

Journal of Image  
and Graphics

# 中国图象图形学报



ISSN1006-8961  
CN11-3758/TB

2012 3  
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所  
中国图象图形学学会主办  
北京应用物理与计算数学研究所

# 中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年3月 第17卷 第3期(总第191期)

## 目次

### 图像处理和编码

- 摄影测量共线方程的单位四元数描述 ..... 杨化超,卢晓攀,王永波,姚国标(301)
- 分形压缩感知高维信号重构方法 ..... 刘佶鑫,孙权森(309)
- 自适应子矢量划分的快速码字搜索算法 ..... 吴鑫鹏,潘志斌,李达(315)
- 基于人类视觉模型的各向异性扩散滤波方法 ..... 宋建军,侯志强,余旺盛(321)
- 整数提升小波多相矩阵分解系数的快速提取算法 ..... 王锋,赵志文,牟盛(329)
- 自适应样本块大小的图像修复方法 ..... 孟春芝,何凯,焦青兰(337)

### 图像分析和识别

- 改进FCM在交互式图像分割中的应用 ..... 依玉峰,高立群,郭丽(342)
- 输电导线图像目标识别方法 ..... 孙凤杰,杨镇浓,李媛媛,范杰清(349)
- 无表观特征小目标检测与跟踪 ..... 陶霖密,李亮,邸慧军(357)
- 应用改进频率调谐的海上小目标检测方法 ..... 任蕾,施朝健,冉鑫(365)
- 视觉注意原理局部特征的行人检测 ..... 刘俊涛,刘文予,吴彩华,李雄伟,冯镔(370)
- 尺度不变单样本人脸识别方法 ..... 王炜强,张晓阳,曹春芹,付奎生(380)
- 复杂交通场景中采用稀疏表示的车辆识别方法 ..... 李修志,吴健,崔志明,陈建明(387)
- 利用复合导数的边缘检测新算法 ..... 程金梅,叶永强,姜斌(393)

## 图像理解和计算机视觉

迭代分割逼近:新的基于局部响应显著度的角点检测 ..... 马丽红,谭幸均(402)

融合 SIFT 特征的熵图估计医学图像非刚性配准 ..... 张少敏,支力佳,赵大哲,林树宽,赵宏(412)

## 计算机图形学

面向非均匀采样点集的 3 维表面重建算法 ..... 刘晓平,段瑞青,余烨(419)

基于可编程图形管线的大规模流程工厂模型多分辨率绘制方法 ..... 周剑,唐卫清,朱耀琴,夏明,黄晓剑(426)

带有位置修正的环境映射 ..... 王晨昊,汤晓安,孙即祥,马伯宁(435)

## 遥感图像处理

海岸线遥感信息提取的元胞自动机方法及其应用 ..... 冯永玖,韩震(441)

# 中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 3 期

2012 年 3 月 16 日出版

**主管单位** 中国科学院  
**主 办** 中国科学院遥感应用研究所  
中国图象图形学学会  
北京应用物理与计算数学研究所  
**主 编** 李小文  
**编辑出版** 《中国图象图形学报》编辑出版委员会  
北京 9718 信箱 邮编 100101  
电子信箱:jig@irsa. ac. cn  
电话:010-68407995 010-82614429  
网 址:www. cjig. cn  
**印刷装订** 北京北林印刷厂  
**广告经营许可证** 京朝工商广字第 0346 号  
**总 发 行** 北京报刊发行局  
**订 购** 全国各地邮局  
**国外发行** 中国国际图书贸易总公司  
(中国国际书店)  
(北京 399 信箱 邮编 100044)

**Superintended by** Chinese Academy of Sciences  
**Sponsored by** Institute of Remote Sensing Application,  
CAS China Society of Image and Graphics  
Institute of Applied Physics and Computational  
Mathematics  
**Chief editor** LI Xiaowen  
**Editor, Publisher** Editorial and Publishing Board  
of Journal of Image and Graphics  
(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)  
E-mail:jig@irsa. ac. cn  
**Distributed by** Beijing Bureau for Distribution of Newspapers  
and Journals  
**Domestic** All Local Post Offices in China  
**Foreign** China International Book Trading Corporation  
(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)  
**Printed by** Beijing Beilin Printing House

# Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 3 March 2012

## Contents

### Image Processing and Coding

- Unit quaternion based description of collinearity equations ..... Yang Huachao, Lu Xiaopan, Wang Yongbo, Yao Guobiao(301)
- Fractal compressive sensing for high-dimension signal recovery ..... Liu Jixin, Sun Quansen(309)
- Fast codeword search algorithm based on adaptive subvector partitions ..... Wu Xinpeng, Pan Zhibin, Li Da(315)
- Anisotropic diffusion image smoothing method based on human visual model ..... Song Jianjun, Hou Zhiqiang, Yu Wangsheng(321)
- Fast extraction algorithm of the polyphase matrix decomposition coefficient based integer lifting wavelet  
..... Wang Feng, Zhao Zhiwen, Mou Sheng(329)
- Image completion method with adaptive patch size ..... Meng Chunzhi, He Kai, Jiao Qinglan(337)

