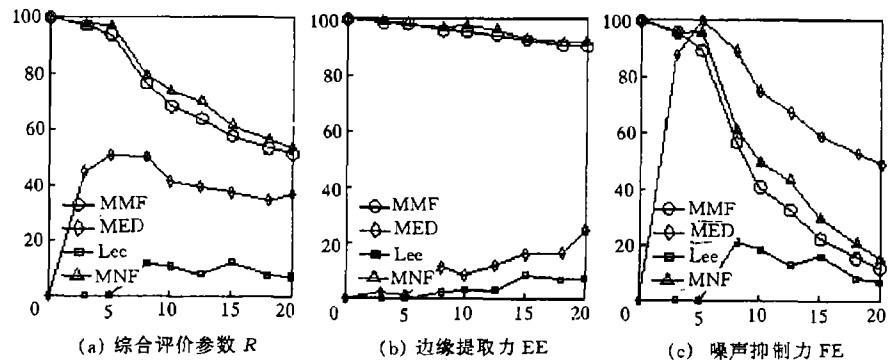


图 5 新的客观评价方法对各边缘检测器的图像细节处边缘检测性能的比较 (脉冲噪声下)

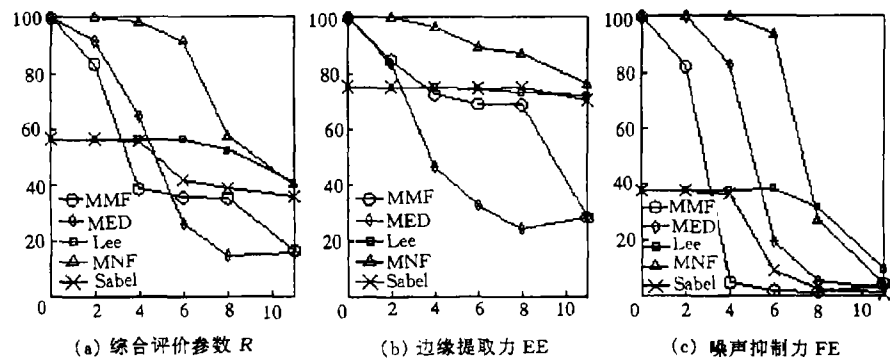


图 6 新的客观评价方法对各边缘检测器的图像轮廓检测性能的比较 (高斯噪声下)

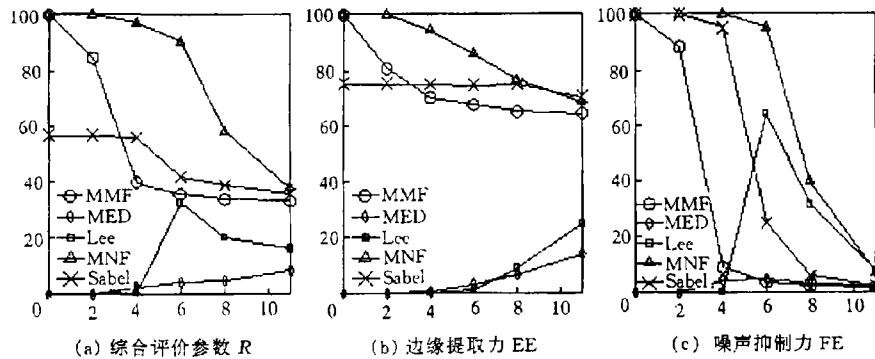


图7 新的客观评价方法对各边缘检测器的图像细节处边缘检测性能的比较 (高斯噪声下)

可以看出 (1) 在对图像细节处边缘进行检测时, MED 和 Lee 的性能极差, 即使无噪声存在时, 也不能提取边缘。原因是中值和均值运算丢失和模糊了图像的细节。因此, 这两种算子的三个参数的曲线无意义, 纯粹是由噪声引起的随机波动。(2) 在对图像轮廓进行检测时, Lee 的性能不好, 这是因为它提取的边缘是双像素, 即边缘较粗, 而这里定义的理想边缘是单像素。因此, 新的客观评价方法能够反映边缘的粗细。同时还可看出, 不管是在脉冲噪声下还是在高斯噪声下, 它的三个参数的曲线相当平稳。这是由于它具有同时滤除高斯和脉冲噪声的能力。因此, 在不考虑边缘的粗细时, 它的性能是相当不错的。(3) 在对图像轮廓进行检测时: 由于 MED 对脉冲噪声抑制力最强 (见图 4(c)), 而对高斯噪声的平滑能力有限 (见图 5(c)), 因此, 在脉冲噪声下, 它的性能最佳。而在高斯噪声下, 效果不好。(4) 在对图像轮廓和细节处边缘检测时, MMF 和 MNF 均能取得满意的效果。一般地, 后者的性能都要好于前者的性能。(5) Sobel 算子具有一定的平滑高斯噪声的能力, 因此除了其提取的边缘较粗 (双线) 以外, 它的性能要优于中值预滤波和多层中值预滤波。(6) 新的客观评价方法由于将边缘检测器的性能分解成边缘提取力 EE 和噪声抑制力 FE 两部分, 所以不仅能由综合评价参数 R 看出 MED 的性能比 MMF 的性能好, 而且还能分析出造成这种现象的原因, 即 MMF 对脉冲噪声抑制力不如 MED 的缘故 (即它们的边缘提取力 EE 相差并不大, 真正变差的是 FE)。综上所述, 在噪声存在的情况下, MNF 的性能是最佳的。

