

· 影像 AI 多模态研究专题 · doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2026.02.001

网络首发 [https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20250928.1639.009\(2025-09-29\)](https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20250928.1639.009(2025-09-29))

迭代影像重建辅以深度学习在膝关节 MRI 扫描中的临床价值*

彭超¹ 李传明¹ 余飞¹ 刘欢¹ 黄英¹ 刘羽^{2△}

(1. 重庆市急救医疗中心/重庆大学附属中心医院医学影像科, 重庆 400014; 2. 重庆市公共卫生医疗救治中心医学影像科, 重庆 400030)

[摘要] **目的** 研究迭代影像重建(IIR)辅以深度学习技术在膝关节 MRI 扫描中的临床价值。**方法** 选取 2022 年 6 月至 2023 年 7 月重庆市急救医疗中心/重庆大学附属中心医院收治的疑似为膝关节病变行 MRI 检查的患者 240 例, 随机选择其中 120 例为试验组, 另 120 例为对照组。对照组采用常规 T1WI-Fse-Sag、PDWI-Fse-Sag 序列; 试验组采用加速 T1WI-Fse-Sag、PDWI-Fse-Sag 序列, 并采用 IIR 辅以深度学习进行图像重建。两组图像质量评价采用 Likert5 级计分法进行对比, 主观指标包括图像质量、清晰度、诊断置信度, 客观指标包括图像信噪比(SNR)、对比噪声比(CNR)。在矢状位 PDWI、T1WI 分别测量股骨内侧髁、腓肠肌内侧头、髌下脂肪垫、髌上囊积液及髌软骨感兴趣区(ROI)的 SI 值, 再分别以相同大小 ROI 测量膝关节以外的背景噪声标准差(SD), 通过计算 SI 组织/SD 背景获得 SNR; 通过计算矢状位 PDWI、T1WI 髌上囊积液 SI 与髌软骨 SI 的差值, 再将该差值与髌软骨层面 SD 相除, 所得结果为 CNR。使用 Stoller 分级评估半月板内、外侧前、后角及体部损伤程度。**结果** 对照组常规序列 T1-Fse-Sag、PD-Fse-Sag 扫描时间分别为 75、84 s, 试验组分别为 60、67 s, 与对照组比较分别缩短 20.00%、20.24%。试验组整体图像质量、清晰度及诊断置信度评分均明显高于对照组($P < 0.05$)。在半月板损伤诊断方面, 2 位阅片者内部可靠性较强, Kappa 值为 0.46~0.92。客观指标方面, 试验组图像股骨内侧髁、腓肠肌内侧头、髌下脂肪垫、髌上囊积液、髌软骨 SNR 明显高于对照组, 同时加速图像上滑膜液/髌软骨 CNR 高于常规图像($P < 0.05$)。**结论** IIR 辅以深度学习技术可以在缩短膝关节 MRI 扫描时间的同时, 明显提高图像质量, 提高检查效率。

[关键词] 迭代; 深度学习; 膝关节; 磁共振成像; 图像质量评估

[中图法分类号] R684 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-8348(2026)02-0241-06

Clinical value of iterative image reconstruction combined with deep learning in knee MRI scanning*

PENG Chao¹, LI Chuanming¹, YU Fei¹, LIU Huan¹, HUANG Ying¹, LIU Yu^{2△}

(1. Medical Imaging Department, Chongqing Emergency Medical Center/Chongqing University Central Hospital, Chongqing 400014, China; 2. Department of Medical Imaging, Chongqing Public Health Medical Center, Chongqing 400030, China)

