

# 肩关节加速 MRI 应用深度学习重建算法的可行性与临床价值

王璇<sup>1</sup>, 王皓<sup>2,3</sup>, 万云天<sup>2</sup>, 陈友芳<sup>2</sup>, 聂春焰<sup>2</sup>, 杜昱升<sup>2</sup>, 何健<sup>3</sup>

1. 东南大学附属中大医院江北院区医学影像科, 江苏 南京 210048; 2. 南京医科大学第四附属医院放射科, 江苏 南京 210031;  
3. 南京医科大学鼓楼临床医学院, 江苏 南京 210008

**摘要:** **目的** 探讨深度学习重建算法(DLR)在肩关节 MRI 中提高图像质量和缩短扫描时间的可行性与临床价值。**方法** 前瞻性纳入 2023 年 6 月至 10 月期间在南京医科大学第四附属医院的 50 例疑似患有肩关节病变的患者,采用 1.5T MRI 行常规序列扫描图像为  $Fse_{con}$  组,使用并行采集加速因子 2 的扫描图像为  $Fse_{fast}$  组,扫描序列包括脂肪抑制质子加权像(PDWI-FS)和 T1 加权像(T1WI),将  $Fse_{fast}$  组传至 Subtle MR<sup>TM</sup> dlr 后获得图像  $Fse_{dlr}$  组。测量三组图像中的冈上肌、肱二头肌长头肌腱、孟唇软骨、肱骨骨髓的信号噪声比(SNR)及冈上肌/孟唇软骨的对比噪声比(CNR)并进行比较,两名放射科医师双盲采用 Likert 4 分法分别对  $Fse_{dlr}$  组与  $Fse_{con}$  组的图像清晰度和伪影进行主观评价,并对这两组的病理异常结构进行诊断效能对比。**结果** 相对于  $Fse_{con}$  组, $Fse_{dlr}$  组扫描时间缩短了 44%,且图像清晰度评分、伪影评分均增高,差异有统计学意义( $P<0.05$ ),两名医师主观评分组内相关性系数为 0.797~0.919。客观评价指标中, $Fse_{dlr}$  组的 SNR 和 CNR 均明显高于  $Fse_{con}$  组与  $Fse_{fast}$  组,差异均有统计学意义( $P<0.05$ )。在两位医师对  $Fse_{con}$  组与  $Fse_{dlr}$  组病理异常结构的评估中,两组的诊断结果均有较好的一致性(Kappa 值:0.675~1.000),在同一名医师的评估中也显示出极好的一致性(Kappa 值:0.771~1.000),其中肱骨骨髓、关节滑囊、肱二头肌长头肌腱的 Kappa 值均高于 0.8。**结论** 将 DLR 算法应用于肩关节 MRI 检查中,能够提高图像质量、缩短图像采集时间,并保证诊断效能,提高检查效率,具有较好的临床价值。

**关键词:** 深度学习重建; 肩关节; 核磁共振; 信号噪声比; 对比噪声比; 图像质量

中图分类号: R445.2 TP183 文献标识码: A 文章编号: 1674-8182(2024)08-1238-06

## Feasibility and clinical value of deep learning reconstruction in accelerated MRI of shoulder

WANG Xuan\*, WANG Hao, WAN Yuntian, CHEN Youfang, NIE Chunyan, DU Yusheng, HE Jian

\* Department of Medical Imaging Department, Jiangbei Branch of Zhongda Hospital, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210048, China

Corresponding author: HE Jian, E-mail: hjxueren@126.com

**Abstract: Objective** To investigate the feasibility and clinical value of the deep learning reconstruction (DLR) algorithm in enhancing image quality and reducing scan time in shoulder MRI. **Methods** Fifty patients suspected of having shoulder joint lesions in the Fourth Affiliated Hospital of Nanjing Medical University from June to October 2023 were prospectively included. Routine sequence scanning images with 1.5T MRI were grouped as  $Fse_{con}$ , while scanning images with parallel acquisition acceleration factor 2 were grouped as  $Fse_{fast}$ . The scanning sequences included fat-suppression proton density-weighted imaging (PDWI-FS) and T1 weighted imaging (T1WI). The  $Fse_{fast}$  group was then transferred to Subtle MRTM dlr to obtain images in the  $Fse_{dlr}$  group. The signal-to-noise ratio (SNR) of supraspinatus muscle, long head tendon of biceps brachii, glenoid labrum cartilage, and humerus marrow, as well as the contrast-to-noise ratio (CNR) of supraspinatus muscle/glenoid labrum cartilage, were measured and compared among the three

DOI: 10.13429/j.cnki.cjcr.2024.08.020

基金项目: 江苏省“十三五”强卫工程青年医学重点人才(QNRC2016041); 南京医科大学科技发展基金一般项目(NMUB20230037)

通信作者: 何健, E-mail: hjxueren@126.com

出版日期: 2024-08-20

groups. Two radiologists blindly evaluated the image clarity and artifacts of the  $Fse_{dlr}$  group and the  $Fse_{con}$  group using the Likert 4-point scale, and compared the diagnostic efficacy of pathological abnormal structures between the two groups.

