

基于多尺度边缘响应函数的自适应阈值边缘检测算法

岳思聪 赵荣椿 郑江滨
(西北工业大学计算机学院 西安 710072)

摘要: 该文提出了一种基于多尺度边缘响应函数的自适应阈值边缘检测算法。首先分析二进小波变换, 根据边缘和噪声随尺度变化的不同特性, 设计了多尺度边缘响应函数(MERF)。通过 MERF 中的乘积放大作用, 增大了边缘响应的幅度, 同时也抑制了噪声产生的伪边缘。然后利用小波变换多尺度之间的联合分布关系, 计算自适应阈值, 检测 MERF 的梯度模值形成多尺度边缘。该算法直接在小波特征上进行多尺度合成, 避免了多个边缘图合成过程的病态问题。实验表明, 与 LOG, Canny 以及 Mallat 多尺度小波检测方法相比, 该算法在检测和定位之间能够达到更好的平衡, 既能够实现小尺度下的精确定位, 也可以保留大尺度下对噪声的抑制作用。

关键词: 计算机视觉; 边缘检测; 多尺度分析; 自适应阈值; 小波变换

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)04-0957-04

MERF Based Edge Detection with Adaptive Threshold

Yue Si-cong Zhao Rong-chun Zheng Jiang-bin
(School of Computer, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: An MERF based edge detection algorithm with adaptive threshold is presented in this paper. After analyzing dyadic wavelet transform and different behavior of edge and noise across scales, a Multi-scale Edge Response Function (MERF) is defined as the multiple scales point-wise products of the DWT to enhance significant image structures and suppress noise. Thereafter, an adaptive threshold for MERF is calculated and imposed on the module of MERF to identify edges as the local maxima of the gradient map without synthesizing the edge maps at several scales together, which was employed in many multi-scale techniques. Experiments on synthetic benchmark and natural images showed that the proposed MERF based adaptive threshold edge detection algorithm achieves better detection results than that for a single scale, especially on the localization performance; and edge and noise can be better distinguished by MERF comparing with the Laplacian of Gaussian (LOG), Canny edge detection and Mallat wavelet based edge detection algorithms.

Key words: Computer vision; Edge detection; Multi-scale analysis; Adaptive threshold; Wavelet transform

1 引言

边缘包含了图像中目标的边界以及重要的突变信息, 对于三维重建、目标识别、图像增强、图像配准和图像压缩等应用领域来说, 都具有重要的意义, 因此边缘检测是计算机视觉中一个基本的研究课题。早期的边缘检测算法有 Roberts, Sobel, Prewitt 和 Laplacian 等^[1], 这些方法都是采用微分模板或者其变形来检测边缘结构, 对噪声非常敏感。后来出现了大量新的边缘检测方法^[2-9], 主要采用平滑滤波之后求取梯度, 通过阈值或者聚类实现边缘检测。在文献[2]中, Canny 提出了著名的 3 个边缘检测准则, 并且设计出基于高斯平滑函数的 Canny 边缘检测算子, 具有较好的抗噪和检测性能。

但是研究中发现, 对图像进行单一尺度上的检测存在很大的不足, 例如在较大尺度上的平滑滤波, 尽管可以有效地滤除噪声, 但是会出现平滑过渡的问题, 使得边缘信息丢失, 造成定位失误; 而在较小尺度上的平滑会使噪声和信号边缘都产生较强的响应, 难以区分, 从而产生过多的伪边缘。这就是在单一尺度下, 检测和定位之间不可调和的矛盾。因此, 要达到平滑尺度和检测误差之间更好的平衡, 必须同时利用多个尺度上的信息描述不同结构的边缘, 以实现多尺度综合检测。众所周知, 小波变换具有良好的时频局部化特性及多尺度分析能力, 是检测突变信号强有力的工具。Mallat^[4,5]首先将小波变换引入多尺度边缘检测之中, 并且从理论上分析了信号边缘和噪声在小波域上的不同, 即信号边缘的滤波响应幅值随尺度的增大明显增强, 而噪声随着尺度增大迅速衰减。本文正是利用这个的特性, 提出了基于多尺度边缘响应函数的自适应阈值边缘检测算法。

2007-06-01 收到, 2007-11-25 改回

国家自然科学基金(60403008)和国家 863 计划项目基金(2006AA01Z324)资助课题

2 多尺度边缘响应函数

小波变换实际上是一线性算子, 它把信号表示为不同尺度上多个基元分量的线性组合, 因而能够灵活地反映出不同尺度上的信息。假设 $\phi(x, y)$ 是满足积分值为 1 并在无穷远处趋于 0 的二维可微平滑函数, 那么二维小波定义为 $\psi^x(x, y)$ 和 $\psi^y(x, y)$:

$$\psi^x(x, y) = \frac{\partial \phi(x, y)}{\partial x}, \quad \psi^y(x, y) = \frac{\partial \phi(x, y)}{\partial y} \quad (1)$$