[Abstract] **Objective** To investigate the clinical value of iterative image reconstruction (IIR) combined with deep learning in knee MRI scanning. **Methods** A total of 240 patients with clinically suspected knee lesions who underwent MRI examinations at Chongqing Emergency Medical Center/Affiliated Central Hospital of Chongqing University from June 2022 to July 2023 were enrolled. Among them, 120 patients were randomly assigned to the experimental group and 120 to the control group. The control group underwent conventional T1WI-Fse-Sag and PDWI-Fse-Sag sequences, while the experimental group underwent accelerated T1WI-Fse-Sag and PDWI-Fse-Sag sequences with image reconstruction using IIR combined with deep learning. Image quality was compared using a 5-point Likert scale for subjective scores including image sharpness, overall quality and diagnostic confidence, and objective indicators including signal-to-noise ratio (SNR) and contrast-to-noise ratio (CNR). SNR was calculated by measuring the signal intensity (SI) values of regions of interest (ROIs) in the medial femoral condyle, medial head of the gastrocnemius, infrapatellar fat pad, suprapatellar bursa effusion, and patellar cartilage on sagittal PDWI and T1WI sequences, respectively, followed by measuring the standard deviation (SD) of background noise outside the knee joint with ROIs of the same size, using the formula: $SNR = SI \text{ tissue} / SD \text{ background}$. CNR was calculated as $(SI \text{ suprapatellar bursa effusion} - SI \text{ pa-}$

* 基金项目: 重庆市科卫联合医学科研项目(2023MSXM077)。△ 通信作者, E-mail: lypc2008520@126.com。

tellar cartilage)/SD patellar cartilage layer on sagittal PDWI and T1WI sequences. The Stoller classification was used to evaluate the injury degree of the anterior, posterior horns and body of the medial and lateral menisci. **Results** The scanning times of conventional T1-Fse-Sag and PD-Fse-Sag sequences in the control group were 75 s and 84 s, respectively, while those in the experimental group were 60 s and 67 s, representing a 20.00% and 20.24% reduction, respectively. The overall image quality, sharpness, and diagnostic confidence scores of the experimental group were significantly higher than those of the control group ($P < 0.05$). For the diagnosis of meniscal injuries, the intra-observer reliability of the two readers was strong, with Kappa values ranging from 0.46 to 0.92. In terms of objective indicators, the SNR values of the medial femoral condyle, medial head of the gastrocnemius, infrapatellar fat pad, suprapatellar bursa effusion, and patellar cartilage in the experimental group were significantly higher than those in the control group, and the CNR of synovial fluid/patellar cartilage on accelerated images was also higher than that on conventional images ($P < 0.05$). **Conclusion** IIR combined with deep learning can shorten the scanning time of knee MRI, significantly improve image quality, and enhance examination efficiency.

[Key words] iteration; deep learning; knee joint; magnetic resonance imaging; image quality assessment

骨关节炎^[1-2]、急慢性损伤所致的半月板^[3]及韧带损伤^[4]等是膝关节常见的病变,其发病率逐年上升,往往导致关节功能和活动能力受限,对患者造成影响。MRI 具备多参数、多方位、非侵袭性成像等优点,并结合多通道相控阵线圈,具有良好的组织对比度和较高的空间分辨率,在评估膝关节半月板、韧带、软骨等结构损伤方面起着重要的作用。有研究表明 MRI 在诊断半月板撕裂、前交叉韧带和后交叉韧带损伤中的灵敏度和特异度均超过 90%,诊断半月板损伤的准确率达 92%,诊断韧带损伤达 89%,是非侵入性检查膝关节病变是“金标准”,具有重要临床价值^[5-6]。目前常用序列为基于快速自旋回波(fast spin echo, FSE)的质子密度加权成像(proton density weighted imaging, PDWI)、T1WI 和 T2WI^[7-8]。研究表明, T1WI 在观察低信号的骨质损伤、骨髓病变、骨关节炎、骨肿瘤筛查等方面具有不可替代的优势^[9-12]。GÖKALP 等^[13]证实 PDWI 序列的敏感度和特异度高,与关节镜检查结果高度一致,优于其他检查序列。因此, T1WI 和 PDWI 序列已成为半月板损伤及撕裂、骨髓水肿等疾病除关节镜检查外的最佳观察序列。然而,在 1.5T MR 扫描仪上扫描这些序列的所需时间为 7~9 min,耗时较长,由于 PDWI、T1WI 成像序列图像对骨关节炎或急慢性损伤等疾病较为敏感,因此提高扫描速度和图像质量,可提高检查效率并降低运动伪影发生率,改善患者体验。