**Results** Compared with the  $Fse_{con}$  group, the scan time of the  $Fse_{dlr}$  group was shortened by 44%, and the image clarity and artifact scores were higher, with statistically significant differences ( $P<0.05$ ). The intraclass correlation coefficients (ICC) for subjective scores within the two radiologists' groups were 0.797 to 0.919. Among the objective evaluation indicators, the SNR and CNR of the  $Fse_{dlr}$  group were significantly higher than those of the  $Fse_{con}$  group and the  $Fse_{fast}$  group, with statistically significant differences ( $P<0.05$ ). In the evaluation of the pathological abnormal structures of the  $Fse_{con}$  group and the  $Fse_{dlr}$  group by two radiologists, the diagnostic results of the two groups were consistent (Kappa value: 0.675–1.000), and also showed excellent consistency in the evaluation of the same radiologist (Kappa value: 0.771–1.000), among which the Kappa values of humerus bone marrow, joint bursa and long head tendon of biceps brachii were higher than 0.8.

**Conclusion** The application of the DLR algorithm in shoulder MRI examination can improve image quality, shorten image acquisition time, ensure diagnostic efficacy, and improve examination efficiency, demonstrating good clinical value.

**Keywords:** Deep learning reconstruction; Shoulder joint; Magnetic resonance image; Signal-to-noise ratio; Contrast-to-noise ratio; Image quality

**Fund program:** 13th Five-Year Plan Youth Medical Key Talent for the Strong Health Engineering Project of Jiangsu Province (QNRC2016041); General Project of Nanjing Medical University Science and Technology Development Fund (NMUB20230037)

肩关节疼如果不及时治疗,可能会导致慢性肩关节疼痛和不可逆性损伤<sup>[1]</sup>。在临床实践中,磁共振成像(MRI)是评估肩关节损伤最常用的检查之一,可以更准确地显示软组织的结构,包括肌肉、韧带、肌腱和神经等,从而提供更准确的诊断和制定更合理的治疗方案<sup>[2]</sup>。然而,在进行肩关节的MRI扫描时,患者需要将手臂靠紧身体并保持固定位置,这可能会导致不适或疼痛。此外,扫描时间通常需要近10 min甚至更长。对于一些老年患者或急性疼痛患者来说,长时间的扫描可能会让患者感到焦躁和不适,并且可能会造成运动伪影,从而降低图像质量<sup>[3-4]</sup>。因此,降低扫描时间具有重要的临床意义。尽管并行成像、多层并发采集成像和压缩感知等技术不断被提出并应用于临床实践中,但这些技术会降低图像的信噪比或分辨率<sup>[5]</sup>。因此,如何在保证图像质量的同时缩短扫描时间一直是MRI应用领域研究的热点。

近年来,深度学习(DL)算法已经开始应用于MRI临床领域,其不仅可以缩短扫描时间,还能提高图像的信噪比和对比度,并减少运动伪影<sup>[6]</sup>。本研究首次采用了由深透医疗开发的DL算法(Subtle-MR™)对肩关节扫描进行前瞻性临床研究,使用快速自旋回波序列(fast spin echo, Fse),在质子加权像(PDWI-FS)及T1加权像(T1WI)序列中,将应用并行采集与深度学习重建(DLR)的扫描序列与常规扫描序列进行图像质量评价和病理异常结构评估的比较,探讨DLR算法在肩关节MRI的图像质量、诊断效能和缩短扫描时间的可行性与临床价值。

## 1 资料与方法

**1.1 一般临床资料** 对象为2023年6月至10月期间在南京医科大学第四附属医院接受肩关节MRI扫描的连续入选患者。纳入条件:临床上存在肩关节疼痛症状的患者;年龄 $\geq 18$ 岁。排除条件包括:无法完成检查的患者;存在MRI检查禁忌证的患者。本研究采用前瞻性设计,研究已获得南京医科大学第四附属医院伦理委员会的批准(批准编号:20230625-k136),并且所有参与者及其监护人均已签署知情同意书。共纳入50例患者,男性23例,女性27例,年龄( $49.4\pm 14.4$ )岁,BMI为( $24.30\pm 2.77$ )  $\text{kg}/\text{m}^2$ ;导致肩部疼痛病因:慢性退行性改变19例,急性创伤20例及不明原因肩部疼痛11例。

