

## 弥散张量成像纤维束跟踪中噪声去除方法研究

潘运达<sup>1</sup>, 徐龙春<sup>2</sup>, 何乐民<sup>1</sup>, 张敏凤<sup>2</sup>, 张岗<sup>2</sup>, 邹越<sup>2</sup>, 赵文波<sup>2</sup>, 宋学睿<sup>1</sup>, 段洛炜<sup>1</sup>, 张光玉<sup>1</sup>

1. 泰山医学院放射学院, 山东 泰安 271016; 2. 泰山医学院附属医院, 山东 泰安 271000

**【摘要】**对弥散张量成像(DTI)中影响纤维束跟踪效果的几种噪声去除方法进行研究。仿真结果表明:高斯平滑滤波、中值滤波和形态学最大最小值滤波对DTI中的噪声都有一定的抑制作用。高斯平滑滤波能够去除高频白噪声,引起图像边缘模糊,影响纤维束跟踪的连续性;中值滤波在去除随机噪声的同时,较好地保存了图像细节,能提高纤维束跟踪效果;最大最小值滤波能抑制较大噪声的影响,提高纤维束跟踪的连续性。此外,提出一种联合运用最大最小值滤波和中值滤波的混合滤波去噪法,该方法能更好地抑制噪声对DTI纤维束跟踪的影响,获得了令人满意的跟踪效果。

**【关键词】**弥散张量成像;中值滤波;高斯平滑滤波;最大最小值滤波;混合滤波;纤维束跟踪;噪声去除方法

**【中图分类号】**R312;TP391.4

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2018)10-1150-05

## Noise elimination methods for fibre tracking in diffusion tensor imaging

PAN Yunda<sup>1</sup>, XU Longchun<sup>2</sup>, HE Lemin<sup>1</sup>, ZHANG Minfeng<sup>2</sup>, ZHANG Gang<sup>2</sup>, ZOU Yue<sup>2</sup>, ZHAO Wenbo<sup>2</sup>, SONG Xuerui<sup>1</sup>, DUAN Luowei<sup>1</sup>, ZHANG Guangyu<sup>1</sup>

1. College of Radiology, Taishan Medical University, Tai'an 271016, China; 2. Affiliation Hospital of Taishan Medical University, Tai'an 271000, China

**Abstract:** Several noise elimination approaches for fibre tracking in diffusion tensor imaging (DTI) are analyzed. The simulation results indicate that Gaussian smoothing filter, median filter, and maximum-minimum filter are able to eliminate the noise in DTI image. Gaussian smoothing filter eliminates high-frequency white noise, but causes fuzzy edges of images and affects the connectivity of DTI fibre tracking. Median filter not only eliminates random noise, but also remains valuable information, which improves the effect of DTI fibre tracking. Maximum-minimum filter inhibits the effects of significant noise and improves the connectivity of DTI fibre tracking. Herein a mixed filtering method by integrating maximum-minimum filter with median filter is proposed for image denoising. The proposed method is proved to be able to effectively reduce the effects of noise on DTI fibre tracking, achieving better DTI fibre tracking results.

**Keywords:** diffusion tensor imaging; median filter; Gaussian smoothing filter; maximum-minimum filter; mixed filter; fibre tracking; noise elimination method

## 前言

弥散张量成像(Diffusion Tensor Imaging, DTI)可用来观察脑组织水分子的活动进而对脑微结构改变进行研究,白质束追踪技术可对白质纤维束的完

整性及走向性进行评估,并可构建脑结构连接网。目前,DTI在医学研究中获得广泛应用,例如,多发性硬化、老龄化和坐骨神经成像研究<sup>[1-3]</sup>;腰椎神经根评估<sup>[4]</sup>和动物模型研究<sup>[5-7]</sup>;心脏骤停引起的脑神经损失研究<sup>[8]</sup>。特别是纤维束跟踪技术可以观察病变对纤维束完整性和走向性的影响,对疾病进行精准诊断和治疗。DTI纤维束跟踪技术是目前DTI中的一个热点研究领域。研究者已经提出了很多种跟踪算法,这些算法主要包括确定性跟踪法<sup>[9]</sup>、概率跟踪算法<sup>[10]</sup>。但由于受到DTI噪声的影响,这些算法的跟踪效果还不能完全满足临床应用的需要。因此,迫切需要噪声去除方法来消除噪声对纤维束跟踪的影响。在这个研究中,笔者分析了几种DTI中噪声去除

