

基于分数阶微分的图像边缘细节检测与提取

陈 青^{1,3}, 刘金平^{1,2}, 唐朝晖¹, 李建奇¹, 吴 敏¹

(1. 中南大学信息科学与工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 湖南师范大学数学与计算机科学学院, 湖南长沙 410081;
3. 湖南工业大学计算机与通信学院, 湖南株洲 412008)

摘 要: 图像边缘细节包含重要的视觉感知信息, 是进一步进行图像理解与场景感知的基础. 针对常用的边缘梯度检测方法难以有效提取类似于分形纹理结构的复杂图像边缘问题, 提出一种基于分数阶微分的图像边缘检测方法. 该方法首先基于分数阶微分的性质进行图像拐点检测, 并进一步结合拉格朗日多项式插值和 Grunwald-Letnikov (G-L) 分数阶微分的定义, 推导出具有非整数步长像素信息的图像边缘检测算子. 实验表明, 该方法能有效提取图像中的边缘细节(拐点)特征. 对被噪声严重污染的具有复杂边缘细节的图像, 该算子同样具有较好的边缘细节检测能力, 获得更好的视觉效果.

关键词: 图像边缘细节检测; 图像拐点; 分数阶微分; 抗噪能力

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013) 10-1873-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.10.001

Detection and Extraction of Image Edge Curves and Detailed Features Using Fractional Differentiation

CHEN Qing^{1,3}, LIU Jin-ping^{1,2}, TANG Zhao-hui¹, LI Jian-qi¹, WU Min¹

(1. School of Information Science & Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;
2. College of Mathematics and Computer Science, Hunan Normal University, Changsha, Hunan 410081, China;
3. School of Computer and Communication, Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan 412008, China)

Abstract: The edge details in images involve significant visual perception information, which play an important role in the further image understanding and scene perception. An image edge detection and extraction method is presented based on the fractional differentiation theory aiming at solving the problems of inaccurate edge detection like fractal structures in the images by the traditional edge detection methods. Firstly, the inflexion points in the images are detected based on the characteristics of fractional differentiation; then, an image edge detail detection and extraction operator with sub-pixel interpolation is derived from the Grunwald-Letnikov (G-L) definition of fractional differentiation combining with the Lagrange interpolation polynomials. The experimental results demonstrate that the proposed operator is capable of extracting image edge details (inflexion points) efficiently. Furthermore, it is able to detect the useful object edge details from image with serious noise to achieve better visual effect.

Key words: image edge detail detection; image flexion points; fractional differentiation; noise robustness

1 引言

图像边缘是视觉目标最基本的特征之一, 它蕴含了视觉感知目标非常重要的内在信息. 图像边缘细节检测与提取是数字图像处理中不可或缺的研究主题, 是进一步实现视觉目标分割、模式分析和图像理解与识别等更高层视觉感知处理的关键性的步骤^[1]. 到目前为止, 许多研究者和工程应用者根据待处理图像的特点已经提出了大量的图像边缘检测算法^[2], 并在特定的工程环境

中取得了较好的应用效果, 但是如何能切实有效地保证视觉图像中各种细节边缘的准确提取仍然是一项极具挑战性的研究课题.

从信号的角度来说, 图像的边缘是由图像中像素值发生急剧变化的点集构成的, 因此经典的边缘检测方法基本上是基于图像像素梯度的方法^[3], 比如基于一阶微分的局部灰度极大值检测的图像边缘检测算子 (Sobel^[4]、Roberts^[5]和 Canny^[6]算子) 和基于二阶微分过零点检测的图像边缘检测算子 (Laplacian 算子、Log^[7]算子).

然而,从理论上来说,这些整数阶微分算子基本只适合于检测图像中高频变化的边缘细节,对自然图像中具有非连续边界点且有低频变化特性的细节部分往往无能为力,比如具有类似分形纹理结构的自然图像边缘^[8].任何自然图像都会包含若干种纹理表面,这些表面间像素灰度值起伏变化显著,外在视觉特性常常表现出分形几何边界,是人们描述和区分不同物体的重要特征之一,在医学影像疾病诊断、图像检索、目标识别和工业在线辨识中的应用越来越广泛^[9].然而,图像纹理细节部分在同种材质的目标表面所展现出来的自相似性和统计相关性等特点在图像上常常表现为图像的中低频特性.对具有丰富表面纹理细节的图像进行边缘检测时,不同纹理区域间的分形边界曲线常常被当成噪声点忽略或者在平坦的纹理表面区域检测出大量的非轮廓性的无用的细节曲线.也就是说,传统的整数阶微分梯度算子对纹理部分的细节检测和边缘特征提取时难以取得较好的处理效果.其他的基于小波变换^[10]和数学形态学^[11,12]以及针对特殊纹理结构^[13,14]进行改进的边缘检测算子可能对某些具有特殊规则的纹理图像具有较好的检测效果,但对自然图像中的随机纹理结构进行处理时往往难以取得更加实质的边缘检测效果.

