

• 中枢神经影像学 •

人脑联合纤维的扩散张量纤维束成像初步研究

于春水, 李坤成, 李永忠, 梁志刚, 秦文, 刘嘉宾

【摘要】 目的: 利用扩散张量纤维束成像显示人脑内联合纤维的三维结构, 探讨其与解剖学描述的一致性。方法: 对 5 例正常志愿者进行单次激发回波平面扩散张量成像, 利用纤维束成像软件包显示人脑联合纤维的三维结构, 观察重建的联合纤维与解剖学描述的一致性。结果: 通过选择恰当的兴趣区, 设置不同的分数各向异性阈值、角度阈值、步长和体素长度内采样数目等参数, 扩散张量纤维束成像可以清楚地显示弓状纤维、扣带、钩束、上纵束、下纵束、上枕额束和下枕额束等联合纤维的三维结构, 除上枕额束以外, 其显示结果与解剖学描述具有良好的一致性。结论: 联合纤维束成像的结果与解剖学描述具有高度一致性, 该方法是一种可靠的研究人脑纤维连接的方法。

【关键词】 磁共振成像; 联合纤维; 脑; 解剖学

【中图分类号】 R445.2; R816.1 【文献标识码】 A 【文章编号】 1000-0313(2004)09-0623-04

Preliminary study of diffusion tensor tractography of the association fibers in the human brain YU Chun-shui, LI Kun-cheng, LI Yong-zhong, et al. Department of Radiology, Xuan Wu Hospital, Capital University of Medical Sciences, Beijing 100053, P. R. China

【Abstract】 **Objective:** To visualize the three dimensional architecture of association fibers in the human brain by using diffusion tensor tractography, and to investigate the coherence of anatomic descriptions with those structures. **Methods:** Single shot echo planar diffusion tensor imaging was performed in 5 volunteers, and then association fibers in the human brain were visualized by using tractography software package. Finally, the coherence of reconstructed association fibers with anatomic descriptions of those structures was evaluated. **Results:** By selecting appropriate regions of interest and setting different parameters which included fractional anisotropy (FA) threshold, angle threshold, step size and number of sampling in a voxel length, the three dimensional architecture of association fibers, including the arcuate fibers, the cingulum, the uncinate fasciculus, the superior and inferior longitudinal fasciculi, and the superior and inferior occipito-frontal fasciculi, can be clearly visualized by using diffusion tensor tractography. Except the superior occipito-frontal fasciculus the above mentioned association fibers were well consistent with known anatomy. **Conclusion:** The results of tractography are highly consistent with known anatomy. This technique is a reliable for studying fiber connectivity in the human brain.

【Key words】 Magnetic resonance imaging; Association fibers; Brain; Anatomy

扩散张量纤维束成像(diffusion tensor tractography, DTT)或称纤维追踪(fiber tracking, FT)是近几年 MRI 技术的一项重大进展,是目前唯一可在活体上显示脑白质纤维束的无创性成像方法^[1]。纤维束成像结果的可靠性受采集图像的质量、使用的算法、控制参数及操作者对相关解剖知识熟悉程度的影响^[2,3]。本文通过采集高质量图像、采用较先进的算法和使用优化的控制参数显示人脑内主要联合纤维束,观察重建的联合纤维与解剖学描述的一致性,从而建立一种可靠的显示脑内纤维连接的方法。

