

论 著

快速场回波FRACTURE序列在膝关节骨质异常的初步应用研究

张琪明¹ 祁 良^{2,*} 顾敏岚³
顾晓清¹ 郑 凯¹ 金少华¹

1.南京医科大学附属江苏盛泽医院放射科
(江苏 苏州 215200)

2.南京医科大学第一附属医院放射科
(江苏 南京 210029)

3.吴江区中医医院放射科
(江苏 苏州 215200)

【摘要】目的 探讨3.0T磁共振快速场回波(FRACTURE)序列显示膝关节骨质异常的可行性,并以计算机断层扫描(CT)的骨质病变作为标准,评估FRACTURE序列与常规T1序列对膝关节骨质病变的检出能力。方法 选取符合纳入标准的患者35例,所有病例均行CT、MR平扫并添加FRACTURE序列,扫描时间间隔均短于一周。2名医师采用5分法从显示骨质结构的图像质量对FRACTURE序列进行评价,采用Kappa检验分析评价者间一致性;使用配对t检验比较CT图像及FFE图像测量相同层面骨皮质厚度的一致性;以CT作为参考标准,分析FRACTURE序列及常规T1序列对骨质异常的检出能力,结果采用 χ^2 检验。结果 FRACTURE序列检查的图像质量评分为(4.56±0.56),对骨质病变的显示较好,满足诊断要求,两名评价者间一致性良好,kappa值为0.78;两种序列显示骨皮质厚度无统计学差异($P>0.05$);CT检出骨质异常75处,FRACTURE序列共检出骨质异常73处,检出率97%,常规T1序列共检出骨质异常60处,检出率80%,FRACTURE序列图像与常规T1序列之间差异有统计学意义($P<0.05$)。结论 本研究提示FRACTURE序列骨质结构对比度较高,在常规MR检查中添加FRACTURE序列可增加MR检查对骨质病变的识别能力。

【关键词】膝关节; 体层摄影; 磁共振成像; FRACTURE序列

【中图分类号】R445.2

【文献标识码】A

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2023.07.052

Preliminary Study on the Application of Fast Field Echo (FRACTURE) Sequence in the Detection of Bone Abnormalities of Knee Joint

ZHANG Qi-ming¹, QI Liang^{2,*}, GU Min-lan³, GU Xiao-qing¹, ZHENG Kai¹, JIN Shao-hua¹.

1.Department of Radiology, The Affiliated Jiangsu Shengze Hospital of Nanjing Medical University, Suzhou 215200, Jiangsu Province, China

2.Department of Radiology, the First Affiliated Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 210029, Jiangsu Province, China

3.Department of Radiology, Suzhou Wujiang District Hospital of Traditional Chinese Medicine, Suzhou 215200, Jiangsu Province, China

ABSTRACT

Objective To explore the feasibility of 3.0T MR fast field echo (FRACTURE) sequence in displaying bone abnormalities of the knee joint, and to evaluate the detection ability of FRACTURE sequence and conventional T1 sequence in detecting bone lesions of the knee joint based on the bone lesions of computed tomography (CT). **Methods** 35 patients who met the inclusion criteria were selected. All of them underwent CT and MR plain scans with the addition of FRACTURE sequence. The interval between scans was less than one week. Two doctors used the 5-point method to evaluate the FRACTURE sequence from the image quality of displaying the bone structure, and kappa test was used to analyze the consistency between the evaluators; Paired t-test was used to compare the consistency of CT images and FFE images in measuring the thickness of bone cortex in the same layer; Taking CT as the reference standard, the detection ability of FRACTURE sequence and conventional T1 sequence for bone abnormalities was analyzed, and the results were tested with 2. **Results** the image quality score of FRACTURE sequence examination was (4.56 ± 0.56), which showed bone lesions well and met the diagnostic requirements. The consistency between the two evaluators was good, and the kappa value was 0.78; There was no significant difference in cortical thickness between the two sequences ($P>0.05$); There were 75 bone abnormalities detected by CT, 73 bone abnormalities detected by FRACTURE sequence, with a detection rate of 97%, and 60 bone abnormalities detected by conventional T1 sequence, with a detection rate of 80%. There was a significant difference between FRACTURE sequence images and conventional T1 sequence images ($P<0.05$). **Conclusion** this study suggests that the contrast of bone structure of FRACTURE sequence is high. Adding FRACTURE sequence to conventional MR examination can increase the recognition ability of MR examination for bone lesions.