近年来,分数阶微积分扩展了传统的整数阶微积分方法,并因其独特的性能被广泛应用于信号处理与信息控制等多相关领域中^[15].将分数阶微分理论应用到数字图像处理以解决整数阶微分所不能解决的图像处理和分析问题成了数字图像处理中一个新的研究热点.其中最典型的进展包括图像细节增强与图像边缘提取.Pu^[16]等根据分数阶微分的性质推导出了一系列的基于分数阶微分的图像纹理增强掩模模板,取得了较好的处理结果.为了能更好地获取图像的边界细节,Mathieu^[17]提出了一种基于分数阶微分的边缘检测算子:CRONE算子,实验表明当选用 $(-1 < n < 0)$ 阶分数微分时,该算子对噪声有较强的抑制能力.文献^[18]提出了一种基于分数阶微分的图像纹理分割方法,结果表明该方法对纹理细节丰富的图像能获得较好的分割结果.虽然分数阶微分越来越受到人们的重视,但是如何借助该思想对纹理细节丰富的图像进行有效的边缘检测和细节特征提取以获取更加丰富的图像边缘细节的研究还比较少.

本文针对传统的微分算子在图像边缘提取时对噪声敏感度高和难以有效提取图像中低频细节的不足,根据分数阶微分的特点和图像边缘拐点的性质推导出一种新的图像边缘(拐点)检测算子,并构造出相应的图像边缘检测模板.通过大量的边缘检测实验,对比了该方法与传统的整数阶微分边缘检测算子的优劣,并

进一步分析了该方法对图像噪声的容忍度.

2 图像边缘拐点检测

通过计算图像像素值的梯度变化来进行图像边缘检测是非常有效的处理方法.为了简化描述,以一维信号为例子(可以看成是二维图像信号中的某一列或者某一行),通过获取信号的一阶导数能有效定位信号发生急剧变化的位置,如图1(a)所示.然而,在基于整数阶微分的信号拐点提取时,所获得的检测结果极易受噪声的干扰^[17].受噪声污染的信号和对应的一阶导数如图1(b)所示.从图中可以看出,当信号中存在噪声污染时,信号的一阶导数已经无法体现信号的变化规律,因此也就无法进行信号中拐点检测与提取.

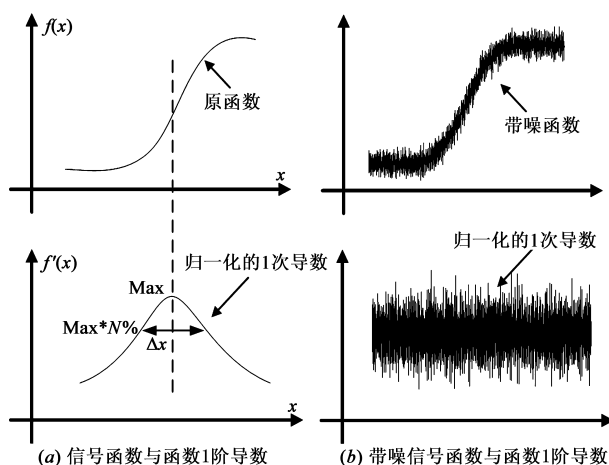


图1 信号梯度与信号拐点对照关系

鉴于整数阶微分在信号处理中存在的某些不足,越来越多的研究者希望借助分数阶微分的某些优点来进行数字信号处理.研究表明,很多自然现象最好的描述方法是采用分数阶微分进行描述^[16].研究表明,分数阶微分掩模处理能有效地对图像的分形纹理细节进行非线性增强,它能够保持图像纹理的低频轮廓,同时非线性保持高频边界特征.不同区间的分数阶微分具有不同的处理性能,通过选择合适的微分阶数将获得更加有效的图像信号处理效果.比如, $(0 < n < 1)$ 阶的分数阶微分能大幅提升信号的低频成分,非线性增强信号的中频成分和保留信号的高频成分,对具有丰富纹理细节的图像的边界检测、纹理增强等进行处理时具有天然的优越性.

为了深入分析基于分数阶微分的图像边缘检测方法,首先考虑 $f(x)$ 基本的整数阶导数的定义,在 x 轴递增方向的导数定义 $Df(x)$ 如下:

$$Df(x) = f'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x) - f(x-h)}{h} \quad (1)$$

为了方便计算,定义延迟算子为 q^{-1} ,那么 $f(x)$ 的左右

平移可以记为 $q^{-1}f(x) = f(x - h)$ 和 $qf(x) = f(x + h)$. 于是式(1)可以简写为

$$f'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1 - q^{-1}}{h} f(x) \quad (2)$$

并记一阶导数算子为 $\underline{D} = \frac{1 - q^{-1}}{h}$, 那么 n 阶导数算子可以表示为

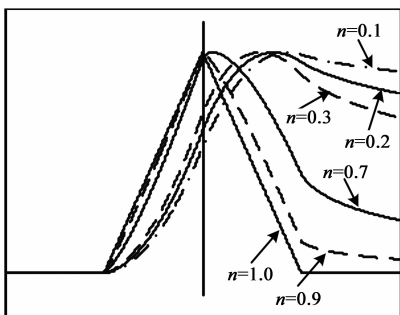
$$\underline{D}^{(n)} = \left(\frac{1 - q^{-1}}{h} \right)^n \quad (3)$$

也就是说 $f(x)$ 的 n 阶导数可以采用以下公式进行计算

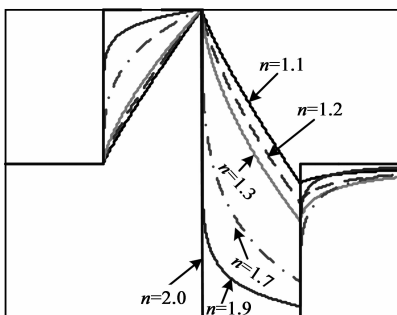
$$\begin{aligned} \underline{D}^{(n)} f(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \left(\frac{1 - q^{-1}}{h} \right)^n f(x) \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^n} \sum_{k=0}^m (-1)^k \binom{n}{k} f(x - kh) \end{aligned} \quad (4)$$