### Image Analysis and Recognition

- Application of improved FCM for interactive image segmentation ..... Yi Yufeng, Gao Liqun, Guo Li(342)
- Methods of transmission line target recognition ..... Sun Fengjie, Yang Zhenhuan, Li Yuanyuan, Fan Jieqing(349)
- Featureless small object detection and tracking ..... Tao Linmi, Li Liang, Di Huijun(357)
- Small target detection method under sea surface environment using revised frequency tuned saliency detection  
..... Ren Lei, Shi Chaojian, Ran Xin(365)
- Pedestrian detection method using local feature based on vision attention  
..... Liu Juntao, Liu Wenyu, Wu Caihua, Li Xiongwei, Feng Bin(370)
- Scale invariant face recognition from single sample ..... Wang Weiqiang, Zhang Xiaoyang, Cao Chunqin, Fu Kuisheng(380)
- Sparse representation method of vehicle recognition in complex traffic scenes  
..... Li Xiuzhi, Wu Jian, Cui Zhiming, Chen Jianming(387)
- Novel edge detection algorithm using a composite derivative ..... Cheng Jinmei, Ye Yongqiang, Jiang Bin(393)

### Image Understanding and Computer Vision

- Iterative segment approaching: new corner detection based on local response saliency ..... Ma Lihong, Tan Xingjun(402)
- Entropic graph estimation integrated with SIFT features for medical image non-rigid registration  
..... Zhang Shaomin, Zhi Lijia, Zhao Dazhe, Lin Shukuan, Zhao Hong(412)

### Computer Graphics

- Three-dimensional surface reconstruction algorithm for non-uniform sampling points ..... Liu Xiaoping, Duan Ruiqing, Yu Ye(419)
- Multi-resolution rendering approach of large-scale process plant models based on programmable graphics pipeline  
..... Zhou Jian, Tang Weiqing, Zhu Yaoqin, Xia Ming, Huang Xiaojian(426)
- Environment mapping with position rectification ..... Wang Chenhao, Tang Xiao'an, Sun Jixiang, Ma Boning(435)

### Remote Sensing Image Processing

- Cellular automata approach to extract shoreline from remote sensing imageries and its application  
..... Feng Yongjiu, Han Zhen(441)

中图法分类号: TP301.6 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)03-0393-09

论文引用格式: 程金梅, 叶永强, 姜斌. 利用复合导数的边缘检测新算法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(3): 393-401

# 利用复合导数的边缘检测新算法

程金梅, 叶永强, 姜斌

南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016

**摘要:** 图像是人类获取和交换信息的主要来源。图像的边缘是图像最基本也是最重要的特征之一。图像边缘检测是计算机视觉和图像处理领域的经典研究课题。提出由分数阶次微积分组合而成的复合导数概念, 并在该复合导数的基础上提出一种边缘检测新方法。通过实验验证了新算法的有效性, 展现了新算子在检测精度与抗噪性两方面的特点。最后, 对新算子与两种经典算子 Canny 和 CRONE 进行了定性和定量的分析和比较。通过比较, 新算法的优越性体现在边缘定位准确, 在很好地抑制虚假边缘的同时能够检测出精细的真实边缘。

**关键词:** 图像处理; 边缘检测; 分数阶次微积分; 检测精度; 抗噪性; 定性和定量分析和比较

## Novel edge detection algorithm using a composite derivative

Cheng Jinmei, Ye Yongqiang, Jiang Bin

College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

**Abstract:** Images are the main source through which humans acquire and exchange information. Edges are one of the most fundamental and important feature of image. Edge detection is a classic research problem of computer vision and image processing. In this paper we present a new edge detection operator based on a composite derivative, which is realized by the combination of fractional differentiation and integration. The features of the new operator, in terms of detection accuracy and noise immunity, are demonstrated through experiments, and the experimental results verify the effectiveness of the new operator. Finally, qualitative and quantitative comparisons of the new operator with two classical operators, Canny and CRONE, are performed. The comparisons show the superiority of the new algorithm, which is reflected in the abilities of accurate edge localization and good suppression of false edges while still being able to detect fine true edges.

**Key words:** image processing; edge detection; fractional differentiation and integration; detection accuracy; noise immunity; qualitative and quantitative comparisons.

## 0 引言

边缘是图像的最基本特征。通过对人类视觉系统的研究可以看出, 图像中的边缘非常重要。往往仅凭一条粗略的边缘轮廓线就能识别出一个物体。

因此, 如何获取图像的边缘和轮廓, 成为图像处理与分析中的研究热点。

由于边缘为局部图像中灰度发生急剧变化的区域边界, 传统的图像边缘检测方法大多可归结为图像高频分量的增强过程, 微分运算自然就成了边缘检测与提取的主要手段<sup>[1]</sup>。许多经典边缘检测算

收稿日期: 2011-05-19; 修回日期: 2011-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(61074161, 61034005); 教育部博士学科点专项科研项目(20103218120014); 2009年江苏高校优秀科技创新团队资助项目(2009-3); 南京航空航天大学引进人才科研启动基金项目(S0938-032); 南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目(NS2010090)

第一作者简介: 程金梅(1987—), 女, 南京航空航天大学自动化学院控制理论与控制工程专业硕士研究生, 主要研究方向为图像处理。  
E-mail: jennyjinmei@163.com

子都采用微分运算来进行边缘检测<sup>[1-5]</sup>。由于图像中的噪声和边缘都属于高频分量,微分运算会引入大量的噪声,对边缘检测结果造成干扰。因此,在微分运算之前要先采用适当的平滑滤波来抑制噪声的影响。高斯平滑滤波是最常用的滤波手段。但平滑滤波会滤除部分边缘信号。因此,想减少噪声,就得牺牲边缘细节;想多保留边缘细节,就不能有效地抑制噪声。如何掌握平滑滤波尺度,一直是困扰人们的难题。因此,研究快速、准确的边缘检测方法成为改善图像处理质量的迫切需要。采用有别于传统微分运算的数学手段以及平滑滤波器是研究边缘检测新方法的有效途径。