**1.2 仪器与方法** 所有患者均采用1.5T超导MRI机(UMR560, United Image, Shanghai)和16通道肩关节专用线圈。患者采用仰卧位,头部先进,被检测手掌掌心朝上,并用沙袋固定以尽量减少运动伪影。将肩部置于磁场扫描中心,扫描线位于肩胛骨喙突。扫描序列包括:横断位(tra)、矢状位(sag)和冠状位(cor)的PDWI-FS及冠状位(cor)的T1WI;扫描序列分组:对每位患者分别进行常规序列组( $Fse_{con}$ ,扫描时间479 s)及加速序列组( $Fse_{fast}$ ,扫描时间269 s)的扫描, $Fse_{fast}$ 仅在并行采集的加速因子上设置为2.0,其他扫描参数均与 $Fse_{con}$ 一致。 $Fse_{fast}$ 扫描完成后,将图像传入DLR平台(Subtle MR™)进行降噪重建后回传至MRI扫描工作站得到DLR序列组( $Fse_{dlr}$ ,重

建时间 133 s)。具体扫描参数见表 1。

1.3 图像客观评价 由一名放射科技师(13年放射技术经验)在联影工作站(United Image Health Workstation, UIHWS)上,选取  $Fse_{con}$ 、 $Fse_{fast}$ 、 $Fse_{dlr}$  三组图像的 PDWI-FS 与 T1WI 的冠状位,通过勾画 10~100 个像素大小的感兴趣区(ROI)测量获得信号强度(SI)值,分别在肩关节的冈上肌、肱二头肌长头肌腱、孟唇软骨与肱骨骨髓结构勾画圆形 ROI,对同一区域连续测量三次并取其平均 SI 值,同时在肩关节外勾画 100 像素大小的 ROI 测量标准差(SD)值作为背景噪声。根据测得的 SI 值与 SD 值,计算各部位的信号噪声比(signal-to-noise ratio, SNR),同时计算冈上肌与孟唇软骨的对比噪声比(contrast-to-noise ratio, CNR),计算公式为:  $SNR = SI_{组织} / SD$ ,  $CNR = (SI_{冈上肌} - SI_{孟唇软骨}) / SD$ 。

1.4 图像主观评价 由两名放射医师(均有 15 年诊

断经验)在 UIHWS 上对  $Fse_{con}$ 、 $Fse_{fast}$  及  $Fse_{dlr}$  三组图像进行评估,两位医师均不知道图像序列信息及患者临床信息。评估使用 Likert 4 分法<sup>[7]</sup>:4 分,解剖结构显示清晰,无明显伪影,非常适合诊断;3 分,大部分结构显示清晰,伪影轻微,诊断良好;2 分,解剖结构显示有限,有部分伪影,大部分可以诊断;1 分,解剖结构显示不清,伪影明显,无法诊断。两位医师分别对各组的图像清晰度与伪影程度进行主观评分。

1.5 病理异常结构评估 由相同两名放射医师对肩关节病理异常结构进行评估,评估内容包括肩袖肌腱(包括冈上肌肌腱、冈下肌肌腱、肩胛下肌肌腱)、肱二头肌长头肌腱、孟唇软骨、肱骨与滑囊的损伤与病变情况。肩袖肌腱、肱二头肌长头肌腱、孟唇软骨的病变评估为正常、改变(包括术后改变或退行性变)、部分或完全撕裂,等级依次为 0、1、2,同时评估肱骨骨髓损伤及滑囊是否有积液存在<sup>[4]</sup>,详见表 2。

表 1  $Fse_{con}$ 、 $Fse_{fast}$ 、 $Fse_{dlr}$  的 MRI 成像参数  
Tab. 1 MRI imaging parameters of  $Fse_{con}$ ,  $Fse_{fast}$  and  $Fse_{dlr}$