将式(4)的微分阶数 n 从整数推广到分数, 并令 $m = \lfloor n \rfloor$, 式(4)就成了分数阶微分的 Grunwald-Letnikov (GL) 定义形式^[19]. 对于 $n > 0$ 情况, 在式(4)的基础上可以获得在 x 轴递增方向的函数任意分数阶导数 $\underline{D}^{(n)} F$

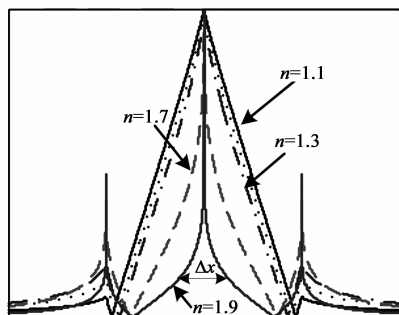
$$\begin{aligned} \underline{D}^{(n)} F &= \lim_{h \rightarrow 0} F^{(n)}(x) \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{h^{-n}}{\Gamma(-n)} \sum_{k=0}^m (-1)^k \frac{\Gamma(k-n)}{\Gamma(k+1)} F(x - kh) \end{aligned} \quad (5)$$



(a) 0.1-1之间分数阶微分



(b) 1.1-2之间分数阶微分



(c) 综合分数阶微分算子 $\underline{D}^{(n)}$

图2 分数阶微分与信号拐点检测

从图2可以看出, 当采用 $(1 > n > 0)$ 阶的分数阶微分计算时, 随着 n 的减小, 函数梯度的极值会向右偏移, 而采用 $(1 < n < 2)$ 阶微分计算时, 函数梯度最大值会随着 n 的增大在梯度最大值的右侧产生一个锐化衰减. 在对图像信号中的边缘进行检测时, 如果所有的梯度极值在真实梯度最大值的左右两边都锐减(构成尖峰的话), 那么所获得的图像的边缘将更加精确.

因此, 本文综合考虑函数 x 轴递增和 x 轴递减方向的分数阶导数, 通过计算 $|\underline{D}^{(n)} F - \underline{D}^{(n)} F|$ 在图像信号的各边缘拐点处产生一个较窄的梯度尖峰. 这样在后续的图像边缘点选取时就能获得更加精确的图像边界. 图2(c)显示了采用改进了梯度提取方法后获得的不同阶分数阶 $(1 < n < 2)$ 信号梯度分布图. 该图表明,

而对于 $n < 0$ 的广义分数阶微分, 其对应的 Riemann-Liouville(R-L) 定义为

$$\begin{aligned} \underline{D}_{R-L}^{(n)} f(x) &= \frac{d^n}{[d(x-a)]^n} f(x) \Big|_{R-L} \\ &= \frac{1}{\Gamma(-n)} \int_a^x (x-t)^{-n-1} f(t) dt \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $f(x)$ 的定义域区间为 $[a, x]$. 根据 G-L 定义, 扩展的分数阶微分和整数阶微分一样, 仍然具有以下性质 $\underline{D}^{(n)} \underline{D}^{(v)} F = \underline{D}^{(n+v)} F$. 进而, 可以将任意分数阶 $(n > 0)$ 分成整数 $m = \lceil n \rceil$ 和小数 $v = n - m$ 两部分, 再通过结合 G-L 和 R-L 定义, 那么 $\underline{D}^{(n)} F$ 可以用下式来计算^[16]

$$\begin{aligned} \underline{D}^{(n)} F &= \frac{d^m}{dx^m} \frac{d^{n-m}}{(x-a)^{n-m}} F(x) \\ &= \sum_{k=0}^m \frac{(x-a)^{k-n} s^{(k)}(a)}{\Gamma(k-n+1)} \\ &\quad + \frac{1}{\Gamma(m-n)} \int_a^x \frac{s^{(m)}(t)}{(x-t)^{n-m+1}} dt \end{aligned} \quad (7)$$

对图1中的1维信号函数进行不同阶的分数阶求导, 图2(a)和(b)分别显示了分数阶为 $(0 < n < 1)$ 和 $(1 < n < 2)$ 这两个区间的信号函数分数阶导数.

该方法能在函数的梯度变化极值位置产生一个较大的尖峰, 这样就能更加精确地定位出函数中拐点的位置.

3 图像边缘检测模板设计

通过 $\underline{D} F(x)$ 算子对图像进行边缘检测可以有效提取图像的边缘拐点, 其中

$$\underline{D}^{(n)} F(x) = |\underline{D}^{(n)} - \underline{D}^{(n)}| \quad (8)$$

由式(5)可知, 目前常用的函数的 n 阶分数阶微分计算方法为

$$\underline{D}^{(n)} F(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{h^{-n}}{\Gamma(-n)} \sum_{k=0}^{\lfloor n \rfloor} \frac{\Gamma(k-n)}{\Gamma(k+1)} F(t - kh) \quad (9)$$