Keywords: Knee Joint; Computed Tomography; Magnetic Resonance Imaging; FRACTURE Sequence

膝关节常见的骨质病变一般包括骨关节炎(OA)及外伤骨折、骨挫伤等。及时准确的诊断骨关节炎中的骨赘及外伤骨折的类型并给予有效治疗,对改善膝关节功能有重要意义。以往X线平片是常用的影像学检查方式,但是X线平片存在图像重叠及分辨率有限的缺点,常常被CT所取代^[1]。在骨质结构显示上,CT检查因其密度分辨率高、能进行三维重建等的优势,弥补了X线检查的不足。但是CT检查的电离辐射剂量也较X线平片检查大幅提高,胎儿及生长发育期的儿童对电离辐射比成年人敏感^[2],因此CT检查在这类人群中的应用需要非常谨慎。目前磁共振检查已经是评估膝关节的常见检查方式,但是短T2组织(如骨皮质、钙化等)在磁共振所有常规序列上均呈低信号,导致图像信号特征不足^[3-4],有时不能准确的诊断骨折及骨赘等骨质异常,往往需要参考CT图像。快速场回波FFE序列(fast-field-echo),在文献中称为FRACTURE序列,是一种基于高分辨率3D梯度回波的磁共振成像技术,利用具有恒定回波间隔的多个回波和后处理减法,可以提供类似CT对比度的图像。有研究报道其在颅骨骨折的显示中可以作为CT的一种替代方法^[5]。但是该序列在膝关节骨质病变的研究较少。本研究旨在评估快速场回波(FFE)序列显示膝关节骨质异常的可行性及临床应用价值。

1 资料和方法

1.1 一般资料 搜集2021年12月至2022年6月江苏盛泽医院符合以下标准的患者35例。

纳入标准:近期有较严重的外伤导致膝关节活动受限,经X线检查怀疑骨折的患者10例;膝关节疼痛、僵硬、关节肿胀时间3个月以上而无外伤,经临床及影像诊断膝骨关节炎的患者25例。共35例,其中男性22例,女性13例,年龄30-70岁,平均年龄(55.5±12)岁。所有患者均行CT、MR平扫并添加FFE序列,并且全部检查均在一周内完成。排除标准:有MRI检查禁忌证;无法耐受检查者;体内植入物影响观察。

根据CT检查结果,35例患者中共检出骨质异常75处(骨折10处、骨赘50处、骨质游离体15处)。

【第一作者】张琪明,男,主治医师,主要研究方向:骨肌系统磁共振成像。E-mail: jsszzqm@163.com

【通讯作者】祁 良,男,副主任医师,主要研究方向:骨肌系统磁共振成像。E-mail: jsszyyql@163.com

1.2 检查方法

1.2.1 CT检查 采用64排GE 660 CT机，令所有患者呈仰卧位，采用螺旋方式断层扫描，扫描范围原则上包括整个膝关节。参数设定如下：电压120kV，电流260mA，矩阵选择512×512，层厚1.25mm，扫描后利用GE工作站进行多平面重建。

1.2.2 MRI检查 采用GE Discovery 750w 3.0T MRI扫描仪，层厚3mm，层间隔1 mm，行横轴面、冠状面和矢状面扫描，序列包括SE T₁WI (TR 520 ms，TE 10 ms)，T₂WI FS脂肪抑制序列(TR 2100 ms，TE 48 ms)。FFE序列参数：TE：0.2 ms，TR：10.2 ms，翻转角：15°。获得了15°翻转角的四个同相回波(起始 TE:4.6 毫秒，TR 22毫秒，回波间隔:4.6毫秒)。脂肪信号和水信号同相时，每4.6ms采集一次所有回波。

1.3 图像后处理 FFE序列采集后，在GE ADW4.6后处理平台，执行两个额外的后处理步骤：第一个后处理步骤是所有3D梯度回波信号的求和。第二个后处理是通过反转灰度给骨皮质提供类似CT的对比度。

1.4 图像分析

1.4.1图像质量评分 由2名放射科诊断医师在GE AW4.6后处理工作站上，对每位患者的FFE序列图像肉眼观察，进行独立评估，以任意顺序调取图像、隐藏图像标记并记录图像顺序，采用5分法对FFE图像进行分析，并评分。图像质量评分标准从1、图像显示骨质结构模糊，无法诊断；2、图像显示骨质结构欠佳，影响诊断；3、图像显示骨质结构一般，不影响诊断；4、图像显示骨质结构良好，可用于诊断；5、图像显示骨质结构质量优，可用于诊断。

