

基于边缘视觉特征描述的自适应多尺度小波边缘检测方法¹

杨 炬 梁德群

(西安交通大学电子与信息工程学院图象所 西安 710049)

摘 要 本文从人类视觉的特点出发,提出了一种新的图象边缘特征描述.根据该特征描述,定义了邻域的有效边缘测度,以作为边缘复杂程度的度量,并以此来调整多尺度小波边缘检测中的尺度参数.最后给出了相应的实验比较结果.

关键词 计算机视觉,边缘特征,小波变换,边缘检测

中图分类号 TP391.7, TN911.7

1 引 言

图象的边缘检测在计算机视觉中有着重要的意义.经典的边缘检测方法有 Marr-Hildreth^[1]边缘检测方法(拉普拉斯-高斯算子,即 LOG 算子)和 Canny^[2]最优算子边缘检测方法.多尺度的思想始于 Witkin^[3],并随着小波的研究得到更深入的发展, Mallat^[4]从小波变换的角度将文献 [1, 2] 的思想统一起来.文献 [5] 利用 M 通带的小波变换分析图象在不同尺度、方向下的边缘情况,通过非线性的能量算子区分有效边缘和不必要的细节,最后进行多尺度边缘综合.该方法是从信号奇异性的角度分析边缘,在判定有效边缘时没有很好地考虑边缘本身的特征;在边缘综合时,也没有给出一个明确的算法,而多尺度边缘综合一直是多尺度思想中较难解决的问题.文献 [6] 从二维信号的角度构造最优函数,该函数在边缘位置产生极值,以此来定位边缘的准确位置.该方法需要使用 LOG 算子预检测边缘,而如何确定 LOG 算子的尺度参数却是一个困难的问题;另外,该方法最后也需要综合不同尺度下的边缘,因而不可避免地遇到边缘综合的困难;同时该方法在实现上也是比较复杂的.

在众多的多尺度边缘检测中,存在两个问题:(1)边缘仅定义为信号的奇异性表现,事实上,图象的边缘是视觉的一种反映,与人的视觉特点、先验知识紧密相关,而不是简单的信号奇异性,它同时还包括高层知识的描述.因此需要从人的视觉特征这一角度重新描述边缘的特征.(2)滤波尺度参数的选择.多尺度边缘综合的本质就是要解决这个问题.滤波尺度决定着抑制噪声与边缘精确定位之间的折衷,将直接影响边缘检测效果.本文不需要检测各尺度下的边缘情况,而是直接从人的视觉特征出发,描述边缘的特征,并定义象素点在邻域内的有效边缘测度,作为对该象素点进行滤波的尺度调整依据,以解决自适应多尺度边缘检测中的尺度确定问题.

2 边缘特征描述

人类的视觉研究表明,“图象知觉主要取决于客观刺激物的相互关系,也取决于主体的能动状态”^[7].格式塔心理学派^[7]指出,图形知觉不是图形各部分简单的相加,而是由各部分有机组成的.人类的图形识别具有以下几个特点:(1)图形与背景的对比鲜明时,图形知

¹ 1997-06-28 收到, 1997-12-16 定稿

觉比较稳定。(2) 图形在空间上比较接近的部分容易形成一个整体。(3) 在一个按一定顺序组成的图形中, 如果有新的成分加入, 则这些新的成分容易看做是原来图形的继续。(4) 在视觉的初级阶段, 视觉系统首先会把图形与背景分离出来, 然后才能知觉到图形的细节, 辨认出图形的形状, 也就是说, 首先识别的是目标的大轮廓。(5) 知觉的过程中并不只是被动地接受外界刺激, 同时也主动地认识外界事物, 复杂图形的识别需要人的先验知识作指导。(6) 图形的空间位置、方向影响知觉的结果。