目前 MRI 加速的采集技术主要包括压缩感知(compressed sensing, CS)技术和并行采集(parallel imaging, PI)技术。CS 技术是通过随机采样获取信号的离散样本,再通过非线性重建算法重构信号,减少了不必要的数据采集,缩短了扫描时间,但这种方法会增加图像噪声,采样和重建过程中可能会丢失图像的细微信息。PI 是一种通过 K 空间欠采样加速 MRI 数据采集的技术,基于从 MRI 信号并行采样的重叠相控阵线圈元件中获取空间编码数据的原理,减少扫描时间,但是由于信噪比下降、重建伪影风险较高、对

设备硬件要求高及部分序列兼容性有限等缺点,导致图像质量明显下降,极大地限制了其临床应用。迭代影像重建(iterative image reconstruction, IIR)是一种对噪声水平较高的 MRI 图像进行回顾性重建的容积算法,能明显降低噪声、恢复图像细节、提高图像质量。目前,已经开发出多种 3D 迭代图像重建技术,如非局部均值、奇异值分解、稀疏表示、基于机器学习的技术及这些技术的组合^[14-17],可以在不降低图像质量的前提下明显缩短检查时间,目前已经在头颅、颈椎等部位 MRI 检查中取得了较大应用进展。目前,有关该加速技术在膝关节 MRI 检查中的研究较少。本研究采用随机对照方法,对膝关节疑似病变患者,采用 MRI 传统扫描与加速技术扫描,对扫描时间和图像质量进行对比分析,评估采用迭代与深度学习相结合的 T1WI 和 PDWI 序列对膝关节 MRI 加速性能及图像质量的改善情况,以促进其临床应用。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取重庆市急救医疗中心/重庆大学附属中心医院 2022 年 6 月至 2023 年 7 月因膝关节疼痛进行检查的 240 例患者为研究对象,并对其膝关节 MRI 影像资料进行分析,将患者随机分为对照组 120 例,其中男 61 例(50.8%),女 59 例(49.2%),年龄 10~92 岁,平均(50.01±21.16)岁;试验组 120 例,其中男 58 例(48.3%),女 62 例(51.7%),年龄 11~85 岁,平均(47.71±17.79)岁。纳入标准:膝关节疼痛;排除标准:(1)膝关节区域存在金属植入物;(2)膝关节区域信号异常,影响数据测量。本研究通过重庆市急救医疗中心/重庆大学附属中心医院伦理委员会批准,免除患者知情同意。

1.2 方法

1.2.1 图像扫描

患者均采用临床 1.5-T 扫描仪(uMR560,上海联影医疗科技有限公司)进行检查,并采用 12 通道接收膝关节专用线圈(上海联影医疗科技有限公司)。采

用仰卧位、足先进,扫描中心行膝关节 MRI,扫描线位于髌骨下缘。采集对照组 T1WI、PDWI 序列,参数:T1WI(重复时间 782 ms;回波时间 11.52 ms;体素大小 0.73 mm×0.51 mm×4 mm;带宽 190 kHz/像素;回波链长度 2;平均次数 1;加速因子 0);PDWI(重复时间 4 488 ms;回波时间 21.88 ms;体素大小 0.70 mm×0.56 mm×4 mm;带宽 200 kHz/像素;回波链长度 16;平均次数 1;加速因子 0)。试验组的 T1WI、PDWI 加速因子分别增加到 1、1,其他参数不变。

1.2.2 图像重建

将快速序列 T1WI-Fse-Sag、PD-Fse-Sag 数据传输到服务器,首先进行 K 空间校正,通过相位补偿、运动参数估计、并行校准、稀疏优化等方法,从原始数据层面修复误差,结合物理模型与数据驱动算法,平衡速度、分辨率和噪声,改善噪声估计和 IIR 算法的稳健性。然后,通过卷积神经网络(convolution neural network, CNN)进行处理,以提升图像微小细节的可视度并改善图像锐度。CNN 采用固定的参数集,让算法以固定的非线性过滤器进行工作。原始图像连续贯穿过滤器组从而得到加强,在过滤器组包含阈值与比例运算。通过 CNN 的架构以超级分辨率生成对

