

FGATIR在锥体束识别与重建的应用价值

吴艳凯¹, 李晓童¹, 董楠², 卜静英¹, 焦金海¹, 张聪¹, 孙晓枫³, 杨吉鹏^{3*}

(1. 河北医科大学第二医院医学影像科, 河北石家庄 050000; 2. 河北医科大学第二医院医务处, 河北石家庄 050000; 3. 河北医科大学第二医院医学神经外科, 河北石家庄 050000)

【摘要】目的 探讨快速灰质采集T1反转恢复(fast gray matter acquisition T1 inversion recovery, FGATIR)序列在锥体束显示与重建过程中的应用价值。**方法** 对2024年10月—2025年3月河北医科大学第二医院招募的健康志愿者30名进行三维T1加权磁化准备快速梯度回波拨序列(3D-T1 weighted magnetization prepared rapid gradient echo, 3D-T1MP-RAGE)、T2加权快速自旋回波序列(T2 weighted fast spin echo, T2FSE)、FGATIR和弥散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)扫描, 比较内囊、脑桥及延髓水平的锥体束在3D-T1MP-RAGE、T2FSE与FGATIR上的信号表现。依据FGATIR序列, 应用3DSlicer软件采用DTI纤维追踪技术三维重建锥体束, 并分析与比较其重建效果。基于FGATIR对10例中央区肿瘤患者重建锥体束辅助其手术治疗。**结果** 内囊在FGATIR上显示清晰, 呈明显低信号, 脑桥及延髓对比度的锥体束在FGATIR上表现为显著低信号, FGATIR中内囊、脑桥及延髓水平的锥体束与周围结构间的信号高于3D-T1MP-RAGE与T2FSE($P < 0.05$)。30名志愿者共重建成功60个锥体束, 均呈伞状汇聚并向内下方穿内囊下行。中央区肿瘤患者10例完全切除9例, 残留少许瘤组织1例, 术后肢体肌力均正常10例。**结论** FGATIR序列上纤维传导束与周围结构间的对比度高, 在识别内囊及脑干水平的锥体束时具有明显的优势, 可作为重建锥体束理想的结构像, 对中央区肿瘤的精准治疗发挥重要作用。

【关键词】 锥体束; 弥散张量成像; 快速灰质采集T1反转恢复序列 doi:10.3969/j.issn.1007-3205.2026.03.003

【中图分类号】 R322.85 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1007-3205(2026)03-0261-07

Application value of FGATIR in visualization and reconstruction of pyramidal tract

WU Yan-kai¹, LI Xiao-tong¹, DONG Nan², BU Jing-ying¹, JIAO Jin-hai¹, ZHANG Cong¹, SUN Xiao-feng³, YANG Ji-peng^{3*}

(1. Department of Medical Imaging, the Second Hospital of Hebei Medical University, Shijiazhuang 050000, China; 2. Medical Affairs Office, the Second Hospital of Hebei Medical University, Shijiazhuang 050000, China; 3. Department of Medical Neurosurgery, the Second Hospital of Hebei Medical University, Shijiazhuang 050000, China)

【Abstract】Objective To investigate the application value of fast gray matter acquisition T1 inversion recovery (FGATIR) sequence in the visualization and reconstruction of the pyramidal tract. **Methods** Thirty healthy volunteers treated in the Second Hospital of Hebei Medical University from October 2024 to March 2025 underwent scanning with three-dimensional (3D)-T1 weighted magnetization prepared rapid gradient echo (3D-T1 MP-RAGE), T2 weighted fast spin echo (T2 FSE), FGATIR and diffusion tensor imaging (DTI) sequences. The signal characteristics of the pyramidal tract at the internal capsule, pontine and medullary levels on 3D-T1 MP-RAGE, T2 FSE and FGATIR sequences was compared. Based on the FGATIR sequence, the pyramidal tracts were reconstructed using 3DSlicer software with DTI-based tractography. Then, the pyramidal tracts reconstructed were analyzed and compared. Based on FGATIR, pyramidal tracts were reconstructed for 10 patients with central region tumors to assist the surgery. **Results** On FGATIR sequence, the internal capsule was clearly visualized as a markedly hypointense structure, and pyramidal tract also showed significant hypointensity at the level of pons and medulla

[收稿日期] 2025-08-26

[基金项目] 河北省重点科技研究计划项目(20221021)