常用的 $\underline{D}^{(n)} F$ 定义都是基于整数像素的计算结果. 但实际采集到的图像是经过采样量化后的离散函数,

在进行边缘梯度计算时除了在整数像素点取值之外,在非像素点也应该进行估值,以获得更加精确的图像边缘曲线.本文通过引入 Lagrange 多项式插值方法获得其中非整数像素点的梯度关系.将式(9)修改如下

$$\underline{\Delta}^{(n)} F(t) = \frac{h^{-n}}{\Gamma(-n)} \sum_{k=0}^{\lfloor n \rfloor} \frac{\Gamma(k-n)}{\Gamma(k+1)} F\left(t + \frac{nh}{d} - kh\right) \quad (10)$$

其中 $d > 1$, 由于 $F\left(t + \frac{nh}{d} - kh\right)$ 只在 $n=0, \pm d, \pm 2d, \dots$ 处存在确切的像素值,那么其他位置需要通过 Lagrange 多项式插值获得.考虑信号 $F(t)$ 中的近邻 3 点, $F(t+h-kh)$, $F(t-h-kh)$, $F(t-kh)$, 经过插值可以得到其中任意点 $F(\xi)$

$$F(\xi) = \frac{(\xi-t+kh)(\xi-t+h+kh)}{2h^2} F(t+h-kh) - \frac{(\xi-t-h+kh)(\xi-t+h+kh)}{h^2} F(t-kh) + \frac{(\xi-t-h+kh)(\xi-t+kh)}{2h^2} F(t-h-kh) \quad (11)$$

令 $\xi = t + \frac{nh}{d} - kh$, 代入到式(11), 可以得到

$$F\left(t + \frac{nh}{d} - kh\right) \cong \left(\frac{n}{2d} + \frac{n^2}{2d^2}\right) F(t+h-kh) + \left(1 - \frac{n^2}{d^2}\right) F(t-kh) + \left(\frac{n^2}{2d^2} - \frac{n}{2d}\right) F(t-h-kh) \quad (12)$$

将 $F\left(t + \frac{nh}{d} - kh\right)$ 代入到式(10)中, 从而获得 $\underline{\Delta}^{(n)} F(t)$ 更加精确的计算方法如下

$$\underline{\Delta}^{(n)} F(t) = \frac{h^{-n}}{\Gamma(-n)} \sum_{k=0}^{\lfloor n \rfloor} \frac{\Gamma(k-n)}{\Gamma(k+1)} * \left(F_k + \frac{n}{2d} (F_{k-1} - F_{k+1}) + \frac{n^2}{2d^2} (F_{k-1} - 2F_k + F_{k+1}) \right) \quad (13)$$

其中 $F_{k-1} = F(t-h-kh)$, $F_{k+1} = F(t+h-kh)$, $F_k = F(t-kh)$. 式(13)进一步扩展了 G-L 的分数阶微分的定义, 通过修改步长 d , 将获得具有非整数像素精度的分数阶梯度.

对图像进行梯度检测时, 一般通过设计特定的模板对图像进行卷积计算以获得相应的梯度分布. 设图像灰度值为 $f(x, y)$, 对应的卷积模板为 $W(s, t)$, 模板大小为 $s \times t$. 对应的二维图像函数在 x 轴和 y 轴正向的分数阶微分的差分求解如下

$$\frac{\partial^{(n)} f(x, y)}{\partial x^n} \cong \sum_{k=0}^{\lfloor n \rfloor} T_k f(x-i, y) \quad (14)$$

$$\frac{\partial^{(n)} f(x, y)}{\partial y^n} \cong \sum_{k=0}^{\lfloor n \rfloor} T_k f(x, y-i) \quad (15)$$

其中

$$T_i = \frac{1}{\Gamma(-n)} \left[\frac{\Gamma(i-n+1)}{\Gamma(i+2)} \left(\frac{n}{2d} + \frac{n^2}{2d^2} \right) + \frac{\Gamma(i-n)}{\Gamma(i+1)} \left(1 - \frac{n^2}{d^2} \right) + \frac{\Gamma(i-n-1)}{\Gamma(i)} \left(-\frac{n}{2d} + \frac{n^2}{2d^2} \right) \right] \quad (16)$$

通过同样的方法可以获得基于 x 轴和 y 轴递减方向的梯度 $\underline{D}^{(n)}$, 这样根据式(8)就可以构成完整的图像边缘检测模板 $W(s, t)$. 为了尽可能检测图像多方向边缘梯度, 可以通过分别检测图像水平、垂直、对角线和斜对角线四个主要方向的图像分数阶微分梯度, 获得其对应的最大值作为该点的梯度值. 所构成的图像边缘检测模板如图 3 所示. 在计算时, 为了保证 $\sum_i T_i = 0$ 以满足边缘提取的需要, 特别令 $T_0 = -\sum_i T_i + T_i$.