则二维图像函数 $f(x, y)$ 在尺度 2^j 和位置 (x, y) 的二进小波变换具有两个分量:

$$\begin{pmatrix} W_j^x f(x, y) \\ W_j^y f(x, y) \end{pmatrix} = 2^j \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} (f * \phi_j)(x, y) \\ \frac{\partial}{\partial y} (f * \phi_j)(x, y) \end{pmatrix} = 2^j \nabla (f * \phi_j)(x, y) \quad (2)$$

其中 $*$ 表示卷积, ∇f 是 f 的梯度矢量, $\xi_s(x, y) = \frac{1}{s^2} \xi\left(\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right)$

表示二维函数 $\xi(x, y)$ 经过尺度因子 s 的伸缩变换。由此可见二进小波变换 $W_j f(x, y)$ 就是信号 $f(x, y)$ 经 $\phi_j(x, y)$ 平滑之后的一阶偏导数, 其梯度的模值正比于小波变换的模值。若检测小波变换的模极值作为边缘, 则等同于 Mallat^[5]设计的多尺度边缘检测方法。本文也采用 Mallat 构造的小波, 取平滑函数为三次样条, 则小波为二次样条, 详细推导见文献^[5]。

在小波变换的作用下, 信号边缘和噪声随尺度的增大会产生不同的特性, 这取决于信号本身的正则性, 可以用 Lipschitz 指数来度量。

定义 1 设 $0 \leq \alpha \leq 1$, 称一个函数 $f(x)$ 在 x_0 是 Lipschitz α , 当且仅当存在一个常数 K_1 ($K_1 > 0$), 使得在 x_0 的邻域 $|x - x_0| \leq \delta$ 满足

$$|f(x) - f(x_0)| \leq K_1 |x - x_0|^\alpha \quad (3)$$

我们称所有满足式(3)的 α 的上确界为 Lipschitz 正则。而函数 $f(x)$ 的小波变换的 Lipschitz 指数为满足下式的 α , 证明见文献^[4]。

$$|W_j f(x)| \leq K(2^j)^\alpha \quad (4)$$

由式(4)可以分析得到, 小波变换的模值在不同的 Lipschitz 正则 α 下, 随尺度 2^j 变化有如下规律: $\alpha > 0$, 随着 j 的增大 $|W_j f(x)|$ 增大; $\alpha = 0$, 随着 j 的增大 $|W_j f(x)|$ 不变; $\alpha < 0$, 随着 j 的增大 $|W_j f(x)|$ 减小; 而且 $|\alpha|$ 越大, $|W_j f(x)|$ 变化就越快。在小波变换域中, 边缘和噪声的 Lipschitz 指数就有很大差异, 例如, 阶跃边缘的 Lipschitz 正则为 0, 随着尺度的增大, 其小波模值基本不变; 而高斯噪声的 Lipschitz 正则为 $-1/2$, 随着尺度的增大, 小波模值迅速衰减。图 1 展示了加噪信号 f 在 $j = 1 \sim 3$ 尺度上的小波变换及 $j = 1$ 上的多尺度边缘响应, 它直观地印证了上面分析得到的结论, 即边缘的小波变换随尺度的增大保持峰值不减, 而噪声的小波变换随尺度的增大迅速衰减。

单独检测某个尺度 j 上小波变换的模 $\sqrt{W_j^x f(x, y) + W_j^y f(x, y)}$ 的极值作为边缘, 就是通常使用的

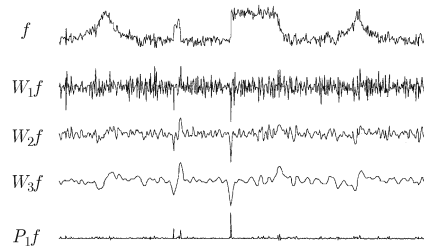


图 1 加噪信号 f 及其在尺度 $j = 1, 2, 3$ 上的小波变换和 $j = 1$ 上的 MERF

小波边缘检测方法。由于仅仅使用单一尺度, 就存在抗噪和定位之间不可调和的矛盾。由以上分析知, 将较大尺度上的小波变换作为权值与较小尺度的小波变换对应相乘, 就能够进一步增强边缘和噪声之间的差异, 使边缘响应更强, 噪声更弱。因此, 定义多尺度边缘响应函数 MERF(Multi-scale Edge Response Function) $P_j f(x)$ 为

$$P_j f(x) = W_j f(x) W_{j+1} f(x) \quad (5)$$

与二维小波变换相似, 对于二维图像, MERF 包含 x 和 y 方向上的两个分量

$$\begin{cases} P_j^x f(x, y) = W_j^x f(x, y) W_{j+1}^x f(x, y) \\ P_j^y f(x, y) = W_j^y f(x, y) W_{j+1}^y f(x, y) \end{cases} \quad (6)$$