本文提出了一种新的解决方法。将利用正向分数阶微分和反向分数阶积分的组合来实现复合求导,进而实现边缘检测。阐述了新算法在平衡检测精度和对噪声免疫性上的独特方法。

分数阶微积分具有很多时域或频域的不同定义<sup>[6]</sup>。首次尝试把分数阶导数运用到边缘检测中的是文献[7]。该文献提出了一个叫做 CRONE 的检测算子以针对 1 维信号进行分数阶导数运算。该算子的分数阶导数阶次介于 -1 和 2 之间。为扩展至 2 维图像信号,文献[7]提出了 CRONE 模板来完成边缘检测。不过它的检测效果还不能和经典的 Canny 算子<sup>[3]</sup>相提并论。但是文献[7]运用分数阶导数的过程值得学习。

本文提出的边缘检测新方法是基于分数阶信号处理和非因果全通导数概念<sup>[8]</sup>的扩展及边缘检测应用。文献[8]把正向分数阶微分和反向分数阶积分组合起来,实现一个非因果全通导数。本文把全通导数概念推广到利用正向分数阶微分和反向分数阶积分的组合来实现一般非全通复合求导,并成功地将复合求导新算法应用于边缘检测。

## 1 CRONE 边缘检测算子

CRONE 边缘算子是一种边缘样板算子,即利用像素点在上下左右邻点的灰度差,在边缘处达到极值来检测边缘。其基本思想与 Prewitt 算子类似,都是先求邻域平均以平滑噪声,然后求梯度,但是文献[7]阐述了将求导阶次取为非整数的效果优势,并推导了适用于分数阶导数的卷积模板。如果模板长度为 3, X 方向和 Y 方向的模板分别为

$$\begin{aligned} X_{\text{mask}} &= [-d \ 0 \ d] \\ Y_{\text{mask}} &= [-d \ 0 \ d]^T \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $d$  表示求导阶次。它可以是 1 即传统的一阶导数;也可以是介于 1 和 2 之间的分数,用于提高检测的选择性;也可以是介于 -1 和 0 之间的分数,用来提高对噪声的免疫性。然而,CRONE 算子仍然局限于求导原则,没有很好地解决检测精度和噪声抑制之间的矛盾。

## 2 边缘检测新算法

Canny 算子是公认的效果最好的边缘检测算子之一。在文献[3]中,该算法采用了非极大值抑制和双阈值算法,提高了检测精度,但它为了抑制噪声干扰,加入了高斯平滑滤波的过程。高斯滤波是边缘检测中最常用的平滑预处理手段。很明显,平滑滤波过程会模糊高频边缘信号,造成边缘丢失。因此,如果不能很好地掌握平滑滤波尺度,检测精度就会降低。问题是,能不能不使用高斯滤波而采用其他手段以达到同样平滑的目的,以及如何选择平滑的尺度? 下面给出基于分数阶微积分的新观点和新解答。

### 2.1 复合求导过程

将图像沿两个坐标轴上的空间分布看成是时间分布,图像处理就可以直接使用 Laplace 传递函数的概念。图像中的传统一阶导数运算可以用 Laplace 变换表示为  $s$ 。新提出的复合求导过程可以分为两步:1) 反向通过  $(s^*)^{-\beta}$  滤波,其中  $0 < \beta < 1$ , 负号表示第 1 步是一个积分过程,  $s^*$  表示的是  $s$  的共轭复数,代表积分过程是在反向时间轴上进行的。2) 正向通过  $s^\alpha$  滤波,其中  $0 < \alpha < 1$  且  $0 < \beta < \alpha < 1$ ,  $\alpha + \beta = 1$ 。两步的组合结果是  $\frac{s^\alpha}{(s^*)^\beta}$ 。复合导数

$\frac{s^\alpha}{(s^*)^\beta}$  的幅频增益为  $\omega^{(\alpha-\beta)}$ , 其中  $\omega$  是频率。由于  $\alpha + \beta = 1$ , 故该复合导数的相位特性为恒前移  $90^\circ$ , 即实现了传统的一阶导数的相移。由于幅频增益最终影响的是对噪声的敏感度,可以通过调节  $\alpha - \beta$  的值来调节最终的幅频增益,进而调节算子对噪声的抵抗性和边缘检测的敏感度。此外,反向积分是一种特殊的平滑滤波器,可以作为低通滤波器除去虚假边缘。而  $\beta$  是控制平滑滤波尺度的关键参数。 $\beta$  越大,平滑效应越明显。本文在上述复合导数的

基础上,提出了新的边缘检测算法,其过程可以归纳如下:读取灰度图像并生成目标灰度矩阵;利用复合求导过程进行梯度计算,得到梯度幅值;然后进行非极大值抑制;最后用双阈值法连接边缘点。

### 2.2 算法实现

为了验证提出的新检测算法的有效性,下面将分别就1维信号和2维图像信号的具体实现方法进行说明。

#### 2.2.1 1维频域实现及验证

尽管可以用模拟电路来实现分数阶次微积分<sup>[9-10]</sup>,但计算机需要数字化来实现。Oustaloup 等人就曾提出过频域分数阶次微分的近似计算公式<sup>[11]</sup>

$$S^\alpha \approx D(s) = \lim_{N \rightarrow \infty} D_N(s)$$

$$D_N(s) = \left(\frac{w_u}{w_h}\right)^\alpha \prod_{k=-N}^N \frac{1 + \frac{s}{w'_k}}{1 + \frac{s}{w_k}} \quad (2)$$

$$w_u = \sqrt{w_l w_h}$$

$$w'_k = w_l \left(\frac{w_h}{w_l}\right)^{\frac{k+N+0.5-0.5\alpha}{2N+1}}$$

$$w_k = w_l \left(\frac{w_h}{w_l}\right)^{\frac{k+N+0.5+0.5\alpha}{2N+1}}$$

式中,实际感兴趣的频带为 $[w_l, w_h]$ , $N$ 为非负数。由式(2)可知, $S^\alpha$ 为 $2N+1$ 阶近似, $N$ 越大,结果越精确,算法复杂度越高。频域分数阶次积分的近似计算公式如下:

$$\frac{1}{S^\alpha} \approx \frac{1}{D(s)} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{D_N(s)} \quad (3)$$