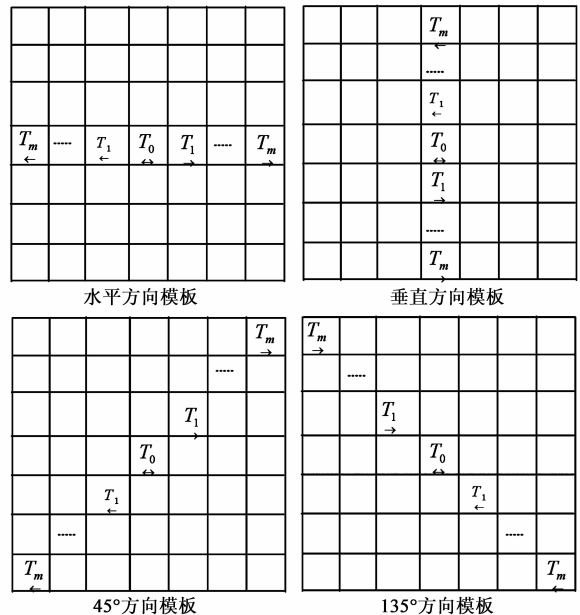


图3 图像边缘检测模板示意图

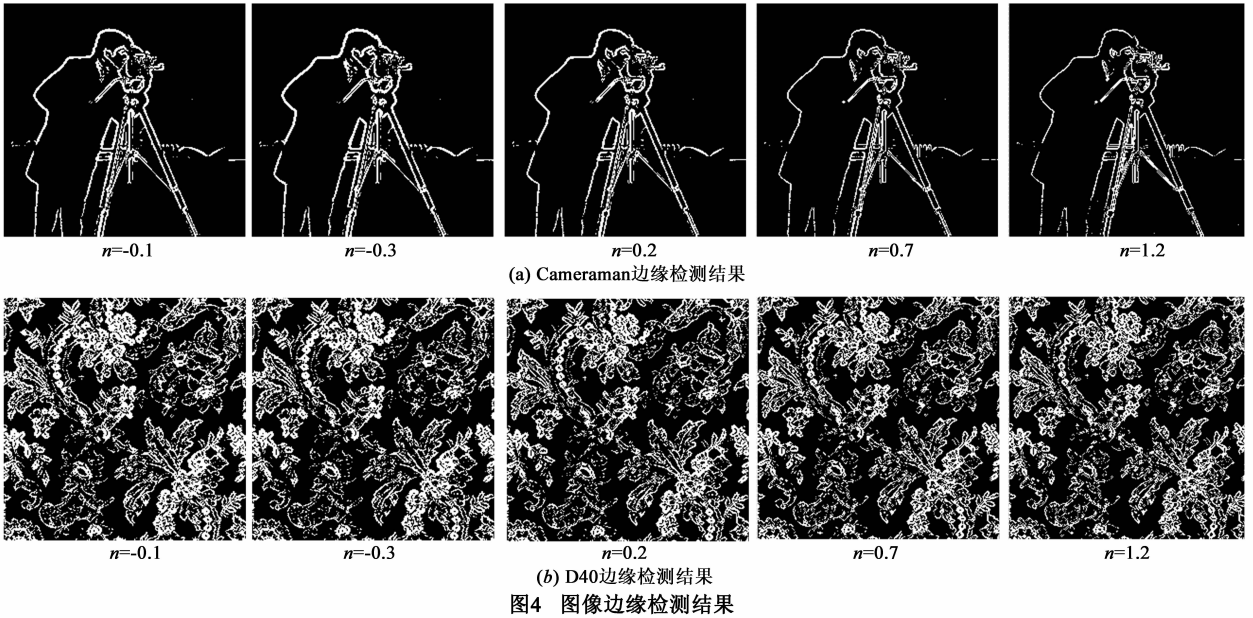
4 图像边缘检测结果与性能分析

4.1 图像边缘检测结果

为了验证本文提出的边缘检测算子的性能, 设立了 5×5 的边缘检测模板进行图像边缘提取实验, 其中亚像素步长 $d=2$. 首先, 通过选用不同的分数阶微分根据利用式(16)获取图像边缘检测掩模模板, 然后将这些不同分数阶微分条件下的掩模模板应用到图像 Camerman 和 Brodatz 纹理库中的 D40 图像边缘检测与特征提取实验中, 实验结果如图 4 所示. 其中 Camerman 图像和 D40 图像都带有较为复杂的纹理细节. 特别是 D40, 该幅图像全部由复杂的曲线边缘等具有各种分形纹理结

构组成,常用的边缘检测方法往往难以有效地刻画出该图像的边缘细节.通过采用不同微分阶的掩模模板进行图像边缘检测能获得不同的边缘检测效果.实验结果表明,本文所提出的分数阶微分算子能较好地提取图像的灰度值发生较大变化的边缘拐点,同时对图像中的细微的边缘细节也能通过选择不同的微分阶数来保持.图 4 中的边缘图像经过了 Ostu 阈值处理.从图

像的边缘检测结果可以明显看出,当选用的分数阶微分算子的阶数在 -1 到 1 之间时,能减少噪声等局部细微变化点的干扰,所取得的全局目标轮廓边缘的结果将优于 1 到 2 之间的微分算子.当需要更多地关注图像中的高频变化细节时,选择微分阶数在 1 到 2 之间的微分算子将取得更好的效果.



4.2 图像边缘检测性能分析与对比

(1) 图像边缘检测能力

任意图像可以看作是一个具有二个变量的函数.数字图像信号经过采样、量化, $f = f(x) * \delta(x)$, 那么图像的分数阶导数可以写成

$$\underline{D}^{(n)} f = f(x) * \underline{D}^{(n)} \delta(x) \quad (17)$$

式(17)中, $\underline{D}^{(n)} \delta(x)$ 表示 Dirac 冲击响应函数 $\delta(x)$ 在 x 递增方向的导数, $\underline{D}^{(n)} \delta(x)$ 为

$$\underline{D}^{(n)} \delta(x) = \begin{cases} \frac{x^{-n-1}}{\Gamma(-n)}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (18)$$

