

• 骨骼肌肉影像学 •

MR 扩散张量成像在膝关节前交叉韧带的初步应用

杨献峰, 李茗, 杨尚文, 王冬梅, 朱斌

【摘要】 目的:探讨采用 3.0T 磁共振对膝关节前交叉韧带进行磁共振扩散张量成像(DTI)及纤维束示踪成像(FT)的可行性。**方法:**对 25 名健康志愿者进行膝关节 DTI 检查,男 15 例,女 10 例,年龄 21~40 岁,平均 34.6 岁。采用单次激发自旋回波平面成像序列,在工作站进行纤维束示踪三维模拟成像,计算前交叉韧带的纤维束长度及平均 FA 值、ADC 值,比较不同性别的 FA 值及 ADC 值差异,并分析同一操作者在不同时间测量结果的一致性。**结果:**25 名受检者中 16 例前交叉韧带显示三维纤维束结构,4 例显示多束,5 例未显示规则的纤维束。所显示的平均纤维束长度为 $(13.79 \pm 1.75) \sim (25.43 \pm 3.37)$ mm。全部受试者前交叉韧带平均 FA 值为 0.457 ± 0.058 ,平均 ADC 值为 1.419 ± 0.289 ,无性别差异。比较同一测量者在不同测量时间的 FA 和 ADC 测量值,其可信度和组内相关系数均较好。**结论:**采用 3T MR 成像系统能成功完成正常前交叉韧带 DTI 和 DTT,并可显示正常前交叉韧带的双束结构。

【关键词】 膝关节; 前交叉韧带; 磁共振成像

【中图分类号】 R323.72; R323; R445.2 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2017)10-1047-04

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2017.10.011

The demonstration of anterior cruciate ligament using MR diffusion tensor imaging: a preliminary study YANG Xian-feng, LI Ming, YANG Shang-wen, et al. Department of Radiology, the Affiliated Drum Tower Hospital of Nanjing University, Medical School, Nanjing 210008, China

【Abstract】 Objective: To assess the feasibility of demonstrating the fibric structure of anterior cruciate ligament (ACL) using MR diffusion tensor imaging (DTI) and DTT, and analyze the DTI and DTT parameters of ACL. **Methods:** 25 healthy volunteers (15 males, 10 females, age range 21 to 40 years, mean age 34.6 years) were scanned at 3T MR scanner using 8ch knee coil. A single-shot spin-echo-based echo-planar imaging sequence was performed at each subject using b value of 400 s/mm^2 , the number of diffusion directions for the DTI sequence was 32. Routine PDW and T_2W images were also obtained. The fiber tracking and other post-processing steps were carried out by a radiologist on Philips workstation. The length of ACL, FA and ADC values of ACL were measured. The results of the same operator at different time were compared. **Results:** Reconstructed DTI and DTT (20/25) were of good quality. Tractography illustrated nicely the 3D courses of double-bundle structure in 16 cases. The average length of ACL fibers was $(13.79 \pm 1.75) \text{ mm}$ to $(25.43 \pm 3.37) \text{ mm}$. The average FA values of ACL were 0.457 ± 0.058 . The average ADC values of ACL were 1.419 ± 0.289 . There was no statistic difference of FA value and ADC value in different gender. Among the results of the same measurer at different time, the intraclass correlation coefficient and the alpha coefficient were pretty good. **Conclusion:** DTI and DTT for normal ACL can be accomplished by 3T MR scanner, and DTI and DTT can demonstrate the double-bundle structure of ACL.

【Key words】 Knee joint; Anterior cruciate ligament; Magnetic resonance imaging

前交叉韧带是稳定膝关节的重要结构^[1],其损伤是常见的运动损伤,严重影响患者的运动能力,可导致膝关节不稳定继而引发骨性关节炎。重建前交叉韧带可部分恢复膝关节的运动力学,尤其近年来出现的双束重建技术,有助于更好地恢复前交叉韧带的正常解剖和功能,减少和延缓韧带损伤后骨性关节炎的发生^[2]。磁共振检查是诊断前交叉韧带损伤的有效方法,可协助韧带重建手术方案的制定,也有 3D 序列可提供三维观察^[3],然而,目前的研究多限于形态的显