为了便于验证,对文献[7]中的分段函数 $f(x)$ 进行一阶求导, $f(x)$ 为

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ ax^2 & 0 \leq x \leq x_0 \\ -ax^2 + 4ax_0x - 2ax_0^2 & x_0 \leq x \leq 2x_0 \\ 2ax_0^2 & x > 2x_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $a = 1/(2x_0^2)$ , $x_0 = 200$ 。

因为频域近似法只是在一定宽度的频带内逼近 $s$ 的频率特性,在频带外的近似程度很低,所以不可能完全精确地达到求导目的,只能近似模拟。在本例中取频带为 $[w_l, w_h]$ ,其中 $w_l = 0.001$  Hz, $w_h = 500$  Hz。新算法的结果以及 $f(x)$ 和 $f(x)$ 的一阶导数 $f'(x)$ 绘制于图1中。由图1可见, $\alpha - \beta$ 的值越

大,曲线越尖,模拟越精确,检测选择性<sup>[7]</sup>也越好; $\alpha$ 值越小反向滤波效果越好。在图1中,各复合导数求出的拐点(即边缘)均在横坐标 $x = 400$ 处,边缘定位完全正确。验证结果显示频域算法可以良好的完成一阶近似复合求导任务,证明本文的思想行之有效。

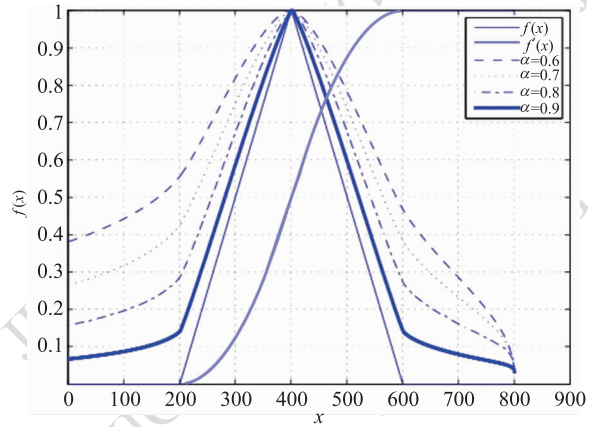


图1  $f(x)$ 、 $f'(x)$ 及 $\alpha = 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ 情况下的归一化近似结果

Fig. 1  $f(x)$ ,  $f'(x)$  and the normalized approximate derivatives with  $\alpha = 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$

#### 2.2.2 2维实现

尽管可以考虑用频域近似 $s^\alpha/(s^*)^\beta$ 的方法对2维图像进行逐点滤波处理,然而这样不仅算法复杂度高,计算时间长,而且不够精确。在以往的经典边缘检测算法中,许多算法采用模板卷积计算梯度的方法进行边缘检测。本文也将采用卷积的方法进行梯度计算。先进行卷积计算反向 $\beta$ 阶积分,再进行卷积计算正向 $\alpha$ 阶微分,最后把这两个卷积过程组合起来就实现了复合求导过程,即完成了新的边缘检测算法中的核心——梯度计算部分,然后根据边缘检测算法步骤完成对2维图像的边缘检测。

与文献[7]相同,分数阶次微分采用模板卷积方法实现。文献[7]提出了 $n$ 阶微分的 $X$ 方向的CRONE模板如下:

$$X_{\text{mask}} = [a_m \cdots a_k \cdots a_1 0 - a_1 \cdots - a_k \cdots - a_m] \quad (5)$$

式中,

$$a_k = \frac{(-1)^k n(n-1) \cdots (n-k+1)}{k!} \quad (6)$$

模板长度设定为 $2m+1$ 。 $Y$ 方向上的CRONE模板为 $Y_{\text{mask}} = X'_{\text{mask}}$ 。复合导数中的正向分数阶次微分是采用CRONE模板与图像信号卷积来实现的。即在式(6)中设 $n = \alpha$ ,实现正向 $\alpha$ 阶次微分。

反向分数阶次积分  $(s^*)^{-\beta}$  的实现是通过图像和分数阶次积分的脉冲响应卷积而成。文献[7]给出  $x$  增加方向上的  $n$  阶导数  $\overrightarrow{D}^n$  的脉冲响应为

$$\overrightarrow{D}^n \delta(x) = \begin{cases} \frac{x^{-n-1}}{\Gamma(-n)} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

同理,  $x$  减少方向上的  $n$  阶导数  $\overleftarrow{D}^n$  的脉冲响应为

$$\overleftarrow{D}^n \delta(x) = \begin{cases} 0 & x \geq 0 \\ -\frac{|x|^{-n-1}}{\Gamma(-n)} & x < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式(7)(8)中,