材料与方法

图像采集: 5 名健康志愿者,男 3 例,女 2 例,年龄 22~31 岁,平均 28.6 岁,无任何神经系统症状和体征,

MRI 平扫正常。采用 1.5T MR 扫描仪(Siemens Sonata),梯度场 40 mT/m,切换率 200 T/M/ms。使用扩散敏感单次激发回波平面成像序列对志愿者进行轴位扫描,扫描参数:TR 6100 ms,TE 106 ms,视野 230 mm × 230 mm,在相位编码方向上重复取样率为 38%,矩阵 128 × 128,层厚 3 mm,无间隔,总计获取 30 层,图像体素 1.8 mm × 1.8 mm × 3.0 mm,再应用内插(interpolation)技术将集体素减小至 0.9 mm × 0.9 mm × 1.5 mm,信号 10 次平均。使用 2 个扩散加权,b 值分别为 0 和 1000 s/mm²,在 6 个各向同性方向(1, 0, 1; -1, 0, 1; 0, 1, 1; 0, 1, -1; 1, 1, 0 和 -1, 1, 0)上分别施加扩散敏感梯度,总采集时间为 7 min 15 s。

数据处理: 将采集到的扩散张量成像数据传输至工作站(Siemens Leonardo),使用美国麻省总医院提供的纤维束成像软件包进行图像分析,采用高斯平滑

作者单位: 100053 北京,首都医科大学宣武医院医学影像部放射科
作者简介: 于春水(1970~),男,天津人,博士,在站博士后,主要从事神经影像学研究。

消除采集数据噪声, 进一步应用内插技术提高图像分辨率, 使体素减小至 $0.45 \text{ mm} \times 0.45 \text{ mm} \times 0.75 \text{ mm}$ 。

纤维束成像算法: 采用流线型(streamline)算法, 自一个种子点(体素内任意一点)开始, 在最大本征向量方向上, 向前、后方向各延伸一个步长, 然后计算出新位置的最大本征向量, 纤维沿新的最大本征向量方向再延伸一个步长。多次重复该步骤, 直至符合终止条件。终止条件包括纤维束到达低于预设分数各向异性(fractional anisotropy, FA)阈值的区域或两个步长间的角度大于阈值。由于经典神经解剖研究显示脑白质是由走行接近的不同纤维束组成。笔者采用设置 2 个兴趣区(region of interest, ROI)的方法, 第 2 个 ROI 放置在距离第 1 个 ROI 一定距离处, 它包含想要显示的纤维束, 而不包含任何通过第 1 个 ROI 不想要的纤维束。根据已知的解剖知识选择恰当的 ROI(包括单 ROI 和多 ROI), 不断调整分数各向异性阈值、角度阈值、步长和体素长度内采样数目等参数, 以准确显示人脑内联合纤维。

纤维束成像显示的联合纤维与解剖学描述的一致性比较: 观察重建联合纤维的各个组分的形态、位置、起点、止点和走行, 并与已知解剖学知识比较, 研究二

者间的异同, 从而判断该方法的可靠性。

结 果

联合纤维各个组分纤维束成像 ROI 的放置方法见表 1。

表 1 联合纤维各个组分纤维束成像 ROI 的放置方法

联合纤维名称	第一个ROI	第二个ROI
扣带	顶叶下方扣带回白质内	—
钩束	额叶眶部白质内	颞叶靠近颞极的白质内
上纵束	顶叶深部白质内	—
下纵束	颞极后部白质内	枕叶深部白质内
上枕额束	额叶后部侧脑室额角外侧白质内	顶叶深部白质内
下枕额束	额叶下部白质内	枕叶下部白质内

联合纤维各个组分纤维束成像的控制参数见表 2。

表 2 联合纤维各个组分纤维束成像的控制参数

联合纤维名称	FA 阈值	角度阈值 (°)	步长 (mm)	每个体素内采样数目	显示管半径 (mm)
扣带	0.15	50	0.10	8	0.20
钩束	0.15	50	0.10	27	0.10
上纵束	0.15	50	0.10	8	0.30
下纵束	0.20	40	0.10	8	0.20
上枕额束	0.15	40	0.20	8	0.30
下枕额束	0.30	50	0.10	27	0.10
弓状纤维	0.15	50	0.10	8	0.30