示,较少提供量化评价。

磁共振扩散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)及纤维束示踪成像(diffusion tensor tractography, DTT)的出现为通过影像学观察前交叉韧带的整体形态提供了新的方法。DTI 能显示水分子弥散运动在不同方向上的差异,评估组织水分子的扩散情况,提供组织超微结构变化的相关信息。本研究对 25 例健康志愿者的前交叉韧带进行 DTI 及 DTT,尝试三维显示前交叉韧带双束结构,并力图发现相对合适的数据采集及后处理参数。

材料与方法

1. 一般资料

作者单位:210008 南京,南京大学医学院附属鼓楼医院放射科
作者简介:杨献峰(1980—),男,山东莒县人,博士,副主任医师,主要从事骨科与运动医学影像诊断工作。
通讯作者:朱斌, E-mail:15950570742@163.com
基金项目:南京市医学科技发展项目(YKK14071)

搜集 25 例健康志愿者,男 15 例,女 10 例,年龄 21~40 岁,平均 (34.6 ± 5.1) 岁,其中男性平均年龄 (32.8 ± 5.7) 岁,女性平均年龄 (37.1 ± 2.8) 岁,均身体健康,膝关节抽屉试验为阴性。所有受试者均知情同意。

2. 扫描及后处理方法

使用 Philips Achieva TX 3.0TMR 成像仪和膝关节专用线圈,受检者仰卧位,膝关节放置于线圈中心区域。获取常规矢状面、冠状面及横轴面 PDW 图像,扫描参数为 TR 2000 ms,TE 40 ms,层厚 4 mm,层间距 1.2 mm,视野 160 mm,矩阵 320×256 。DTI 扫描前进行匀场以减少磁场不均匀造成的干扰,采用轴位单次激发自旋回波平面成像序列(single-shot spin-echo-based echo-planar imaging sequence),EPI 因子 79,视野 160 mm,32 个扩散敏感梯度方向,b 值为 400 s/mm^2 ,矩阵 128×128 ,体素 1.96 mm^3 ,层厚 2 mm,层间距 0,采集次数 3 次,成像时间 6 分 56 秒。

由同一操作者在 Philips 工作站(Extended MR Work Space R2.6)上应用 fiber track 软件包进行后处理,在前交叉韧带中下 1/3、中部及中上 1/3 段设定感兴趣区(region of interest,ROI),FA 最小阈值 0.10,角度最大阈值 34.1° ,进行纤维束示踪三维模拟成像。由后处理软件自动计算所示纤维束的平均长度、平均 FA 值及平均 ADC 值。4 个月后,由同一操作者再次对上次扫描的数据进行相同处理,对前后两次所获数据进行统计学分析。

3. 统计方法

使用 SPSS 17 统计软件包,对 FA 值及 ADC 值进行正态性检验,如符合正态分布,则应用 t 检验比较不同性别间前交叉韧带的 FA 值及 ADC 值, P 值 <0.05 为差异有统计学意义;如不符合,则采用校正的 t 检验。采用信度分析检验同一操作者重复测量结果的一致性,Alpha 系数 <0.6 表示可信度较差, $0.6\leq\alpha$ 系数 ≤0.8 提示可信度较好,alpha 系数 >0.8 表示可信度极好。用组内相关系数(intraclass correlation coefficient,ICC)比较测量值的重复性,ICC <0.4 提示重复性差, $0.4\leq\text{ICC}\leq0.75$ 提示重复性较好,ICC >0.75 提示有非常好的重复性。

结 果

所有图像均无严重伪影。25 例志愿者中,20 例显示规则纤维束结构,其中 16 例显示双束结构,4 例显示为多束。另外 5 例纤维迂曲成团、走向紊乱,未呈规则束状结构。20 例双束结构中,11 例前内侧束较后外侧束小(图 1),9 例相反(图 2)。前交叉韧带平均纤维长度介于 $(13.79\pm1.75)\sim(25.43\pm3.37)\text{ mm}$ 。未显

示束状结构的 5 例中,常规 MRI 图像呈“芹菜梗征”,其平均 FA 值为 0.408 ± 0.187 ,低于平均值。

表 1 不同性别的平均 FA 值和 ADC 值(前后两次测量的平均值)

性别	样本量	平均 FA 值	平均 ADC 值
男	15	0.462 ± 0.063	1.390 ± 0.285
女	10	0.450 ± 0.051	1.442 ± 0.297
合计	25	0.457 ± 0.058	1.419 ± 0.289

