

一种新的基于小波包与人类视觉系统的边缘检测算法

孙利杰, 赵景秀, 郑美珠, 高 忠

(曲阜师范大学计算机科学学院, 山东 日照 276826)

[摘要] 针对小波变换的局限性和人类视觉系统的敏感性不同, 提出了一种新的基于小波包与人类视觉系统的边缘检测算法. 首先对加噪的载体图像应用中值滤波进行图像的平滑处理并用小波包对图像的高频和低频部分进行分解; 然后根据人类视觉系统模型的特性进行小波包系数的选择, 并利用 Log 算子进行边缘的零交叉点检测; 最后通过二维小波包重构函数得到图像近似部分的边缘. 理论数据与实验结果表明, 应用文中提出的边缘检测算法, 通过与经典的 Roberts, Sobel, Prewitt 和 Log 4 种边缘检测算子比较, 不但更符合人类的认知, 而且在含有丰富细节和微小变化的区域, 新方法更具有应用价值.

[关键词] 小波包, 人类视觉系统, 中值滤波, 小波包系数, 零交叉点

[中图分类号] TP391 [文献标识码] A [文章编号] 1001-4616(2010)04-0134-05

A New Edge Detection Algorithm Based on Wavelet Packet and Human Visual System

Sun Lijie, Zhao Jingxiu, Zheng Meizhu, Gao Zhong

(School of Computer Science, Qufu Normal University, Rizhao 276826, China)

Abstract To recognize the limit of wavelet transform and the sensitive diversity of human visual system, an approach using a new edge detection algorithm based on wavelet packet and human visual system is proposed. Firstly, the median filtering is easy to remove image noise, and the denoising image is transformed by wavelet packet. The edge detection regions are by selecting the wavelet packet coefficients based on the characteristic of human visual model, and then use Log algorithm to select the zero-crossing. The detected edge image is obtained by reverse wavelet packet. The experimental results show that the algorithm compared with Roberts, Sobel, Prewitt and Laplacian of Gaussian edge detection algorithm, not only agrees more with human's recognition, but also can get an even better application on some regions including abundant local details and some tiny areas that change.

Key words wavelet packet, HVS, the median filtering, the wavelet packet coefficients, zero-crossing

图像边缘^[1]往往是由图像中景物的物理特性发生变化而引起的, 如物体的成像亮度(阴影等)、几何特性(方向和深度等)以及反射系数, 它广泛存在于物体与背景之间、物体与物体之间和区域与区域之间. 由于边缘总是可以看做图像中灰度突变的部分, 所以梯度很自然成为一种提取边缘的特征. 基于梯度的边缘检测算子也是最早出现的. 它们易于实现且便于识别边缘方向, 因而被广泛应用. 但由于对噪声过于敏感, 所以其效果不能令人满意^[2]. 另一类重要的边缘检测算子是基于优化目标函数发展起来的^[3-4]. 然而, 为基于优化的边缘响应滤波器选择一个合适的尺度是非常困难的, 尺度过小无法滤掉噪声, 尺度过大则损失掉了边缘细节. 多尺度方法^[5-8]为这个问题的解决提供了一种方法, 但是同时又引入了新的问题. 如滤波器数量的选择以及响应的组合等. 但都不能很好地反映人眼对图像边缘的感知程度与图像内容间的密切关系^[9].

小波包对图像分解作多分辨率分析是在小波函数对图像的分解基础上发展起来的, 与小波分解相比, 小波包是一种更精细的分解方法, 它不仅对图像的低频部分进行分解, 还要对图像的高频部分进行分解.

收稿日期: 2010-06-10

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2009GM009)、山东省博士基金.

通讯联系人: 孙利杰, 硕士研究生, 研究方向: 图像处理与数字水印. E-mail: dpslj_good@126.com

基于人类视觉系统模型的特性及小波包的优势,本文提出了一种新的基于小波包与人类视觉系统的边缘检测算法,将新方法经典的 Robert Sobel Prew itt和 LoG 4种边缘检测算子比较,可以看出新方法优势明显.与 Robert Sobel Prew itt算子相比,新方法所包含的细节与人类的感知更加吻合.与 LoG 算子相比,检测效果更明显.

