

结构相似指数噪声整形算法及其在图像编码中的应用

冯涛*, 吕俊白

(华侨大学 计算机科学与技术学院, 福建 厦门 361021)

(*通信作者电子邮箱 fengtao86520@163.com)

摘要:提出一种基于双树小波变换的结构相似指数噪声整形算法(SSIM-NS)算法并将其应用于图像编码传输中。算法是在双树小波变换后的噪声整形过程中引入结构相似指数度量(SSIM),自适应地调整增益因子以达到最大限度聚集图像能量减少小波系数的目的,运用SPIHT编码算法对噪声整形后的小波系数进行编码并传输。实验结果表明,该算法不仅能够有效地削减小波系数个数聚集图像能量,而且在低比特率条件下重构图像具有更高的峰值信噪比(PSNR),能够显著提高解码图像的质量。

关键词:噪声整形;双树离散小波变换;图像编码;结构相似指数度量

中图分类号:TP391.41 **文献标志码:**A

Structural similarity index measurement-noise shaping algorithm and its application in image coding and transmission

FENG Tao*, LÜ Jun-bai

(College of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen Fujian 361021, China)

Abstract: A proposed form of Structural Similarity Index Measurement-Noise Shaping (SSIM-NS) based on dual-tree wavelet transform algorithm was set up and applied in image coding and transmission. The algorithm investigated that Structural Similarity Index Measurement (SSIM) was introduced into the traditional noise shaping process after the dual-tree wavelet transform, adaptively adjusted the gain factor to aggregate image energy to the maximum and diminished the number of wavelet coefficients. Then SPIHT algorithm was applied to encode the coefficients after the noise shaping and transmission. The experimental results show that the proposed algorithm could effectively cut the number of wavelet coefficients and aggregate energy of the image, and it has better results for the image coding quality and provides higher Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) value of the reconstructed image at low bit rate.

Key words: Noise Shaping (NS); Dual-tree Discrete Wavelet Transform (DDWT); image coding; Structural Similarity Index Measurement (SSIM)

0 引言

过去的20年间小波理论日臻完善,基于小波的图像编码取得飞速发展。然而基于离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT)的图像编码不能有效地表征图像。因此各国学者转而研究多尺度方向的图像表示。其中文献[1]提出的双树复数小波变换(Dual-tree Complex Wavelet Transform, DT-CWT)就是其中重要的一种。DT-CWT具有近似平移不变性、多方向选择性、高计算效率和完美重构等特点^[2-3]。不足的是DT-CWT具有较高的冗余,相比原始图像需要更多存储空间。文献[5-6]提出噪声整形算法(Noise Shaping, NS)以期达到最大限度削减非零系数个数、降低冗余的目的。但是NS算法中的增益因子却是固定的,并未考虑NS过程中每次取阈值操作对原始图像的影响。文献[4]提出一种新的NS算法:在NS过程中引入结构相似指数度量(Structural Similarity Index Measurement, SSIM),结合取阈值操作后的观测图像与原始图像的SSIM指数,自适应地调整增益因子,在削减非零系数个数同时保证重构图像的编码质量;但该算法是针对DT-CWT的,并没有减少变换的冗余度,同时其中的SSIM指数和增益因子是分离的;论文验证了算法的有效性,SSIM指数虽然得到提高,峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise

Ratio, PSNR)却有所降低。文献[7]中提出一种改进的双树小波变换:双树离散小波变换(Dual-Tree Discrete Wavelet Transform, DDWT)。DDWT采用设计逼近Hilbert变换对的小波基函数和尺度函数,形成新的滤波器组,其特点是冗余度仅为DT-CWT的一半,计算复杂度降低。

本文在减少双树小波变换冗余度,提高图像重构质量的启发下,针对均方差(Mean Square Error, MSE)和PSNR度量图像质量的缺陷,提出基于DDWT的噪声整形方案:结构相似指数噪声整形算法(Structural Similarity Index Measurement-Noise Shaping, SSIM-NS)。本文采用DDWT,能够减少变换冗余度;将SSIM引入基于DDWT的噪声整形过程,依据取阈值操作后的观测图像和原始图像间的SSIM指数,自适应地调整增益因子,提高SSIM指数的同时保证解码后的重构图像质量。实验结果表明本文算法能够有效减少小波系数个数,同时在低比特率条件下能够保证较好的图像重构质量。

