

基于 Canny 算子边缘检测的小波阈值去噪方法

孙康泰, 羿旭明, 方 壮
(武汉大学数学与统计学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 本文研究了信号处理中图像去噪的问题. 利用小波变换理论提出了一种基于 Canny 算子边缘检测的小波阈值去噪方法, 实验结果表明, 该方法在有效去除噪声的同时能够更好地保留图像的边缘.

关键词: 图像去噪; 小波变换; Canny 算子; 边缘检测

MR(2010) 主题分类号: 65T60

中图分类号: O29

文献标识码: A

文章编号: 0255-7797(2015)06-1388-05

1 引言

图像在获取过程中常会受到噪声干扰, 为对含噪图像进行有效的利用, 首先需要对其进行去噪处理. 然而, 在对图像进行有效去噪的同时, 常常会对图像的边缘特征等信息造成丢失. 因此, 在设计图像去噪算法时, 既要使含噪图像进行有效地去噪, 同时又要很好地保留图像的边缘特征. 近些年来, 小波变换以其低熵性、小波基选择的多样性、多分辨特性和去相关性等特点在图像去噪方面得到广泛而有效的应用. Donoho 和 Johnstone (见文 [1-3]) 在高斯噪声模型下提出了基于小波阈值去噪的算法框架, 并给出了具体的阈值估计, 该算法实现简单、计算量小且理论上证明在均方意义下渐进最优. 本文提出一种基于 Canny 算子边缘检测的小波阈值去噪的新方法, 不但可以有效去除噪声, 同时能够保留原始图像重要的边缘特征.

2 小波阈值去噪

2.1 小波阈值去噪原理

小波阈值去噪法的主要原理是, 小波变换具有能量集中特性, 含噪信号经由小波变换后使得噪声成分的能量分布在整個小波域但主要集中在高频部分, 而信号的能量集中分布在少数几个幅值较大的小波系数上, 其中噪声的小波系数幅值小于信号的小波系数幅值, 因此合理的选取阈值, 并能有效地实现信号和噪声的分离. 小波阈值去噪法具体处理过程可以分为三步 (见文 [4, 5]): (1) 选取小波函数和小波分解层数, 并对含噪信号在各尺度上进行小波分解. (2) 对小波系数进行阈值处理, 根据选定的阈值, 若小波系数的幅值小于该阈值, 则置为零, 反之则保留或进行一定的收缩处理. (3) 利用小波逆变换对处理后的小波系数进行重构.

2.2 阈值函数的选取

*收稿日期: 2014-06-25

接收日期: 2014-12-03

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究项目基金资助 (B20111909).

作者简介: 孙康泰 (1992-), 男, 安徽宿州, 硕士, 主要研究方向: 小波分析及其应用.

在小波阈值去噪过程中, 最为重要的就是阈值和阈值函数的选取. 如果阈值过小, 处理后的小波系数仍含有大量的噪声成分, 去噪效果不理想; 若阈值过大, 则造成有用信号的丢失, 导致图像失真.

在阈值去噪法中, 阈值函数主要可以分为以下两种:

(1) 硬阈值函数

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k}, & |w_{j,k}| \geq \lambda_j, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (2.1)$$

(2) 软阈值函数

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(w_{j,k}) \cdot (|w_{j,k}| - \lambda_j), & |w_{j,k}| \geq \lambda_j, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (2.2)$$

2.1、2.2 式中 $w_{j,k}$ 为小波系数, λ_j 为第 j 层确定的阈值, $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数, 两种方法各有特点, 硬阈值函数可以很好地保留图像的边缘等特征, 但在 $\pm\lambda_j$ 处不连续, 容易使去噪后的图像出现振铃、Pseudo-Gibbs 现象, 软阈值函数方法整体连续性好, 处理的结果更平滑, 视觉效果更自然.

2.3 阈值的确定

本文采用三种比较常用的阈值, 分别为由 Donoho 和 Johnstone 共同提出的全局阈值 $\lambda = \sigma\sqrt{2\ln N}$ 、基于 Stein 的无偏似然估计原理的 rigrsure 自适应阈值和 heursure 混合型阈值, 其中 σ 为图像噪声的标准差, N 为图像像素数. 由于传统的阈值去噪对各个不同层次的小波系数使用同样的阈值, 一定程度上影响了每个层次上的信噪分离, 因此本文采用小波细节系数自相关性分析的分层阈值降噪法进行图像去噪.

3 基于 Canny 算子边缘检测

边缘是指图像上那些不连续的点或剧烈变化的像素点的集合, 是图像最基本的特征, 例如纹理结构的突变、灰度值的突变、颜色的突变等等. 图像的边缘检测是图像分析、解释和识别的重要前提. 传统的边缘检测算子有 Roberts 算子、Prewitt 算子、Sobel 算子和 Canny 算子等. 本文所采用的 Canny 算子 (见文 [6, 7]) 检测速度快、对噪声比较敏感且具有很好的检测精度. 该算法较之其它边缘检测方法的优越之处在于, 它使用两种不同阈值分别检测强边缘和弱边缘, 并且仅当弱边缘和强边缘相连时才将弱边缘包含在输出图像中, 因此 Canny 算子更容易检测出真正的弱边缘.