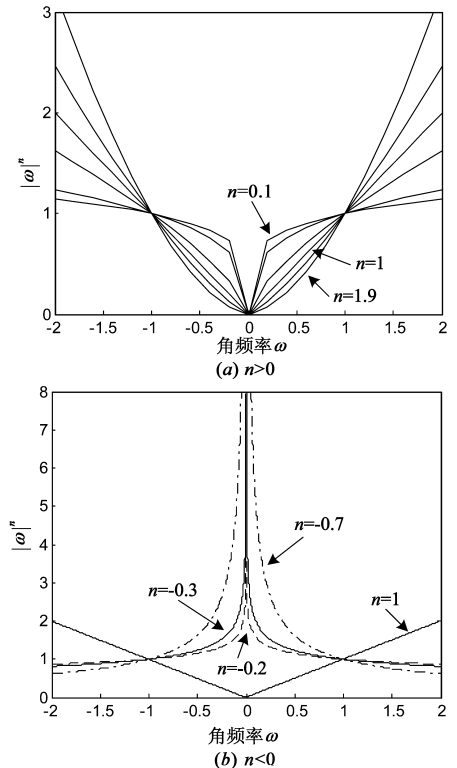
由于本文在进行图像边缘提取时综合考虑了 x 递增和递减方向双向结合的检测算子 $\underline{D}^{(n)}$, 那么

$$\overleftrightarrow{D}^{(n)} \delta(x) = \frac{|x|^{-n-1}}{\Gamma(-n)} \quad (19)$$

此时 $\overleftrightarrow{D}^{(n)} \delta(x)$ 对应的傅里叶频谱特征为

$$\overleftrightarrow{D}^{(n)} F(x) \overset{FT}{\Leftrightarrow} FT(\overleftrightarrow{D}^{(n)} \delta(x)) F(\omega) \propto F(\omega) (i\omega)^n \quad (20)$$

式(20)中, $F(\omega)$ 表示信号函数对应傅里叶频谱.从上面的公式可知,分数阶微分实际上是对图像函数进行



的广义幅度和相位调制.根据式(20)计算出分数阶微分的幅频特性曲线如图5所示.根据分数阶微分的幅频特性,当选阶数为 $1 \sim 2$ 间的分数阶微分算子时,能极大地增强图像的高频特征,但是可能会获得许多与目标轮廓无关的图像内部纹理细节.而当选用 $-1 \sim 0$ 之间的分数阶微分算子时,则可能抑制图像噪声和图像中局部细节的干扰,获得图像大致的目标轮廓信息.更确切地说,分数阶($1 < n < 2$)微分算子都有提高信号高频成分的作用且随微分阶数的增加呈非线性急剧增长,同时对低频信号有削弱作用.而对于分数阶微分($0 < n < 1$)而言,高频信号被提升程度虽小于 $1, 2$ 阶微分,但也获得了足够的提升,同时,中频信号也得到较大增强,低频信号却没有进行大幅衰减,而是呈非线性保留.由此可见,分数阶微分在提升图像高频成分的同时,对中频成分和低频信号做了非线性增强和保留.

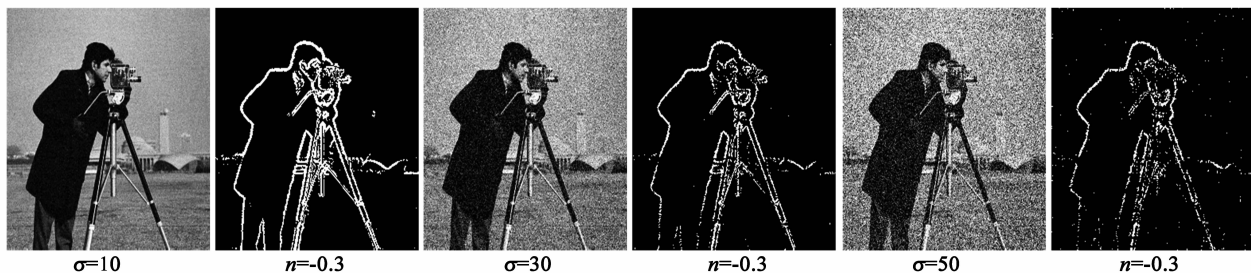
总之,根据图像的特点和图像处理中目标关注度的不同,通过选择不同阶的分数阶微分可以有效提升信号高频成分、非线性增强信号中频成分和保留信号甚低频成分.在数字图像中,一般高频成分对应图像的边缘和噪声,中频成分对应图像的纹理细节,低频成分对应图像的平滑区域.所以,采用分数阶微分进行图像边缘检测时,不仅能较好地提取图像中具有高频特性的边缘信息,还能更加有效地提取图像中的具有低频特性的复杂纹理边缘细节.因此,在进行图像边缘拐点检测与提取时,本文提出的分数阶微分算子理论上能得到更加理想的处理效果.