1 双树小波变换及噪声整形

DDWT保留了DT-CWT变换的特点,能够克服DWT变换的缺陷:平移可变性和缺乏方向选择性,同时DDWT具有比较低的冗余度,仅为DT-CWT变换的二分之一。DDWT的滤波器组经过特定设计具有不同的延迟,小波基函数和尺度函

收稿日期:2012-04-05;修回日期:2012-05-22。

作者简介:冯涛(1986-),男,河南安阳人,硕士研究生,主要研究方向:图像处理、计算机视觉;吕俊白(1969-),女,福建泉州人,副教授,硕士,主要研究方向:图像处理、多媒体。

数逼近 Hilbert 变换对,减少计算复杂度^[7]。DDWT 由两棵特殊的离散小波滤波器组树平行构成。图像经过滤波器组(H0a、H1a、H0b、H1b)分解得到两个低频子带,分别标记为 $L(j+1,1)$ 、 $L(j+1,2)$ (其中低频子带分解产生下一尺度上的低频和高频子带),同时得到6个不同方向($\pm 15^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 75^\circ$)高频子带,分别记为 $H(j+1,m)$; $m=1,2,\dots,6$ 。其对应的子带频谱如图1所示:图中各子带频谱图按从上到下,从左到右的顺序分别为:S1、S3、S2、S6、S4、S5^[3]。

DDWT 多方向选择性是通过提高变换的冗余度实现的。因此在对小波系数进行编码之前要进行稀疏化处理,以削减小波系数个数聚集图像能量。文献[5-6]中研究发现:大多数的高频子带中小波系数的值相对较小,且分布类似于高斯噪声,在此研究基础上提出噪声整形算法。噪声整形算法是 Landweber 算法的一种特殊形式^[9],其基本思想就是对小波系数取阈值操作,尽可能保留低频子带中的有效系数,摒弃高频子带中的无效系数,并对误差进行迭代投射修正,最大化聚集原始图像能量,减小重建误差。文献[9]的编码方案也验证了基于 DDWT 的噪声整形算法对图像编码的合理性和有效性。但是传统的噪声整形算法增益因子固定给出,并没有考虑每次迭代中取阈值操作后的观测图像与原始图像的关联及影响。虽然明显削减小波系数个数,但是重构图像质量有待提高。



图1 DDWT 六个小波基函数的频率频谱

2 结构相似指数度量(SSIM)

结构相似性理论^[4]认为,自然图像是高度结构化的,即像素间有很强的相关性,特别是空域中最接近的像素,这种相关性蕴含着视觉场景中物体结构的重要信息。SSIM 指数度量实质是观察图像信息、度量图像质量的一种具体方式,提供了与感知图像失真非常接近的一种客观评价方法。SSIM 指数度量由三个独立比较分量构成:测量视觉感知的亮度比较分量,测量图像相似性的对比度比较分量和测量图像结构信息的结构比较分量^[8],如式(1):

$$O(x,y) = I(l(x,y),c(x,y),s(x,y)) \quad (1)$$

其中: $O(x,y)$ 是观测图像与原始图像相似性的测量函数,用来度量失真度; $l(x,y)$ 是亮度比较函数; $c(x,y)$ 是对比度比较函数; $s(x,y)$ 是结构比较函数; $I(\cdot)$ 是整合函数。

基于 SSIM 指数进行图像质量客观评价的依据是提取视觉场景中的结构信息^[8]。如果变换前后图像质量变化不大,即图像结构信息损失不大,则失真较小 SSIM 指数较高;相反 SSIM 指数较小。噪声整形算法初始参数设置比较大,小波系数经过取阈值操作后数量虽然大量减少,但是图像结构信息损失严重,图像质量变化比较明显,SSIM 指数也较低;而随着迭代次数增加,阈值逐步减小,小波系数数量增加,图像结构信息增加,SSIM 指数逐步提高。