在 MERF 基础上定义点 (x, y) 的模及相角为

$$M_j f(x, y) = \sqrt{P_j^x f(x, y) + P_j^y f(x, y)} \quad (7)$$

$$A_j f(x, y) = \arctan \left(\frac{\text{sgn}(W_j^y f(x, y)) \sqrt{P_j^y f(x, y)}}{\text{sgn}(W_j^x f(x, y)) \sqrt{P_j^x f(x, y)}} \right) \quad (8)$$

MERF 不仅能够保留小尺度上定位精确和细节检测的能力, 还综合了大尺度下对噪声抑制作用。对于边缘点 (x, y) 来说, 其在相邻尺度上的小波变换应具有相同的属性, 所以 $W_j^d f(x, y)$ 和 $W_{j+1}^d f(x, y)$ ($d = x$ 或 $d = y$) 应具有相同的符号, 即 $P_j^d f(x, y) > 0, d = x$ 或 $d = y$, 而噪声点不满足这个规律。由此, 可以首先利用 $P_j^d f(x, y) < 0$ 滤除部分噪声, 再根据局部模极值检测得到边缘图像。

3 自适应阈值

基于模极值检测的算法, 对于阈值的选取至关重要。如果阈值取得过大, 则一些边缘就会和噪声一起被滤除; 如果阈值过小, 那么噪声又会产生一些伪边缘。根据上节的分析, MERF 能够有效地增强边缘和噪声之间的差异, 因此只要选择能够滤除绝大部分噪声的阈值, 就能够得到很好的边缘。

设输入信号为高斯噪声 $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$, 为表示方便, 记 ε 的二进小波变换为

$$U_j^d(x, y) = W_j^d \varepsilon(x, y) = \varepsilon * \psi_j^d(x, y), \quad d = x \text{ 或者 } y \quad (9)$$

U_j^d 为高斯分布, 标准差为 $\sigma_j = \|\psi_j\| \sigma$, 其中 $\|\psi_j\| = \sqrt{\iint \psi_j^2(x, y) dx dy}$ 。 U_j^d 和 U_{j+1}^d 为联合高斯分布, 其相关系数为

$$\rho_{j,j+1} = \frac{\iint \psi_j(x,y)\psi_{j+1}(x,y)dxdy}{\sqrt{\iint \psi_j^2(x,y)dxdy \iint \psi_{j+1}^2(x,y)dxdy}} \quad (10)$$

那么多尺度边缘响应函数 $V_j^d = U_j^d U_{j+1}^d$ 的标准差为^[10]

$$\kappa_j = \sqrt{E[v_j^2]} = \sqrt{E[u_j^2 u_{j+1}^2]} = \sqrt{1 + 2\rho_{j,j+1}^2} \sigma_j \sigma_{j+1} \quad (11)$$

若取 $c \geq 5$, 则 $P\{v_j \leq c \cdot \kappa_j\} \geq 99.5\% \rightarrow 1$ 。这表明阈值 $t^d(j)$ 取为 $5\kappa_j$ 时, 能够抑制 V_j^d 中 99.5% 以上的数据。实际应用中, 输入信号往往是原始信号和噪声的合成信号, 虽然在小尺度上噪声和边缘容易混淆, 但是由于多尺度函数 MERF 的放大作用, 大尺度的引入使得边缘的响应 $P_j f(x)$ 远大于噪声的响应 $P_j \varepsilon(x)$, 阈值 $c \cdot \kappa_j$ 依然能够保留完好的边缘。则 $M_j f(x,y)$ 的阈值取为

$$t(j) = \alpha \sqrt{t^x(j) + t^y(j)} \quad (12)$$

其中 α 是调节系数, 当模值大于阈值 $t(j)$ 时, 该点就被认为是边缘。通常 α 取为 1.0, 即选取阈值为 $t(j) = \sqrt{t^x(j) + t^y(j)}$, 此时获得的检测结果令人满意, 既能够检测到边缘细节, 又能够抑制绝大多数噪声。