(2) 分数阶微分算子抗噪能力

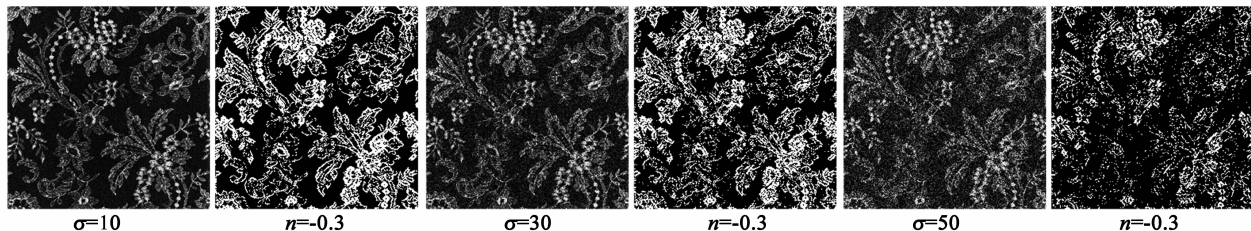
由图5中的图像分数阶微分的幅频特性可知,采用

$0 \sim 1$ 之间的分数阶微分时,相比 1 阶和 2 阶微分将对图像中的高频进行一定压缩,同时增强图像的低频细节.由于图像中的噪声一般表现为高频部分,与常用的整数阶微分算子相比,该区域的微分算子将对图像中噪声具有一定的抑制作用.同时,对于小 0 的分数阶微分,由于其能最大限度地增强图像的低频特征,并且极地抑制图像的高频成分(如图5(b)所示),这对增强图像的纹理细节,抑制噪声干扰将起到非常重要的作用.

为了验证本文算子对噪声的抗干扰能力,采用具有不同噪声水平的图像进行边缘提取对比.图像中的噪声通过手动叠加不同噪声水平的高斯白噪声组成.含噪图像及对应的图像边缘检测结果如图6所示,其中图像噪声水平由叠加的噪声标准差 σ 控制.带噪图像的边缘检测结果表明,当选 $n = -0.3 < 0$ 的分数阶微分算子时,即使图像被严重污染,本文提出的边缘拐点提取方法仍然能获得较好的视觉效果.为了更加直观对比本文的边缘检测方法经典的边缘检测算子对图像噪声的适应程度,图7标记了含有噪声的Camerman和D40图像中的单独一行信号经不同的边缘检测方法所获得的图像拐点检测结果.结合未带噪声的检测结果(图6)和带噪图像检测结果(图7)可以看出,通过选用 $n = -0.3 < 0$ 的分数阶微分算子进行图像边缘检测时,本文的方法在较高噪声的污染下也能较好地提取图像中的拐点,极大保持了图像的边缘特性,而Canny算子将因噪声存在检测出大量的非边界噪点,Sobel算子会因噪声的存在无法检测出大量的存在的拐点.



(a) 不同噪声水平的Cameraman图像边缘检测结果



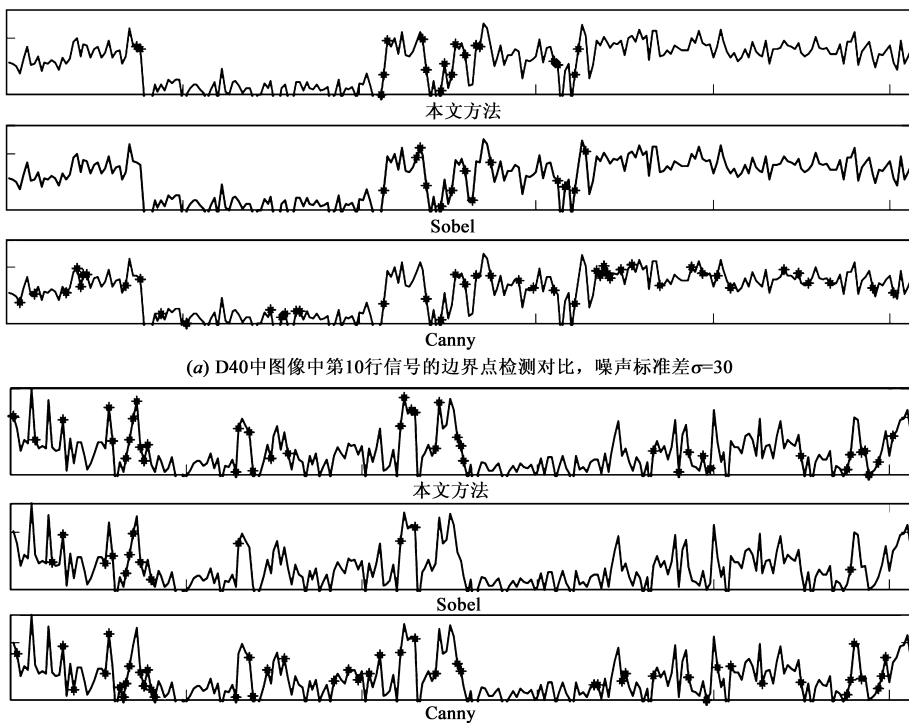
(b) 不同噪声水平的Cameraman图像边缘检测结果

图6 带噪图像边缘检测结果

5 结论

分数阶微分理论在图像信号处理中具有非常积极的作用.根据分数阶微分的性质可以设计出许多有用的图像处理算子以达到理想的处理效果.本文以分数阶微分理论为基础,针对常用的整数阶微分算子和传统分数阶微分定义导出的微分算子在边缘检测中存在的对噪声敏感、难以有效提取图像中细节边界的问题,提出了一种具有非整数像素精度、步长可调的基于分数阶微分的图像边缘检测和细节提取方法.该方法能在图像拐点处生产一个尖峰梯度,获得更加有效的图像拐点检测结果.通过与现有的边缘检测方法进行图像边缘提取对比实验,可以发现,通过选择合适的微分

阶数,本文提出的图像边缘检测方法对于图像中灰度变化不大的纹理细节信息并没有被大幅度衰减,而是一定程度上得到了保留,能够较好地检测出更多的图像纹理细边缘,产生较好的视觉效果;同时本文的方法具备传统边缘检测算子的计算简单、复杂度低的优点,边界拐点检测结果明显优于整数阶微分边缘检测方法.如果能进一步结合图像的先验信息或者对检测的边缘点进行相应的目标边缘曲线插值等后续处理,将能有效地获取图像中视觉目标的轮廓,为更高层的场景分析、视觉理解奠定基础.与此同时,本文的方法还有进一步深入研究的空间,比如进一步从理论上分析以确定更佳的分阶数和获得更加有效的亚像素边缘检测结果是后续研究的目标.