1.4.2 骨皮质定量测量 在后处理工作站上对FFE及CT图像进行适度放大，选取两组轴位图像股骨同一层面的4个感兴趣区，对骨皮质厚度进行测量，测量点从骨皮质的外侧至内侧，分别重复测

量2次取平均值。
1.4.3 骨质异常的检测 将35例患者编号，由2名放射科医师在GE ADW4.6工作站上对影像资料进行共同分析。分析范围包括整个膝关节，其中骨赘仅分析最大上下径大于3mm的骨样突起，根据本研究中骨折、骨赘、骨质游离体的特定信号或密度，2名医师通过肉眼观察，并判断存在骨质异常的部位并计数，结果不一致时协商统一。以CT结果作为参照标准。

1.5 统计学分析 采用SPSS 23.0进行统计学分析。服从正态分布的计量资料用平均值±标准差表示。采用Kappa检验进行2名医师的一致性检验，Kappa系数k值>0.75表示一致性较好，k值为0.40~0.75表示一致性一般，k值<0.4表示一致性差，取2位医师的平均值作为主观评分的最终结果。采用配对t检验比较两种不同方法测量骨皮质厚度的差异。采用χ²检验比较FFE序列及常规T₁序列对骨质异常的检出能力，以P<0.05为差异有统计学意义。

表1 CT及FFE序列测量骨皮质厚度的一致性

部位	股骨内侧(mm)	股骨外侧(mm)	股骨前侧(mm)	股骨后侧(mm)
CT	2.13±0.08	2.23±0.01	1.69±0.01	2.60±0.09
FFE	2.14±0.01	2.22±0.01	1.70±0.01	2.58±0.09
t值	-1.44	1.79	-1.79	1.97
P值	0.16	0.08	0.08	0.06

表2 常规T₁及FFE序列检测骨质异常的检出率

序列	骨折(处)	骨赘(处)	游离体(处)	总计(处)	检出率(%)	χ ² (P)
常规T ₁	7/10	41/50	12/15	60/75	80%	11.21(P<0.05)
FFE	10/10	48/50	14/15	72/75	97%	



图1A~图1C 膝关节股骨同一层面的轴位图像。骨关节炎患者，女，53岁。图1A为CT图像；图1B为FFE后处理图像；图1C为FFE原始图像。在CT图像及FFE序列后处理图像上均清晰的显示骨皮质的轮廓及厚度。图2A~图2C 膝关节矢状位图像25岁女性X线怀疑髌骨骨折。图2A为CT图像；图2B为T₁WI图像；图2C为FFE图像。CT示髌骨下极线性骨折，后缘稍错位。T₁WI图像上髌骨后缘的骨折线信号不明显，与骨髓水肿信号分辨不清，在FFE序列上见到线样的低信号骨折线，并且位置与CT图像一致。图3A~图3C 膝关节矢状位图像，70岁男性，膝关节骨关节炎患者。图3A为CT图像；图3B为T₁WI图像；图3C为FFE序列图像。CT示髌骨上缘的两处骨赘，并且在髌骨上缘见一局限性骨质透亮区，T₁WI图像上骨赘与周围组织分界不清，骨质透亮区未显示，FFE序列清晰的显示了两处骨赘，并且显示了与CT图像上位置相同的骨质透亮区。

2 结果

FFE序列显示骨质图像质量良好,满足临床诊断要求,图像评分为(4.56±0.56),并且评价者间一致性好($k=0.78$)。在骨皮质厚度的测量方面,FFE序列与CT测量结果均无统计学差异(表1),在骨质病变的检出情况中,CT作为标准,共检出骨质病变75处(骨折10处,骨赘50处,骨质游离体15处),FFE序列检出骨质异常73处(骨折10处,骨赘48处,骨质游离体14处),检出率为97%,MR常规T₁序列检出骨质异常60处(骨折7处,骨赘41处,骨质游离体12处),检出率为80%,FFE对骨质异常的检出率明显高于MR常规序列,差异有统计学意义(表2, $\chi^2=11.21, P<0.05$)。