表 2 重复测量前交叉韧带平均 ADC 值及 FA 值的一致性

参数	第 1 次测量	第 2 次测量	alpha 系数	ICC
FA 值	0.454 ± 0.064	0.459 ± 0.053	0.782	0.642
ADC 值	1.436 ± 0.293	1.401 ± 0.290	0.725	0.568

所测前交叉韧带 FA 值($Z=0.870,P=0.435$)和 ADC 值($Z=0.540,P=0.933$)均符合正态分布。平均 FA 值无性别间差异($t=2.98,P=0.091$),平均 ADC 值亦无性别间差异($t=3.037,P=0.088$)。同一操作者在不同测量时间的测量值统计结果如表 2 所示,FA 值和 ADC 值重复测量均具有较好的可信度和重复性。

讨 论

前交叉韧带损伤是一种常见的运动损伤,如不进行治疗,可引起膝关节不稳定,加剧关节软骨的磨损,继而引发骨性关节炎。传统的治疗方式为利用自体肌腱组织进行膝关节前交叉韧带重建^[4]。然而,前交叉韧带具有复杂的内部结构和功能。解剖学、影像学及生物力学研究表明,前交叉韧带可分为前内侧束和后外侧束两个不同的功能束,前者主要限制胫骨前移,后者则在膝关节伸直位时起稳定作用,尤其是保持膝关节的旋转稳定性^[1,5,6]。单条韧带重建难以恢复膝关节正常的生物力学。随着外科技术的发展,前交叉韧带双束重建及选择性单束重建技术正在成为研究热点,这些技术能够更好地恢复前交叉韧带的解剖形态和功能,有助于提高前交叉韧带断裂的治疗效果^[2]。直观地显示前交叉韧带的双束结构,对关节外科医生术前准备具有重要意义。然而,我们所检索到的前交叉韧带双束结构影像学文献多为二维研究^[7],关于其三维形态的报道相对较少。此外,常规 MRI 检查也缺乏对前交叉韧带的定量评价。

DTI 能较好的反映纤维结构的扩散各向异性特征,DTT 可直观显示纤维束的细微结构及空间分布,对显示纤维结构的形态、评价其内部结构具有重要意义。DTI 及 DTT 已普遍用于中枢神经系统白质纤维束的显示,在其它富含纤维的组织中的应用也越来越多,但应用于韧带成像的报道相对较少^[8,9]。与脑白质纤维不同,前交叉韧带内部纤维结构平行排列,不交叉、扭曲或汇合,这种内部干扰较少的结构是 DTI 的