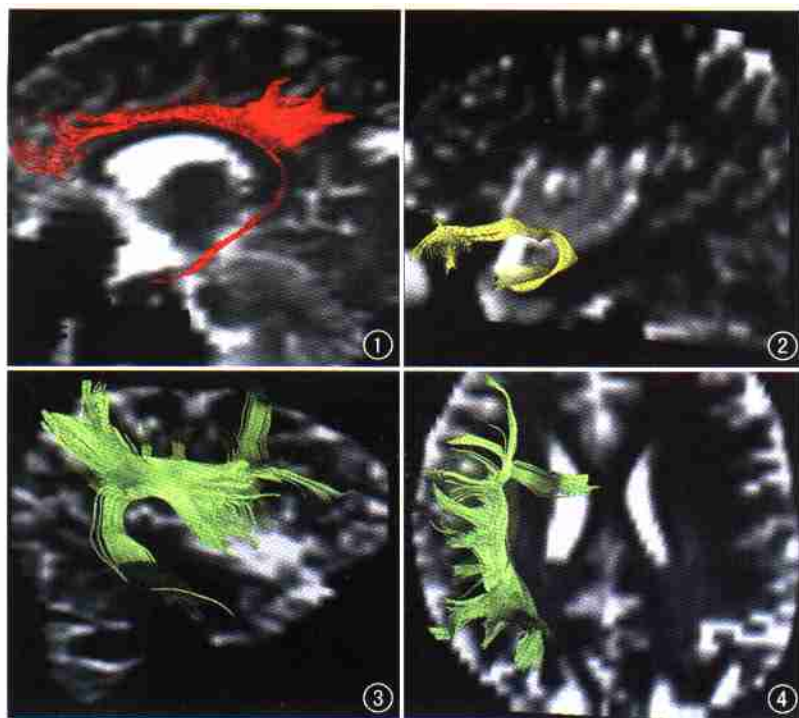


图 1 将纤维束成像结果叠加到矢状位 T₂WI 上, 示左侧扣带的外侧。

图 2 将纤维束成像结果叠加到矢状位 T₂WI 上, 示右侧钩束的内侧。

图 3 将纤维束成像结果叠加到矢状位 T₂WI 上, 示右侧上纵束的内侧。

图 4 将纤维束成像结果叠加到横轴位 T₂WI 上, 示右侧上纵束和弓状纤维的上部。弓状纤维较短, 联系相邻的脑回。

联合纤维的纤维束成像结果: 扣带表现为长而弯曲的纤维束, 起自额叶内侧皮质, 在扣带回内, 随扣带回弯曲向后走行, 向下止于海马旁回及邻近颞叶。部分纤维从扣带的凸侧进出, 形成一种不规则的穗状外观(图 1)。钩束起自额叶基底部皮质, 水平向后走行, 在脑岛的前下方, 纤维急转弯越过外侧裂, 行向前止于颞极附近皮质(图 2)。上纵束为最大的弓状纤维束, 起于前额部, 在脑岛上方和放射冠外侧弓形向后通过顶叶, 发出纤维至枕叶皮质后, 在脑岛后方弯向下前, 分布到颞叶皮质。上纵束全长都有纤维进出(图 3、4)。下纵束起自枕叶皮质, 纤维沿侧脑室外侧向前下走行, 分布到颞叶皮质(图 5)。上枕额束起自额叶皮质, 在胼胝体外侧的下方和胼胝体与内囊纤维交汇处的外侧向后走行一段距离后, 行向后上止于顶叶上部皮质(图 6)。下枕额束位于钩束上方, 在豆状核和最外囊下部走行, 连接枕叶与额叶皮质(图 7、8)。弓状纤维是较短的联合纤维, 联系相邻的脑回(图 4)。

