

# 基于多通道小波的 DTI 图像恢复

张相芬<sup>1,2</sup>, 田蔚风<sup>2</sup>, 陈武凡<sup>3</sup>, 叶宏<sup>1</sup>, 于金兰<sup>1</sup>

(1. 上海师范大学机电学院, 上海 201418; 2. 上海交通大学仪器系, 上海 200240; 3. 南方医科大学生物医学工程学院, 广州 510515)

**摘要:** 扩散张量图像中存在的赖斯噪声给张量计算和脑白质追踪等带来严重影响。为了减少噪声影响, 该文采用多通道小波对扩散加权图像进行恢复, 采用峰值信噪比来定量地评估本滤波器消除赖斯噪声的性能。基于模拟和真实数据对张量场的表面扩张系数等进行了计算并进行脑白质纤维追踪。把该去噪方法和单通道小波方法进行比较, 实验结果表明, 提出的滤波器具有更好的噪声性能。

**关键词:** 扩散张量成像; 恢复; 多通道小波

## Multi-channel Wavelet-based DTI Image Restoration

ZHANG Xiang-fen<sup>1,2</sup>, TIAN Wei-feng<sup>2</sup>, CHEN Wu-fan<sup>3</sup>, YE Hong<sup>1</sup>, YU Jin-lan<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 201418; 2. Instrument Department, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240; 3. College of Biomedical Engineering, Southern Medical Univ., Guangzhou 510515)

**【Abstract】** The Rician noise introduced into the diffusion tensor images can bring serious impacts on tensor calculation and fiber tracking. To decrease the effects of the Rician noise, this paper proposes a multi-channel wavelet-based method to denoise multi-channel typed diffusion weighted images. To evaluate quantitatively the efficiency of the presented method in accounting for the Rician noise introduced into the DW images, the peak-to-peak signal-to-noise ratio metric is adopted. Based on the synthetic and real data, it calculates the apparent diffusion coefficient and tracks the fibers, makes comparisons between the presented model and the channel-by-channel smoothing method. Experimental results quantitatively and visually prove the better performance of the presented filter.

**【Key words】** diffusion tensor imaging; restoration; multi-channel wavelet

### 1 概述

扩散张量成像(DT-MRI, DTI)是最近发展起来的一种成像技术。DTI 技术使得无创研究人脑神经纤维和进行多发性硬化以及脑中风等疾病的诊断成为可能。

DTI 的噪声为赖斯分布, 其取值大小和信号强弱有关, 因此, 难以从信号中分离<sup>[1]</sup>。当信噪比低的时候, 赖斯噪声不仅会引起随机漂移而且会带来依赖于信号的偏差, 这将给张量计算和纤维追踪等后处理带来很大的困难。因此, 为 DTI 寻找一种良好的去噪方法非常重要。

小波变换在图像恢复中起着非常重要的作用。基于软阈值和硬域值的小波滤波器得到了广泛应用, 并有研究者采用它进行了消除赖斯噪声的研究<sup>[1]</sup>。然而, DTI 图像具有多通道特性, 因此研究多通道小波滤波对 DTI 图像恢复具有重要意义。

### 2 赖斯噪声

磁共振 DWI 图像的主要噪声来源是来自病人的热噪声。这种噪声通常被当作加性高斯噪声。因为信号是被测电压经过傅立叶付里叶反变换后进行取模运算而获得的, 所以影响信号的噪声更确切来讲是服从赖斯分布。赖斯分布在信噪比低的情况下趋近于瑞利分布而在信噪比高的情况下趋近于高斯分布。受赖斯噪声污染的信号强度概率密度函数<sup>[2]</sup>为

$$P(m) = \frac{m}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{m^2 + \alpha^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{m\alpha}{\sigma^2}\right) \quad (1)$$