**【收稿日期】**2018-06-20

**【基金项目】**山东省自然科学基金(ZR2018MH033, ZR2014HM072, ZR2015HL095);泰山医学院国家级大学生创新创业训练计划项目(201710439076)

**【作者简介】**潘运达,研究方向:弥散张量成像纤维束跟踪算法, E-mail: 1016601424@qq.com

**【通信作者】**张光玉,研究方向:数字医学影像处理和脑功能成像, E-mail: gyuzhn@163.com

方法,对这些方法进行了比较和评估,并在此基础上,提出一种混合滤波去噪法,取得较好效果。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

使用泰山医学院附属医院影像科提供的DICOM格式的磁共振DTI图像作为DTI纤维束跟踪噪声去除方法的测试图像。

### 1.2 方法

**1.2.1 中值滤波去噪法** 中值滤波是基于排序统计理论的一种能有效抑制噪声的非线性信号处理技术,具有简单和速度快的特点,而且滤除噪声的同时对影像的细节信息(如边缘、锐角等)进行了较好地保护<sup>[11-13]</sup>。与中值滤波相对应的滤波器叫中值滤波器,常见的中值滤波器有一维、二维和三维中值滤波器,在这个研究中,笔者使用了三维的正方体形中值滤波器。具体滤波步骤如下:设 $I_o$ 表示待滤波的三维DTI影像, $G_o(m, n, k)$ 表示影像 $I_o$ 中像素点 $(m, n, k)$ 处的像素值, $M$ 表示 $(2s+1) \times (2s+1) \times (2s+1)$ 的一个三维正方体形中值滤波器, $s$ 是大于0的整数。对影像 $I_o$ 中像素点 $(m, n, k)$ 进行中值滤波的公式如下:

$$G_f(m, n, k) = \text{Med} \left\{ G_o(m+h, n+j, k+i) \mid (h, j, i) \in M \right\} \quad (1)$$

式中, $G_f(m, n, k)$ 表示滤波后的像素值,符号Med表示在影像 $I_o$ 中,以像素点 $(m, n, k)$ 为中心,取 $(2s+1) \times (2s+1) \times (2s+1)$ 个像素点大小的正方体区域,对该区域中各像素点按像素值从小到大的顺序排序,取排在中间的像素点的像素值。 $G_o(m+h, n+j, k+i)$ 表示排序后的像素点 $(m+h, n+j, k+i)$ 处的像素值,其中, $h, j$ 和 $i$ 取整数,且 $h \in [-s, s], j \in [-s, s], i \in [-s, s]$ 。具体的滤波过程可描述如下:从医学影像 $I_o$ 的起始像素点开始,按照从左到右,从前到后,以及从上到下的顺序,依次取出每一个像素点,利用式(1)得到中值滤波后的值,由这些值组成滤波后医学影像。

**1.2.2 高斯平滑滤波去噪法** 高斯滤波是一种线性平滑滤波,广泛应用于医学影像处理的减噪和平滑过程<sup>[14-15]</sup>。高斯滤波是对整幅图像进行加权平均的过程,每一个像素点的值,都由其本身和邻域内的其他像素值经过加权平均后得到。使用高斯滤波,首先要设计高斯滤波器,通常使用高斯函数来建立滤波器。由于高斯函数的傅里叶变换仍是高斯函数,因此高斯函数能构成一个在频域具有平滑性能的低通滤波器。可通过在频域做乘积实现高斯滤波,也可

以在时域利用卷积实现。

常见的高斯平滑滤波器有一维、二维和三维滤波器。本研究利用三维高斯平滑滤波器对DTI进行噪声去除。三维高斯平滑滤波器定义如下:

$$H(h, j, i) = e^{-\frac{h^2}{2\sigma_h^2} + \frac{j^2}{2\sigma_j^2} + \frac{i^2}{2\sigma_i^2}} / 2\pi\sqrt{2\pi}\sigma_h\sigma_j\sigma_i \quad (2)$$