抗网络为基础,配合调整过的过滤块与损失函数,将训练后的图像锐化参数从低分辨率图像恢复至高分辨率和更锐利的图像。最后,输入的数据集被分解为 3D 方块,通过计算每个图像方块的多特征转换至特征空间,然后基于独特相似性测量进行分组,结合方块间的相似性及噪声统计学预测,噪声和信号被共同预测并分离。该过程反复进行,直至达到确切的收敛性标准。随后,特定的过滤器会用于增强特定特征(如边缘)并把图像恢复至放射科医生所倾向的主观感受,从而数据集会按要求进行重建。核心算法可通过多个参数进行控制,从而影响最终成像,例如图像更柔和/锐利,边缘增强较高/较低等。机器学习模组可以为输入图像匹配最佳的处理参数合集,随之供给迭代重建算法,以获得最佳的输出图像,见图 1。

1.2.3 图像质量评价

1.2.3.1 主观评价

由具有影像诊断经验的主治医师及副主任医师以双盲方式在 PACS 工作站上对图像进行独立评估。使用 Likert5 级计分法对图像整体质量、清晰度、诊断置信度进行评估,1~5 分别代表无法诊断、图像质量低、适中、良好、极好。

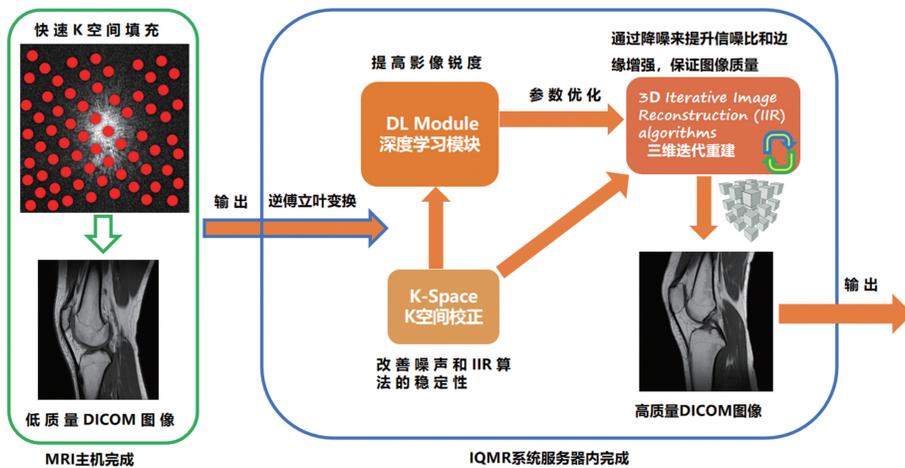


图 1 加速技术架构示意图

1.2.3.2 客观评价

在 MR 扫描仪配套后处理工作站(uWS-MR, 上海联影医疗科技有限公司),选取膝关节 PDWI、T1WI 矢状位,分别在股骨内侧髌、腓肠肌内侧头、髌下脂肪垫、髌上囊积液及髌软骨放置面积约 0.5、0.5、0.1、0.1、0.1 cm² 的椭圆形感兴趣区(region of interest, ROI),测出相应信号强度(signal intensity, SI)值,同 1 个部位连续测量 3 次,获得 ROI 平均 SI 值;再以相同大小 ROI 测量膝关节以外的背景噪声标准差(standard deviation, SD),分别计算各组织的图像信噪比(signal noise ratio, SNR);此外,计算 T1WI、PDWI 序列中髌上囊积液 SI 与髌软骨 SI 的差值,再将该差值与髌软骨层面 SD 相除,所得结果为对比噪声比(contrast-to-noiseratio, CNR)。计算公式如下:

$$SNR = SI_{\text{组织}} / SD_{\text{背景}}; CNR = (SI_{\text{组织 1}} - SI_{\text{组织 2}}) / SD_{\text{背景}}$$

1.2.3.3 Stoller 分级评估

Stoller 分级是评估膝关节半月板损伤程度的 MRI 影像学分级系统,主要用于判断半月板退变或撕裂的程度,结合临床症状帮助医生制订合适的治疗方案。由 2 位对临床数据不知情的放射科医师,对对照组、试验组图像进行评分,检验采用组内相关系数(intraclass correlation coefficient, ICC)和 Kappa 检验评估 2 位阅片者间的一致性(<0.20 为一致性较差,0.20~<0.40 为一致性一般,0.40~<0.60 为一致性中等,0.60~<0.80 一致性较强,0.80~1.00 一致性很强)。