从以上这几点, 我们可以总结出待识别的图象边缘点应具有的特征: (1) 具有较强的灰度突变, 也就是与背景的对比如鲜明。(2) 边缘点之间可以形成有意义的线形关系, 即相邻边缘点之间存在一种有序性。(3) 具有方向特征。(4) 在图象中的空间相对位置。(5) 边缘的类型, 即边缘是阶跃型还是屋脊型。这样, 我们定义坐标为 (i, j) 的边缘点; 其特征描述为

$$E_{ij} = \{g, l, \theta, d, \text{type} | g \in R, 0 \leq \theta \leq \pi, l, d \in Z^+, \text{type} \in \{0, 1\}\},$$

其中 g 表示该边缘点的梯度强度, 它反映图形与背景的对比如程度; l 表示该边缘点所处的线形链的长短, 它反映图形结构上的相关性; θ 是边缘点的方向; d 是边缘点距离其它长链边缘(大轮廓)的距离, 也就是其空间相对位置的反映; type 表明边缘点是阶跃型边缘还是屋脊型边缘, 0 代表阶跃边缘, 1 代表屋脊边缘。

3 不同类型边缘在尺度空间中的变化特征

信号 $f(x)$ 在尺度 s 下的小波变换为

$$Wf(s, x) = f(x) * \frac{d\theta(x/s)}{dx} = f(x) * \psi_s(x) = \frac{1}{s} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-t}{s}\right) dt.$$

$\psi(x)$ 称为分析小波, $\psi_s(x) = (1/s)\psi(x/s)$ 。本文选用三次 B 样条函数 $B^3(x)$ 作为平滑函数 $\theta(x)$, 其一阶导数作为小波函数 $\psi(x)$ ^[1]。

定理 1 令 $0 < \alpha < 1$, 若函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 具有一致的 Lipschitz 指数 α , 当且仅当存在常数 $K > 0$, 对于所有 $x \in [a, b]$, 其小波变换满足: $|W_{2^j} f(x)| \leq K(2^j)^\alpha$, 即 $\log_2 |W_{2^j} f(x)| \leq \log_2(K) + \alpha j$ 。

对于脉冲型边缘, 其 Lipschitz 指数 $\alpha = -1$, 所以小波变换的模值随尺度增大而减小; 对于阶跃型边缘, 其 Lipschitz 指数 $\alpha = 0$, 所以小波变换的模值不随尺度变化而变化; 而对于斜坡和屋脊型边缘, 小波变换的模值的变化同时取决于 α 和相应的 Gauss 平滑方差 σ , 其小波变换的模值随尺度增加而增加^[1]。这样, 得到区分噪声与有效边缘的准则为: (1) 若其小波变换的模值随尺度增加而减小, 则为脉冲型边缘。否则为阶跃型边缘。(2) 脉冲边缘与脉冲噪声可以通过边缘点的梯度和边缘点所处的链长来区分。一般来讲, 噪声相对于有效边缘往往是比较弱的, 同时由于噪声的随机性, 其相邻点链在一起的可能性较小, 而脉冲型边缘具有结构上的有序性, 具有一定的链长。

4 自适应小波变换中尺度参数的调整

进行边缘检测时, 滤波尺度参数的选取取决于当前像素点所处区域是平滑区还是边缘区, 如果是平滑区, 则取大的滤波尺度, 以抑制噪声; 如果是边缘区, 则取小的滤波尺度, 以准确定位边缘。

4.1 判断平滑区和边缘区

计算 $s = 1, s = 2$ 两个尺度下的小波变换结果 M^1 和 M^2 , 对于坐标为 (i, j) 的像素点, 在两个尺度下的小波变换模值分别为 M_{ij}^1 和 M_{ij}^2 , 若满足: $M_{ij}^1 \geq 2M_{ij}^2$, 且 $M_{ij}^1 < T_m$, 则判断为脉冲噪声。其中 T_m 是阈值, T_m 的取值可以去掉一部分噪声和一些弱的细节, 其取值受图象中噪声强度的影响, 若图象噪声强度较弱, 则 T_m 较小, 否则 T_m 较大。假设图象中噪声分布为 $N(0, \sigma^2)$, 可取 $T_m = 2\sigma$, 这样可以去掉较多噪声点。