讨 论

DTT 是利用扩散张量成像数据显示白

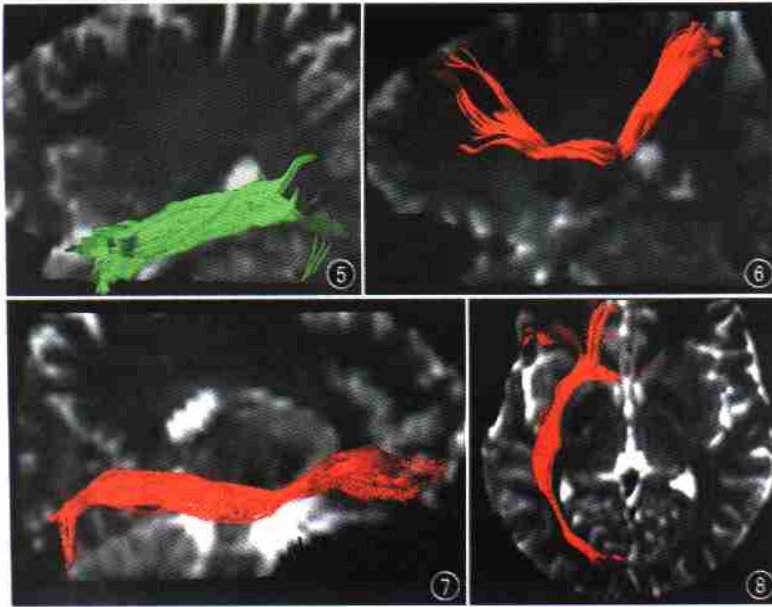


图5 将纤维束成像结果叠加到矢状位T₂WI上,示左侧下纵束的外侧。图6 将纤维束成像结果叠加到矢状位T₂WI上,示右侧上枕额束的内侧。图7 将纤维束成像结果叠加到矢状位T₂WI上,示右侧下枕额束的外侧。图8 将纤维束成像结果叠加到横轴位T₂WI上,示右侧下枕额束的上面。

质纤维束的一种方法。目前比较流行的方法包括基于张量域的算法和基于统计学的算法^[2,3]。基于张量域的算法是利用局部张量信息进行纤维束成像,本文即采用这种算法。扩散张量成像能识别每个体素的优选扩散方向,在空间内各个点张量的排列被称为张量域。纤维追踪最初是自1条纤维上的某点开始,先计算出该点的最大本征向量,沿该向量方向追踪一小段距离后,再以轨迹上新的一点作为开始点,重复后2个步骤,经多次重复,即可在纤维方向上产生一系列不连续的点,将这些点连接起来就可以显示被追踪的纤维。但由于该方法使用不连续的张量域,可引起很大的累积误差,导致跟踪偏离真实纤维方向。为解决该问题,本研究通过张量域线形内插的方法建立连续张量域。然后自1个种子点开始,在最大本征向量方向上,向前、后方向延伸1个步长,计算步长末端的最大本征向量,沿新方向再延伸1个步长。多次重复此步骤,直至符合某种终止条件,此法被称为流线性算法。

采集数据质量的高低(如分辨率、信噪比和运动引起的变形等)是影响纤维束成像结果可靠性的重要因素。由于用于纤维束成像的扩散张量是体素内的平均值,最大本征向量仅与体素内平均纤维方向相一致。因此,体素越小纤维束成像结果越可靠。本文在保证适当信噪比的情况下,通过加大矩阵,减小层厚和视野,应用内插技术等一系列措施来提高图像分辨率,从

而最大程度上减小了部分容积效应。噪声可引起对本征向量分类的错误,导致计算的轨迹突然跳跃到另一条纤维束上。即使在本征向量分类正确的情况下,数据中的噪声也可以引起本征向量分布发散,导致跟踪结果偏离真实轨迹。本文主要采用提高平均次数、使用重复取样和在后处理时使用高斯平滑等措施减少噪声。降低运动、电涡流和磁场不均匀引起的伪影,也是成功进行纤维跟踪的关键。本研究使用单次激发回波平面成像技术,单次激发即可获得所有K空间原始数据,其成像时间明显短于一般生理运动,从而减少了运动引起的伪影。