其中,  $\alpha$  代表信号的实际强度;  $\sigma$  是噪声标准差;  $I_0$  是改进的第 1 类零阶贝塞尔函数。

### 3 多通道小波变换

小波曾被成功地应用于消除赖斯噪声影响。假设尺寸为  $N \times N$  的 MR 图像  $I$  受到均值为零的赖斯噪声污染。因为赖斯噪声和信号是不独立的, 所以噪声污染的信号其小波系数和尺度系数都是有偏的。文献[1]通过对 MR 图像模平方后进行小波去噪处理有效解决了这个问题。模平方后, 信号服从非中心卡方分布, 小波系数不再是有偏估计但是尺度系数仍然是有偏的。这个偏差可通过如下方法来消除: 在分辨尺度  $2^j$ , 对每个尺度因子都减掉  $2^{j+1}\sigma_c^2$ , 其中,  $\sigma_c^2$  是相应复高斯噪声的方差。该方差通常由病人之外的空区域估算得出。

扩散加权图像就其本质来讲属于多通道信号。为了恢复出单个通道的信号又保持各通道的相关性, 根据文献[3]的思想把多通道 2-D 信号(相当于 3-D 信号)转化成单通道 2-D 信号, 然后通过 2-D 离散小波变换在小波域中进行图像处理。本文, 采用的是 Daubechies-2 小波基<sup>[4]</sup>。这种正交小波基具有紧支性, 在时频两域都具有良好的分辨率。考虑到 DWI 图像的噪声为赖斯噪声, 因此, 对信号模平方运算后再进行小波域去噪处理。

**基金项目:** 国家“973”计划基金资助项目(2003CB716103); 上海市教委基金资助项目(CL200538); 上海师范大学基金资助项目(SK200734)

**作者简介:** 张相芬(1977-), 女, 讲师、在职博士研究生, 主研方向: 信息融合, 图像处理; 田蔚风、陈武凡, 教授; 叶宏, 副教授; 于金兰, 实验师

**收稿日期:** 2007-12-20 **E-mail:** wdrq@sohu.com

## 4 算法过程

根据 DWI 图像的噪声特点和 DWI 图像的多通道特性, 本文提出了多通道小波的赖斯噪声去除算法。其算法步骤描述如下:

(1)对每层各梯度加权的 DWI 图像(不包含未加权  $T_2$  图像, 因为实验证明  $T_2$  的参与对最终张量场计算和白质追踪等几乎不产生任何影响)进行模平方运算。模平方运算使得对信号小波系数的估计变为无偏。

(2)把模平方后的图像灰度矩阵按列进行向量化。通过按列向量化把单通道 2-D 信号变成了 1-D 信号。在实际编程中, 本步骤可以和步骤(1)对换。

(3)把步骤(2)中各向量作为矩阵的列组合成一个新的矩阵, 并把这个矩阵当作新的“图像”。DWT 对各通道信号进行恢复时能保持各通道之间的相关性, 因此, 实验中把表示各层各梯度加权图像灰度的 2-D 矩阵进行向量化并组成表示新“图像”的矩阵。

(4)对步骤(3)中的“图像”做 2-D DWT。

(5)对各小波系数进行软阈值去噪。小波系数是无偏的, 因此, 可以直接进行阈值处理以去掉小的噪声系数而保留大的信号系数。

(6)在分辨尺度  $2^j$ , 从各尺度系数减掉  $2^{j+1}\sigma_c$ 。模平方后, 小波系数为无偏的, 但是尺度系数仍然有偏故需要去偏处理。

(7)根据步骤(5)和步骤(6)处理后的小波系数和尺度系数进行离散小波反变换并获得重构后的“图像”。此“图像”相当于对步骤(3)中“图像”进行小波滤波后的结果。

(8)对步骤(7)中的“图像”按像素进行平方根运算。

(9)从步骤(8)中的图像按照和步骤(3)相反的过程得到各个通道的图像。

通过以上步骤完成了多通道型 DWI 图像的恢复。本算法的优点是兼顾了图像噪声特点和图像本身的多通道特性。计算过程中把 3-D 图像变成 2-D 图像进行处理, 因而编程实现简单, 特别是在图像通道比较多的情况下本算法优点更加突出。本算法不仅有其良好的理论基础而且基于本算法进行的大量图像恢复实验的结果都表明本滤波方法具有良好的噪声性能。