式中 $h \in [-\text{ceil}(3\sigma_h), \text{ceil}(3\sigma_h)], j \in [-\text{ceil}(3\sigma_j), \text{ceil}(3\sigma_j)], i \in [-\text{ceil}(3\sigma_i), \text{ceil}(3\sigma_i)]$ 。 $\text{ceil}(3\sigma_h)$ 表示 $\geq (3\sigma_h)$ 的整数; $\text{ceil}(3\sigma_j)$ 表示 $\geq (3\sigma_j)$ 的整数; $\text{ceil}(3\sigma_i)$ 表示 $\geq (3\sigma_i)$ 的整数。 $\sigma_h, \sigma_j$ 和 $\sigma_i$ 的值决定了高斯滤波器的宽度和平滑程度,通过调节这3个平滑参数,可在图像特征过分模糊(过平滑)与平滑图像中由于噪声和细纹理所引起的过多不希望的突变量(欠平滑)之间取得折衷效果。当 $\sigma_h = \sigma_j = \sigma_i$ 时,高斯滤波器具有各向同性。 $H(h, j, i)$ 表示高斯滤波器中点 $(h, j, i)$ 的值。获得高斯滤波器后,就可以对DTI进行高斯滤波。设 $I_o$ 表示待滤波的三维DTI影像,三维高斯滤波公式表示如下:

$$G_f(m, n, k) = \sum_{h=-\text{ceil}(3\sigma_h)}^{\text{ceil}(3\sigma_h)} \sum_{j=-\text{ceil}(3\sigma_j)}^{\text{ceil}(3\sigma_j)} \sum_{i=-\text{ceil}(3\sigma_i)}^{\text{ceil}(3\sigma_i)} G_o(m+h, n+j, k+i) H(h, j, i) \quad (3)$$

式中, $G_o(m+h, n+j, k+i)$ 表示 $I_o$ 中像素点 $(m+h, n+j, k+i)$ 处的像素值, $G_f(m, n, k)$ 表示高斯滤波后的像素点 $(m, n, k)$ 处的滤波值。具体的滤波过程可描述如下:从 $I_o$ 的起始像素点开始,按照从左到右,从前到后,以及从上到下的顺序,依次取出每一个像素点,利用式(3)得到高斯滤波后的值,由这些值组成滤波后的医学影像。

**1.2.3 最大和最小值滤波去噪法** 在医学影像处理中,基于排序统计理论的滤波方法还有最大值滤波和最小值滤波。类似于中值滤波,最大值滤波就是取医学影像中以待滤波点为中心的区域中所有像素值的最大值代替原来的值,最大值滤波主要是为了突出医学影像中的高密度点,去除减性噪声。最小值滤波就是取医学影像中以待滤波点为中心的区域中所有像素值的最小值代替原来的值,主要是为了突出医学影像中的暗点(即像素值比较小的点),去除加性噪声。在DTI噪声去除中,将这两种方法联合起来运用,即求最大值和最小值的平均值作为最后的滤波值,会较好地消除噪声。具体原理可描述如下:

设 $I_o$ 表示待滤波的三维DTI影像, $G_o(m, n, k)$ 表示影像 $I_o$ 中像素点 $(m, n, k)$ 处的真实像素值,即不包

含任何噪声的像素值。 $G_{\max}(m, n, k)$ 表示影像 $I_o$ 中像素点 $(m, n, k)$ 处的最大滤波值,即利用最大值滤波得到的滤波值, $\delta_+(m, n, k)$ 表示影像 $I_o$ 中像素点 $(m, n, k)$ 处的加性噪声。 $G_{\max}(m, n, k)$ 可表示如下:

$$G_{\max}(m, n, k) = G_r(m, n, k) + \delta_+(m, n, k) \quad (4)$$

类似地,像素点 $(m, n, k)$ 处的最小值滤波值 $G_{\min}(m, n, k)$ 可表示如下:

$$G_{\min}(m, n, k) = G_r(m, n, k) + \delta_-(m, n, k) \quad (5)$$

式中, $\delta_-(m, n, k)$ 表示影像 $I_o$ 中像素点 $(m, n, k)$ 处的减性噪声。将式(4)和(5)两边相加除以2,并整理后可得下式:

$$G_r(m, n, k) = \frac{(G_{\max}(m, n, k) + G_{\min}(m, n, k))}{2} + \frac{(\delta_+(m, n, k) + \delta_-(m, n, k))}{2} \quad (6)$$