1 小波包边缘检测算法的视觉模型

1.1 小波包理论分析^[10]

1.1.1 小波包基本理论

短时傅里叶变换对信号的频带划分是线性等间隔的.多分辨率分析可以对信号进行有效的时频分解,但由于其尺度是按二进制变化的,所以在高频段其频率分辨率较差,而在低频段其时间分辨率较差,即对信号的频带进行指数等间隔划分(具有等 Q 结构).

小波包分析能够为信号提供一种更精细的分析方法,它将频带进行多层次划分,对多分辨率分析没有细分的高频部分进一步分解,并能够根据被分析信号的特征,自适应地选择相应频段,使之与信号频谱相匹配,从而提高了时频分辨率,因此小波包具有更广泛的应用价值.

关于小波包分析的理解,我们这里以一个 2 层的分解进行说明,其小波包分解树如图 1 所示.

图 1 中, A 表示低频, D 表示高频,末尾的序号数表示小波分解的层数(即尺度数).由图可见,也就是选择的小波包尺度越大,小波包系数对应的空间分辨率就越低,利用这一点,可以在不同的空间分辨率上进行分析,提高图像边缘检测的效率.

分解具有关系:

$$S = AA2 + DA2 + AD2 + DD2$$

1.1.2 小波包理论分析

在多分辨率分析中, $L^2(R) = \bigoplus_{j \in Z} W_j$ 表明多分辨率分析是按照不同的尺度因子 j 把 Hilbert 空间 $L^2(R)$ 分解为所有子空间 $W_j (j \in Z)$ 的正交和,其中, W_j 为小波函数 $\Psi(t)$ 的闭包(小波子空间).现在,我们希望进一步对小波子空间 W_j 按照二进制分式进行频率的细分,以达到提高频率分辨率的目的.

一种自然的做法是将尺度空间 V_j 和小波子空间 W_j 用一个新的子空间 U_j^n 统一起来表征,若令 $\begin{cases} U_j^0 = V_j \\ U_j^1 = W_j \end{cases}, j \in Z$ 则 Hilbert 空间的正交分解 $V_{j+1} = V_j \oplus W_j$ 即可用 U_j^n 的分解统一为

$$U_{j+1}^0 = U_j^0 \oplus U_j^1 \quad j \in Z, \tag{1}$$

定义子空间 U_j^n 是函数 $U_n(t)$ 的闭包空间,而 U_j^{2n} 是函数 $u_{2n}(t)$ 的闭包空间,并令 $u_n(t)$ 满足下面的双尺度方程:

$$\begin{cases} u_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in Z} h(k) u_n(2t - k), \\ u_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in Z} g(k) u_n(2t - k), \end{cases} \tag{2}$$

式中, $g(k) = (-1)^k h(1 - k)$, 即两系数也具有正交关系.当 $n = 0$ 时,以上两式直接给出

$$\begin{cases} u_0(t) = \sum_{k \in Z} h(k) u_0(2t - k), \\ u_1(t) = \sum_{k \in Z} g(k) u_0(2t - k), \end{cases} \tag{3}$$

与在多分辨率分析中, $\phi(t)$ 和 $\varphi(t)$ 满足双尺度方程:

$$\begin{cases} \phi(t) = \sum_{k \in Z} h(k) \phi(2t - k) \{h(k)\}_{k \in Z} \in l^2, \\ \varphi(t) = \sum_{k \in Z} g(k) \varphi(2t - k) \{g(k)\}_{k \in Z} \in l^2, \end{cases} \tag{4}$$

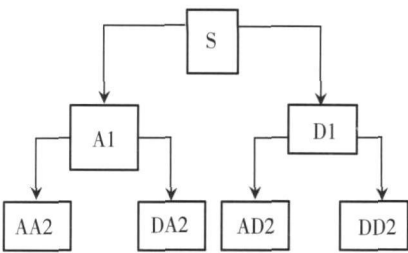


图 1 2 层小波包分解树

Fig.1 Two layers wavelet packet decomposition tree

相比较, $u_0(t)$ 和 $u_1(t)$ 分别退化为尺度函数 $\phi(t)$ 和 $\varphi(t)$. 式 (3) 是式 (1) 的等价表示. 把这种等价表示推广到 $n \in Z_+$ (非负整数) 的情况, 即得到式 (2) 的等价表示为

$$U_{j+1}^n = U_j^n \oplus U_j^{2^{n+1}-1} j \in Z; n \in Z_+.$$

(5)

定义(小波包) 由式 (2) 构造的序列 $\{u_n(t)\}$ (其中 $n \in Z_+$) 称为由基函数 $u_0(t) = \phi(t)$ 确定的正交小波包. 由于 $\phi(t)$ 由 h_k 唯一确定, 所以又称 $\{u_n(t)\}_{n \in Z}$ 为关于序列 $\{h(k)\}$ 的正交小波包.