1.3 统计学处理

采用 SPSS25.0 软件进行统计学分析。采用

Shapiro-Wilk 检验评价计量资料的正态性。对符合正态分布的计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,采用独立样本 t 检验;对不符合正态分布的计量资料以 $M(Q_1, Q_3)$ 表示,采用独立样本 Wilcoxon 秩和检验。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 序列采集时间

对照组图像采集时间分别为 75、84 s, 试验组图

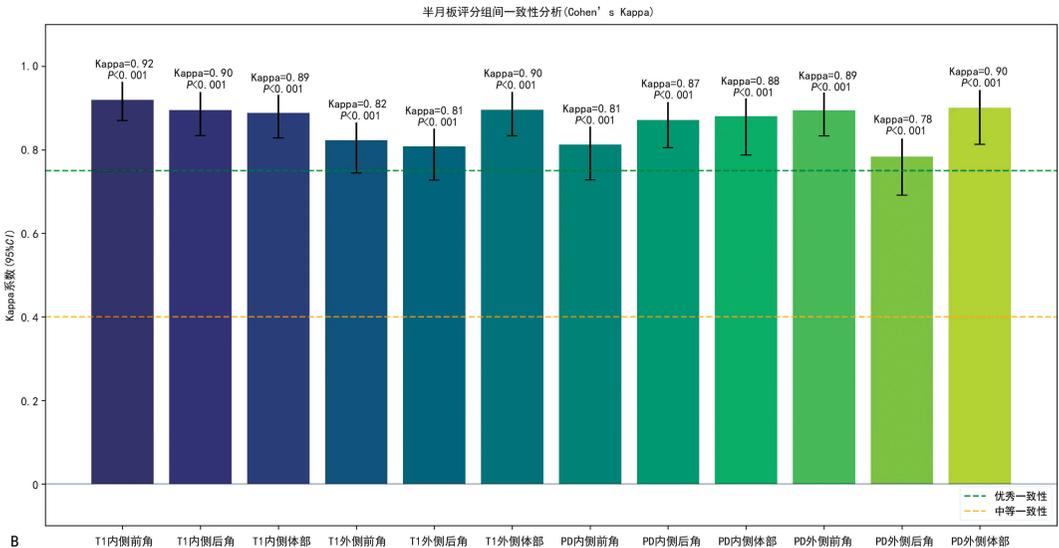
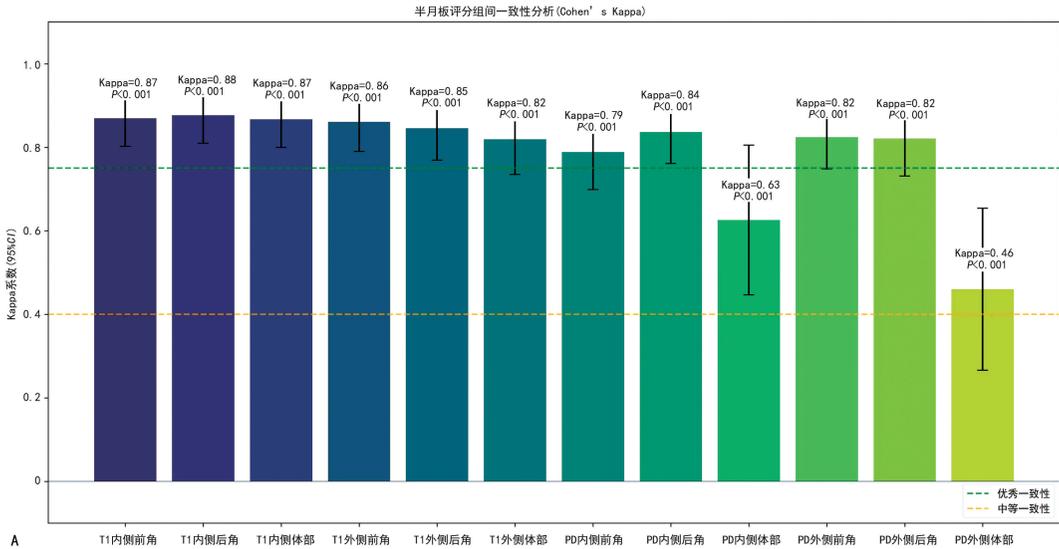
像采集时间为 60、67 s, 后者较常规图像采集时间分别缩短 20.00%、20.24%。