[作者简介] 吴艳凯(1981—), 男, 河北石家庄人, 河北医科大学第二医院主管技师, 医学硕士, 从事中枢神经系统MRI检查及诊断研究。

*通信作者。E-mail: yangjipengyida@163.com

oblongata on FGATIR. The signal contrast between the pyramidal tract and surrounding structures at the levels of the internal capsule, pons, and medulla oblongata was significantly higher on FGATIR than on 3D-T1 MP-RAGE and T2 FSE. A total of 60 pyramidal tracts were reconstructed successfully from all the healthy volunteers. All of the pyramidal tracts converged in a shape of umbrella and descended inferomedially through the internal capsule. Among the 10 patients with central region tumor, complete resection was achieved in 9 cases, while residual tumor tissue was observed in 1 case, and all the 10 patients had normal limb muscle strength after surgery. **Conclusion** The contrast between the pyramidal tract and surrounding structures is significantly higher on FGATIR sequence. FGATIR has significant advantage in identifying the pyramidal tract at the levels of the internal capsule and brainstem. It can serve as an ideal structural image for pyramidal tract reconstruction and plays a significant role in facilitating precise surgical treatment for central region tumors.

[Key words] pyramidal tracts; diffusion tensor imaging; fast gray matter acquisition T1 inversion recovery

锥体束是人躯体运动传导通路的最重要组成部分之一,在治疗运动功能区肿瘤、岛叶胶质瘤、基底节区脑出血等手术中极易损伤并导致患者术后出现不同程度的躯体运动障碍,严重影响患者生活质量^[1-3]。如何保护锥体束是手术治疗运动功能区、岛叶及基底节区病变的难点,术前重建锥体束并了解锥体束的走行可帮助手术医生制定安全的手术方案,有助于术中锥体束的保护。随着影像后处理技术的发展,越来越多的影像科与神经外科医生开始尝试不同的方法重建锥体束^[4-5]。从众多的影像序列中选择适合的影像序列作为结构像(或解剖像)是重建锥体束的重要条件。常规的核磁扫描序列(如3D-T1、T2加权成像)均存在锥体束走行区域(如内囊)识别困难的问题,严重影响锥体束的完整重建。为进一步帮助术前锥体束的重建与术中的保护,本研究团队在探索人体锥体束重建的过程中选择了一种新的影像序列作为重建锥体束的结构像,应用3DSlicer软件成功重建出完整的锥体束,现将此序列特点与重建结果介绍如下。

1 资料与方法

1.1 一般资料 选取2024年10月—2025年3月河北医科大学第二医院招募的健康志愿者30名,女性14名,男性16名,年龄21~32岁,平均 (24.67 ± 2.78) 岁。既往均无肢体运动异常和面部表情障碍,无颅脑外伤或手术史、无颅内肿瘤及血管病史,无神经内科疾病史,查体均未见神经系统阳性体征。

本研究经河北医科大学第二医院科研伦理委员会审核批准(批准文号:2021-R349)。

1.2 磁共振检查 应用3.0 T核磁扫描仪(美国GE公司,型号:Signa Architect)扫描以下序列,三维T1加权磁化准备快速梯度回波序列(3D-T1

weighted magnetization prepared rapid gradient echo, 3D-T1 MP-RAGE)、T2加权快速自旋回波序列(T2 weighted fast spin echo, T2 FSE)、快速灰质采集T1反转恢复序列(The Fast Gray Matter Acquisition T1 Inversion Recovery, FGATIR)与弥散张量成像(Diffusion Tensor Imaging, DTI)。扫描参数如下,①3D-T1 MP-RAGE: TE为4.39 ms, TR为2 664.90 ms,层厚为1.00 mm,层间距为0 mm, FOV为240 mm×240 mm,矩阵为512×512。②T2 FSE序列: TE为117.36 ms, TR为4 474.00 ms,层厚为1.00 mm,层间距为0 mm, FOV为240 mm×240 mm,矩阵为512×512。③FGATIR序列: TE为3.43 ms, TR为8.18 ms,层间距为0 mm,层厚为1.00 mm。④DTI序列: TE为79.30 ms, TR为5 600.00 ms,系数b值取1 000 mm²/s,层间距为0 mm,层厚为1.80 mm,弥散梯度方向64个,48通道线圈。

1.3 图像分析 将上述志愿者的影像学数据导入3DSlicer软件,由3名影像科中枢神经系统经验丰富的诊断医生同时观察、识别与对比内囊及脑干内锥体束在3D-T1 MP-RAGE、T2 FSE与FGATIR序列上的显示情况。将内囊与脑干内锥体束的识别情况分为3个级别,即Ⅰ级(识别很容易)、Ⅱ级(识别比较难)与Ⅲ级(不能识别)。应用3DSlicer软件中的“Segment Editor”手动勾画内囊、脑桥与延髓水平的锥体束作为感兴趣区(region of interest, ROI) A,勾画锥体束周围组织作为ROI区B,勾画图像背景处作为ROI区C。后切换至Slicer软件“Quantification”模块获得ROI区A、B的信号均值与ROI区C的背景噪声标准差,分别命名为ROI_A_mean、ROI_B_mean与ROI_C_SD。后按照公式计算对比度噪声比(contrast-to-noise ratio, CNR),公式: $CNR = ROI_A_mean - ROI_B_mean / ROI_C_SD$ 。