序列组别	扫描参数	视野 (mm <sup>2</sup> )	体素 (mm <sup>2</sup> )	重复时间 (ms)	恢复时间 (ms)	层数	层厚 (mm)	层间距 (mm)	加速因子	扫描/重建时间(s)	DLR
$Fse_{con}$	PDWI-FS-tra	170×170	0.96×0.63×3	1 946	34.98	20	3	20	无	93	无
	PDWI-FS-sag	170×170	0.96×0.63×3	1 895	37.80	20	3	20	无	137	无
	PDWI-FS-cor	170×170	0.96×0.63×3	1 763	34.20	20	3	20	无	127	无
	T1WI-cor	170×170	0.96×0.63×3	490	10.72	20	3	20	无	122	无
$Fse_{fast}$	PDWI-FS-tra	170×170	0.96×0.63×3	1 946	34.98	20	3	20	2	59	无
	PDWI-FS-sag	170×170	0.96×0.63×3	1 895	37.8	20	3	20	2	72	无
	PDWI-FS-cor	170×170	0.96×0.63×3	1 763	34.20	20	3	20	2	67	无
	T1WI-cor	170×170	0.96×0.63×3	490	10.72	20	3	20	2	77	无
$Fse_{dlr}$	PDWI-FS-tra	170×170	0.96×0.63×3	1 946	34.98	20	3	20	2	33	有
	PDWI-FS-sag	170×170	0.96×0.63×3	1 895	37.80	20	3	20	2	33	有
	PDWI-FS-cor	170×170	0.96×0.63×3	1 763	34.20	20	3	20	2	33	有
	T1WI-cor	170×170	0.96×0.63×3	490	10.72	20	3	20	2	33	有

注:PDWI 为质子加权像,T1WI 为 T1 加权像, $Fse$  为快速自旋回波。

表 2 MRI 评估肩关节异常改变评估表

Tab. 2 Evaluation of abnormal changes in shoulder joint by MRI

评估等级	肩袖肌腱	长头肌腱	孟唇软骨	肱骨骨髓	滑囊
0	正常	正常	正常	正常	无积液
1	改变	改变	改变	骨髓水肿	有积液
2	撕裂损伤	撕裂损伤	撕裂损伤	骨折	

1.6 统计学方法 采用 SPSS 26.0 进行统计分析。采用 Kolmogorov-Smirnov 检验分析数据是否符合正态分布,符合正态分布的资料使用  $\bar{x} \pm s$  表示,偏态资料使用  $M(P_{25}, P_{75})$  表示。采用 Kappa 检验评估两位医师之间的主观评分与病理异常结构评估的一致性:  $Kappa \leq 0.2$  为一致性较差,  $0.2 < Kappa \leq 0.4$  为一致性一般,  $0.4 < Kappa \leq 0.6$  为一致性中等,  $0.6 < Kappa \leq 0.8$  为一致性较好,  $0.8 < Kappa \leq 1.0$  为一致性极好。同时,采用组内相关系数(ICC)评估两位医师之间主

观评分一致性,当  $ICC > 0.75$  时表示一致性很好。对两位医师之间、 $Fse_{con}$  组与  $Fse_{dlr}$  组之间的主观评分进行比较并采用 Wilconxon 秩和检验,采用单因素方差分析比较  $Fse_{con}$ 、 $Fse_{dlr}$ 、 $Fse_{fast}$  三组之间的差异,两两比较采用 LSD-t 检验。  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

2.1 各序列扫描时间 本研究中, $Fse_{con}$  组扫描时间为 7 min 58 s, $Fse_{fast}$  组扫描时间为 4 min 29 s, $Fse_{dlr}$  组总重建时间 2 min 12 s,需要注意的是, $Fse_{dlr}$  组由  $Fse_{fast}$  组重建得到,重建不占用扫描时间,相对于  $Fse_{con}$  组, $Fse_{dlr}$  组扫描时间缩短了 44%。见图 1。

2.2 图像质量评价 图像质量客观评价中,在 PDWI 和 T1WI 序列中, $Fse$  组各组织的 SNR 与 CNR 均明显

高于另外两组( $P<0.01$ )。图像质量主观评价中,两名医师对  $Fse_{dlr}$  组图像的清晰度和图像伪影给出的主观评分均高于  $Fse_{con}$  组,差异有统计学意义( $P<0.05$ )。两名医师的主观评分之间一致性很好,ICC 值为0.797~0.919。见表3、表4。

**2.3 肩关节病理评估** 两位医师分别对  $Fse_{con}$  组与  $Fse_{dlr}$  组的图像中的病理异常结构进行评估。一致性评估结果显示,Kappa 值 0.675~1.000,  $P<0.01$ ,表明两组的诊断结果均有较好的一致性。此外,在同一名医师对  $Fse_{con}$  组与  $Fse_{dlr}$  组图像的评估中, Kappa 值 0.771~1.000,  $P<0.01$ ,其中肱骨骨髓、关节滑囊、肱二头肌长头肌腱的 Kappa 值均高于 0.8,表明诊断结果具有极好的一致性。见表5。

**表3** 三组图像的 PDWI 与 T1WI 序列不同组织的 SNR 与 CNR 比较 ( $n=50, \bar{x}\pm s$ )

**Tab. 3** Comparison of SNR and CNR of different tissues in PDWI and T1WI sequences of three sets of images ( $n=50, \bar{x}\pm s$ )