3 基于 SSIM 指数度量的噪声整形

传统的噪声整形是利用迭代投射的方法修改较大的小波

系数,聚集因取阈值操作而损失的图像能量,并最小化原始图像和观测图像的误差,起到减少小波系数个数的作用^[5-6]。但是传统噪声整形过程是逐个像素操作的,没有考虑图像的结构化信息,以及观测图像和原始图像间的关联和影响,其结果会直接影响到均方差(MSE)和 PSNR 的值;同时其增益因子是固定给出的。针对传统噪声整形过程中的不足,本文提出基于 DDWT 的 SSIM-NS 方法,即在传统噪声整形取阈值操作后依据观测图像与原始图像间的关联,计算 SSIM 指数度量,将 SSIM 指数作为新的增益因子的部分参数反馈到下次迭代过程中,能够自适应地调整增益因子的大小,弥补传统噪声整形过程中结构化信息缺失的不足。其过程描述如图2所示。

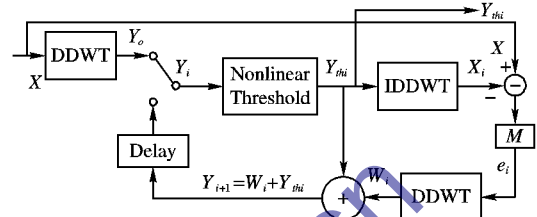


图2 基于 SSIM 指数度量的噪声整形框架

根据图2,图像失真度量可修正为式(2):

$$e_i = M \cdot (X - X_i) \quad (2)$$

其中: $M = \frac{K}{\beta \cdot SSIM^{\gamma} + 1}$; M 是本文算法中新的增益因子; X 表示原始输入图像; X_i 表示小波系数经过取阈值操作后的观测图像;SSIM 指数度量根据式(1)求出,SSIM ^{γ} 表示局部 SSIM 指数度量参数, γ 表示 SSIM 的调整因子; β 表示用于调控 SSIM 的权重因子,而 K 则是全局调控因子。基于 SSIM 指数度量的噪声整形算法是根据观测图像和原始图像之间的 SSIM 指数度量的不同,在噪声整形处理过程中自适应地调整增益因子大小并整合到下次迭代过程中完成噪声整形过程,以达到减少小波系数的目的。SSIM-NS 算法描述如下:

1) 初始化参数。设置初始阈值和终止阈值,以及其他需要的参数。

2) 对原始图像进行 DDWT 变换得到小波系数。

3) 对小波系数取阈值。依设置的阈值 T ,根据式(3)对 DDWT 变换后的小波系数进行取阈值操作。

$$y = \begin{cases} 0, & |y| < T \\ y \cdot \frac{|y|^2 - T^2}{|y|^2}, & |y| \geq T \end{cases} \quad (3)$$

如果小波系数 y 小于阈值 T ,则小波系数设置为零;否则小波系数采用 Centre-clipper 处理,得到新的小波系数;保存取阈值处理后的小波系数,执行4)。

4) 计算 SSIM 指数度量并把它引入到取阈值处理的图像重构误差中。首先对步骤3)中的小波系数进行 IDDDWT 得到观测图像,然后计算观测图像与原始图像之间的 SSIM 指数度量,并利用式(2)得到两者间的误差图像,最后再做 DDWT 得到误差小波系数,执行5)。

5) 将3)、4)中的小波系数合并构成新的小波系数。阈值减1,并判断终止条件,若不满足则返回3)进行下次迭代;否则结束 SSIM-NS 算法,输出3)中保存的小波系数。

4 实验与结果

为了证实本文提出的 SSIM-NS 算法的有效性,阐明基于 SSIM 指数度量噪声整形的优点,实验中对经过 SSIM-NS 算法处理的图像和小波系数分别进行 SSIM 指数分析与统计定量分析,并且将 SSIM-NS 算法应用到图像编码传输过程中,最后

比较结果得出实验结论。实验中分别采用 8 比特 512×512 测试图像:“Barbara”, “Baboon”进行实验测试。

根据文献[5-6]对于增益因子的描述和文献[4]对于 SSIM 参数的描述,本文实验对相关数据进行系统测试并采用筛选法选择最优参数,图 3 给出部分参数对于 PSNR 值的影响:初始阈值为 81,终止阈值为 8,调整参数为 $\gamma = 4$,权重参数为 $\beta = 1.6$ 。由于不同图像具有不同的纹理,对小波系数的要求不同,因此需要不同的全局调控因子 K , 分别为 3.0 和 2.5。