1.2 小波包边缘检测算法的视觉模型

由于小波包变换是基于小波变换的进一步发展, 能提供比小波变换更高的分辨率. 所以我们定义各频段的第 l 层小波的 θ 方向 $l \in \{0, 1, 2\}$, $\theta \in \{0, 1, 2\}$.

小波域图像水印算法的视觉模型主要由以下 3 个部分组成^[11]:

(1) 人眼对不同方向不同层次的中高频子图像中的噪声较为不敏感, 特别对 45° 方向高频子带图像中的噪声更不敏感. 设不同层, $l(l = 0, 1, 2)$ 各个子带对噪声的掩因子记为 $S(l, \theta)$, 则 $S(l, \theta)$ 可由式 (6) 估计.

$$S(l, \theta) = \begin{cases} \sqrt{2} \sin \theta = 1 \\ 1, \text{ otherwise} \end{cases} * \begin{cases} 1.00 & \text{if } l = 0 \\ 0.32 & \text{if } l = 1 \\ 0.16 & \text{if } l = 2 \end{cases}.$$

(6)

(2) 人类视觉系统对不同亮度区域的噪声的视觉敏感性不同, 对很黑或很亮的区域的噪声不敏感. 设分解层次 l 中某空间位置 (i, j) 亮度因子 $L(l, i, j)$, 则 $L(l, i, j)$ 可由式 (7) 估计.

$$L(l, i, j) = \frac{l}{256} LL3 \left[1 + \left\lceil \frac{i}{2^{l-i}} \right\rceil, 1 + \left\lceil \frac{j}{2^{l-j}} \right\rceil \right].$$

(7)

(3) 人眼对图像纹理区域的噪声特别不敏感, 即纹理可掩盖较大的噪声. 令 $L(l, i, j)$ 为纹理掩盖效应的因子, 可用不同细节子图像局部均值的平方和低频子带的方差两部分进行刻画, 分别由像素 (i, j) 处的 2×2 邻域计算, 如式 (8) 所示.

$$T(l, i, j) = \sum_{k=0}^{2^l-1} \frac{l}{16k} \sum_{\theta=0}^2 \sum_{x=0}^l \sum_{y=0}^l \left[LL3 \left\{ y + \frac{i}{2^l}, x + \frac{j}{2^l} \right\} \right]^2$$
$$* \text{var} \left\{ LL3 \left\{ 1 + \frac{y+i}{2^{2-i}}, 1 + \frac{x+j}{2^{2-j}} \right\} \right\} \Big|_{\substack{x=0,1 \\ y=0,1}}$$

(8)

从以上 3 个公式可以看出, 这个视觉模型考虑了人类视觉系统不同频率、不同方向特性的敏感性以及不同亮度的对比度掩盖效应, 为边缘检测的定位提供了很好的依据. 本文算法主要参照式 (1) 进行小波包系数的选择, 通过下面实验, 本文选取小波包系数 $(1, 0)$.

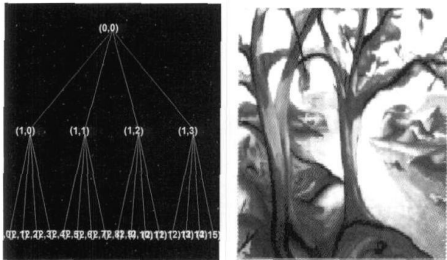


图 2 小波包分解树和系数(1,0)对应的示意图

Fig.2 The coefficients of wavelet packet decomposition tree (1,0) corresponds to the diagram

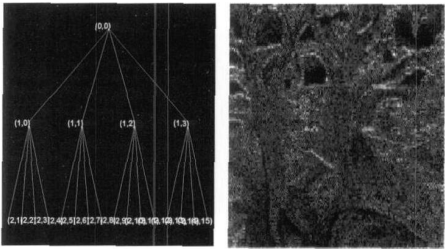


图 3 小波包分解树和系数(1,1)对应的示意图

Fig.3 The coefficients of wavelet packet decomposition tree (1,1) corresponds to the diagram

2 新的边缘检测算法

小波包分析属于线性时频分析法, 它具有良好的时频定位特性以及对信号的自适应能力. 本文在考虑人类视觉特性的基础上, 利用小波包具有更精细的分解特性来确定边缘检测区域, 最后利用 LoG 算子的零交叉检测对边缘进行判断.