根据式(6)可以看出,加性噪声和减性噪声相加后,互相抵消,相加后的值较小,因此,最大滤波值和最小滤波值求平均后,非常接近真实的像素值,该方法可以有效地去除DTI纤维束跟踪中的噪声干扰。

**1.2.4 混合滤波去噪法** 根据上面的分析可知,在最

大最小值滤波中,尽管加性噪声和减性噪声相加后,互相抵消,相加后的值较小,但仍然存在未抵消掉的较小的加性噪声和减性噪声,这些噪声主要分布在像素值较大(含有加性噪声)和较小(含有减性噪声)的像素点中,而中等像素值的像素点中加性或减性噪声却较少。因此,对DTI进行最大最小值滤波后,再进行中值滤波可以较好地抑制DTI中的噪声,取得理想跟踪效果,这种联合运用最大最小值滤波和中值滤波的方法也叫混合滤波去噪法。

## 2 结果

在VC++开发环境下,用C/C++语言编程实现了上述3种去噪声方法。仿真结果如图1所示,图1中,高斯滤波器是各向同性滤波器, $\sigma_h = \sigma_j = \sigma_i = 0.6$ ;中值滤波器和最大最小值滤波器是 $3 \times 3 \times 3$ 的正方形滤波器。从1图中可以看出,高斯滤波、中值滤波和最大最小值滤波都能有效去除DTI中的噪声,其中,高斯和最大最小值滤波会引起滤波后的图像一定程度模糊,中值滤波在去除噪声的同时,较好地保存了图像的细节,滤波后引起的模糊程度最低。

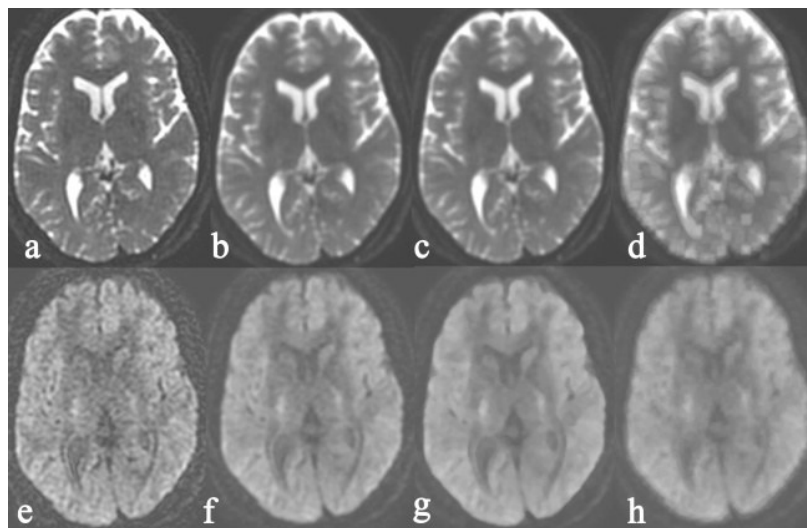


图1 DTI噪声去除方法仿真结果

Fig.1 Simulation results of noise elimination methods for diffusion tensor imaging (DTI)

a: Original DTI b, image; b: Result of Gaussian filtering for image a; c: Result of median filtering for image a; d: Result of maximum-minimum filtering for image a; e: Original gradient image of DTI; f: Result of Gaussian filtering for image e; g: Result of median filtering for image e; h: Result of maximum-minimum filtering for image e

笔者还用DTI后处理软件Diffusion Toolkit和纤维束跟踪可视化软件TrackVis对去噪前后的DTI纤维束进行了跟踪和显示,实验结果如图2所示。从图2可以看出,高斯滤波、中值滤波和最大最小值滤波后的DTI中纤维束跟踪效果较好,其中,最大最小值滤波后的DTI