4 实验结果及分析

本文分别使用合成的基准图像和自然图像进行实验, 并与 LOG, Canny 以及 Mallat 小波 3 种边缘检测算法进行比较。对基准图像使用量化指标分析, 自然图像则根据视觉效果判断。其中 LOG 和 Canny 算法有两个参数可调, 高阈值 t_h 和高斯函数的标准差 σ_g , 低阈值则固定为高阈值的一半, 实验将根据视觉效果选择合适的参数, 以产生最好的边缘检测结果。

图 2 是加噪的基准图像及其边缘检测结果, 所加高斯噪声水平为 $\sigma = 22$ (SNR=11.93dB)。图 2(b) 为 LOG 检测结果 ($\sigma_g = 2.6, t = 0.8$), 图 2(c) 是 Canny 检测结果 ($\sigma_g = 1.0, t_h = 0.4$), 图 2(d), 2(e) 分别是 Mallat 小波变换和本文算法的检测结果。采用 Pratt^[11] 在文献中提出性能评价函数 F 对基准图像的检测结果进行定量分析:

$$F = \frac{1}{\max\{N_I, N_A\}} \sum_{k=1}^{N_A} \frac{1}{1 + \alpha d^2(k)} \quad (13)$$

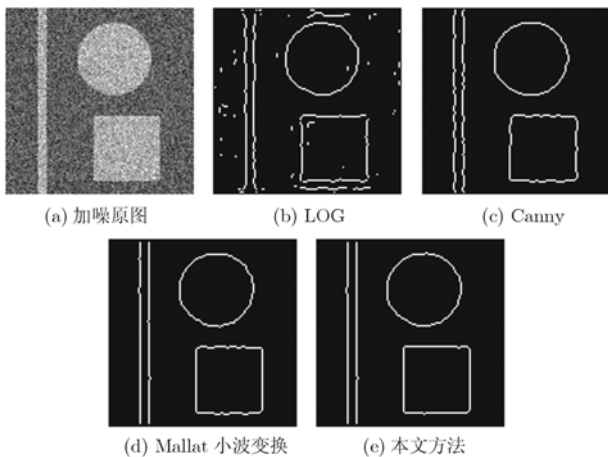


图 2 加噪的基准图像及其边缘检测结果

其中 N_I 和 N_A 分别表示实际边缘点数和检测边缘点数, $d(k)$ 是检测边缘与对应的实际边缘之间的距离, α 为常量, 本文沿用 Pratt 的设定 1/9。F 值越大, 表示定位精度越高, 检测性能越好。表 1 中列出 Canny, Mallat 小波和本文算法检测结果的 F 值, 因为 LOG 受噪声影响较大, 检测结果明显比其他 3 种方法差, 故没有将其列出。

表 1 基准图像检测结果的性能指标

方法	Canny	Mallat 小波	本文算法
性能 F	0.9597	0.9898	0.9932

图 3(a) 是加噪的 Lena 图像 (SNR=15.53dB), 图 3(b)-3(e) 分别是 LOG ($\sigma_g = 2.6, t = 0.8$), Canny ($\sigma_g = 0.8, t_h = 0.3$), Mallat 小波变换和本文方法检测的边缘图。图 4 是加噪的 Cameramen 图像 (SNR=15.70dB) 及其检测结果, 其中 LOG 的参数为 $\sigma_g = 2.8, t = 0.8$, Canny 算法的参数为 $\sigma_g = 0.8, t_h = 0.2$ 。所加高斯噪声水平均为 $\sigma = 22$ 。从图 3 和图 4 的边缘图以及表 1 可以看出, LOG 算子的抗噪性能差, 因此 σ_g 较大, 导致定位不准确, 细小结构检测失效, 否则噪声会将边缘淹没; 而 Canny 算子的定位较好, 但是边缘和噪声容易混淆, 检测的伪边缘较多, 主要因为缺少大尺度的平滑, 导致在较小尺度上有些噪声响应的幅度过大; Mallat 小波变换方法在定位和检测之间虽然取得了较好的平衡, 但是与本文方法相比, 在细节定位和抑制噪声的性能上还是相差一些, 主要是因为多尺度边缘图合成过程是一个病态问题, 不同尺度的边缘(或噪声)缺乏可信度一致的判别方法。通过实验验证, 本文算法取得了比较理想的检测结果, 一方面能够检测出的边缘更加丰富清晰, 另一方面, 能够有效的抑制噪声。