将整幅图象中所有这样的脉冲噪声去掉, 然后将剩下的 M^1 中的局部极值点 (候选边缘点) 进行线性连接, 得到各候选边缘点的链长 l 。我们将链长大于某一阈值 T_l 的候选边缘点定义为大轮廓的边缘点, 然后计算其它候选边缘点距离最近的大轮廓边缘点的距离, 得到边缘点特征中的 d 参量, 候选边缘点的方向参数 θ 使用文献 [1] 中的方法来计算。这样, 可以得到整幅图象中所有候选边缘点的边缘特征。

定义 1 (有效边缘测度) 令 R 为图象中以候选边缘点 (i, j) 为中心的邻域集合, l_{ij}, g_{ij} 分别是 (i, j) 的链长和梯度值, μ 为定义在 R 上的有效边缘测度:

$$\mu = \begin{cases} 1, & l_{ij} \geq T_l; \\ f\left(\sum_{(i,j) \in R} g_{ij}\right), & l_{ij} < T_l; \end{cases}$$

其中 T_l 是链长阈值, T_l 的取值受图象中的大轮廓的链长影响, 若图象中的大轮廓较长, 则 T_l 较大, 否则 T_l 较小, 一般取 $T_l = 5$ 就比较理想。 $f(\cdot)$ 是非线性归一函数, $0 \leq f \leq 1$, 令 g_{\max} 为整图中 $\sum_{(i,j) \in R} g_{ij}$ 的最大值, 定义 $f(\cdot)$ 为

$$f(x) = \begin{cases} (x/g_{\max})^2, & d \geq T_d; \\ x/g_{\max}, & d < T_d; \end{cases}$$

其中 d 为像素点 (i, j) 的距离特征, T_d 为距离阈值, 一般取 $T_d = T_l$, $T_d = 5$ 。 T_d 的取值受图象中大轮廓周围边缘细节的影响, 若在大轮廓周围细节丰富, 则 T_d 较大, 表明需要考虑到附近弱的、有意义的边缘, 否则表明附近细节不重要, 此时 T_d 取值较小。

可知 $0 \leq \mu \leq 1$, μ 反映当前像素点 (i, j) 所处的邻域内存在边缘的可能性。对于非候选边缘点, 则 $\mu = 0$, 表示为平滑区; 若像素点 (i, j) 不在一个长链上, 且邻域内 μ 值较小, 则为平滑区; 若像素点 (i, j) 处在一个长链上时, μ 值较大, 则为边缘区域; 若像素点 (i, j) 不在一个长链上, 但邻域内具有较大的 μ 值, 则为细节丰富的边缘区。

4.2 滤波尺度参数的选取范围

边缘准确定位时, 滤波尺度应尽可能小, 取最小尺度 $s_0 = 1$ 。最大滤波尺度的选取应考虑抑噪能力和计算复杂度的折衷, 选取能够充分抑制噪声的所有尺度中最小者为 s_{\max} 。由于使用的小波函数是三次 B 样条的一阶导数, 检测到的边缘点是小波变换的局部极值点,

在满足下式时则判定为局部极值点: $Wf(x_0, s) - Wf(x_0 - \delta_{x_0}, s) > T$, 其中 x_0 是局部极值点, δ_{x_0} 是 x_0 的邻域, T 是阈值. 理论上是不需要阈值的, 但具体实现时, 阈值可以抑制噪声的影响, 同时阈值在一定范围内时 (不引起有效边缘的丢失), 决定着相应的最大滤波尺度 s_{\max} , 阈值越大, s_{\max} 越小; 阈值越小, s_{\max} 越大.