## 5 实验结果

基于模拟和真实的 DWI 图像进行了实验。对模拟数据构造了无噪声污染的 DWI 图像, 然后给图像加入赖斯噪声。文中采用 PSNR 来定量评估本文提出的滤波方法(以下用 F2 表示本文提出的多通道小波滤波器的)滤噪性能。对实际的人脑扩散张量图像, 无法获得人脑图像的“真”值, 因此, 通过追踪到的纤维长度和平滑后的图像来定性地衡量本方法的有效性。方法实现和可视化编程通过 Matlab 和 MEDINRIA<sup>[5]</sup>来完成。采用 MRICro 来构造体元并根据滤波前后图像获得的体元进行张量估计和纤维追踪。

### 5.1 模拟数据

实验采用一个简单的张量场。该张量场如图 1(a)所示为一个  $16 \times 16 \times 4$  的体元, 图中对张量场进行了 2 次抽样。张量场的迹取为  $0.002 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。设 4 个无噪声未加权图像同为一 MR 图像。无噪声污染的加权图像根据未加权图像、模拟张量场和加权梯度(Basser 序列<sup>[6]</sup>,  $b=1000 \text{ s}/\text{mm}^2$ )计算得出。给上述图像(非加权和加权图像)加  $\text{SNR}=5:20:65$  的赖斯噪声, 然后用 F2 对含噪图像( $\text{SNR}=35$ )进行滤波。由含噪图像计算所得的张量如图 1(b)所示, F2 滤波后的张量场如图 1(c)所示。由

图可知, F2 滤波后的张量场和实际张量场非常接近, 从而证明了其良好的滤波效果。

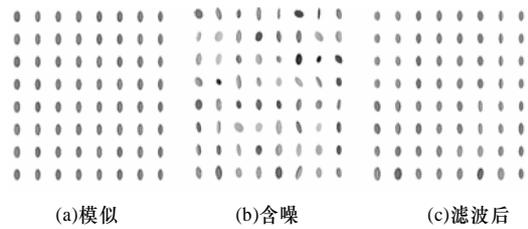


图 1 模拟张量场

为了估计 F2 的滤波性能, 把该滤波结果和单通道小波方法(以下用 F1 表示单通道小波滤波器)滤波结果做了一个比较, 实验中对参数进行了最优化, 比较采用了 PSNR。表 1 为第 2 梯度( $g_2$ ), 第 4 梯度( $g_4$ )和第 6 梯度( $g_6$ )加权图像的 PSNR。其中,  $S1j$  表示 F1 滤波后的第  $j$  梯度加权图像;  $S2j$  表示 F2 滤波后的第  $j$  梯度加权图像。从表中可以看出, 本文滤波方法能够获得更高的 PSNR 值, 因此, 消除赖斯噪声的性能更佳。

表 1 滤波后的 PSNR

SNR	5	25	45	55
S12	27.4	34.7	36.8	38.5
S22	28.4	40.6	42.6	44.6
S14	26.9	36.2	38.1	39.5
S24	27.1	41.3	44.4	45.4
S16	26.5	36.3	39.2	39.3
S26	27.1	41.9	43.9	45.9