3 讨论

在膝关节骨关节炎患者中,骨赘是引起临床症状的较主要的原因,有报道,胫骨及股骨内外侧的骨赘大小与膝关节的疼痛呈正相关,并且胫骨外侧及股骨外侧骨赘患者的疼痛风险高于胫骨及股骨内侧骨赘的患者^[6],因此准确的识别骨赘对骨关节炎的诊断至关重要。在膝关节外伤的患者中,当膝关节受到外界暴力撞击、过伸过屈的情况下,即便有众多韧带及肌肉的保护,仍可能出现骨折及脱位^[7]。在怀疑膝关节这些骨质病变时,往往先行X线平片检查,观察整体病变,有时还会需要进行CT检查显示局部的细节改变,但是CT检查对人体能形成较高的电离辐射,随着电离辐射剂量的大幅提高,受检者的潜在辐射危害也随之提高,会人体细胞中的DNA染色体损伤增加^[8],造成电离辐射相关伤害。近年来,MR检查在骨肌系统的应用越来越广泛。MRI检查具有优越的软组织对比、不存在电离辐射损伤、可任意层面成像、不仅可以反映被检体解剖信息,而且能对组织生理、生化特征进行检测^[9],因此能早期检出骨髓水肿及骨折。但MRI对于骨关节系统疾病的诊断也有明显的缺陷,主要表现在MRI常规图像无法清晰显示骨质情况,特别是骨皮质的状态,骨皮质中所包含的骨基质、矿物质及少量水,T₂值极短,导致在常规MRI序列中骨皮质信号还未采集到k空间中心时已经大幅度衰减到几乎为零,在MRI所有序列上均呈低信号^[10],造成常规MR图像无法对骨质病变进行有效的诊断。例如MR检查可以较CT更准确的检测出骨折的部位及范围,但是难以准确的诊断骨髓水肿背景下的非移位性骨折^[11]。近年来,诞生了很多骨成像的MRI新技术,包括UTE及ZTE^[12-14]、黑骨成像^[15]等,均可较MRI常规序列更好的显示出骨的结构,但是这些序列对设备、线圈等有较高的要求,不利于广泛推广使用。

本文探讨的FFE序列是一种高分辨率3D梯度回波的磁共振成像技术,由Brian Johnson等^[16]在2020年提出,该序列通过精确的回波间隔记录多个回波,以同相时间分辨率获取TEs,使其产生更好的骨皮质和骨小梁的对比度,并能最大限度地减少化学位移伪影,从而更好地描绘和定位骨皮质的信号,减少边缘模糊,帮助减少骨组织界面处的信号丢失。FFE序列基于常规的3D梯度回波,对场强的依赖度较低,而且无需对线圈及采集方式进行转换,是一种先进、简便的显示骨结构的序列。

在本研究中,我们通过FFE序列获得类似CT对比度的膝关节图像,评分表明FFE序列适用于膝关节骨质结构的显像,仅有一例图像因为移动伪影导致图像质量评分为一般,分析认为是患者扫描时轻微的自主移动导致的。但总的来说,两名医师均认为FFE序列的图像对骨质结构显示良好,满足诊断要求。此外,通过定量测量骨皮质厚度,分析比较CT及FFE序列间的差异,结果提示两组图像的测量值无统计学差异。说明FFE序列对骨皮质的显示较好,与CT扫描一致。最后,以CT作为标准,在骨质异常的检出率上,FFE序列较常规T₁序列有明显的提高,并且差异有统计学意义。在骨折的检测中,CT及常规T₁序列、FFE序列对有移位的骨折显示良好,常规T₁序列3例无移位的骨折未检出,因为在病变处骨髓水肿明显,难以准确观察骨皮质是否连续,因此诊断为骨折,而FFE序列均准确的显示了低信号的骨折线信号,并且与CT位置一致;在骨赘的检测中,常规T₁序列有9例韧带、

内外侧副韧带及股四头肌肌腱附着处旁的骨赘未检出,这部分骨赘呈T₁低信号,与肌腱韧带信号类似,常规T₁序列难以识别,而FFE序列骨组织与周围软组织对比度良好,所以在对骨赘的检出率与CT的一致性更好;常规T₁序列有3例骨质游离体未检出,主要原因是骨质游离体内骨髓的含量不同会导致其在T₁序列上可呈高、等、低信号,因此,与膝关节增生的滑膜皱襞、关节积液、前后交叉韧带,无法准确的区分,而FFE序列上骨质游离体呈高信号,与周围组织对比明显,因此能准确的检出。由此可见,FFE序列能较常规T₁序列提高了骨折、骨赘、骨质游离体的检出率,尤其是非移位性骨折、肌腱韧带附着处旁的骨赘。

FFE序列不仅能在一定程度上弥补常规MR检查的不足,避免CT检查的电离辐射,能实现MR一站式对软组织及骨质病变的显示,而且在临床中,可简化检查流程,更利于患者的复查。