设有强度为 A 的脉冲噪声 $f(x) = A\delta(x)$, 其小波变换为

$$Wf(x, s) = \frac{A}{s} \theta' \left(\frac{x}{s} \right) = \frac{A}{s} \left[B^2 \left(\frac{x}{s} + \frac{1}{2} \right) - B^2 \left(\frac{x}{s} - \frac{1}{2} \right) \right],$$

其中 $B^2(x) = \sum_{j=1}^3 \frac{(-1)^j}{2!} \binom{3}{j} \left[x + \frac{3}{2} - j \right]_+^2$, $Wf(x, s)$ 的局部极值点在 $\pm s/2$ 处, 在 $x = -s/2$, 取 $\delta_{x_0} = 1$, 由 $B^2(x)$ 的性质知, $B^2(x/s - 1/2)|_{x=-s/2} = 0$, $B^2(x/s - 1/2)|_{x=-s/2-1} = 0$, 则有

$$Wf\left(-\frac{s}{2}, s\right) = \frac{A}{s} B^2\left(\frac{x}{s} + \frac{1}{2}\right) \Big|_{x=-s/2} = \frac{A}{s} \frac{3}{4},$$

$$Wf\left(-\frac{s}{2} - 1, s\right) = \frac{A}{s} B^2\left(\frac{x}{s} + \frac{1}{2}\right) \Big|_{x=-s/2} = \frac{A}{s} \left(-\frac{1}{s^2} + \frac{3}{4}\right),$$

满足 $Wf(-s/2, s) - Wf(-s/2 - 1, s) \leq T$ 时, 该脉冲噪声被抑制, 即 $A/s^3 \leq T$, $s \geq \sqrt[3]{A/T}$, 从而 $s_{\max} = \sqrt[3]{A/T}$. 在应用到图象中时, 由于在一个邻域内噪声之间互相有影响, 相应地可以取 $s_{\max} = k \sqrt[3]{A/T}$, $k > 1$.

4.3 利用有效边缘测度调整滤波尺度

若判定当前像素点处在平滑区, 则应取最大的滤波尺度 s_{\max} ; 若判定为边缘区, 则应取最小滤波尺度 s_0 ; 若不能确定时, 选取尺度为 $s_0 + 1$, 这样在一定程度上可以抑噪, 同时又不会使边缘定位误差过大, 如果图象噪声的强度较大, 这个尺度可以取 $s_0 + 2$, 以进一步抑制噪声. 由于 μ 中反映了当前像素点所处邻域内的边缘情况, 可以根据 μ 值构造尺度确定函数 $s = g(\mu)$:

$$g(\mu) = \begin{cases} s_0, & \mu = 1; \\ s_0 + 1, & T_\mu \leq \mu < 1; \\ s_{\max}, & \mu < T_\mu; \end{cases}$$

其中判定阈值 T_μ 可以根据图象中噪声的强度进行调整, 噪声较强时, T_μ 较大, 噪声较弱时, T_μ 较小. 假设图象中噪声分布为 $N(0, \sigma^2)$, 当 $0 \leq \sigma < 50$ 时, 取 $T_\mu = 2\sigma/100$.

4.4 实验结果

我们将上述方法用于图 1(b) 和图 2(b), 得到相应的边缘检测结果, 可以看到, 本文提出的方法具有较好的抗噪能力, 同时保留了大多数有效边缘.

5 结 论

在自适应多尺度边缘检测方法中, 本文从人的视觉特点出发, 给出了新的边缘特征描述, 这种描述更多地反映了影响人进行图形识别的因素, 根据这种边缘特征, 可以得到有效边缘测度这一度量, 作为多尺度边缘检测中调整尺度的依据, 可以得到较理想的检测结果. 实验分析结果表明这种特征描述是合理的、有效的.