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{n-1} dt \quad (9)$$

值得注意的是,这两个脉冲响应的长度都是无限的。卷积应用时必须截断到一定的长度。

在式(7)(8)中,  $n$  必须是负数,也就是说,  $\overrightarrow{D}^n$  和  $\overleftarrow{D}^n$  实际上都是一个积分过程<sup>[7]</sup>。因此,只能用式(7)(8)中的脉冲响应来实现反向  $\beta$  阶次积分。若用式(7),其实现过程为:首先令  $n = -\beta$ , 然后将对应的脉冲响应截断后左右翻转,最后与目标矩阵进行卷积运算即可。若用式(8),其实现过程为:首先令  $n = -\beta$ , 然后将对应的脉冲响应截断后左右翻转并把符号取反,最后与目标矩阵进行卷积运算即可。

虽然式(7)(8)均可用于实现反向分数阶次积分,但当  $0 < \beta < 1$  时,它们会使积分结果偏离正确位置。现进行一维拐点检测试验。对于文献[7]中的分段函数  $f(x)$ , 正向分数阶次微分用 CRONE 模板卷积,反向分数阶次积分分别用式(7)(8)中的滤波器卷积,得到的复合求导结果分别如图 2 和图 3 所示。可以看出用式(7)得到的拐点即边缘在横坐标  $x = 397$  处,偏左 3 个单位。还可以看出用式(8)的结果拐点即边缘在横坐标  $x = 403$  处,偏右 3 个单位。图 2 和图 3 中的  $f'(x)$  是归一化后  $f(x)$  的一阶导数。

考虑到用滤波器式(7)或式(8)卷积的结果都会出现边缘定位偏差并且各自偏差的方向正好相反,本文用这两个滤波器的脉冲响应相加,得到非因果算子  $\overleftrightarrow{D}^n$  的脉冲响应,表达式如下:

$$\begin{aligned} \overleftrightarrow{D}^n \delta(x) &= \overrightarrow{D}^n \delta(x) + \overleftarrow{D}^n \delta(x) = \\ & \begin{cases} \frac{x^{-n-1}}{\Gamma(-n)} & x > 0 \\ \frac{|x|^{-n-1}}{\Gamma(-n)} & x < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

反向分数阶次积分用滤波器式(10)卷积,正向分数阶次微分用 CRONE 模板卷积,得到的复合求导结果如图 4 所示。可以看出拐点正好在坐标  $x = 400$  处,没有任何偏差。

图 5 中  $dx_i (i=1,2,3)$  表示的是  $f(x)$  运用新算法得到的复合求导最终结果(即先与反向脉冲响应卷积,再与正向 CRONE 模板卷积,  $\alpha = 0.8$ )。图 5 中红点划线  $dx_1$ 、绿实线  $dx_2$ 、蓝虚线  $dx_3$  分别表示的是运用式(7)(8)(10)得到的复合求导结果。可以看出用式(10)得到的拐点即最高点比用式(7)(8)得到的拐点高一倍,也就是说式(10)可以大幅度提高边缘检测的选择性。因此,将选用式(10)实现反向  $\beta$  阶积分。

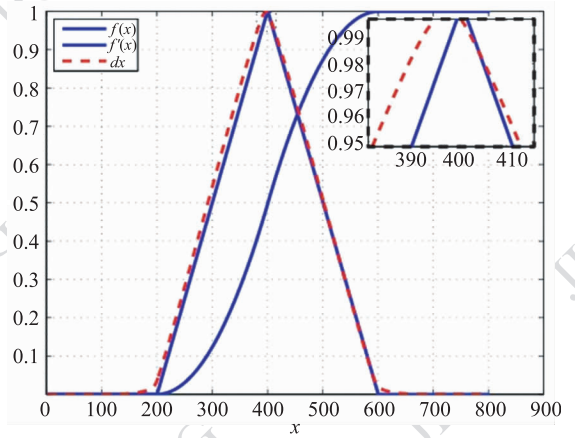


图 2 反向分数阶次积分用滤波器式(7)的结果  
Fig. 2 The result of backward fractional integration with filter (7)

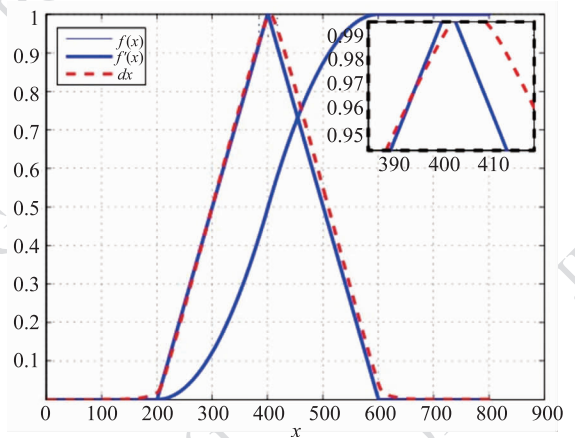


图 3 反向分数阶次积分用滤波器式(8)的结果  
Fig. 3 The result of backward fractional integration with filter (8)

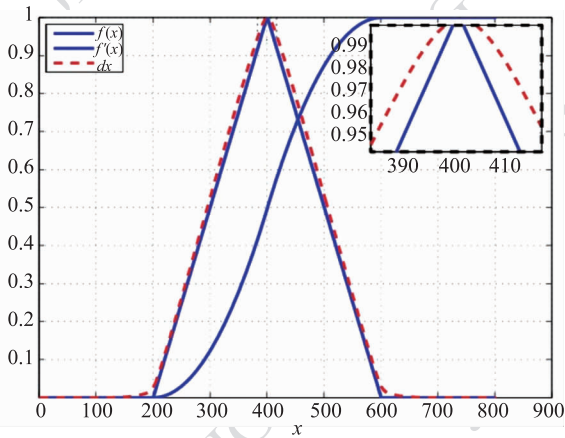


图4 反向分数阶次积分用滤波器式(10)的结果  
Fig.4 The result of backward fractional integration with filter (10)