项目	$Fse_{con}$	$Fse_{dlr}$	$Fse_{fast}$	F 值	P 值
PDWI 网上肌 SNR	154.18±44.63	244.28±88.68	143.45±43.19	26.461	<0.001
PDWI 长头肌腱 SNR	26.99±14.18	42.70±19.75	26.38±13.87	13.074	<0.001
PDWI 孟唇软骨 SNR	24.54±10.97	46.65±22.60	25.86±10.44	20.228	<0.001
PDWI 肱骨骨髓 SNR	57.69±24.84	97.95±42.57	53.89±23.99	21.283	<0.001
PDWI 网上肌/软骨 CNR	129.64±40.81	197.63±74.71	117.59±37.90	22.828	<0.001
T1WI 网上肌 SNR	82.41±18.12	169.00±43.70	102.52±27.06	84.462	<0.001
T1WI 长头肌腱 SNR	23.95±10.25	48.81±20.76	31.21±13.23	30.629	<0.001
T1WI 孟唇软骨 SNR	26.62±9.60	60.24±23.32	35.14±14.87	45.177	<0.001
T1WI 肱骨骨髓 SNR	243.51±62.27	508.66±152.23	300.94±92.23	65.282	<0.001
T1WI 网上肌/软骨 CNR	55.79±15.21	108.76±39.27	67.37±23.65	39.978	<0.001

**表5** 两位医师对肩关节病理异常结构的一致性评估 ( $n=50$ )

**Tab. 5** Consistency evaluation of two physicians on pathological abnormal structure of shoulder joint ( $n=50$ )

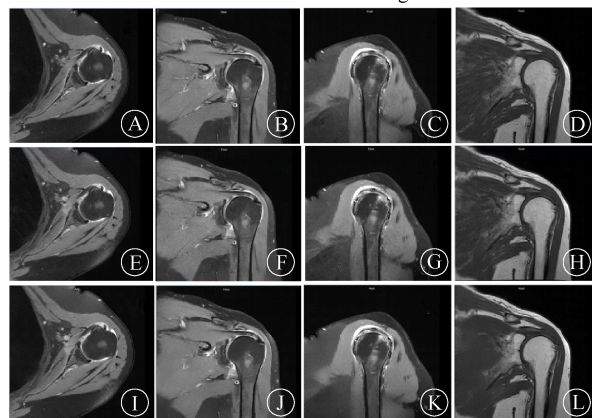
组织	$Fse_{con}$ (医师1 vs 医师2)		$Fse_{dlr}$ (医师1 vs 医师2)		医师1( $Fse_{con}$ vs $Fse_{dlr}$ )		医师2( $Fse_{con}$ vs $Fse_{dlr}$ )	
	Kappa 值	P 值	Kappa 值	P 值	Kappa 值	P 值	Kappa 值	P 值
肩袖肌腱	0.867	<0.001	0.837	<0.001	0.868	<0.001	0.771	<0.001
长头肌腱	0.775	<0.001	0.928	<0.001	0.850	<0.001	0.892	<0.001
孟唇软骨	0.675	<0.001	0.867	<0.001	0.784	<0.001	1.000	<0.001
肱骨骨髓	0.924	<0.001	1.000	<0.001	0.924	<0.001	1.000	<0.001
滑囊	0.831	<0.001	0.884	<0.001	0.884	<0.001	0.831	<0.001

### 3 讨论

在本研究中,笔者提出了一种基于二维  $Fse$  序列的扫描方法,旨在比较  $Fse_{con}$ 、 $Fse_{fast}$  及  $Fse_{dlr}$  的图像对肩关节 MRI 扫描的影响,包括图像质量评估、病理异常结构评估及扫描时间比较。研究结果显示,DL 技术重建后的图像不仅在主观评分和优于传统图像,且在客观指标上拥有更高的 SNR 与 CNR,同时在评估异常结构上与常规扫描图像的诊断效能相当,扫描时间相对常规序列也缩短了 44%。

在进行肩关节 MRI 检查时,患者通常需要保持

PDWI-Tra-FS PDWI-Cor-FS PDWI-Sag-FS T1WI-Cor-FS



注: A~D 为常规序列组 ( $Fse_{con}$ ), E~H 为快速序列组 ( $Fse_{fast}$ ), I~L 为 DLR 组 ( $Fse_{dlr}$ );  $Fse_{dlr}$  图像总体图像更加清晰,且噪音伪影更小; PDWI 为质子加权像, T1WI 为 T1 加权像。

**图1** 三组扫描序列示例图及所需时间

**Fig. 1** Examples of three sets of scanning sequences and required time

**表4**  $Fse_{con}$  与  $Fse_{dlr}$  的主观评价得分和一致性结果 [ $n=50, M(P_{25}, P_{75})$ ]

**Tab. 4** Subjective evaluation scores and consistency results of  $Fse_{con}$  and  $Fse_{dlr}$  [ $n=50, M(P_{25}, P_{75})$ ]