2.2 一致性分析

试验组图像质量更优, 与对照组图像比较差异有统计学意义 ($P < 0.001$)。对图像质量主观评价的一致性 ICC 为 0.661~0.745, 见表 1。半月板 Stoller 分级评估中, 2 位阅片者间一致性较高, Kappa 值为 0.46~0.92, 见图 2。

表 1 图像质量主观评分

项目	医师 1					医师 2					ICC(95%CI)	P
	≤3分 (n)	4分 (n)	5分 (n)	Z	P	≤3分 (n)	4分 (n)	5分 (n)	Z	P		
对照组 T1WI	107	9	4	-11.423	<0.001	91	25	4	-8.511	<0.001	0.661(0.547~0.751)	<0.001
试验组 T1WI	10	53	57			25	64	31			0.745(0.654~0.815)	<0.001
对照组 PDWI	111	18	1	-10.144	<0.001	89	28	3	-5.700	<0.001	0.685(0.577~0.770)	<0.001
试验组 PDWI	18	62	40			47	60	13			0.733(0.637~0.806)	<0.001



A: 医师 1; B: 医师 2。

图 2 半月板 Stoller 分级评估

2.3 客观评价

试验组的股骨内侧髁、腓肠肌内侧头、髌下脂肪

垫、髌上囊积液、髌软骨 SNR 明显高于对照组, 差异均有统计学意义 ($P < 0.05$), 见表 2、图 3。

表 2 常规图像和加速图像 (TIWI, PDWI) 不同组织 SNR 和 CNR 比较 [$M(Q_1, Q_3)$]

部位	TIWI	TIWI3	P	PDWI	PDWI3	P
股骨内侧髁 SNR	116.43(97.36, 135.71)	245.43(199.11, 299.30)	<0.001	37.75(33.31, 42.26)	80.52(68.54, 93.88)	<0.001
腓肠肌内侧头 SNR	49.02(40.50, 59.29)	127.57(109.23, 156.73)	<0.001	98.59(89.20, 108.60)	201.78(165.00, 231.76)	<0.001
髌下脂肪垫 SNR	172.26(153.06, 202.98)	381.15(299.25, 434.57)	<0.001	62.70(50.81, 75.31)	125.30(101.33, 163.02)	<0.001
髌上囊积液 SNR	46.63(34.95, 54.73)	118.14(96.84, 155.24)	<0.001	228.82(198.78, 261.32)	539.33(442.75, 595.25)	<0.001
髌软骨 SNR	52.95(43.35, 64.92)	142.09(111.94, 162.36)	<0.001	128.30(110.22, 152.62)	269.76(211.97, 319.19)	<0.001
滑膜液/髌软骨 CNR	-9.19(-15.68, -0.72)	-15.03(-32.77, -1.68)	0.001	96.84(62.27, 119.63)	247.75(193.37, 302.25)	<0.001

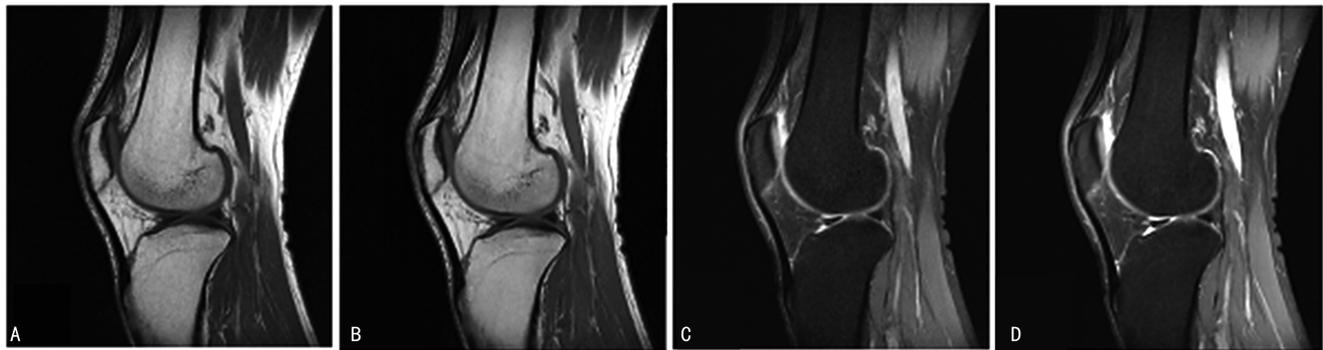


图 3 两组膝关节矢状位 T1WI 及 PDWI 序列图像的对比
A: 对照组常规 T1WI 序列; B: 试验组加速 T1WI 序列, 图像质量更好, SNR、CNR 值更高; C: 对照组常规 PDWI 序列; D: 试验组加速 PDWI 序列, 图像质量更好, SNR、CNR 值更高。