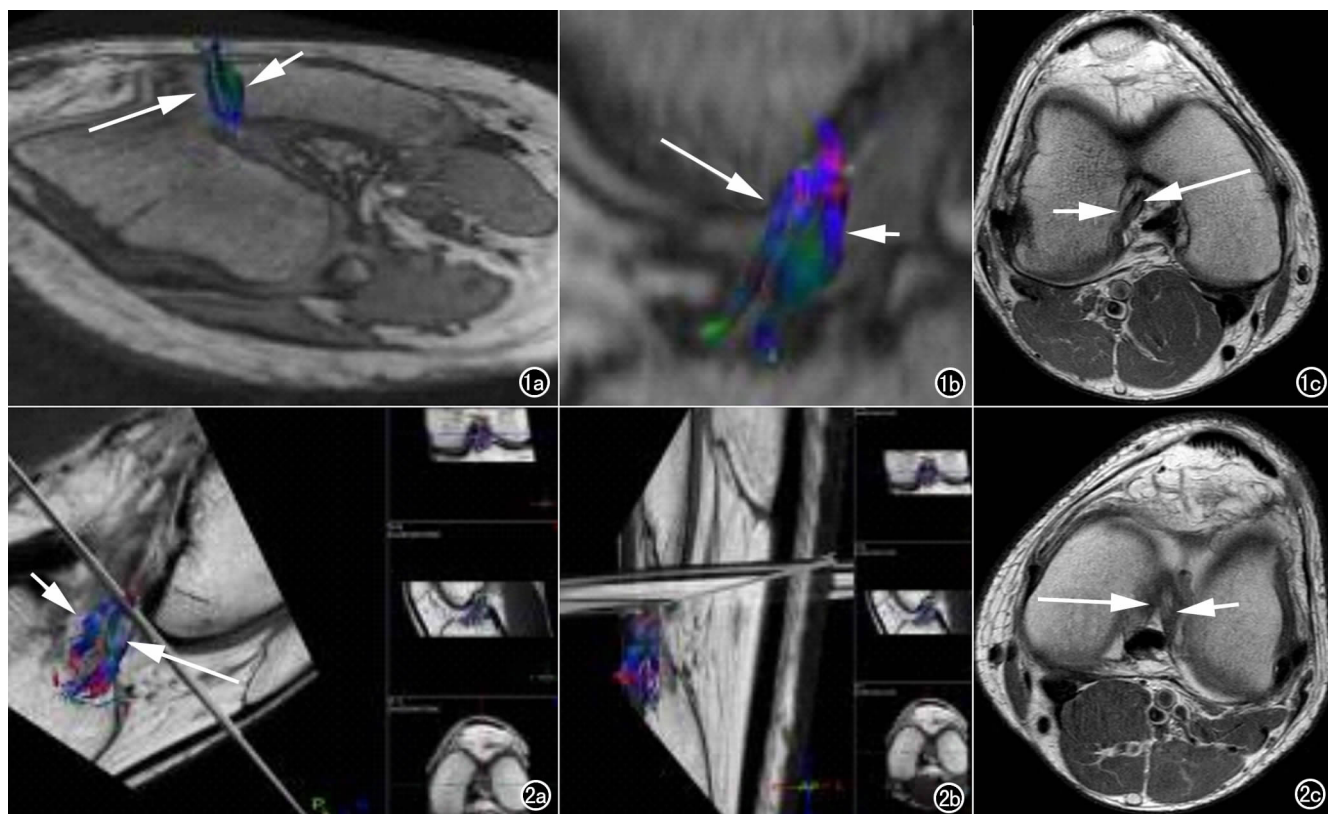


图1 男,25岁。a)横轴面重建纤维示踪成像;b)矢状面重建纤维示踪成像;前内侧束(箭)小于后外侧束(短箭);c)横轴面PDWI见双束结构断面显示。图2 男,34岁。a)矢状面重建纤维示踪成像;b)三维显示纤维束形态及走向;前内侧束(箭)大于后外侧束(短箭)。图中不同颜色代表纤维束不同走向。c)PDWI横轴面示双束结构断面形态。

理想组织。我们设想通过DTI和DTT三维显示前交叉韧带的双束结构,但前交叉韧带体积较小,长度平均约为31 mm,宽度约为2.5~3 mm,且距离骨皮质近,可能会受到周围组织的干扰,成像难度较大。

结果表明DTT对正常前交叉韧带体部显示良好,韧带体部表现为不同的颜色,代表不同的纤维走向,符合前交叉韧带不同于其它韧带的内部波浪状纤维走向^[10]。三维形态的前内侧束和后外侧束可以分辨,且能够提供韧带的平均FA值及平均ADC值。本研究中16例显示双束结构,其中11例前内侧束小于后内束,与文献报道略有差异。4例显示为多束,这可能为一种解剖变异。纤维束形态及表面光整程度受重建参数及周围组织的干扰。5例未显示规则的纤维束,其常规MRI表现呈“芹菜梗征”,文献认为前交叉韧带粘液样变性的表现,其平均FA值低于正常平均值。FA值与纤维束走向及纤维密度可能相关^[11,12],这也为前交叉韧带内部状态的定量评价,特别是韧带重建术后的随访提供了可能的有效方法。然而,DTT对前交叉韧带长度的显示并不理想,本组实验结果低于正常解剖学测量值,其原因可能为前交叉韧带的上下段紧邻骨皮质,局部磁场均匀性较差,DTI采用的EPI序列对此较为敏感。这需要通过常规MRI检查

进行弥补。此外,需要注意的是DTT仅仅提示前交叉韧带内存在方向不同的纤维束,并不表明存在解剖学分隔。

DTI数据采集和后处理是本技术的核心部分。很多技术因素能影响成像效果,包括场强、b值,扩散敏感梯度方向数目以及后处理的参数等^[12-14]。本研究的技术参数主要基于其他组织的文献报道和系统默认的参数。文献报道的b值介于400~1000 s/mm²,过高的b值导致信噪比下降,且膝关节本身结构较为复杂,故本研究采用400 s/mm²。b值可影响扩散张量成像的导出量,有研究者提出,比较不同组织的扩散张量参数时,应尽量选择同样的成像参数^[14]。对于扩散敏感梯度方向数目,多数文献认为应>20个,本研究取32个扩散敏感梯度方向,重建图像质量较好。此外,对不同组织的DTI研究表明,高场强可提高DTI的成像质量。