1.4 重建锥体束 依次选择 3DSlicer 软件里 Diffusion 模块中的 Diffusion Brain Masking 与 Diffusion Tensor Estimation 功能选项完成彩图的计算,再经 UKF Tractography 选项重建全脑的纤维束,应用 Segment Editor 模块在 FGATIR 序列的轴位图像上标记内囊后肢与脑桥、延髓水平的锥体束作为感兴趣区 (region of interest, ROI) 区。应用 select ROI region tractography 选项追踪通过上述感兴趣区的纤维束。最后利用 Tractography Display 功能选项进行筛选获得最终的锥体束。

1.5 数据采集 通过上述方法为 10 例中央区肿瘤患者重建锥体束,包括中央区凸面脑膜瘤 4 例,窦镰旁脑膜瘤 4 例,脑转移瘤 1 例,胶质瘤 1 例,术前通过锥体束明确中央前回的位置,分析肿瘤与中央前回及锥体束的相对位置关系,制定手术方案,包括切口与骨窗的设计、肿瘤切除策略及中央前回的保护措施等。记录 10 例患者肿瘤切除情况及术后 1 周对侧肢体的肌力及并发症等情况。

1.6 统计学方法 应用 SPSS 20.0 统计软件分析数据。计数资料以例数表示,比较采用 χ^2 检验;等级资料比较采用秩和检验;符合正态分布的计量资料以 $(\bar{x} \pm s)$ 表示,比较采用单因素方差分析和 SNK- q 检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 成像质量分析 3D-T1 MP-EAGE、T2 FSE 与 FGATIR 序列均可呈现脑灰质结构与白质结构。脑灰质在 3D-T1 MP-EAGE 与 T2 FSE 上均呈等信号,脑白质在 3D-T1 MP-EAGE 上较灰质稍高,在 T2 FSE 上也略微稍低于脑灰质。而 FGATIR 上的脑灰质结构与白质结构间的信号差异却非常明显,脑灰质结构 (如大脑皮层与尾状核等核团) 在 FGATIR 上呈明显高信号,而脑白质则呈现明显的低信号;相较于 3D-T1 MP-EAGE 与 T2 FSE 两种序列,FGATIR 上的脑灰、白质间的对比度更高,脑组织层次也显示的更为丰富。内囊区域在 3D-T1 MP-EAGE 与 T2 FSE 上表现为等信号或稍低信号且与周围结构的信号相近,导致内囊的边界不易鉴别 (图 1A、图 1B),而在 FGATIR 上内囊呈明显低信号且与尾状核、苍白球等基底区重要结构间信号对比明显,内囊边界显示非常清晰且容易识别 (图 1C)。此外,脑干在 3D-T1 MP-EAGE 与 T2 FSE 上信号比较均匀,无法识别锥体束,而在 FGATIR 序列上脑桥基底部及延髓水平的锥体束呈明显低信号,与周围脑干组织信号对

比差异十分明显,非常容易识别 (图 1D~1I)。FGATIR 序列比 3D-T1 MP-EAGE 与 T2 FSE 更容易识别脑实质的内囊及脑干内的锥体束,差异有统计学意义 ($P < 0.05$),见表 1~3。通过计算 3 种序列的内囊、脑干中锥体束的对比度噪声比,本研究显示 FGATIR 序列中内囊、脑桥与延髓水平的锥体束的对比度噪声比高于 3D-T1 MP-EAGE 与 T2 FSE,差异有统计学意义 ($P < 0.05$),见表 4。

表 1 3 种序列识别内囊边界难易程度的比较

Table 1 Comparison of the difficulty of identifying the internal capsule boundary among the three sequences

($n=30$,例数)

序列	难易程度		
	I 级	II 级	III 级
3D-T1	4	11	15
T2-FSE	2	6	22
FGATIR	29	1	0
χ^2 值	67.620		
P 值	<0.001		

表 2 3 种序列识别脑桥水平锥体束难易程度的比较

Table 2 Comparison of the difficulty of identifying the pyramidal tract at the pontine level among the three sequences

($n=30$,例数)

序列	难易程度		
	I 级	II 级	III 级
3D-T1 MP-EAGE	0	5	25
T2-FSE	1	5	24
FGATIR	28	2	0
χ^2 值	78.238		
P 值	<0.001		

表 3 3 种序列识别延髓水平锥体束难易程度的比较

Table 3 Comparison of the difficulty of identifying the pyramidal tract at the medullary level among the three sequences

($n=30$,例数)