4 结 论

分析和计算机模拟实验表明新的客观评价方法与 Pratt 的品质因素法相比, 具有以下优点: (1) 能同时评价边缘检测器在检测图像轮廓和检测图像细节处的边缘时的性能。(2) 能同时准确反映边缘连续性、边缘移位、边缘粗细和噪声虚检等情况。(3) 由于该方法将整个测试图区分成三个不同性质的区域, 不同的区域用不同的参数来反映边缘检测器的不同性能, 因此, 能准确区分噪声在不同区域对边缘检测器的影响。(4) 由于该方法将整个边缘检测器的性能分解成边缘提取力和噪声抑制力两部分, 这就便于我们全面、准确和客观地评价具有不同特性的边缘检测器。(5) 根据不同应用场合对边缘提取力和噪声抑制力的不同需要, 通过调节它们在评价边缘检测器性能中的比重, 能获得最佳的综合评价参数。

参 考 文 献

- [1] Jain A K. Fundamentals of Digital Image Processing. Englewood, Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1989.
- [2] Yoo J, Bouman C A, Delp, E J, *et al.* The nonlinear prefiltering and difference of estimates approaches to edge detection: Applications of stack filters, CVGIP, 1993, 55(2): 140-159.
- [3] Lee J S J, Haralick R M, Shapiro L G. Morphological edge detection, IEEE Trans. on Robotics Automat, 1987, RA-3(2): 142-156.
- [4] Abdou I E, Pratt W K. Quantitative design and evaluation of enhancement/thresholding edge detectors, Proc. IEEE, 1979, 67(5): 753-763.
- [5] Fram J R, Deutsch E S. On the quantitative evaluation of edge detection schemes and their comparison with human performance, IEEE Trans. on Computers, 1975, C-24(6): 616-627.
- [6] Kitchen, L, Rosenfeld A. Edge evaluation using local edge coherence, IEEE Trans. on SMC, 1981, SMC-11(9): 597-605.
- [7] Li Xiangji(李向吉), Ding Runtao(丁润涛). Fuzzy morphological operators to edge enhancing of images, Proc. of International Conference on Signal Processing, ICSP'98, Beijing: 1998, 1017-1020.
- [8] Li Xiangji(李向吉), Ding Runtao. Morphological edge enhancing filtering of images, in International Symposium on Multispectral Image Processing, Proceedings of SPIE, vol.3545, 1998, 262-265.
- [9] Arce G R, Foster R E. Detail-preserving ranked-order based filters for image processing, IEEE Trans. on ASSP, 1989, ASSP-37(1): 83-98.
- [10] 李向吉, 丁润涛. 脉冲噪声图像中的数学形态边缘检测器, 中国图形图像学报, 1998, 3(11): 903-906.

OBJECTIVE AND QUANTITATIVE EVALUATION OF
EDGE DETECTORS

Li Xiangji Ding Runtao Cai Jing

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, 300072)

Abstract This paper presents a new method to evaluate edge detectors objectively and quantitatively. This method is capable of showing correctly the performance of detecting the contour of images, as well as of detecting the fine details of images. The effects of noises on edge detectors can be accurately reported by partitioning the whole test image into three areas having different characteristics and then, at different areas, using different parameters to match the different performance of edge detectors. At the same time, the whole performance of edge detectors is divided into two parts: the edge-extracting ability and the noise-attenuating ability. So, the edge detectors, having different characteristics, can be evaluated comprehensively, accurately and objectively, and be applied to different cases.

Key words Edge detectors, Objective and quantitative evaluation

李向吉: 男, 1969 年出生, 博士, 从事的研究领域为通信、语音和图像处理; 目前已(或待)发表学术论文十余篇。

丁润涛: 男, 1938 年出生, 天津大学电信学院院长、教授、博士生导师, 多年来一直从事信号与信息处理、图像处理、电视与视频技术等方面的研究, 曾发表学术论文五十余篇, 并主持了多项国家自然科学基金、高校博士点基金项目等的研究。

蔡 靖: 男, 1973 年出生, 博士生, 目前从事图像处理研究。