项目	医师1		医师2		ICC	
	清晰度	伪影	清晰度	伪影	清晰度	伪影
$Fse_{con}$	4(4,4)	3(3,4)	4(4,4)	3(3,4)	0.805	0.883
$Fse_{dlr}$	4(4,4)	4(3.75,4)	4(4,4)	4(3,4)	0.797	0.919
Z 值	2.236	4.082	2.121	3.649		
P 值	0.025	<0.001	0.034	<0.001		

固定的姿势。然而,损伤和退变所带来的疼痛和不适往往使患者难以长时间坚持<sup>[8]</sup>。缩短扫描时间能够降低和缓解患者焦虑情绪,减少检查过程的耐受性问题,提高患者的舒适度和满意度<sup>[9]</sup>。其次,缩短扫描时间可以有效降低运动伪影和呼吸伪影的产生和影响,提高图像质量和准确性<sup>[10]</sup>。同时,缩短扫描时间还可以提高 MR 设备的运转效率,具有良好的经济效益和社会效益<sup>[11]</sup>。较短的扫描时间可以增加设备的利用率,缩小患者等待时间,提高医疗机构的工作效率和服务质量。

先前的研究表明,在骨肌系统方面 DLR 具有显

著优势。它可以在缩短成像时间的同时提高 SNR 和对比度,更清晰地显示了局部细节,此外,DLR 还可以提高结构清晰度,改善诊断评估一致性<sup>[12-15]</sup>。本研究结果显示,在主观双盲评价中,应用 DL 技术的 Fse<sub>dlr</sub>组图像不仅整体图像清晰度优于常规序列 Fse<sub>con</sub>组,且伪影明显减少。这主要是因为通过 DL 模型有效抑制了大部分的本底噪音、截断伪影及呼吸引起的运动伪影;在客观评价指标中,Fse<sub>dlr</sub>组在 PDWIFS 与 T1WI 序列上的各组织 SNR 与 CNR 明显高于 Fse<sub>con</sub>组与 Fse<sub>fast</sub>组,这也与前述研究结果一致;在肩关节异常结构检出评估中,对于 Fse<sub>dlr</sub>组和 Fse<sub>con</sub>组的图像,两位医师之间达到了很好的一致性(Kappa>0.750),仅在 Fse<sub>con</sub>组中孟唇软骨一致性稍低(Kappa=0.675),这可能是由于未经降噪的图像在分辨低信号细小结构时易受伪影的干扰所致。

现阶段临床上常用并行成像技术来实现快速成像,该技术利用多个接收线圈来提供额外的空间信息,并通过对接接收线圈的数据进行并行处理,从而减少采样点数实现加速扫描,然而由于信号未能完全覆盖整个图像空间,可能会引入一定程度的图像伪影,从而降低图像的 SNR<sup>[16]</sup>。本研究使用的商业化的 DLR 算法:SubtleMR<sup>TM</sup>,该算法在由超过 300 万张 MRI 图像构成的数据集上进行训练,具有较强的鲁棒性和泛化性能。当低分辨率、低 SNR 的 MRI 图像输入模型后,算法对其进行偏场校正、图像配准和归一化等预处理,通过卷积神经网络(CNN)的深度反向投影网络(DBPN)技术,将低分辨率图像逐步重建为高分辨率图像的同时进行噪音抑制,单张图像在数秒内便可处理完毕,随后发回到 PACS 系统或工作站,实现端到端的自动工作流程,通过该方法可以获得低噪音,高分辨率的 MRI 图像<sup>[17]</sup>。由于 DLR 工作是对已扫描完成的图像进行处理,因此不会占用扫描时间,通过结合 DLR 算法和并行成像技术的优点,可以在实现加速扫描的同时获得高 SNR 的 MRI 图像。与目前市场上集成于高端 MR 设备的 DL 算法相比,SubtleMR<sup>TM</sup>平台采用独立部署的模式,可以无缝融入到工作流程中。同时该平台兼容多种品牌的 MR 设备、PACS 和不同场强的设备,可用于降低全身各组织区域的 MRI 成像,因此在临床工作中具有更为广泛的适应性与灵活性<sup>[18]</sup>。

本研究存在以下局限不足:首先是研究患者数量较少(50例),且病因包括外伤、慢性退变和其他原因,没有对同一种病因进行专门研究,今后可针对单一病理情况进行深入研究,以提高结果的准确性和适