序列	难易程度		
	I 级	II 级	III 级
3D-T1 MP-EAGE	1	5	24
T2-FSE	1	6	23
FGATIR	29	1	0
χ^2 值	77.613		
P 值	<0.001		

2.2 重建的锥体束 通过在双侧内囊后肢及延髓水平的锥体束区域标记的感兴趣区,采用双张量无损凯尔曼滤波纤维示踪 (unscented Kalman filter

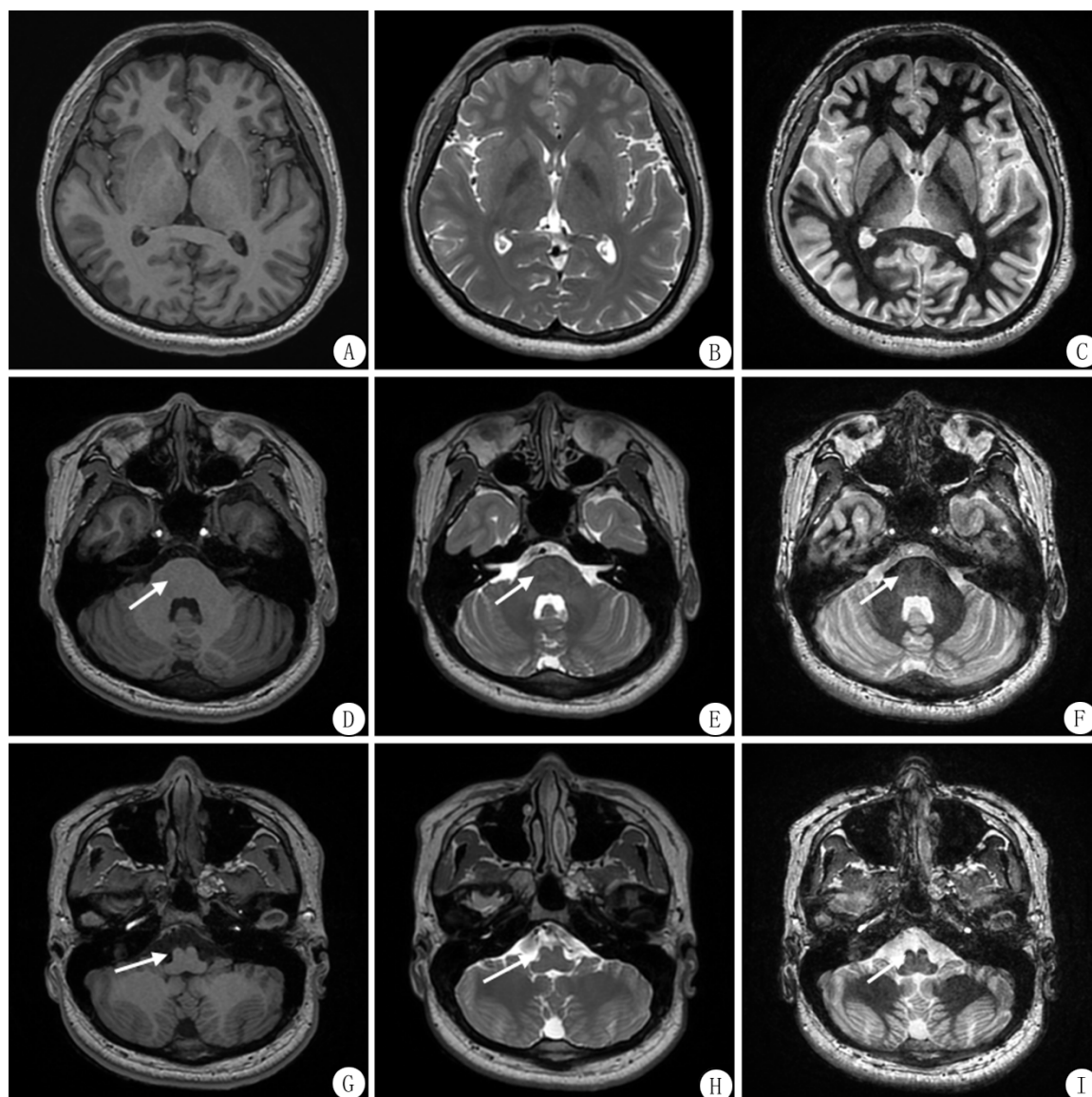


图1 一名男性23岁健康志愿者,内囊、脑干中锥体束在3D-T1 MP-EAGE、T2 FSE和FGATIR3种序列中的表现

A~C. 内囊在3D-T1 MP-EAGE、T2 FSE和FGATIR序列分别显示为等信号、稍低信号和低信号;D~F. 脑桥水平的锥体束在3D-T1 MP-EAGE、T2 FSE均呈等信号在FGATIR序列呈低信号;G~I. 延髓水平的锥体束在3D-T1 MP-EAGE、T2 FSE均呈等信号在FGATIR序列呈明显低信号