本研究的不足:首先,样本量较少在下一步研究中需要增加样本量;其次,本研究仅探讨了外伤及退变等膝关节常见的骨质异常,对一些少见的骨肿瘤、骨髓炎等引起的骨质改变等未计入研究。

综上所述,FFE序列可产生类似CT的骨对比度图像,在常规MR扫描中添加FFE序列可提高MR对骨质异常的检出能力,可拓宽磁共振成像检查的适应症,尤其适用于儿科及孕妇等对辐射敏感的人群。该序列具有一定的临床研究价值。

参考文献

- [1] Gersing AS, Daniela P, Kopp FK, et al. Evaluation of MR-derived CT-like images and simulated radiographs compared to conventional radiography in patients with benign and malignant bone tumors[J]. Eur Radiol, 2019, 29(1): 13-21.
- [2] Pierce DA, Shimizu Y, Preston DL et al (1996) Studies of the mortality of atomic bomb survivors. Report 12, Part I [J]. Cancer: 1950-1990. Radiat Res 146: 1-27.
- [3] KENKELMAN R M, STANISZ G J, GRAHAM S J. Magnetization transfer in MRI: a review [J]. NMR Biomed, 2001, 14(2): 57-64.
- [4] ROBSON M D, GATEHOUSE P D, BYDDER M, et al. Magnetic resonance: an introduction to ultrashort echo-time imaging [J]. J Comput Assist Tomogr, 2003, 27(6): 825-846.
- [5] Eva Deininger-Czermak, Andre Euler, Sabine Franckenberg, Tim Finkenstaedt, et al. Evaluation of ultrashort echo-time (UTE) and fast-field-of-view (FRACTURE) sequences for skull bone visualization and fracture detection-A postmortem study [J]. 2021 Nov 7; S0150-9861(21) 00165-6.
- [6] Kazuya Nigoro, Hiromu Ito, Tomotoshi Kawata, et al. Differential Contribution of the Medial and the Lateral Side of the joint to Symptoms in Knee Osteoarthritis: A Radiographic and Laboratory Analysis in the Nagahama Study [J]. 2021 Dec; 13(1-suppl): 1648S-1657S.
- [7] 仲鹤鹤, 孙鹏鹏, 桑鹏, 等. 模拟重建膝关节后外侧复合体核心韧带后膝关节稳定性评估 [J]. 中国组织工程研究, 2021, 25(6): 821-825.
- [8] 王道庆, 刘玉丽. 多层螺旋CT检查辐射危害控制探讨 [J]. 中国辐射卫生, 2016, 25(5): 569-572.
- [9] Sajib SZK, Katoch N, Kim HJ, et al. Software Toolbox for Low-Frequency Conductivity and Current Density Imaging Using MRI [J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2017, 64(11): 2505-2514.
- [10] Majumdar SR, McAlister FA, Johnson JA, et al. Comparing Strategies Targeting Osteoporosis to Prevent FFEs After an Upper Extremity FFE (C-STOP Trial): A Randomized Controlled Trial [J]. J Bone Miner Res, 2018, 33(12): 2114-2121.
- [11] Mohankumar R, White LM, Naraghi A. Pitfalls and pearls in MRI of the knee [J]. AJR Am J Roentgenol, 2014; 203(3): 516-30.
- [12] Ma YJ, Chen Y, Li L et al. (2020) Trabecular bone imaging using a 3D adiabatic inversion recovery prepared ultrashort TE Cones sequence at 3T [J]. Magn Reson Med 83: 1640-1651.
- [13] Lu X, Jerban S, Wan L, et al. (2019) Three-dimensional ultrashort echo time imaging with tricomponent analysis for human cortical bone [J]. Magn Reson Med 82: 348-355.
- [14] Wiesinger F, Sacolick LI, Menini A, et al. (2016) Zero TE MR bone imaging in the head [J]. Magn Reson Med 75: 107-114.
- [15] K A Eley, A G McIntyre, S R Watt-Smith, S J Golding, Black bone MRI: a partial flip angle technique for radiation reduction in craniofacial imaging [J]. Br J Radiol 2012, 85(10 11): 272-8.
- [16] Brian Johnson, Hamza Alizai, Molly Dempsey, Fast field echo resembling a CT using restricted echo-spacing (FFE): a novel MRI technique with superior bone contrast [J]. Skeletal Radiol, 2020; 50(8): 1705-1713.

(收稿日期: 2022-09-25)

(校对编辑: 谢诗婷)