用性;其次,对异常结构的比较评估没有进行有效的外部验证,比如与关节镜、CT 等进行比较,仅与常规扫描序列进行比较,今后可加入更多外部验证手段来补充;再之,虽然研究中两名医师采用双盲评分,但由于 Fse<sub>dlr</sub>组的图像总体观感上明显抑制了噪音,与其他两组图像存在较大的视觉差异,这可能会导致主观偏倚;最后,加速扫描仪使用并行采集技术这一单独变量,未增大体素等其他变量以进一步缩短时间,将在接下来的研究中进一步调整优化参数以探讨 DL 算法的降噪及分辨力性能。

综上所述,应用 DL 算法进行降噪重建在肩关节 MRI 检查具有可行性和较好的临床价值,该技术不仅能够提高图像质量,而且与常规序列相比具有相当的诊断效能,同时 DL 技术还可以缩短图像采集时间,提高检查效率。

**作者贡献声明** 何健对研究方案和稿件的重要内容进行了审阅和修改;王璇、王皓起草和撰写了稿件,收集、分析或解释了本研究的数据;万云天、陈友芳、聂春焰、杜昱升收集、分析或解释了本研究的数据,对稿件内容进行了修改。全体作者都同意发表最后的修改稿,同意对本研究负责,确保研究的真实性和准确性。

**利益冲突** 无

#### 参考文献

- [1] Khazzam MS, Pearl ML. AAOS clinical practice guideline: management of glenohumeral joint osteoarthritis [J]. J Am Acad Orthop Surg, 2020, 28(19): 790-794.
- [2] Expert Panel on Musculoskeletal Imaging, Small KM, Adler RS, et al. ACR appropriateness criteria<sup>®</sup> shoulder pain-atraumatic [J]. J Am Coll Radiol, 2018, 15(11s): S388-S402.
- [3] Niitsu M, Saruya S, Sakaguchi K, et al. Motion-robust MR imaging of the shoulder using compressed SENSE MultiVane [J]. Eur J Radiol Open, 2022, 9: 100450.
- [4] 潘珂,刘倩倩,唐玲玲,等.人工智能-压缩感知与压缩感知在膝关节 MRI 中的加速效率及图像质量评价研究[J].磁共振成像, 2022, 13(5): 94-98.  
Pan K, Liu QQ, Tang LL, et al. Study on acceleration efficiency and image quality of artificial intelligence compressed sensing and compressed sensing in knee MRI [J]. Chin J Magn Reson Imag, 2022, 13(5): 94-98.
- [5] Mazurowski MA, Buda M, Saha A, et al. Deep learning in radiology: an overview of the concepts and a survey of the state of the art with focus on MRI [J]. J Magn Reson Imaging, 2019, 49(4): 939-954.
- [6] 严福华.深度学习 MRI 重建算法的临床应用和发展前景[J].磁共振成像, 2023, 14(5): 8-10.  
Yan FH. The clinical application and development prospect of deep learning MRI reconstruction algorithm [J]. Chin J Magn Reson

- Imag, 2023, 14(5): 8-10.
- [7] Dai X, Yu MM, Pan JW, et al. Image quality and diagnostic accuracy of coronary CT angiography derived from low-dose dynamic CT myocardial perfusion: a feasibility study with comparison to invasive coronary angiography[J]. Eur Radiol, 2019, 29(8): 4349-4356.
- [8] Zaitsev M, MacLaren J, Herbst M. Motion artifacts in MRI: a complex problem with many partial solutions [J]. J Magn Reson Imaging, 2015, 42(4): 887-901.
- [9] Oztek MA, Brunnquell CL, Hoff MN, et al. Practical considerations for radiologists in implementing a patient-friendly MRI experience [J]. Top Magn Reson Imaging, 2020, 29(4): 181-186.
- [10] 王绎忱,张馨心,胡满仓,等.深度学习重建技术在优化前列腺磁共振 T2 加权成像扫描时间和图像质量中的应用价值[J].磁共振成像,2023,14(5):48-52,59.  
Wang YC, Zhang XX, Hu MC, et al. Value of deep learning reconstruction in optimizing prostate MR T2-weighted imaging scanning time and imaging quality[J]. Chin J Magn Reson Imag, 2023, 14(5): 48-52, 59.
- [11] 刘伟军,吴小红,张恩科,等.应用统筹方法优化 MR 应诊流程的效果研究[J].中国医疗设备,2018,33(2):139-142.  
Liu WJ, Wu XH, Zhang EK, et al. Study on the application effect of optimizing the inspection process of MR by critical path method [J]. China Med Devices, 2018, 33(2): 139-142.
- [12] Hahn S, Yi J, Lee HJ, et al. Image quality and diagnostic performance of accelerated shoulder MRI with deep learning-based reconstruction[J]. AJR Am J Roentgenol, 2022, 218(3): 506-516.
- [13] Koch KM, Sherafati M, Arpinar VE, et al. Analysis and evaluation of a deep learning reconstruction approach with denoising for orthopedic MRI[J]. Radiol Artif Intell, 2021, 3(6): e200278.
- [14] Sun S, Tan ET, Mintz DN, et al. Evaluation of deep learning reconstructed high-resolution 3D lumbar spine MRI [J]. Eur Radiol, 2022, 32(9): 6167-6177.
- [15] Foreman SC, Neumann J, Han J, et al. Deep learning-based acceleration of Compressed Sense MR imaging of the ankle[J]. Eur Radiol, 2022, 32(12): 8376-8385.
- [16] Knoll F, Hammernik K, Zhang C, et al. Deep-learning methods for parallel magnetic resonance imaging reconstruction: a survey of the current approaches, trends, and issues [J]. IEEE Signal Process Mag, 2020, 37(1): 128-140.
- [17] Bash S, Wang L, Airriess C, et al. Deep learning enables 60% accelerated volumetric brain MRI while preserving quantitative performance: a prospective, multicenter, multireader trial [J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2021, 42(12): 2130-2137.
- [18] Kidoh M, Shinoda K, Kitajima M, et al. Deep learning based noise reduction for brain MR imaging: tests on phantoms and healthy volunteers [J]. Magn Reson Med Sci, 2020, 19(3): 195-206.