Figure 1 Appearance of the pyramidal tract at the internal capsule and brainstem on 3D-T1 MP-RAGE, T2 FSE, and FGATIR sequences of a 23-year-old male healthy volunteer

tractography, UKFT) 法成功重建锥体束共60个, 成功率为100%, 所建的锥体束均均起自中央前回及其附近脑皮层向内下方呈伞状汇聚经内囊由外上向内下方走行, 依次走行于大脑脚腹侧、脑桥基底部分及延髓腹侧, 且左右两侧大致对称, 均包含支配下肢、躯干、上肢及头面部肌的运动传导束(图2A~2C)。而应用单张量线性追踪法重建的锥体束主要起自中央前回的上半部及其附近皮质, 先向外下再转向内下斜行经内囊后肢下行, 主要由支配下肢、鞍马区随意肌运动的锥体束组成(图2A箭头)。

2.3 具体病例分析 10例中央区肿瘤患者, 术前重建肿瘤、大脑与锥体束, 其中肿瘤主体位于锥体束前方并向后挤压锥体束5例, 肿瘤位于锥体束后方3例, 向两侧挤压1例, 肿瘤位于锥体束内侧并向外侧挤压锥体束1例。经术前充分讨论后手术治疗, 8例脑膜瘤术中显示肿瘤与中央前回存在蛛网膜界面7例, 肿瘤均完全切除, 1例肿瘤与中央前回皮层表面粘连紧密, 无法分离, 术中于脑中央前回皮层表面残留少许肿瘤组织。2例肿瘤位于脑皮层下, 于肿瘤外周远离中央前回皮层方向的脑皮层造瘘并分离肿瘤周边切除肿瘤, 10例患者

表4 3种序列内囊、延髓及脑桥水平锥体束CNR的比较

Table 4 Comparison of CNR of the pyramidal tract at the internal capsule, medullary, and pontine levels among the three sequences

序列	内囊	脑桥水平 锥体束	延髓水平 锥体束
3D-T1 MP-EAGE	14.69±5.10	8.22±2.73	8.00±3.91
T2-FSE	9.34±4.82 [*]	8.50±4.28	8.73±6.18
FGATIR	29.59±6.57 ^{*#}	16.27±4.58 ^{*#}	21.73±6.70 ^{*#}
F值	107.061	40.116	54.496
P值	<0.001	<0.001	<0.001

($n=30, \bar{x} \pm s$)
* P 值<0.05与3D-T1比较;# P 值<0.05与T2-FSE比较(SNK- q 检验)

术后1周肌力均正常。以1例中央区凸面脑膜瘤为例,术前行3D-T1 MP-EAGE增强序列检查(见图3A),重建肿瘤、大脑与锥体束后可见大脑中央前回受到挤压且患侧锥体束被推挤到肿瘤的内外两侧,对侧锥体束起源于大脑中央前回并向下走行(图3B~3D)。

3 讨 论

锥体束重建是减少术中锥体束损伤的重要手段之一^[5-6]。基于DTI的神经纤维示踪技术是目前重建锥体束的主要方法^[7]。其中,识别与标记内囊等锥体束走行区域是锥体束重建的首要环节^[8]。因此,挑选理想的核磁序列作为标记锥体束的结构像(或解剖像)是影像科与神经外科医生关注的问题之一。本研究团队曾发现以FGATIR序列作为结构相更方便重建视放射^[9],因此,本研究拟探索FGATIR序列在重建锥体束中的作用与优势。

FGATIR是在T1磁化准备快速梯度回波成像序列(T1 MP-RAGE)序列的基础上优化了反转时间(inversion time, TI)的T1加权快速反转恢复序列。通过对TI的精准设置然后再用快速自旋回波链采集信号,使脑白质的纵向磁化矢量刚好穿过零点,导致脑白质没有被激发的磁化矢量,采集的信号极低,最终保留脑灰质的信号并去除脑白质的信号,使图像中脑灰质的信号明显增高,同时使脑白质的信号降至最低,所以FGATIR图