### 5.2 实际数据

基于真实 DTI 数据进行了实验。真实数据采用 1.5 T 磁共振系统和 7 个编码梯度对成人脑部进行自旋回波单次激发 EPI 成像获得。每次扫描获得 1 个 EPI 图像和 6 个 DWI 图像, 加权梯度方向为:  $[0.707, 0, 0.707]$ ,  $[-0.707, 0, 0.707]$ ,  $[0, 0.707, 0.707]$ ,  $[0, 0.707, 0.707]$ ,  $[0.707, 0.707, 0]$ ,  $[-0.707, 0.707, 0]$ 。其成像参数为:  $TR=2.4 \text{ s}$ ,  $TE=65 \text{ ms}$ ,  $b=1000 \text{ s}/\text{mm}^2$ ,  $FOV=22 \text{ cm}$ , 像素尺寸  $4.0 \times 1.7 \times 1.7 \text{ mm}^3$ , 矩阵  $256 \times 256 \times 45$ 。

首先提取了一个  $64 \times 64 \times 20$  的体元(该体元在靠近胼胝体的部位)并采用 MEDINRIA 对该体元进行了 FA、张量场和 ADC 的计算。本试验中对 MEDINRIA 参数设置如下: 背景滤除门限(Background Removal Threshold)=0, 部分各向异性门限(FA Threshold)=0, 平滑度(Smoothness)=0, 最小纤维长度(Minimum Fiber Length)=200, 抽样率(Sampling Rate)=10。不希望对平滑后的图像进一步平滑因此令平滑度为 0。为了提高处理速度, 把显示的最小纤维长度和抽样速率都设置为最大值。实验结果如图 2 所示。图 2(a)~图 2(c)分别是平滑前的白质纤维、张量场以及 ADC。图 2(d)~图 2(f)为平滑后的相应结果。从图 2 可以看出, 滤波后的图像更加平滑, 张量场排列更加整齐。

提取了一个  $256 \times 256 \times 20$  的体元(该体元在靠近胼胝体的部位)并采用 MEDINRIA 对该体元进行了 FA、ADC 计算和图像平滑, 其结果如图 3 所示。本试验中平滑度设为 0。为了提高处理速度, 令最小纤维长度和抽样速率为最大值, 背景滤除门限=100, 部分各向异性门限=100。图 3(a)~图 3(c)分别是平滑前的 DWI 图像, ADC 和 FA 图像, 图 3(d)~图 3(f)为 F1 滤波后的结果图 3(g)~图 3(i), 是 F2 滤波后的结果。从图 3 可以看出, F2 滤波后的图像更加平滑、清晰, 从而证明本方法滤波效果更好。