图 3 两组膝关节矢状位 T1WI 及 PDWI 序列图像的对比

3 讨论

本研究采用 IIR 辅以深度学习技术加速膝关节 MRI 质子密度加权序列、T1 加权序列扫描速度, 并进行图像质量的主观和客观评价, 结果显示该技术可提高图像的 SNR 及 CNR, 改善图像质量, 同时与常规序列相比 T1WI、PDWI 扫描时间分别缩短 20.00%、20.24%。本研究为国内首次利用迭代重建结合深度学习技术改善膝关节 MRI 扫描, 提高了检查效率并保证了图像质量, 加快了疾病诊疗流程, 对临床应用有指导意义。

MRI 具有非侵入性、多参数多对比等优点, 在膝关节疾病早期诊断中具有重要价值^[18-19], 其软组织对比分辨率高, 尤其对韧带、半月板疾病诊断具有独特优势, 已成为临床膝关节检查的首选技术。目前的加速技术、成像时间受 K 空间数据点数量、采样方式及图像重建方式等因素影响, 获得高质量的 MR 图像需通过调整激励次数等设备参数来实现, 但会导致检查时间过长, 设备应用率降低, 并且在骨关节病或急性慢性损伤等情况下, 无法保证受检者全程制动, 图像出现严重运动伪影, 导致重复扫描, 扫描时间延长。缩短扫描时间可提高患者的配合度和舒适度, 提高检查效率、降低运动伪影。

在加快扫描速度的同时, 提升图像质量具有重要意义。迭代算法辅以深度学习加速技术能提高 SNR、CNR 并缩短扫描时间^[20-22]。研究首次将 3D (GiRR3D, Medic Vision) 技术中通用迭代反向重建的

Safe CT 算法应用于 MR 图像的处理, 将输入图像与加速技术使用期间获取的高质量图像进行比较, 通过 AI 辅助的方式, 利用 MRI 数据的统计先验知识及 SNR 改善图像增强和迭代重建方法, 来恢复使用相对较差的曝光参数所获取的 MR 图像细节和质量^[23]。不同于其他加速技术, 该研究的加速技术是修改常规标准协议为短时间协议之后, 低质量图像经过服务器处理, 会通过特定的技术模拟重建过程而改变图像质量。其本质不参与除了协议修改以外设备本身(比如激励次数、回波时间)的重建过程, 属于外部的提升, 不额外增加人工操作即可输出最佳图像, 在保证图像质量的前提下实现缩短扫描时间。同时半月板 Stoller 评分对照组与试验组 Kappa 检验为 0.460~0.919, 具有较高的一致性。说明快速序列在极大地缩短了检查时间的前提下, 通过 3D 迭代和深度学习, 与常规序列相比提高了组织 SNR 及 CNR, 明显提高了图像质量, 提升了工作效率, 超过常规评估膝关节病变的能力。

本研究也存在一定的不足之处: 一是仅针对 T1WI 及 PDWI 序列进行研究, 未进行全序列成像研究; 二是仅对膝关节半月板病变显示情况进行研究; 三是纳入样本量较少, 针对膝关节病变的影像诊断是否存在差异有待进一步研究, 以上不足将在后期工作中优化改进。