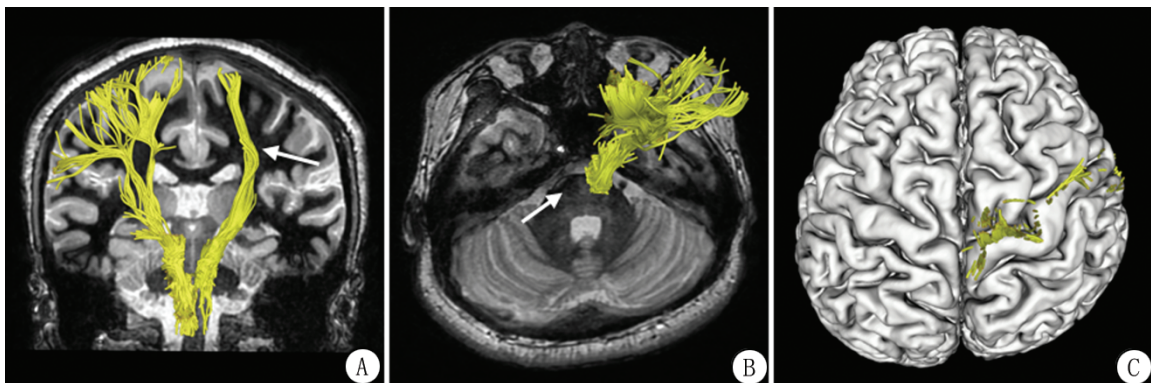


图2 以FGATIR为结构像重建的锥体束

A. 分别采用UKFT算法与单张量线性纤维追踪算法重建的锥体束(箭头);B. 脑桥水平锥体束的位置(箭头),对侧采用UKFT算法重建的锥体束;C. 重建的锥体束起源于大脑中央前回的皮质

Figure 2 Pyramidal tract reconstructed using FGATIR as the structural image

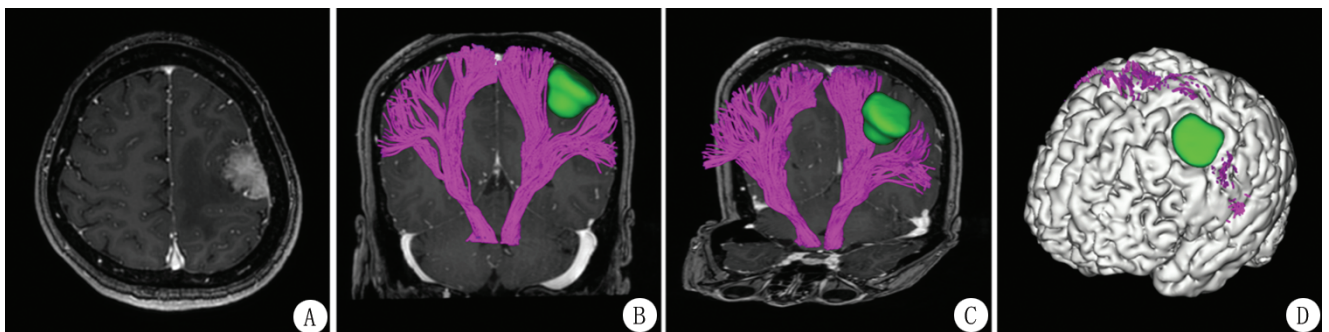


图3 1例患者,女性,52岁,左侧中央区脑膜瘤

A. 3D-T1 MP-EAGE增强影像表现;B~D. 重建的肿瘤与锥体束的相对位置关系

Figure 3 A 52-year-old female patient with meningioma in left central region

像中脑灰质与脑白质间的对比度极高, 相较其他序列脑灰白质间的信号差异更为明显, 此为FGATIR最突出的优势^[10-11]。此外, FGATIR序列在采集信号之前还通过全反转前预脉冲的优化, 可快速产生高分辨率的薄层图像^[12]。基于以上的特征, FGATIR已被用于儿童癫痫等疾病的影像学研究^[13-14]。

3D-T1 MP-EAGE与T2 FSE序列在以往的研究中常被作为重建锥体束等纤维束的结构相^[10, 15]。但在3D-T1 MP-EAGE与T2 FSE上脑实质内的灰质结构与其周围脑白质间的信号对比度低, 两种序列均无法充分显示脑实质内部的结构层次^[16]。医生很难快速准确的明确锥体束的边界, 常经验性的标记其大致的范围, 导致锥体束重建过程繁琐且耗时较长。本研究团队通过与3D-T1 MP-EAGE与T2 FSE序列对比, 结果显示FGATIR序列中脑灰、白质间的信号差异更为突出, 脑实质内的纤维传导束的边界也显示的更为清晰。如壳核、尾状核及丘脑内侧部在FGATIR序列上表现为高信号, 内囊呈显著低信号。相比3D-T1 MP-EAGE与T2 FSE序列, FGATIR中内囊的边界更容易识别。此外, 脑中脑桥与延髓水平的锥体束与周围组织间的信号差异在FGATIR序列上也非常明显。本研究结果显示与3D-T1 MP-EAGE与T2 FSE序列对比, FGATIR序列中锥体束在脑桥基底底部及延髓腹侧的走行区域与周围组织信号对比度噪声比更高, 更容易被识别。依据以上影像特征, 本研究团队拟应用3DSlicer软件以FGATIR序列作为结构相重建脑锥体束。