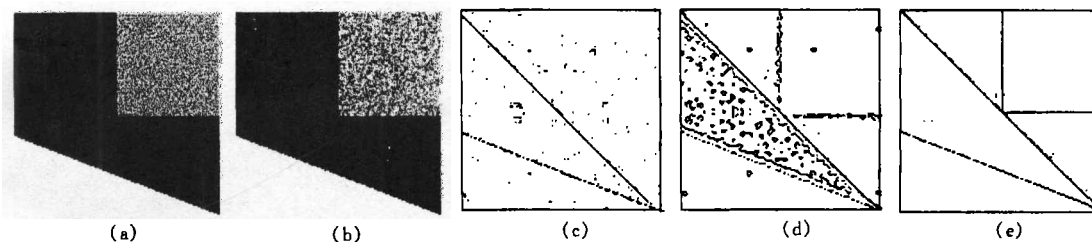


图 1

(a) 是原图, (b) 是添加分布为 $N(0, 10^2)$ 的正态噪声的加噪图,
 (c) 是 $\sigma = 1.6$ 的 Canny 算子检测结果, (d) 是 $\sigma = 1.6$ 的 LOG 算子检测结果,
 (e) 是使用有效边缘测度的检测结果。

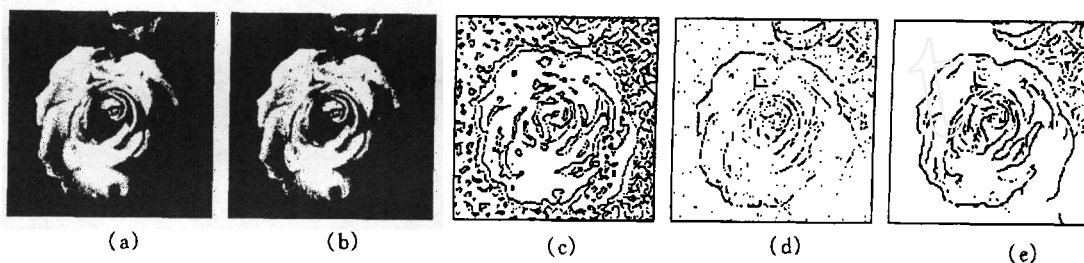


图 2

(a) 是原图, (b) 是添加分布为 $N(0, 10^2)$ 的正态噪声的加噪图,
 (c) 是 $\sigma = 1.6$ 的 Canny 算子检测结果, (d) 是 $\sigma = 1.6$ 的 LOG 算子检测结果,
 (e) 是使用有效边缘测度的检测结果。

参 考 文 献

- [1] Marr D, Hildreth E C. Theory of edge detection. Proc. Roy. Soc. Lond, Series B, 1980, 207: 187-217.
- [2] Canny J. A Computational approach to edge detection. IEEE Trans. on PAMI, 1986, PAMI-8(6): 679-698.
- [3] Witkin A P. Scale-space filtering. in Proc. 7 Int. Joint. Conf. Artificial Intell., Palo Atto, CA: Kaufmann, 1983, 1019-1021.
- [4] Mallat S, Zhong S. Characterization of signals from multiscale edges. IEEE Trans. On PAMI, 1992, PAMI-14(9): 710-732.
- [5] Aydin T, Yemez Y, Anarim E, Sankur B. Multidirectional and multiscale edge detection via M-band wavelet transform. IEEE Trans. on Image Processing, 1996, IP-5(9): 1370-1377.
- [6] Qian R J, Huang T S. Optimal edge detection in two-dimensional images. IEEE Trans. on Image Processing, 1996, IP-15(7): 1215-1220.
- [7] 荆其诚, 焦书兰, 纪桂萍. 人类的视觉. 北京: 科学出版社, 1987, 91-113.

ADAPTIVE MULTISCALE EDGE DETECTION BASED ON VISION FEATURE OF EDGE AND WAVELET TRANSFORM

Yang Xuan Liang Dequn

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract A new multiscale edge detection method is presented, which is based on vision feature of edge and wavelet transform. The novel features of image edge based on human being vision characters are described. The scales of wavelet transform are adjusted adaptively according to effective edge measure. Finally, experimental results are presented.

Key words Computer vision, Edge feature, Wavelet transform, Edge detection

杨 焯: 女, 1969 年生, 博士生, 从事图象处理和模式识别等方向的研究工作.

梁德群: 男, 1940 年生, 教授, 博士生导师, 从事图象处理、模式识别及工业图象检测等方向的研究工作.