实验步骤:第一步首先分别对原始图像做 DDWT 得到小波系数,然后对小波系数进行 SSIM-NS 噪声整形处理,同时每次迭代过程中统计小波系数个数,分析比较小波系数个数与 PSNR 值和 SSIM 指数间的关系,如图 3 所示。

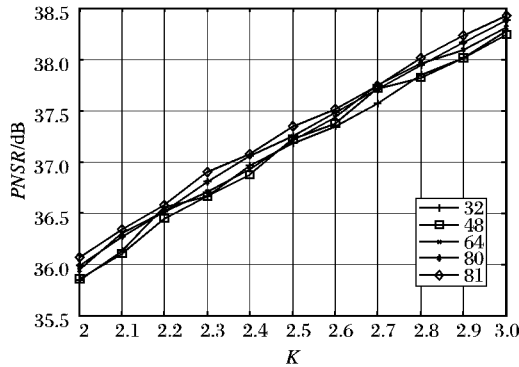


图 3 部分参数对于 PSNR 值的影响

第二步运用 SPIHT 编码算法对噪声整形后的小波系数进行编码并传输,在解码端解码后进行 IDWT 得出重构图像,然后分析比较重构图像和原始图像,实验结果如表 1、2 和图 5、6 所示。

图 4 分别给出两幅测试图像经过 SSIM-NS 算法处理后的非零小波系数个数与 PSNR 值和 SSIM 指数的关系。

由实验结果可以看出仅需要很少的小波系数就可以达到较高的重构图像质量。对于纹理较少的图像,如“Barbara”测试图像,随着小波系数增加其 PSNR 值和 SSIM 指数迅速增长;而对于纹理较多的图像,如“Baboon”测试图像,随着小波系数增加其 PSNR 值和 SSIM 指数增长相对缓慢,但最终都逐渐趋向于 1。图 4 中还发现“Baboon”测试图像最初的 PSNR 值和 SSIM 指数相对较低,其原因归结为纹理丰富细节较多的图像需要更多的小波系数表征,而本文实验中初始阈值设置较大,致使图像结构信息损

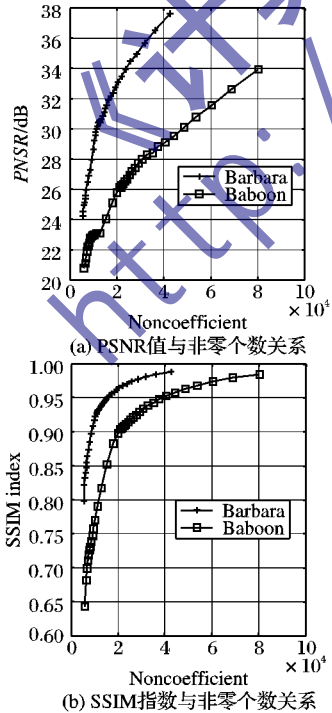


图 4 图像 PSNR 值和 SSIM 指数与非零个数关系

失较多,图像质量变化明显,因而 PSNR 值和 SSIM 指数相对较小。

对于 SSIM-NS 算法在图像编码中的应用,表 1 和表 2 分别给出对于测试图像“Barbara”和“Baboon”的测试结果。其中 PSNR 单位为 dB。可以看出在低码率条件下,如 0.1 bpp ~ 0.3 bpp 时,本文算法比 DDWT-SPIHT 编码算法的 PSNR 值高 0.1 ~ 0.2 dB;比 SPIHT 算法的 PSNR 值高 0.7 ~ 0.9 dB。由于文中 SSIM_NS 算法处理时进行取阈值操作,摒除部分高频子带中的系数,而增加比特率时这部分小波系数并没有起到重构图像的作用,因而算法的性能相对降低,但仍然保持高效率。而图 5 和图 6 分别给出了在 0.2 bpp 时,本文算法以及 DWT_SPIHT 和 DDWT_SPIHT 编码算法的重构图像。从重构图像的视觉效果上来看,本文编码算法的重构图像视觉质量优于 DDWT-SPIHT 编码算法,例如“Barbara”图像中裤子和桌布的纹理信息,以及“Baboon”图像中细微毛发,能够得到很好的重构,视觉质量良好。