传统的 Canny 算法 (见文 [8]) 选用一维高斯函数 $G(x) = -\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$ 构造滤波函数, 首先分别按行和列对原始含噪图像 f 进行平滑去噪处理. σ 为高斯曲线的标准差, 控制着平滑程度, 并得到处理后的平滑图像 I , 同时采用如下一阶偏导数的有限差分近似计算平滑图像 I 在 (i, j) 处的水平和垂直方向的偏导数:

$$\begin{aligned} G_x[i, j] &= (I[i+1, j] - I[i, j] + I[i+1, j+1] - I[i, j+1])/2, \\ G_y[i, j] &= (I[i, j+1] - I[i, j] + I[i+1, j+1] - I[i+1, j])/2. \end{aligned} \quad (3.1)$$

此时, 平滑图像 I 在 (i, j) 处的梯度模 $M(i, j) = \sqrt{G_x^2[i, j] + G_y^2[i, j]}$ 及梯度方向 $\theta(i, j) = \arctan \frac{G_y[i, j]}{G_x[i, j]}$. 如果图像在 (i, j) 像素点的梯度模 $M(i, j)$ 大于或等于沿梯度方向两个相邻像

素点的梯度模, 则判断该点为可能的边缘点. 并分别利用双阈值检测算法及边缘链接算法得到最后的边缘图像.

4 基于 Canny 算子边缘检测的小波阈值去噪算法及数值算例

4.1 算法步骤

步骤 1 对含噪原始图像 f 利用 Canny 边缘检测算子进行边缘检测, 并得到边缘图像 f_e ;

步骤 2 对边缘图像 f_e 和原始图像 f 分别进行多层小波分解, 并分别得到图像在小波域的图像表示 W_{f_e} 和 W_f ;

步骤 3 分别对 W_{f_e} 和 W_f 小波系数进行阈值处理, 得到 W'_{f_e} 和 W'_f ;

步骤 4 在图像的相应像素点, 利用

$$W = rW'_{f_e} + (1 - r)W'_f$$

进行数据的加权处理, 其中权系数 $0 < r < 1$;

步骤 5 对 W 进行小波逆变换, 并得到基于边缘保护和去噪的重构图像 g .

4.2 图像去噪实例及结果分析

本文采用典型的 lena 灰度测试图像, 并对测试图像添加均值为 0 方差为 0.1 的高斯白噪声, 并选择 symlets 对称小波函数 (见文 [9, 10]). 为了数值刻画算法的去噪效果, 本文选用均方差 (MSE) 指标和峰值信噪比 (PSNR) 指标, 具体指标分别为:

$$\text{MSE} = \sqrt{\frac{1}{M \cdot N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (f_{m,n} - g_{m,n})^2}, \quad \text{PSNR} = 10 \lg\left(\frac{255^2}{\text{MSE}}\right),$$

式中 f 为原始图像, g 为重构图像. 由于权系数的选取对去噪效果至关重要, 本文基于均方差指标 MSE 达到最小和峰值信噪比指标 PSNR 达到最大为目标, 选取权系数. 在 2 层和 3 层小波分解下, 图 1 给出了基于 rigrsure 阈值去噪时, 指标 MSE、PSNR、 $\text{MSE} + \frac{1}{\text{PSNR}}$ 与权系数 r 的关系图, 从实验数值结果可以看出, 随着 r 不断增加, MSE、 $\text{MSE} + \frac{1}{\text{PSNR}}$ 先单调递减后单调递增, PSNR 先单调递增后单调递减, 并在 $r = 0.8$ 时, MSE、 $\text{MSE} + \frac{1}{\text{PSNR}}$ 达到最小, PSNR 达到最大, 故综合考虑, 本文选取权系数 $r = 0.8$. 同样在本文采用的另外两种阈值去噪方法下, 也得到了相同的权系数 $r = 0.8$.

表 1 给出了在不同小波分解层数下, 采用全局阈值 ($\lambda_i = \lambda = \sigma\sqrt{2\ln N}$) 和分层阈值以及考虑边缘和不考虑边缘情形下, lena 图像的去噪效果评价指标 MSE 和 PSNR 的数值分析结果. 总体上看, 考虑边缘检测的阈值去噪较不考虑边缘的阈值去噪, 其峰值信噪比提高约 4db 到 5db, 均方差有所降低; 综合考虑均方差和信噪比指标, 在进行 2 层小波分解时基于边缘检测的 rigrsure 分层阈值, 其指标最好. 在视觉效果上 (如图 2.1–2.6 所示), 计及边缘检测的 rigrsure 分层阈值去噪方法较之不计及边缘的 rigrsure 分层阈值去噪方法更好地保护了图像的边缘细节, 并在 2 层小波分解下达到最优. 另外, 对于 heursure 混合型阈值去噪方法, 从表中数据可以看出, 也得到了和 rigrsure 分层阈值去噪方法相近的数值分析结果.