(a) D40中图像中第10行信号的边界点检测对比, 噪声标准差 $\sigma=30$

(b) Cameraman图像中第150行图像信号的边界点检测对比, 噪声标准差 $\sigma=30$

图7 带噪图像边缘点检测性能比较

参考文献

- [1] Ziou D, Tabbone S. Edge detection techniques-an overview[J]. Pattern Recognition & Image Analysis, 1998, 8(4): 537 - 559.
- [2] Wang H, Oliensis J. Generalizing edge detection to contour detection for image segmentation[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2010, 114(7): 731 - 744.
- [3] PAPARI G, PETKOV N. Edge and line oriented contour detection: State of the art[J]. Image and Vision Computing, 2011, 29(2): 79 - 103.
- [4] Kanopoulos N, Vasanthavada N, Baker R L. Design of an image edge detection filter using the sobel operator [J]. IEEE

Journal of Solid-State Circuits, 1988, 23(2): 358 - 367.

- [5] Zuniga O A, Haralick R M. Integrated directional derivative gradient operator[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1987, 17(3): 508 - 517.
- [6] Canny J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, PAMI - 8(6): 679 - 698.
- [7] Deng G, Pinoli J-C. Differentiation-based edge detection using the logarithmic image processing model[J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 1998, 8(2): 161 - 180.
- [8] Hamami L, Lassouaoui N. An Approach Fractal and Analysis of Variogram for Edge Detection of Biomedical Images[M]. Bio-

- Inspired Applications of Connectionism: Springer, 2001. 336 – 344.
- [9] 刘丽, 匡纲要. 图像纹理特征提取方法综述[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(4): 622 – 635.
- Liu L, Kuang G. Overview of image textural feature extraction method[J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(4): 622 – 635. (in Chinese)
- [10] 李哲涛, 李仁发, 谢井雄. 基于全向小波的图像边缘检测算法[J]. 电子学报, 2012, 40(12): 2451 – 2455.
- Li Z, Li R, Xie J. An edge detection algorithm based on omnidirectional wavelet transform [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(12): 2451 – 2455. (in Chinese)
- [11] Fathy M, Siyal M. An image detection technique based on morphological edge detection and background differencing for real-time traffic analysis [J]. Pattern Recognition Letters, 1995, 16(12): 1321 – 1330.
- [12] 赵继印, 徐艳蕾, 焦玉斌. 基于顺序形态学的图像边缘检测快速算法的研究[J]. 电子学报, 2008, 36(11): 2195 – 2199.
- Zhao J, Xu Y, Jiao Y. The fast arithmetic study of image edge detection based on the order morphology[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(11): 2195 – 2199. (in Chinese)
- [13] 陶洪久, 柳健, 田金文. 基于小波变换和数学形态学的遥感图像边缘检测[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(2): 154 – 157.
- Tao H, Liu J, Tian J. Remote sense image edge detection based on wavelet transform and mathematical morphology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2002, 31(2): 154 – 157. (in Chinese)
- [14] 余鹏, 封举富. 基于高斯混合模型的纹理图像分割[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(3): 281 – 285.
- Yu P, Feng J. Texture image segmentation based on Gaussian mixture models[J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(3): 281 – 285. (in Chinese)
- [15] Ortigueira M D. An introduction to the fractional continuous-time linear systems: the 21st century systems[J]. IEEE Circuits and Systems Magazine, 2008, 8(3): 19 – 26.
- [16] Pu Y-F, Zhou J-L, Yuan X. Fractional differential mask: A fractional differential-based approach for multiscale texture enhancement[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(2): 491 – 511.
- [17] Mathieu B, Melchior P, Oustaloup A, et al. Fractional differentiation for edge detection [J]. Signal Processing, 2003, 83(11): 2421 – 2432.
- [18] Pu Y-F, Zhou J-L. A novel approach for multi-scale texture segmentation based on fractional differential[J]. International Journal of Computer Mathematics, 2011, 88(1): 58 – 78.
- [19] Ortigueira M D. A coherent approach to non-integer order derivatives[J]. Signal Processing, 2006, 86(10): 2505 – 2515.

作者简介



陈青女, 1967年10月出生, 湖南长沙人, 湖南工业大学计算机与通信学院副教授. 2004年毕业于中南大学信息科学与工程学院, 获硕士学位, 现为中南大学信息科学与工程学院博士研究生. 主要从事计算机信息技术、智能自动化信息检测与处理等领域的研究开发工作.



刘金平(通信作者) 男, 1983年9月出生, 湖南邵阳人. 2006年和2009年毕业于中南大学信息科学与工程学院, 分别获工学学士和硕士学位, 现为中南大学信息科学与工程学院博士研究生. 主要从事工业过程视觉监控与模式识别方面的研究工作.

E-mail: ljp202518@163.com