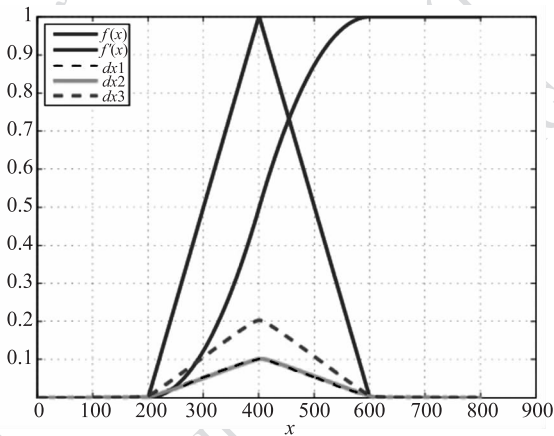


图5 反向分数阶次积分用滤波器式(7)(8)(10)的结果  
Fig.5 The results of backward fractional integration with filters (7)(8)(10) respectively

### 3 实验结果定性分析和比较

以 MATLAB 软件自带的用来检验阈值分割效果的照片 Cameraman(如图6所示)来进行实验。进行检测的算法有复合求导算法,以及 Canny 算子和 CRONE 算子。

#### 3.1 无噪声干扰的情况

图7是默认阈值下 Canny 算子的检测结果,边缘检测细节比较细致、轮廓清晰。图8是 CRONE 算子在  $d=1.5$ ,模板长度为3下的检测结果。虽然  $d>1$  提高了检测的选择性,但是会丢失大量的细节。检测效果不是很好,出现断线情况,且人物手部和远处高楼部分几乎没有检测出。图9是默认阈值

下新算法的检测结果。边缘检测比 Canny 的更加细致、清晰,特别是人物衣袖、面部和摄像机机头部分。新算法的参数设置为:模板长度为201,  $\alpha=0.8$ ,  $\beta=0.2$ 。3种算法的阈值均为默认阈值。

同 Canny 算子相比,因为没有采用高斯平滑滤波作预处理,新算法检测出的细节更加细致,特别在人物脸面部分和摄像机头部分表现得比较明显。与 CRONE 算子相比,新算子的边缘更加清晰,线条轮廓连接更好,没有出现断线情况。



图6 待检测的灰度图像  
Fig.6 A gray image to be detected



图7 默认阈值下的 Canny 检测结果  
Fig.7 The result of Canny operator with default threshold



图8  $d=1.5$  的 CRONE 检测结果  
Fig.8 The result of CRONE operator with  $d=1.5$



图 9 新算法默认阈值  $m = 100$ ,  $\alpha - \beta = 0.6$  的检测结果

Fig. 9 The result of the new operator when the threshold is default,  $m$  is 100,  $\alpha - \beta = 0.6$

由于新算法采取的模板长度与 CRONE 算子的不一致,为了更具有可比性和公平性,可以取  $m = 1$ ,即模板长度为  $2m + 1 = 3$ ,同 CRONE 算子的模板长度一样。当  $\alpha = 0.8$ ,  $\beta = 0.2$  时的检测结果如图 10 所示。显然,图 10 中对人物上衣衣领部分、衣袖部分、天空中的白云的检测效果比 Canny 和 CRONE 算子的更加精细,远处高楼部分,线条清晰、转角分明。总体而言,新算法的检测效果明显比 CRONE 算法好,略优于 Canny。



图 10 新算法默认阈值下  $m = 1$ ,  $\alpha - \beta = 0.6$  的检测结果

Fig. 10 The result of the new operator when the threshold is default,  $m$  is 1,  $\alpha - \beta = 0.6$

### 3.2 含噪声干扰的情况

在图 6 中加入均值为 0,方差为 0.01 的高斯白噪声。图 11 为含噪声情况下 Canny 在默认阈值下的检测结果,图中虽然充满了噪声干扰,还是能清晰地看出图像检测轮廓。图 12 为含噪声情况下 CRONE 算子  $d = -0.5$ ,模板长度为 3 的检测结果,其中  $d < 0$  是为了提高对噪声的免疫性。CRONE 的算子与 Prewitt 算子类似,使用的是邻域平均的滤波法,虽然其抗噪

性能显著,但是检测精度不高,细节大量流失,边缘断续,同时图 12 上半部分仍然有许多噪声点。图 13 为含噪声情况下新算法在默认阈值下模板长度为 201,  $\alpha = 0.6$ ,  $\beta = 0.4$  的检测结果,其中增加  $\beta$  值是为了增强反向滤波的效果。图 13 中充满噪声干扰,能看出图像检测轮廓,但不如 Canny 清晰。



图 11 含噪 Canny 默认阈值下的检测结果  
Fig. 11 The result of Canny operator with noise when the threshold is default



图 12 含噪 CRONE  $d = -0.5$  的检测结果  
Fig. 12 The result of CRONE operator when  $d = -0.5$  with noise



图 13 含噪新算法默认阈值  $m = 100$ ,  $\alpha - \beta = 0.2$  的检查结果  
Fig. 13 The result of new operator when the threshold is default,  $m = 100$ ,  $\alpha - \beta = 0.2$  with noise

实际上,为了更好地抑制噪声干扰,可以调节算法的阈值。在同取阈值为 0.3 的情况下,再用新算法和 Canny 算子分别重新检测。图 14 为含噪声情况下,Canny 在阈值为 0.3 下的检测结果,边缘几乎没有噪声,检测轮廓清晰,但不够细致,远处高楼部分检测效果不是很好。图 15 为含噪声情况下新算法在阈值为 0.3,模板长度为 201, $\alpha = 0.6, \beta = 0.4$  的检测结果,检测轮廓清晰,人物脸部和摄像机机头部分检测比 Canny 更加细致,但边缘上还带有少量噪声,远处高楼部分检测效果仍然不是很好。