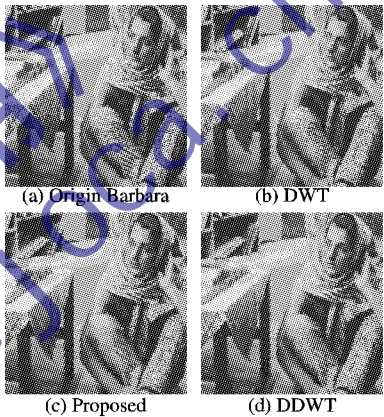


图 5 在 0.2bpp 时的“Barbara”重构图像视觉质量对比

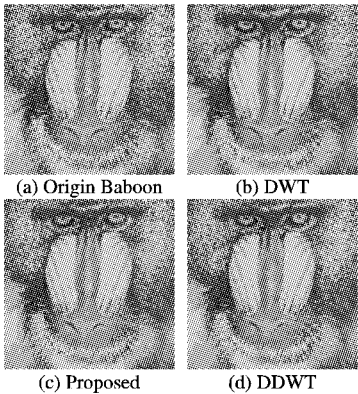


图 6 在 0.2bpp 时的“Baboon”重构图像视觉质量对比

实验结果表明论文提出的算法在噪声整形过程中能够有效地减少小波系数个数,聚集图像能量;在图像编码传输应用中,特别是在低码率的情况下,无论是图像的 PSNR 值和 SSIM 指数,还是解码后的图像视觉质量,本文提出的算法均优于上述两种编码算法。

表 1 “Barbara”的 PSNR 值比较

比特率/bpp	DWT-SPIHT	DDWT-SPIHT	本文方法
0.05	24.61	24.74	24.81
0.10	25.26	25.78	25.97
0.15	26.11	26.35	26.34
0.20	26.72	27.01	27.06
0.30	28.19	28.15	28.70

表2 “Baboon”的PSNR值比较

比特率/bpp	DWT-SPIHT	DDWT-SPIHT	本文方法
0.05	20.11	20.31	20.72
0.10	21.45	21.75	22.07
0.15	22.18	22.21	22.55
0.20	22.76	22.75	22.97
0.30	23.87	23.51	23.42

5 结语

本文提出基于双树小波变换的SSIM-NS算法并将其应用到图像编码传输中。本文算法有以下特点:1)采用DDWT,在保留DT-CWT特点的同时减少冗余度。2)在传统的噪声整形过程中引入SSIM指数信息,在DDWT处理过后根据SSIM指数信息自适应调整增益因子,在保留图像重要信息的同时最大限度地聚集图像能量,同时削减小波系数的个数,保证重构图像质量和获得较高的PSNR值和SSIM指数。实验结果表明本文算法能够在一定程度上削减小波系数个数,在低比特率条件下,能够提高解码图像的PSNR值和SSIM指数,较好地改善图像的重构质量。

参考文献:

- [1] KINGBURY N G. Shift invariance properties of the dual-tree complex wavelet transform[C]// ICASSP99: Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Washington, DC: IEEE Computer Society, 1999: 16-19.
- [2] KINGBURY N G. Complex wavelets for shift invariant analysis and

filtering of signals[J]. Applied Computational Harmonic Analysis, 2002, 10(3): 234-253.

- [3] SELESNICK I W, BARANIUK R G, KINGBURY N G. The dual-tree complex wavelet transform[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(6): 123-151.
- [4] ZHOU J, DANSEREAU R M, JOSLIN C. Perceptual noise shaping in dual-tree complex wavelet transform for image coding[C]// 2011 18th IEEE International Conference on Image Processing. [S.l.]: IEEE, 2011: 237-240.
- [5] REEVES T H, KINGBURY N G. Overcomplete image coding using iterative projection-based noise shaping[C]// Proceedings of International Conference on Image Processing. Rochester: IEEE, 2002: 597-600.
- [6] KINGBURY N G, REEVES T H. Redundant representation with complex wavelets: How to achieve sparsity[C]// Proceedings of International Conference on Image Processing. Barcelona: IEEE, 2003: 45-48.
- [7] SELESNICK I, LI K Y. Video denoising using 2D and 3D dual-tree complex wavelet transforms[C]// Proceedings of the SPIE 5207 (Wavelets Applications in Signal and Image Processing X). [S.l.]: SPIE, 2003: 607-618.
- [8] 佟雨兵, 张其善, 祁云平. 基于PSNR与SSIM联合的图像质量评价模型[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(12): 1758-1763.
- [9] YANG J, WANG Y, XU W, et al. Image coding using dual-tree discrete wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(9): 1555-1569.