中纤维束跟踪效果最好,而原始DTI跟踪效果并不理想,特别是边界区域,受背景噪声的影响较大。

从图3所示的仿真结果可以看出,混合滤波比高斯滤波、中值滤波和最大最小值滤波的去噪效果和去噪后的DTI中纤维束跟踪效果好。



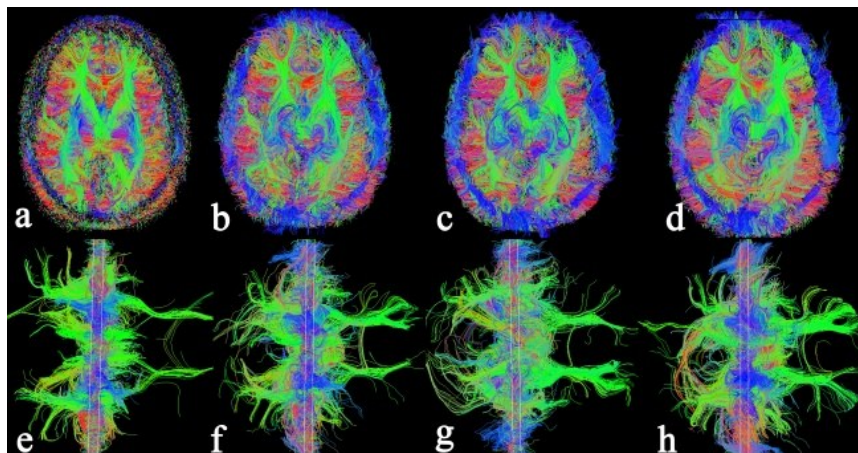


图2 DTI 纤维束跟踪的可视化结果

Fig.2 Visualization results of DTI fibre tracking

a: Axial visualization result of original DTI fibre tracking; b: Axial visualization result of DTI fibre tracking after Gaussian filtering; c: Axial visualization result of DTI fibre tracking after median filtering; d: Axial visualization result of DTI fibre tracking after maximum-minimum filtering; e: Coronal visualization result of original DTI fibre tracking; f: Coronal visualization result of DTI fibre tracking after Gaussian filtering; g: Coronal visualization result of DTI fibre tracking after median filtering; h: Coronal visualization result of DTI fibre tracking after maximum-minimum filtering

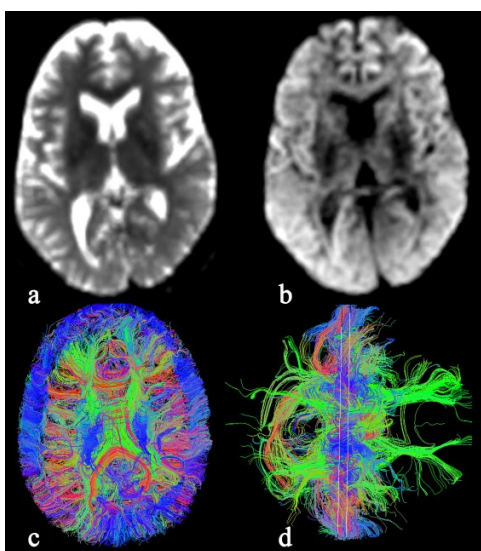


图3 混合滤波去噪法的仿真结果

Fig.3 Simulation results of mixed filter for image denoising

a: Result of mixed filtering for original DTI b<sub>0</sub> image; b: Result of mixed filtering for original gradient image of DTI; c: Axial visualization result of DTI fibre tracking after mixed filtering; d: Coronal visualization result of DTI fibre tracking after mixed filtering

### 3 讨论

DTI纤维束跟踪在临床疾病诊断和治疗中有重要应用,纤维束跟踪的效果直接影响到对疾病治疗的评估<sup>[16-17]</sup>。然而,DTI中通常包含大量的噪声,严重干扰了对纤维束的跟踪,因此,如何消除噪声对纤维束跟踪的影响,是DTI应用中需要解决的关键问题。在这个研究中,我们首先对DTI噪声去除方法进行了

分析和评价,发现高斯滤波、中值滤波和最大最小值滤波都能有效地抑制噪声,获得较好的纤维束跟踪效果,其中,最大值最小值滤波法由于加性噪声和减性噪声相互抵消,能消除强噪声的干扰,提高DTI纤维束跟踪的连续性。然后,我们联合运用最大最小值滤波和中值滤波提出一种混合滤波去噪法,该方法能更好地抑制噪声对DTI纤维束跟踪的影响,获得令人满意的跟踪效果。