表 1: 基于 2 层和 3 层小波分解的 3 种不同阈值选择的图像去噪指标

小波分散层数	MSE		PSNR(db)	
	2	3	2	3
不计及边缘检测的全局阈值去噪	0.0116	0.0126	67.4992	67.1387
计及边缘检测的全局阈值去噪	0.0035	0.0045	72.6327	71.6468
不计及边缘检测的 rigrsure 分层阈值去噪	0.0115	0.0125	67.5066	67.1608
计及边缘检测的 rigrsure 分层阈值去噪	0.0035	0.0044	72.6434	71.6545
不计及边缘检测的 heursure 分层阈值去噪	0.0115	0.0126	67.5189	67.1400
计及边缘检测的 heursure 分层阈值去噪	0.0035	0.0045	72.6383	71.6443

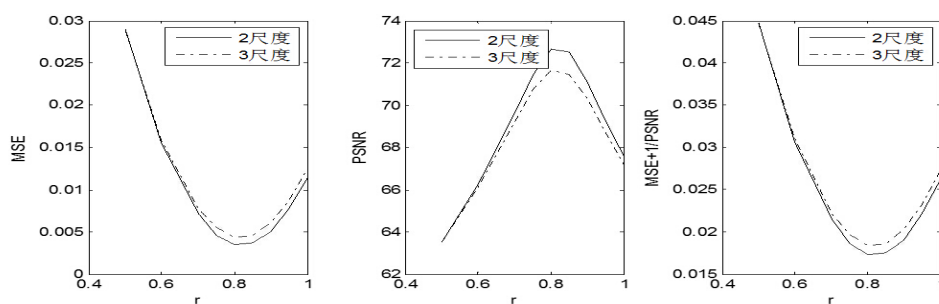
图 1: MSE、PSNR、 $MSE + \frac{1}{PSNR}$ 与权系数 r 的关系图

图 2.1: 含噪图像



图 2.2: 边缘图像



图 2.3: 2 层不计及边缘检测的 rigrsure 分层阈值去噪



图 2.4: 2 层计及边缘检测的 rigrsure 分层阈值去噪



图 2.5: 3 层不计及边缘检测的 rigrsure 分层阈值去噪



图 2.6: 3 层计及边缘检测的 rigrsure 分层阈值去噪

5 结论

本文提出了基于 Canny 边缘检测和基于分层小波阈值去噪相结合的去噪算法, 对含噪图像进去噪处理, 实验结果表明该算法既能有效去除噪声又能很好的保留图像的边缘, 在兼顾去噪效果和保留图像边缘特征方面, 当进行 2 层小波分解同时计及边缘特征时, 达到了一个好的平衡.

参 考 文 献

- [1] Donoho D L. Denoising by softthresholding[J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 1995, 41(3): 613–627.
- [2] Donoho D L, Johnstone I M, Kerkyacharian G, Picard D. Wavelet shrinkage: Asymptopia[J]. J. Royal Stat. Soc., 1995, 57(2): 301–369.
- [3] Donoho D L, Johnstone I M. Ideal spatial adaptaion via wavelet shrinkage[J]. Biometrika, 1994, 81(12): 425–455. .
- [4] 李玉峰. 小波分析在图像去噪与压缩中的应用研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士论文, 2005.
- [5] Chang S G, Yu B, Vetterli M. Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression[J]. IEEE Trans. Image Proc., 2000, 9(9): 1532–1546.
- [6] Rafael C Gonzalez, Richard E Woods, Steven L Eddins. 数字图像处理 (MATLAB 版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [7] Rafael C Gonzalez, Richard E Woods, Steven L Eddins. Digital image processing using MATLAB[M]. Beijing: Publishing Housing of Electronics Industry, 2004.
- [8] Canny J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intel., 1986(6): 679–698.
- [9] 蔡敦虎, 羿旭明. 小波基的选取对图像去噪的影响 [J]. 数学杂志, 2005(2): 185–190.
- [10] 徐丙莲, 羿旭明. 基于小波变换的信号奇异性分析 [J]. 数学杂志, 2004(6): 661–664.

WAVELET THRESHOLD DENOISING METHOD BASED ON CANNY OPERATOR EDGE DETECTION

SUN Kang-tai, YI Xu-ming, FANG Zhuang

(School of Mathematics and Statistics, Wuhan University, Wuhan 430027, China)

Abstract: In this paper, we investigate image denoising in signal processing. This paper presents a Canny operator edge detection by wavelet thresholding approache based on wavelet transforms. The experimental results show that this approache can keep image's edges from damaging.

Keywords: image denoising; wavelet transform; Canny operator; edge detection

2010 MR Subject Classification: 65T60