图 14 含噪 Canny 阈值为 0.3 的检测结果

Fig. 14 The result of Canny operator when the threshold is 0.3 with noise

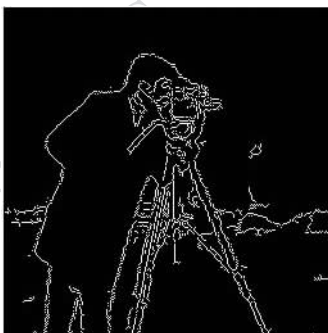


图 15 含噪新算法阈值为 0.3,  $m = 100, \alpha - \beta = 0.2$  的检测结果

Fig. 15 The result of new operator when the threshold is 0.3,  $m = 100, \alpha - \beta = 0.2$  with noise

由于新算法和 CRONE 算子的模板长度不一致,为了公平性,取模板长度为 3, $\alpha = 0.6, \beta = 0.4$ ,检测结果如图 16 所示。跟 CRONE 算子相比,检测轮廓清晰,特别是脸部和摄像机机头部分更加细致,没有出现断线情况,但噪声点多一些。由于 Canny 算子采用高斯函数对图像进行平滑处理,因此具有

较强的噪声抑制能力,但同样会将一些高频边缘平滑掉,造成边缘丢失,如远处高楼部分、人物手部、衣领部分几乎没有检测出来,摄像机机头部分细节丢失。通过比较可以看出,新算法在一定参数设置下比 Canny 算子在噪声干扰下对细节边缘的检测效果要稍微好些,虽然代价是噪声点的增加。一个直观的结论是:新算法的反向分数阶次积分是一种特殊的平滑滤波,其平滑能力稍逊于高斯滤波。

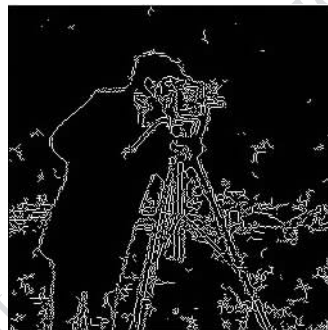


图 16 含噪新算法阈值为 0.3,  $m = 1, \alpha - \beta = 0.2$  的检测结果

Fig. 16 The result of new operator when the threshold is 0.3,  $m = 1, \alpha - \beta = 0.2$  with noise

新算法跟 Canny 算子一样可以通过调节阈值大小( $0 < \text{阈值} < 1$ ),得到不同的检测效果。如果图像细节比较多,可以将阈值设置得较小一点;如果图像的噪声影响比较大,可以将阈值设置得较大些。

## 4 实验结果定量分析与比较

边缘检测的定量评价方法没有定论,大多是针对人们所关心的性能来进行比较分析,最常用的有 Abdou-Pratt 提出的 FOM 品质因数<sup>[12]</sup>、Bowyer 等人提出的 ROC 曲线<sup>[13]</sup>、Marin 等人提出的 PR 曲线、F 方法<sup>[14]</sup>以及 Shin 等人提出的间接方法<sup>[15]</sup>。本文利用 Abdou-Pratt 提出的 FOM 品质因数进行边缘性能比较,其品质公式如下:

$$F = \frac{1}{\max(N_a, N_d)} \sum_{i=1}^{N_d} \frac{1}{1 + ad_i^2} \quad (11)$$

式中, $N_a$  和  $N_d$  分别表示真实边缘个数和检测到的边缘个数, $d_i$  表示被检测到的第  $i$  个点离它最近的真实边缘点的距离, $a$  为常量系数,这里取 0.05。 $F$  被称为品质因数。 $F$  值越大,说明边缘点的定位

精度越高,检测到的边缘就越真实。检测图分别为人工合成的 $100 \times 100$ 黑白方格,如图 17 所示,每个小方格表示  $10 \times 10$ ,以及简单的  $210 \times 210$  人工合成圆,其中圆的半径为 80,如图 18 所示。

表 1 给出了无噪声情况下各算法针对图 17 和图 18 的检测结果通过式 (11) 计算出的品质因数,品质因数越大表示算法越好。从表 1 可以看出,新算法检测人工合成黑白方格(图 17)的最低品质因数为 0.858 5,最高品质因数为 0.892 6,Canny 算子在不同阈值下的品质因数均为 0.864 1,CRONE 方法的品质因数最低,为 0.631 3;新算法检测人工合成圆(图 18)的最高品质因数为 0.989 6,最低品质

因数为 0.840 9,CRONE 算子( $d = 1.5$ )的品质因数为 0.974 1,Canny 算子在不同阈值下的品质因数均为 0.972 5。表 1 中的边缘宽度,为边缘宽度方向上所占据的像素数。

表 1 显示新算法定位精度明显优于 CRONE 算子。另外,对于不同的合成图,大体上新算法在一定的参数设置情况下定位精度比 Canny 算子高。但是新算法在品质因数比 Canny 高的同时,边缘像素宽度比 Canny 多一个像素。总体而言,只要调节好新算法的参数设置,新算法的检测性能和 Canny 的检测性能相当或稍好一些。