3DSlicer软件是一款功能强大且免费的影像后处理软件^[17-19]。目前已有不少利用3DSlicer软件重建锥体束的文献报道^[4], 但至今尚无参考FGATIR序列重建锥体束的研究报道。本研究利用3DSlicer软件以FGATIR为结构像采用双张量无损凯尔曼滤波纤维示踪法(unscented Kalman filter tractography, UKFT)为30名健康志愿者重建锥体束。在标记感兴趣区时, 显示在FGATIR上更容易确定内囊边界, 在延髓与脑桥水平也可同时快速、准确标记锥体束, 显著缩短了筛选有效纤维所损耗的时间。虽然内囊的边界在3D-T1 MP-RAGE序列上也较容易识别, 但延髓与脑桥水平的锥体束边界在3D-T1 MP-RAGE上无法显示的, 因此, 在标记锥体束走行区域时FGATIR比3D-T1 MP-RAGE更具优势。在重建效果方面, 传导下肢、躯干、上肢、面部运动的锥体束均被成

功重建, 所建锥体束均起自大脑中央前回及附近皮层, 在冠状位呈伞状向内下汇聚经内囊后肢下行至延髓水平, 纤维线条清晰美观, 部分锥体交叉的纤维也显示的非常清楚。相比T1或T2序列, 以FGATIR作为结构像重建锥体束的工作效率与重建质量均明显提高。

中央区肿瘤常挤压脑中央前回皮层使其变形与移位, 锥体束的走行也随之改变, 导致神经外科医生很难准确识别大脑中央前回皮质^[20-22]。锥体束的成功重建可使神经外科医生在术前直观、准确的了解肿瘤与锥体束的相对位置关系, 帮助术者快速识别中央前回并评估中央区肿瘤手术治疗的相应风险、制定安全的、个体化的手术方案及预测患者术后肢体运动功能^[23-25]。本研究团队基于FGATIR为10例中央区肿瘤患者重建锥体束, 神经外科医生通过参考肿瘤、锥体束等结构的三维影像进行手术规划, 包括中央前回皮层的识别、肿瘤的切除策略及中央前回的保护措施等术中重要环节。参考重建的三维影像, 神经外科医生术中重点保护锥体束附近的皮层及皮层下脑组织, 根据术中肿瘤与中央前回皮层的粘连情况酌情保留少量肿瘤, 本研究中10例患者中肿瘤完全切除9例, 残留少许瘤组织1例, 中央前回皮质均保护完好, 术后10例患者均肢体肌力正常。参与此例手术的神经外科医生均表示基于FGATIR序列重建的锥体束具有很高的实用性与可靠性, 在中央区肿瘤的手术规划及精准切除方面均发挥重要的作用。本研究团队今后将继续收集病例进一步探索与研究。

综上所述, FGATIR序列在识别与标记内囊与锥体束方面拥有明显的优势, 可作为3DSlicer软件重建锥体束理想的结构像, 帮助临床医生制定个体化的手术方案, 对中央区肿瘤的精准治疗发挥重要作用。

[参考文献]

- [1] Köhlert K, Jähne K, Saur D, et al. Neurophysiological examination combined with functional intraoperative navigation using TMS in patients with brain tumor near the central region-a pilot study [J]. *Acta Neurochir (Wien)*, 2019, 161(9):1853-1864.
- [2] Seidel K, Szelényi A, Bello L. Intraoperative mapping and monitoring during brain tumor surgeries [J]. *Handb Clin Neurol*, 2022, 186:133-149.
- [3] Watanabe G, Conching A, Ogasawara C, et al. Bilateral basal ganglia hemorrhage: A systematic review of etiologies,