收稿日期:2023-10-31 修回日期:2023-12-27 编辑:叶小舟

(上接第 1237 页)

- [10] Zerna C, Thomalla G, Campbell BCV, et al. Current practice and future directions in the diagnosis and acute treatment of ischaemic stroke[J]. Lancet, 2018, 392(10154): 1247-1256.
- [11] Banerjee C, Chimowitz MI. Stroke caused by atherosclerosis of the major intracranial arteries[J]. Circ Res, 2017, 120(3): 502-513.
- [12] Dobiášová M, Frohlich J. The plasma parameter log (TG/HDL-C) as an atherogenic index; correlation with lipoprotein particle size and esterification rate in apoB-lipoprotein-depleted plasma (FER (HDL)) [J]. Clin Biochem, 2001, 34(7): 583-588.
- [13] Pencina MJ, Larson MG, et al. Predicting the 30-year risk of cardiovascular disease: the Framingham heart study [J]. Circulation, 2009, 119(24): 3078-3084.
- [14] 李娜,郭文玲.血浆致动脉硬化指数在脂代谢方面的研究进展 [J].中西医结合心脑血管病杂志,2022,20(22):4138-4140.  
Li N, Guo WL. Research progress of plasma arteriosclerosis index in lipid metabolism [J]. Chin J Integr Med Cardio Cerebrovasc Dis, 2022, 20(22): 4138-4140.
- [15] 文芮,王誉霖,孟可,等.脑梗死患者血浆致动脉硬化指数与颈动脉粥样硬化的相关性研究 [J].中风与神经疾病杂志,2019,36(8):681-683.  
Wen R, Wang YL, Meng K, et al. Correlation between atherogenic index of plasma and carotid atherosclerosis in patients with cerebral infarction [J]. J Apoplexy Nerv Dis, 2019, 36(8): 681-683.
- [16] Cholesterol Treatment Trialists' Collaboration, Baigent C, Blackwell L, et al. Efficacy and safety of more intensive lowering of LDL cholesterol: a meta-analysis of data from 170, 000 participants in 26 randomised trials [J]. Lancet, 2010, 376(9753): 1670-1681.
- [17] Dobiášová M. Atherogenic index of plasma [log (triglycerides/HDL-cholesterol)]; theoretical and practical implications [J]. Clin Chem, 2004, 50(7): 1113-1115.
- [18] Cai GJ, Liu W, Lv S, et al. Gender-specific associations between atherogenic index of plasma and the presence and severity of acute coronary syndrome in very young adults: a hospital-based observational study [J]. Lipids Health Dis, 2019, 18(1): 99.
- [19] Inoue M, Ota T, Hara T, et al. An initial high national institutes of health stroke scale score and any intracranial hemorrhage are independent factors for a poor outcome in nonagenarians treated with thrombectomy for acute large vessel occlusion: the tokyo/Tamaregistry of acute endovascular thrombectomy (TREAT) study [J]. World Neurosurg, 2022, 165: e325-e330.
- [20] Liu HB, Liu K, Pei LL, et al. Atherogenic index of plasma predicts outcomes in acute ischemic stroke [J]. Front Neurol, 2021, 12: 741754.

收稿日期:2023-08-10 修回日期:2023-10-09 编辑:李方