纤维示踪结果的准确性与ROI的设置、FA的阈值、轨迹投影角度及所采用的算法有关^[11,12]。目前设置ROI有单个和多个两种方法,本研究采用多ROI方法,分别放置于前交叉韧带中下1/3、中部和中上1/3段。FA最小阈值选择默认值0.10,角度选择34.1°,即当两个步级之间角度大于34.1°时纤维示踪停止。

多次试验表明上述方法所获结果较为稳定。

本研究的创新之处在于尝试将 DTI 技术引入之前应用相对较少的韧带组织,并使前交叉韧带的双束结构得以初步呈现,并初步用组织 FA 值量化评价前交叉韧带。

本技术存在局限性,主要体现在韧带的显示程度有待于提高;纤维束示踪技术定量评价的可重复性也存在较多争议^[15]。此外,成像时间较长、噪音强也是其缺点之一。

总之,本研究表明运用 DTI 显示前交叉韧带双束结构具备可行性,但成像技术参数有待于进一步优化。研究中限于技术条件未能完整显示前交叉韧带全长,也未能单独重建前内侧束和后外侧束,这有待于今后进一步实验。此外,对于前交叉韧带损伤的形态学显示及定量测量,对前交叉韧带重建术后移植物的定量评价,也具有较为广阔的应用前景,值得深入研究。

参考文献:

- [1] Steckel H, Starman JS, Baums MH, et al. Anatomy of the anterior cruciate ligament double bundle structure: a macroscopic evaluation[J]. Scand J Med Sci Sports, 2007, 17(4): 387-392.
- [2] Yasuda K. A pilot study of anatomic double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction with ligament remnant tissue preservation[J]. 2012, 28(3): 343-353.
- [3] 刘淑仪, 潘建科, 刘军, 等. 前交叉韧带损伤影像学进展[J]. 放射学实践, 2016, 31(9): 893-895.
- [4] 王德就, 王晶. 联合应用半腱肌腱与股薄肌腱重建前交叉韧带[J]. 中华骨科杂志, 1999, 19(7): 428-430.

- [5] Gabriel Mt WEWS. Distribution of in situ forces in the anterior cruciate ligament in response to rotatory loads[J]. J Orthop Res, 2004, 22(1): 85-89.
- [6] 刘霞, 程瑾, 李绪斌. 膝关节前交叉韧带前内侧束和后外侧束的 MR 成像研究[J]. 中华放射学杂志, 2012, 46(5): 445-448.
- [7] 李长清, 陈旺生, 李建军. 膝关节前交叉韧带 MR 扫描方式的研究[J]. 放射学实践, 2009, 24(8): 910-912.
- [8] Zhu J, Zhang X, Ma Y, et al. Ultrastructural and morphological characteristics of human anterior cruciate ligament and hamstring tendons[J]. Anat Rec, 2012, 295(9): 1430-1436.
- [9] Jones J, Lerner A, Kim PE, et al. Diffusion tensor imaging in the assessment of ossification of the posterior longitudinal ligament: a report on preliminary results in 3 cases and review of the literature[J]. Neurosurg Focus, 2011, 30(3): E14.
- [10] 陈立勋, 赵衡, 李劲松, 等. 健康人前交叉韧带的扩散张量成像及其与 MRI 的比较[J]. 中南大学学报(医学版), 2013, 38(6): 610-616.
- [11] Mukherjee PCSBJ. Diffusion tensor MR imaging and fiber tractography: technical considerations[J]. Am J Neuroradiol, 2008, 29(5): 843-852.
- [12] Roberts Tp SE. Principles and implementation of diffusion-weighted and diffusion tensor imaging[J]. Pediatr Radiol, 2007, 37(8): 739-748.
- [13] 陈细香, 魏文洲, 李茂进, 等. 颈髓 MR 扩散张量成像扫描参数的比较研究[J]. 中华放射学杂志, 2007, 41(12): 1257-1260.
- [14] 李德军, 包尚联, 马林. 不同 b 值和扩散张量成像导出量的定量关系研究[J]. 中华放射学杂志, 2004, 38(12): 1238-1242.
- [15] 李静, 李澄, 王伟, 等. 纤维束示踪成像技术的定量测量: 可重复性研究[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2009, 15(1): 82-86.

(收稿日期: 2016-11-10 修回日期: 2017-02-16)