### 【参考文献】

- [1] ALVES C, BATISTA S, D'ALMEIDA O C, et al. The retinal ganglion cell layer predicts normal-appearing white matter tract integrity in multiple sclerosis: a combined diffusion tensor imaging and optical coherence tomography approach[J]. Hum Brain Mapp, 2018, 39(4): 1712-1720.
- [2] CERVANTES B, VAN A T, WEIDLICH D, et al. Isotropic resolution diffusion tensor imaging of lumbosacral and sciatic nerves using a phase-corrected diffusion-prepared 3D turbo spin echo[J]. Magn Reson Med, 2018, 80(2): 609-618.
- [3] MARTENSSON J, LAIT J, AHS F, et al. Diffusion tensor imaging and tractography of the white matter in normal aging: the rate-of-change differs between segments within tracts[J]. Magn Reson Imaging 2018, 45: 113-119.
- [4] SAKAI T, DOI K, YONEYAMA M, et al. Distortion-free diffusion tensor imaging for evaluation of lumbar nerve roots: utility of direct coronal single-shot turbo spin-echo diffusion sequence[J]. Magn Reson Imaging, 2018, 49: 78-85.
- [5] OGI H, NITTA N, TANDO S, et al. Longitudinal diffusion tensor imaging revealed nerve fiber alterations in aspm mutated microcephaly model mice[J]. Neuroscience, 2018, 371: 325-336.
- [6] SALO R A, BELEVICH I, MANNINEN E, et al. Quantification of anisotropy and orientation in 3D electron microscopy and diffusion

- tensor imaging in injured rat brain[J]. Neuroimage, 2018, 172: 404-414.
- [7] ZHAO C, RAO J S, PEI X J, et al. Diffusion tensor imaging of spinal cord parenchyma lesion in rat with chronic spinal cord injury[J]. Magn Reson Imaging, 2018, 47: 25-32.
- [8] VELLY L, PERLBARG V, BOULIER T, et al. Use of brain diffusion tensor imaging for the prediction of long-term neurological outcomes in patients after cardiac arrest: a multicentre, international, prospective, observational, cohort study[J]. Lancet Neurol, 2018, 17(4): 317-326.
- [9] CHENG P, MAGNOTTA V A, WU D, et al. Evaluation of the GTRACT diffusion tensor tractography algorithm: a validation and reliability study[J]. Neuroimage, 2006, 31(3): 1075-1085.
- [10] PESTILLI F, YEATMAN J D, ROKEM A, et al. Evaluation and statistical inference for human connectomes[J]. Nat Methods, 2014, 11(10): 1058-1063.
- [11] CHANU P R, SINGH K M. Impulse noise removal from medical images by two stage quaternion vector median filter[J]. J Med Syst, 2018, 42(10): 197.
- [12] AHMAD M, JUNG L T, BHUIYAN A A. A biological inspired fuzzy adaptive window median filter (FAWMF) for enhancing DNA signal processing[J]. Comput Methods Programs Biomed, 2017, 149: 11-17.
- [13] ZHENG D, DA F, KEMAO Q, et al. Phase-shifting profilometry combined with gray-code patterns projection: unwrapping error removal by an adaptive median filter[J]. Optics Express, 2017, 25(5): 4700-4713.
- [14] KHAN T M, BAILEY D G, KHAN M A, et al. Efficient hardware implementation for fingerprint image enhancement using anisotropic Gaussian filter[J]. IEEE Trans Image Process, 2017, 26(5): 2116-2126.
- [15] YANG Y, LIANG Y, PAN Q, et al. Adaptive Gaussian mixture filter for Markovian jump nonlinear systems with colored measurement noises[J]. ISA Trans, 2018, 80: 111-126.
- [16] YUAN W, BARBER FOSS K D, THOMAS S, et al. White matter alterations over the course of two consecutive high-school football seasons and the effect of a jugular compression collar: a preliminary longitudinal diffusion tensor imaging study[J]. Hum Brain Mapp, 2018, 39(1): 491-508.
- [17] ZIKOU A K, KITSOS G, ASTRAKAS L G, et al. Pseudoexfoliation syndrome without glaucoma: white matter abnormalities detected by conventional MRI and diffusion tensor imaging[J]. Eur J Radiol, 2018, 99: 82-87.

(编辑:薛泽玲)