综上所述, 基于 IIR 辅以深度学习加速技术在膝关节 MRI 中可提高图像质量, 提高组织 SNR 及

CNR,同时缩短扫描时间,提高工作效率,值得临床推广运用。

利益冲突:所有作者声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] LIU Q, NIU J, LI H, et al. Knee symptomatic osteoarthritis, walking disability, NSAIDs use and all-cause mortality: population-based wuchuan osteoarthritis study[J]. *Sci Rep*, 2017, 7(1):3309.
- [2] SILVERWOOD V, BLAGOJEVIC-BUCKNALL M, JINKS C, et al. Current evidence on risk factors for knee osteoarthritis in older adults: a systematic review and meta-analysis[J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2015, 23(4):507-515.
- [3] LIU Y, DU G, LIU J. Meniscal anterior and posterior horn heights are associated with MRI-defined knee structural abnormalities in middle-aged and elderly patients with symptomatic knee osteoarthritis [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2022, 23(1):218.
- [4] LI X, HOU Q, ZHAN X, et al. The accuracy of MRI in diagnosing and classifying acute traumatic multiple ligament knee injuries[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2022, 23(1):43.
- [5] BEHAIRY N H, DORGHAM M A, KHALED S A. Accuracy of routine magnetic resonance imaging in meniscal and ligamentous injuries of the knee: comparison with arthroscopy[J]. *Int Orthop*, 2009, 33(4):961-967.
- [6] KHALID D, IQBAL J, MUSTAFA K, et al. Diagnostic accuracy of magnetic resonance imaging in the detection of meniscal injury in patients with knee trauma: keeping arthroscopy as a gold standard[J]. *Cureus*. 2024, 16(10):e72343.
- [7] SCHNAITER J W, ROEMER F, MCKENNA-KUETTNER A, et al. Diagnostic accuracy of an MRI protocol of the knee accelerated through parallel imaging in correlation to arthroscopy [J]. *ROFO*, 2018, 190(3):265-272.
- [8] CHAUDHARI A S, STEVENS K J, SVEINSON B, et al. Combined 5-minute double-echo in steady-state with separated echoes and 2-minute proton-density-weighted 2D FSE sequence for comprehensive whole-joint knee MRI assessment[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2019, 49(7):e183-194.
- [9] HANRAHAN C J, SHAH L M. MRI of spinal bone marrow: part 2, T1-weighted imaging-based differential diagnosis[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2011, 197(6):1309-1321.
- [10] PASCART T, PACCOU J, COLARD T, et al. T1-weighted MRI images accurately represent the volume and surface of architectural mineral damage of osteonecrosis of the femoral head: Comparison with high-resolution computed tomography[J]. *Bone*, 2020, 130:115099.
- [11] DEL GRANDE F, FARAHANI S J, CARRINO J A, et al. Bone marrow lesions: a systematic diagnostic approach [J]. *Indian J Radiol Imaging*, 2014, 24(3):279-287.
- [12] KUNG J W, YABLON C M, EISENBERG R L. Bone marrow signal alteration in the extremities[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2011, 196(5):W492-510.
- [13] GÖKALP G, NAS O F, DEMIRAG B, et al. Contribution of thin-slice (1 mm) axial proton density MR images for identification and classification of meniscal tears: correlative study with arthroscopy [J]. *Br J Radiol*, 2012, 85(1018):e871-878.
- [14] SUN Z, ANGELIS G, MEIKLE S, et al. MRI tractography-guided PET image reconstruction regularisation using connectome-based nonlocal means filtering [J]. *Phys Med Biol*, 2023, 68(13):135016.
- [15] WEI R, LIU Y, CHEN X, ZHU J, et al. A projection-domain correction method in CBCT reconstruction for head and neck radiotherapy using cycle-GAN and nonlocal means filter[J]. *Med Phys*, 2023, 50(8):5045-5060.
- [16] COUPE P, YGER P, PRIMA S, et al. An optimized blockwise nonlocal means denoising filter for 3-D magnetic resonance images [J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2008, 27(4):425-441.
- [17] FU Y, ZHAO X, LIANG Y, et al. Change detection based on unsupervised sparse representation for fundus image pair[J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1):9820.
- [18] KATZ J N, ARANT K R, LOESER R F. Diagnosis and treatment of hip and knee osteoarthritis: a review[J]. *JAMA*, 2021, 325(6):568-578.
- [19] ARIYACHAIPANICH A, BAE W C, STATUM S, et al. Update on MRI pulse sequences for the knee: imaging of cartilage, meniscus, tendon, and hardware[J]. *Semin Musculoskelet Radiol*, 2017, 21(2):45-62.