本文提出的边缘检测算法如下:

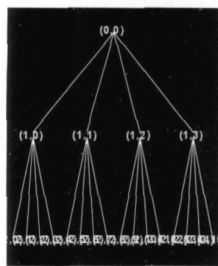


图 4 小波包分解树和系数(1,2)对应的示意图

Fig.4 The coefficients of wavelet packet decomposition tree (1,2) corresponds to the diagram

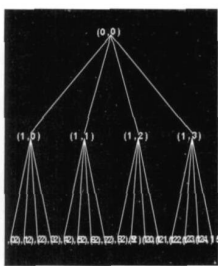


图 5 小波包分解树和系数(1,3)对应的示意图

Fig.5 The coefficients of wavelet packet decomposition tree (1,3) corresponds to the diagram

- ①对载体图像加入椒盐噪声.
- ②利用中值滤波对载体图像进行平滑处理.
- ③小波包系数的选择. 在二维的小波包分解树结构中, 基于一层的小波树被分解成系数是 (1, 0)、(1, 1)、(1, 2)和 (1, 3), 通过实验我们选择小波包系数 (1, 0).
- ④用 LoG 算子进行边缘检测. 将小波选择系数作为边缘检测区域, 根据图像边缘处的一阶微分(梯度)是极值点, 图像二阶微分应为零, 确定过零点的位置要比确定极值点容易得多, 而且比较精确, 本文选择 LoG 算子进行边缘检测. 但二阶微分对噪声敏感. 因此, 先平滑噪声, 再进行边缘检测.
- ⑤二维小波包重构.

3 实验结果及分析

本文实验中仿真软件使用的是 M atlab7.0, 原始图像选用的是 M atlab 图像库中的 trees 图像; 在对比实验中, 新方法当前广泛使用的 3 种检测算子 Robert s、Sobel 和 Prew itt 作了比较, 实验显示: 新方法较好地描述了原图像的边缘特征. 其最大贡献在于: 边缘结果与人类的识别更加吻合. 例如图 6 中的枝干衔接区域. 另外, 在图像含有丰富细节或微小变化的右侧区域, 新方法也优于其他算子的结果, 如图 6 所示:

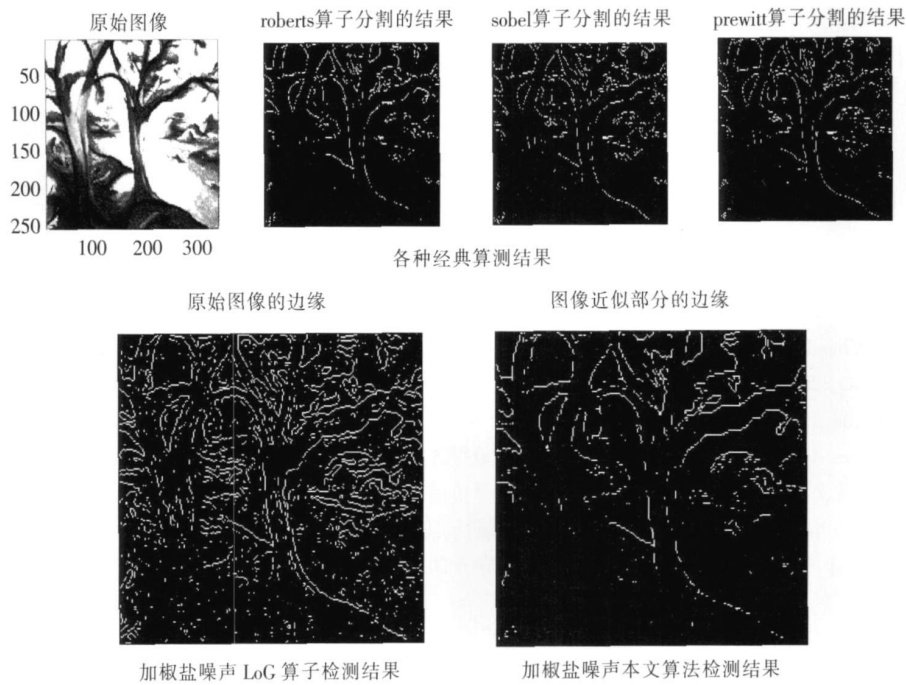


图 6 算法比较

Fig.6 Comparison of algorithms

为了检验本算法对于噪声图像的有效性, 本文使用含有高斯噪声的图像对新方法进行测试. 如图 7 和图 8 所示. 实验表明, 即使对于高斯噪声图像, 新方法仍然可以提取出很多重要的边缘. 同时也可以看出: 与加噪的 LoG 算子相比, 新方法对噪声更加敏感.

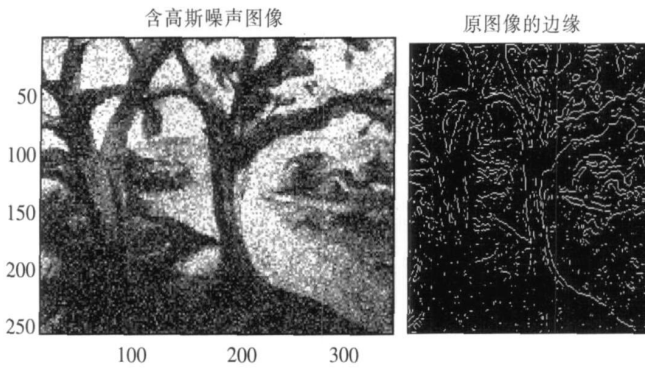


图 7 加高斯噪声 LoG 算子检测结果

Fig.7 The results of adding Gaussian noise LoG operator test

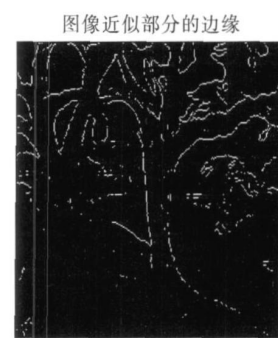


图 8 加高斯噪声本文算法检测结果

Fig.8 The algorithm results of adding Gaussian noise test

4 总结

本文提出了一种新的基于小波包与人类视觉系统的边缘检测算法, 本算法利用人类视觉系统模型的特性进行小波包系数的选择, 将选择的小波包系数作为边缘检测区域, 再寻找零交叉点; 最后通过二维小波包重构函数得到图像近似部分的边缘. 实验结果表明, 本算法与经典的 Roberts, Sobel, Prewitt 和 LoG 4 种边缘检测算子比较, 新方法更具有使用价值.

[参考文献]

- [1] Lee J, Hanlik R, Shapiro L. Morphologic edge detection[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1987, 3(2): 142-156
- [2] 刁麓弘, 于斌, 李华. 一种基于菲涅尔衍射的边缘检测算法[J]. 计算机学报, 2006, 12(29): 2138-2142
- [3] Hou Z J, Wei G W. A new approach to edge detection[J]. Pattern Recognition, 2002, 35(7): 1559-1570
- [4] Tremblais B, Augereau B. A fast multi-scale edge detection algorithm[J]. Pattern Recognition Letters, 2004, 25(26): 603-618
- [5] Zhang L, Bao P. Edge detection by scale multiplication in wavelet domain[J]. Pattern Recognition Letters, 2002, 23(14): 1771-1784
- [6] 王竹青, 王珂, 袁国良, 等. 多层次自适应空间系数高斯小波图像边缘检测[J]. 中国图像图形学报, 2009, 14(7): 1347-1353
- [7] Rakesh R R, Chaudhuri P, Murthy C A. Thresholding in edge detection: A statistical approach[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(7): 927-936
- [8] Konishi S, Yuille A L, Coughlan J M, et al. Statistical edge detection: Learning and evaluating edge cues[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(1): 57-74
- [9] 王磊, 杨付正, 常义林, 等. 基于空间复杂度掩盖的边缘检测[J]. 中国图像图形学报, 2008, 1(13): 100-103
- [10] 张德丰. Matlab 小波分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [11] 董彬, 林小竹, 徐凤. 基于人类视觉系统的小波域数字水印算法[J]. 计算机工程, 2006, 24(32): 138-143

[责任编辑: 孙德泉]