(上接第2850页)

表1 图5的评价指标

各边缘检测方法	L	$1-N$	$1-F$	M
Roberts算子	0.9496	0.9870	0.6869	0.8858
Laplacian算子	0.9465	0.9564	0.7755	0.8992
Sobel算子	0.9531	0.9526	0.7987	0.9066
文献[9]方法	0.9961	0.9903	1.0000	0.9950
本文方法	0.9985	0.9978	1.0000	0.9987

从表1可以看出,本文方法和文献[9]方法边缘检测的三个指标都优于其他方法,漏检率几乎为0,能很好地检测到图像的边缘纹理细节;与文献[9]相比,本文方法的错检率更低,连接度更高,对分数阶微分方法在一定程度上有所改进,明显优于现有的整数阶微分方法。

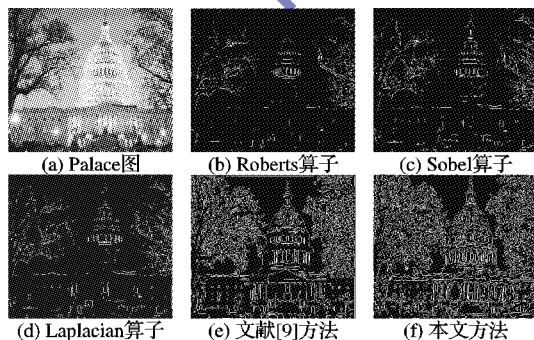


图5 不同边缘检测方法实验对比(Palace图)

3 结语

针对现有的Laplacian算子边缘检测方法中检测纹理细节信息较差,易造成重要边缘丢失等问题,提出了一种基于分数阶偏微分的边缘检测新模型。实验结果表明,与现有的

Roberts算子、Sobel算子、Laplacian算子等整数阶微分边缘检测方法相比,一方面,本文方法取得了较好的检测效果和定位精度,且对噪声具有一定的抑制能力;另一方面,它能够很好地检测出更多的图像纹理细节信息,优于整数阶微分边缘检测方法,达到了边缘检测的目的,且本文模型算法的时间复杂度较低,是一种有效的图像边缘检测方法。然而,对不同的图像如何较快地选取很好的阈值和微分阶数,还有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] 孙增国, 韩崇昭. 基于Laplacian算子的图像增强[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(1): 222-223.
- [2] 贾迪野, 黄凤岗, 苏茜. 一种新的基于高阶非线性扩散的图像平滑方法[J]. 计算机学报, 2005, 28(5): 882-891.
- [3] 蒋伟, 胡学刚. 基于对数图像处理和二阶微分的图像增强新模型[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2009, 31(9): 142-146.
- [4] 仵冀颖, 阮秋琦. 偏微分方程在图像去噪中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(22): 69-71.
- [5] 郭立智, 赵金环. 基于小波变换的边缘检测[J]. 青岛理工大学学报, 2007, 28(2): 78-80.
- [6] 成晓倩. 一种基于数学形态学的边缘检测算子[J]. 河北理工大学学报: 自然科学版, 2009, 31(2): 55-58.
- [7] 贾超, 邹琪, 姚芳, 等. 基于神经网络与模糊算法图像边缘检测方法[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(11): 3507-3508.
- [8] 蒲亦非, 王卫星. 数字图像的分数阶微分掩模及其数值运算规则[J]. 自动化学报, 2007, 33(11): 1129-1135.
- [9] 张旭秀, 卢洋. 基于分数阶微分的医学图像边缘检测方法[J]. 大连交通大学学报, 2009, 30(6): 61-65.
- [10] 蒋伟. 基于分数阶偏微分方程的图像去噪新模型[J]. 计算机应用, 2011, 31(3): 753-756.
- [11] 杨柱中, 周激流, 黄梅, 等. 基于分数阶微分的边缘检测[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2008, 40(1): 152-156.
- [12] 杨炬, 梁德群. 一种基于区域一致性测度的边缘评价方法[J]. 中国图象图形学报, 1999, 4(3): 234-238.