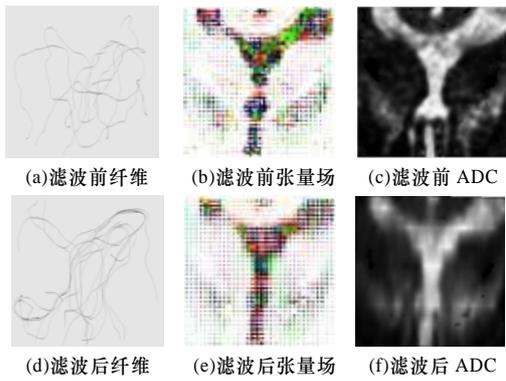


图2 真实数据结果

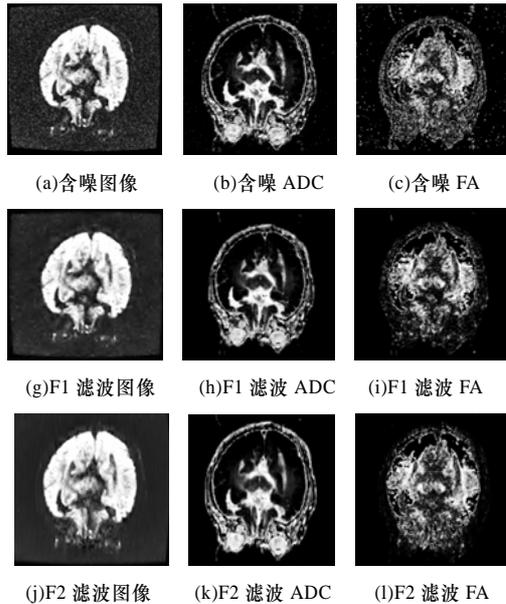


图3 2种方法比较

## 6 结束语

本文提出了一种新的多通道小波滤波模型来消除赖斯噪声对 DWI 图像的影响。本文滤波方法显示出了良好的赖斯噪声消除性能。基于模拟数据把本文所述方法和单通道小波去噪方法进行了比较,结果表明本文滤波方法滤噪性能更佳。基于健康成人脑部的真实 DTI 数据进行了实验,结果表明本文方法滤波后的图像更加平滑,基于平滑后图像追踪到的纤维更加光滑且长度更长,从而证明本方法滤波效果好。

综上所述,基于模拟和真实的数据都证明本文提出的滤波器具有更好的噪声特性。本文着眼于 DWI 图像的滤波处理,实际中可以把本滤波模型很方便地推广到其他多通道图像。提出了多通道图像的混合滤波模型并对模型进行了应用,本模型的良好性能需要进一步的验证。

## 参考文献

- [1] Nowak R D. Wavelet-based Rician Noise Removal for Magnetic Resonance Imaging[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 1999, 12(7): 1408-1419.
- [2] Saurav B, Thomas F, Ross W. Rician Noise Removal in Diffusion Tensor MRI[C]//Proc. of the 9th International Conference on Medical Image Computing and Computer-assisted Intervention. Copenhagen, Denmark: [s. n.], 2006.
- [3] Atkinson I, Kamalabadi F, Mohan S, et al. Asymptotically Optimal Blind Estimation of Multichannel Images[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2006, 15(4): 992-1007.
- [4] 曹林, 王东峰, 邹谋炎. 基于小波变换和隐马尔可夫模型的人脸识别方法[J]. 计算机工程, 2006, 32(23): 18-23.
- [5] Fillard P, Toussaint N. Research Project ASCLEPIOS[EB/OL]. (2007-01-13). <http://www-sop.inria.fr/asclepios>.
- [6] Basser P, Pierpaoli C. Microstructural and Physiological Features of Tissues Elucidated by Quantitative-diffusion-tensor MRI[J]. J. Mag Res B, 1996, 111(3): 209-219.

(上接第3页)

需要过多的约束条件,并且采用改进策略后,算法的鲁棒性提高,使得其对复杂问题仍能发挥优良的性能。

环境复杂度的增加会影响到遗传算法的求解能力。而改进后的蚁群算法随环境复杂度的增加,其求解能力几乎没有影响。可以看出改进后的蚁群算法对环境复杂程度的适应能力很强,特别适合对复杂环境下的机器人路径规划。

## 5 结束语

本文研究基于蚁群算法的机器人路径规划问题,描述机器人全局路径规划的相关问题和蚁群算法原理,论证将蚁群算法应用于机器人路径规划研究的可行性。笔者利用栅格法建立环境模型,为蚁群算法的路径搜索提供一个模拟环境的抽象空间。分析蚁群算法的优势与不足并对其进行改进,融入了遗传算法的交叉、变异操作以加快算法收敛。

实验结果表明,改进后基于蚁群算法的路径搜索更简单、高效、健壮,其有效性和优越性得到验证。

## 参考文献

- [1] Ge Xuecheng. Boundary Following and Globally Convergent Path Planning Using Instant Goals[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2005, 35(2): 240-254.
- [2] 刘作军. 基于电路地图的机器人路径规划方法研究[D]. 天津: 南开大学, 2005.
- [3] 朱庆保, 张玉兰. 基于栅格法的机器人路径规划蚁群算法[J]. 机器人, 2005, 27(2): 132-136.
- [4] 李士勇. 蚁群算法及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- [5] 张汝波, 郭必祥, 熊江. 基于遗传蚁群算法的机器人全局路径规划研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(6): 724-727.
- [6] 郭必祥. 基于蚁群算法的智能机器人全局路径规划方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.