扩散张量成像受扩散敏感梯度的强度、数量和方向的影响。通过设置不同b值,可优化扩散敏感梯度。本文使用0和1000 s/mm² 2个b值。Hasan等^[4]通过模拟分析发现,只要梯度方向最优,使用6个以上编码方向并无明显益处。因此,本研究仅采用具有各向同性的6个编码方向。

纤维束成像的结果还受ROI放置、控制参数及操作者对相关解剖知识熟悉程度的影响。只有熟练掌握各纤维束的解剖学特点,操作者才能在断面图像上辨认出目标纤维束,准确设置ROI部位,进而正确评价重建出的纤维束。设置ROI是纤维束成像的关键,设置原则为:①在与目标纤维束长轴方向垂直的层面上选择ROI,以保证目标纤维束的完整性;②将ROI置于目标纤维束排列紧密且与其它邻近纤维束易于区分区域;③若认为ROI内可能含有其它纤维束成分,可在距离第1个ROI一定距离处放置第2个ROI,使之仅包含目标纤维束,而不包含任何通过第1个ROI的非目标纤维束。

控制参数包括FA阈值、角度阈值、步长、体素长度内采样数目及显示纤维的半径等。FA阈值是控制纤维跟踪的主要参数,当纤维延伸至FA低于阈值区时,则停止延伸,以防止纤维误入灰质或脑脊液内。该值可在一定范围内进行调整,使重建纤维束与经典解剖学描述相一致。角度阈值是指相邻两个步长间最大本征向量所成角度。该值设置过大可产生虚假纤维,过小则可能丢失目标纤维。步长是指计算纤维轨迹时,在最大本征向量方向上传播的最小距离,理论上步长越小,结果越可靠,但同时会增加重建时间。体素长度内采样数目是指一个体素长度上采样点的个数,如该值为2,则一个体素内采样点的个数为 $2 \times 2 \times 2 = 8$

个。显示纤维的半径是控制显示纤维粗细的参数。

本文利用扩散张量成像数据,通过纤维束成像显示了人脑主要联合纤维的三维结构。除上枕额束外,显示结果与经典解剖学描述高度一致^[5,6]。上枕额束在解剖学上存在争议,部分解剖文献描述其后部纤维分布至枕叶和颞叶^[5,6]。而本文重建结果显示其分布至顶叶,与 Catani 重建结果和部分解剖文献相一致^[7,8]。此结果是否正确尚需进一步研究。纤维束成像提供了在活体显示白质纤维束的方法,它必将在研究脑功能连接和白质病变方面发挥巨大作用。

参考文献:

- [1] Melhem ER, Mori S, Mukundan G, et al. Diffusion tensor MR imaging of the brain and white matter tractography[J]. AJR, 2002, 178(1): 3-16.
- [2] Lazar M, Weinstein DM, Tsuruda JS, et al. White matter tractography using

diffusion tensor deflection[J]. Hum Brain Mapp, 2003, 18(4): 306-321.

- [3] Ciccarelli O, Toosy AT, Parker GJ, et al. Diffusion tractography based group mapping of major white-matter pathways in the human brain[J]. Neuroimage, 2003, 19(4): 1545-1555.
- [4] Hasan KM, Parker DL, Alexander AL. Comparison of gradient encoding schemes for diffusion-tensor MRI[J]. J Magn Reson Imaging, 2001, 13(4): 769-780.
- [5] Everett NB, Sundsten JW, Lund RD. Functional neuroanatomy[M]. London: Henry Kimpton, 1971. 141-142.
- [6] 崔世民, 张蕾莉, 刘梅丽. 脑磁共振局部解剖与功能图谱[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2001. 93-96.
- [7] Catani M, Howard RJ, Pajevic S, et al. Virtual in vivo interactive dissection of white matter fasciculi in the human brain[J]. Neuroimage, 2002, 17(1): 77-94.
- [8] Nieuwenhuys R, Voogd J, van Huijzen C. The human central nervous system[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 215.