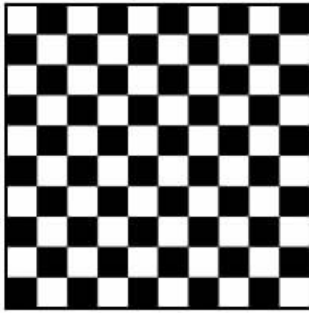


图 17 待检测的人工合成黑白方格图

Fig. 17 A synthetic image with black and white squares to be detected

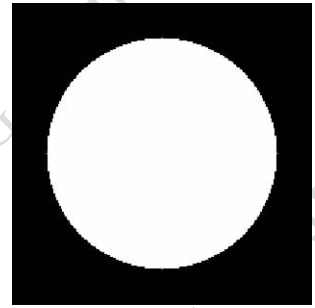


图 18 待检测的人工合成圆

Fig. 18 A synthetic image with a circle to be detected

表 1 各算法边缘检测的品质因数表

Table 1 Quality factor of the edge detection algorithms

算法及参数	图 17		图 18	
	品质因数	边缘宽度	品质因数	边缘宽度
Canny(默认阈值)	0.864 1	1	0.972 5	1
Canny(阈值为 0.3)	0.864 1	1	0.972 5	1
CRONE( $d = 1.5$ )	0.631 3	1	0.974 1	1
新算法 $m = 100, \alpha - \beta = 0.2$ (默认阈值)	0.861 5	1	0.989 6	1
新算法 $m = 100, \alpha - \beta = 0.4$ (默认阈值)	0.858 5	1	0.983 3	1
新算法 $m = 100, \alpha - \beta = 0.6$ (默认阈值)	0.859 4	1	0.970 1	1
新算法 $m = 100, \alpha - \beta = 0.8$ (默认阈值)	0.858 5	1	0.963 3	1
新算法 $m = 100, \alpha - \beta = 0.7$ (默认阈值)	0.860 5	1	0.963 3	1
新算法 $m = 1, \alpha - \beta = 0.6$ (默认阈值)	0.892 6	2	0.840 9	2
新算法 $m = 1, \alpha - \beta = 0.7$ (默认阈值)	0.892 6	2	0.840 9	2
新算法 $m = 100, \alpha - \beta = 0.6$ (阈值为 0.3)	0.859 4	1	0.970 1	1

## 5 结论

本文提出一种利用复合导数的边缘检测新算法。该方法中的反向分数阶次积分是一种特别的平滑滤波,且直观地表现为分数阶次 $\beta$ 。通过调节平滑滤波尺度旋钮 $\beta$ ,可以很好地取得检测精度和抗噪性之间的折中。

目前,平滑尺度 $\beta$ 的选取是依靠多次尝试和经验。平滑尺度 $\beta$ 的自适应选取有一定的难度,将作为后期工作。一个可能的方案是:先对图像的信噪比进行分析,然后由分析结果决定平滑尺度 $\beta$ 。

## 参考文献(References)

- [ 1 ] Lei L Z. On the edge detecting method of digital image [ J ]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2006, ( 3 ):40-42 [ 雷丽珍. 数字图像边缘检测方法的探讨 [ J ]. 测绘通报, 2006, ( 3 ): 40-42. ]
- [ 2 ] Marr D, Hildreth E. Theory of edge detection [ J ]. Proceedings of the Royal Society of London. Series B, 1980, 207 ( 1167 ): 187-217.
- [ 3 ] Canny J F. A computational approach to edge detection [ J ]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8:679-698.
- [ 4 ] Didier D. On optimal linear filtering for edge detection [ J ]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11 ( 7 ): 728-737.
- [ 5 ] Shen J, Castan S. An optimal linear operator for step edge detection [ J ]. CVGIP: Graphical Models and Image Processing, 1992, 54 ( 2 ):112-113.
- [ 6 ] Pu Y F. Research on the application of fractional calculus to modern signal analysis and processing [ D ]. Sichuan: Sichuan University, 2006. [ 蒲亦菲. 分数阶微积分在现代信号分析与处理中的研究 [ D ]. 四川:四川大学, 2006. ]
- [ 7 ] Mathieu B, Melchior P, Oustaloup A, et al. Fractional differentiation for edge detection [ J ]. Signal Processing, 2003, 83 ( 3 ):2421-2432.
- [ 8 ] Ye Y, Tayebi A, Liu X. All-pass filtering in iterative learning control [ J ]. Automatica ( 0005-1098 ), 2009, 45 ( 1 ):257-264.
- [ 9 ] Bohannon G W. Analog realization of a fractional control element revisited [ EB/OL ]. ( 2002-10-27 ) [ 2011-05-01 ]. <http://mechatronics.ece.usu.edu/foc>.
- [ 10 ] Abi Zeid Daou R, Francis C, Moreau X. Synthesis and implementation of non-integer integrators using RLC devices [ J ]. International Journal of Electronics, 2009, 96 ( 12 ):1207-1223.
- [ 11 ] Oustaloup A, Levron F, Mathieu B, et al. Frequency-band complex no integer differentiator: Characterization and synthesis [ J ]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2000, 47 ( 1 ):25-39.
- [ 12 ] Abdou I E, Pratt W K. Quantitative design and evaluation of enhancement/thresholding edge detectors [ J ]. Proceedings of IEEE, 1979, 67 ( 5 ):753-763.
- [ 13 ] Bowyer K, Kranenburg C, Dougherty S. Edge detection evaluation using empirical ROC curves [ J ]. Computer Vision and Image Understanding, 2001, 84 ( 1 ):77-103.
- [ 14 ] Martin D, Fowlkes C, Malik J. Learning to detect natural image boundaries using local brightness, color and texture cues [ J ]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26 ( 1 ):530-549.
- [ 15 ] Shin M, Goldgof K, Bowyer K, et al. Comparison of edge detection algorithms using a structure from motion task [ J ]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2001, 31 ( 4 ):589-601.