- management strategies, and clinical outcomes [J]. *Neurosurg Rev*, 2023, 46(1):135.
- [4] Li Y, Hou Y, Li Q, et al. Optimized tractography mapping and quantitative evaluation of pyramidal tracts for surgical resection of insular gliomas: A correlative study with diffusion tensor imaging-derived metrics and patient motor strength [J]. *J Digit Imaging*, 2022, 35(2):356-364.
- [5] Li Y, Hou Y, Li X, et al. Quantitative validation of the correlation between optimized pyramidal tract delineation after brain shift compensation and direct electrical subcortical stimulation during brain tumor surgery [J]. *J Digit Imaging*, 2023, 36(5):1974-1986.
- [6] Zhyllka A, Sollmann N, Kofler F, et al. Reconstruction of the corticospinal tract in patients with motor-eloquent high-grade gliomas using multilevel fiber tractography combined with functional motor cortex mapping [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2023, 44(3):283-290.
- [7] Denker M, Picht T, Engelhardt M, et al. Navigated transcranial magnetic stimulation and diffusion tensor imaging tractography in insular glioma surgery [J]. *Oper Neurosurg*, 2024, 29(1):62-70.
- [8] Tamura M, Kurihara H, Saito T, et al. Combining pre-operative diffusion tensor images and intraoperative magnetic resonance images in the navigation is useful for detecting white matter tracts during glioma surgery [J]. *Front Neurol*, 2022, 12:805952.
- [9] 吴艳凯, 李晓童, 崔彩霞, 等. 快速灰质采集 T1 反转恢复序列在视放射重建中的应用价值 [J]. *实用放射学杂志*, 2023, 39(7):1174-1178.
- [10] Rijks N, Potters WV, Dilai J, et al. Combining 7T T2 and 3T FGATIR: From physiological to anatomical identification of the subthalamic nucleus borders [J]. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2022, 93(9):1019-1020.
- [11] Tao S, Zhou X, Westerhold EM, et al. Optimization of fast gray matter acquisition T1 inversion recovery (FGATIR) on 7T MRI for deep brain stimulation targeting [J]. *Neuroimage*, 2022, 15: 119043.
- [12] Bot M, Pauwels R, van den Munckhof P, et al. The fast gray matter acquisition T1 inversion recovery sequence in deep brain stimulation: Introducing the rubral wing for dentato-rubro-thalamic tract depiction and tremor control [J]. *Neuromodulation*, 2023, 26(8):1705-1713.
- [13] Ryan MV, Satzer D, Hu H, et al. Delineation of the centromedian nucleus for epilepsy neuromodulation using deep learning reconstruction of white matter-nulled imaging [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2025, 46(9):1868-1874.
- [14] Joshi CN, Karakas C, Eschbach K, et al. Pediatric neuromodulation for drug-resistant epilepsy: Survey of current practices, techniques, and outcomes across US epilepsy centers [J]. *Epilepsia Open*, 2024, 9(2):785-792.
- [15] Larson AS, Brinjikji W, Kroll NJ, et al. Normalized intraplaque hemorrhage signal on MP-RAGE as a marker for acute ischemic neurological events [J]. *Neuroradiol J*, 2022, 35(1):112-118.
- [16] He J, Zhang F, Pan Y, et al. Reconstructing the somatotopic organization of the corticospinal tract remains a challenge for modern tractography methods [J]. *Hum Brain Mapp*, 2023, 44(17):6055-6073.
- [17] Chen Z, Wang Y, Li X, et al. An automatic measurement system of distal femur morphological parameters using 3D slicer software [J]. *Bone*, 2022, 156: 116300.
- [18] He C, Zhong Q, Yang Y, et al. A novel rapid surface projection localization technique (RSPLT) using 3D slicer and smartphone-assisted registration for keyhole evacuation of intracerebral hematomas [J]. *Sci Rep*, 2025, 15(1):39711.
- [19] Cai J, Hu Y, Zeng G, et al. Effectiveness of 3D-Slicer simulated neuro-navigation assisted minimally invasive neuro-endoscopic surgery for basal ganglia hypertensive intracerebral hemorrhage [J]. *BMC Surg*, 2025, 25(1):519.
- [20] Eibl T, Schrey M, Liebert A, et al. Tumor-specific alterations in motor cortex excitability and tractography of the corticospinal tract-A navigated transcranial magnetic stimulation study [J]. *J Integr Neurosci*, 2024, 23(7):132.
- [21] Yuanzheng H, Lichao M, Xiaolei C, et al. Functional outcome of surgery for glioma directly adjacent to pyramidal tract depicted by diffusion-tensor based fiber tracking [J]. *Turk Neurosurg*, 2015, 25(3):438-454.
- [22] Leung L, Lau K, Kan K, et al. Prediction of pyramidal tract side effect threshold by intra-operative electromyography in subthalamic nucleus deep brain stimulation for patients with Parkinson's disease under general anaesthesia [J]. *Front Surg*, 2024, 11: 1465840.
- [23] Schwarz G, Kanber B, Prados F, et al. Acute corticospinal tract diffusion tensor imaging predicts 6-month functional outcome after intracerebral haemorrhage [J]. *J Neurol*, 2022, 269(11):6058-6066.
- [24] Suo X, Guo L, Fu D, et al. A comparative study of diffusion fiber reconstruction models for pyramidal tract branches [J]. *Front Neurosci*, 2021, 15: 777377.
- [25] Zhukov VY, Goryaynov SA, Ogurtsova AA, et al. Diffusion tensor imaging tractography and intraoperative neurophysiological monitoring in surgery of intracranial tumors located near the pyramidal tract [J]. *Zh Vopr Neurokhir Im N N Burdenko*, 2016, 80(1):5-18.

(本文编辑:何祯)