(收稿日期: 2004-03-24 修回日期: 2004-04-30)

• 病例报道 •

肺动脉主干及右室流出道粘液瘤一例

赵宏亮, 郑敏文, 孙立军, 贺宏德, 白桂芹

【中图分类号】R814.42; R732.1 【文献标识码】D 【文章编号】1000-0313(2004)09-0626-01

病例资料 患者,女,51岁,胸闷气短数月加重并伴双下肢浮肿。体检:二尖瓣面容,心律齐,肺动脉区可闻及收缩期杂音。X线造影诊断:肺动脉狭窄。MRI诊断:部位占位血栓不排除。心脏超声示右房、右室增大,右室流出道增宽,内见一低回声团块至肺动脉主干,边界不清,形态不规则,肺动脉瓣与团块融合显示不清。

电子束CT(electron beam CT, EBCT)增强表现:主肺动脉及右室流出道内见低密度充盈缺损,边界光整但呈波浪状,密度较均匀未见钙化。平扫CT值24~45 HU,增强后CT值为30~60 HU。电影序列见瘤体由肺动脉主干随肺动脉收缩舒张而运动至右室流出道。

EBCT诊断:主肺动脉至右室流出道良性肿瘤,粘液瘤可能性大。

术后病理诊断:(肺动脉)粘液瘤。

讨论 心脏粘液瘤是最常见的心脏良性肿瘤,可发生于心脏的各个房、室腔,以左房最多见,约占75%;其次为右心房,约占20%;少数位于右心室或左心室;但以发生于肺动脉主干的粘液瘤罕见。发病者中女性稍多于男性,常见于30~60岁。瘤体多呈息肉状或分叶状,绝大多数伴有长短不一的蒂,可以在

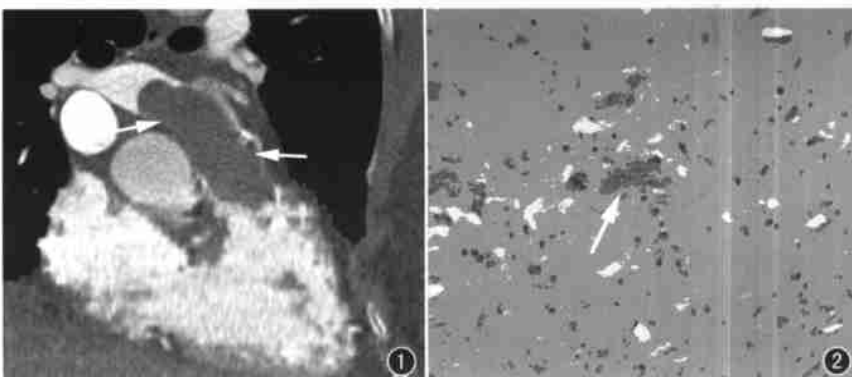


图1 EBCT增强扫描示肺动脉主干至右室流出道见低密度充盈缺损(箭),内密度均匀,边缘呈波浪状,CT值为30~60 HU。图2 病理切片光镜下见(肺动脉)瘤细胞呈星芒状或圆形、不规则形(箭),核呈卵圆形或梭形,间质疏松,充填均匀分布的无定形物,片状出血。

心腔内运动。

EBCT平扫及增强扫描可清晰显示肿瘤部位、大小及肿瘤与心血管之间的关系,结合电影序列可动态观察肿瘤运动情况,瘤体与心腔、心壁、瓣膜口的关系以及蒂的位置,可为临床及手术提供了全面准确的影像资料。

(收稿日期: 2004-02-20 修回日期: 2004-03-31)

作者单位: 710032 西安,第四军医大学西京医院放射科

作者简介: 赵宏亮(1980-),女,内蒙古赤峰人,住院医师,主要从事心血管介入治疗工作。