5 结束语

本文充分利用小波变换在相邻尺度间的相似特性及其联合分布关系, 提出了一种基于多尺度边缘响应函数

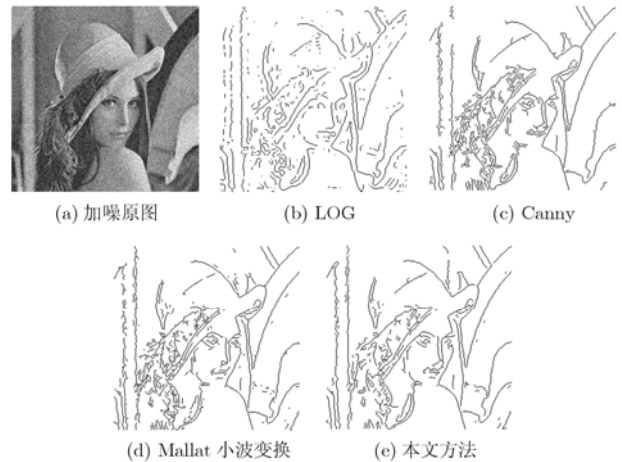


图 3 加噪的 Lena 图像及其边缘检测结果

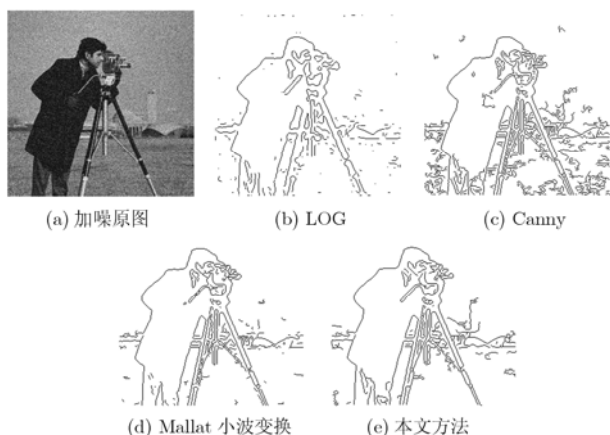


图4 加噪的 Cameramen 图像及其边缘检测结果

(MERF)的自适应阈值边缘检测算法。MERF 对边缘响应放大的同时，抑制了噪声带来的干扰，使得边缘和噪声更容易区分。自适应阈值则能够滤除绝大部分的噪声，而不会对边缘造成影响。通过 MERF 和自适应阈值，在特征上实现了多尺度的合成，对其梯度模值的检测结果即为多尺度边缘，不需要在每个尺度上分别检测边缘，再进行多个边缘图的合成，避免了边缘图合成过程的病态问题。实验证明，与 LOG, Canny 和 Mallat 小波变换的边缘检测算法相比，该算法取得了很好的检测效果和定位精度，边缘图中既保留了丰富的细节，定位准确；又非常干净，基本消除了噪声产生的伪边缘。算法充分利用了不同尺度上的优势，有效地实现了多尺度边缘检测。

参考文献

- [1] Gonzalez R C, Woods R E, and Eddins S L. Digital Image Processing Using MATLAB. Beijing, China: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 287-295.
- [2] Canny J. A computational approach to edge detection. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(2): 679-698.
- [3] Shin M C, Goldgof D B, Bowyer K W, and Nikiforou S. Comparison of edge detection algorithms using a structure from motion task. *IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics*, 2001, 31(4): 589-601.
- [4] Mallat S and Hwang W L. Singularity detection and processing with wavelets. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1992, 38(2): 617-643.
- [5] Mallat S and Zhong S. Characterization of signals from multi-scale edges. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(7): 710-732.
- [6] Yang H and Zhang W. Research on image edge detection based on multi-scale wavelet transform and fuzzy clustering. *Computer Science*, 2006, 33(1): 174-176.
- [7] Zhang G and Liu Q. Robust edge detection based on stationary wavelet transform. *Journal of Southeast University*, 2006, 22(2): 218-221.
- [8] Demigny D. On optimal linear filtering for edge detection. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2002, 11(7): 728-737.
- [9] Wei H and Shen L. Multi-scale edge detection by using anti-symmetrical biorthogonal wavelets. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(3): 313-316.
- [10] Patel J K and Read C B. Handbook of The Normal Distribution. New York, USA: Marcel Dekker, 1996: 288-293.
- [11] Pratt W K. Digital Image Processing, 3rd Edition, New York, USA: John Wiley & Sons, 2005: 330-332.

岳思聪：男，1979年生，博士生，研究方向为计算机视觉、信号处理、模式识别等。

赵荣椿：男，1937年生，教授，博士生导师，研究方向为语音和图像处理、计算机视觉等。

郑江滨：男，1972年生，副教授，研究方向为图像处理、模式识别、计算机视觉等。