

论 著

基于深度学习的重建算法在颞下颌关节MRI应用的可行性探讨

穆 晶 袁 颖* 张晓慧
李 妍
首都医科大学附属北京友谊医院
(北京 100050)

【摘要】目的 探讨应用深度学习重建算法提高颞下颌关节MRI图像质量并且降低扫描时间的可行性。方法 前瞻性纳入未经治疗的颞下颌关节紊乱病患者42例，分别行颞下颌关节张、闭口位常规快速自旋回波(fast-spin echo, FSE)PDWI序列，和DLR快速FSE-PDWI扫描。并保存未应用DLR的原始快速FSE-PDWI序列。由两名医师对三组图像(常规PDWI、快速PDWI、DLR快速PDWI)进行LIKERT五分制法评分，内容包括图像整体质量，关节结构显示情况及伪影进行主观评分，应用组内相关系数(intra-class correlation coefficient, ICC)对评分进行一致性检测。在三组图像的相同层面上测量颞部，髁状突颈部，翼外肌，腮腺及脂肪的信号强度(SI)和噪声值(SD)，并分别计算SNR、CNR。采用Friedman秩检验对主观评分和客观评价进行统计学分析。结果 本研究共纳入42名受试者数据，主观评分均采用中位数(四分位数)M(P₂₅, P₇₅)表示。常规FSE-PDWI序列图像的张、闭口位主观整体评分分别为5(4, 5)，4(4, 5)，快速FSE-PDWI序列图像张、闭口主观整体评分分别为4(4, 4)和4(4, 4)，DLR快速FSE-PDWI序列图像的张、闭口主观评分分别为5(5, 5)和5(5, 5)，DLR快速FSE-PDWI主观评分明显高于其余两组。两名医师的主观评价的一致性组内相关系数在0.741~0.779之间，一致性良好。DLR快速FSE-PDWI序列的各个部位SNR分别为62.65±18.77、79.68±22.93、36.10±6.52、44.68±12.68、CNR分别为18.12±9.28、35.00±15.56、28.95±12.23、48.90±19.59,均高于其余两组，且差异具有统计学意义(P<0.05)。DLR快速FSE-PDWI的总扫描时间为108，较常规组(161s)，减少32%。结论 深度学习重建算法可用于颞下颌关节MRI序列扫描中，可以在保证图像质量的同时大幅度的缩短检查时间。

【关键词】颞下颌；深度学习重建技术；
信噪比；对比噪声比
【中图分类号】R782.6
【文献标识码】A
DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2025.07.015

Feasibility Study of Deep Learning Based Reconstruction Algorithm in Temporomandibular Joint MRI

MU Jing, YUAN Ying*, ZHANG Xiao-hui, LI Yan.
Beijing Friendship Hospital Affiliated to Capital Medical University, Beijing 100050, China

ABSTRACT
Objective To explore the feasibility of using deep learning reconstruction algorithms to improve the quality of temporomandibular joint MRI images and reduce scan time. **Methods** A prospective study was conducted on 42 patients with untreated temporomandibular joint disorders. Routine fast spin echo (FSE) PDWI and DLR FSE-PDWI scans were performed in both the open and closed positions of the temporomandibular joint. And save the original fast FSE-PDWI sequence without DLR. Two physicians scored three sets of images (conventional PDWI, fast PDWI, PDWI after DLR) using the Likert five point scale, including subjective evaluation of overall image quality, joint structure display, and artifacts. The intra class correlation coefficient (ICC) was used to test the consistency of the scores. Measure the signal intensity (SI) and noise value (SD) of the temporal region, the neck of the condylar process, lateral pterygoid muscle, parotid gland, and adipose tissue on the same plane in three sets of images, and calculate the SNR and CNR. The Friedman rank test was used for statistical analysis of subjective ratings and objective evaluations. **Results** A total of 42 subjects were included in this study, and Subjective ratings are all represented as M (P₂₅, P₇₅) in this study. The subjective overall scores for the open and closed positions of conventional FSE-PDWI sequence images are 5 (4,5) and 4 (4,5). The subjective overall scores for the open and closed positions of fast FSE-PDWI sequence images are 4 (4,4) and 4 (4,4). The subjective overall scores for the open and closed positions of DLR fast FSE-PDWI sequence images are 5 (5,5) and 5 (5,5). It can be seen that the subjective scores for DLR fast FSE-PDWI sequence images are significantly higher than the other two groups. The intra-class correlation coefficients of subjective ratings by two physicians ranged from 0.741 to 0.779. The SNR values for various parts of the DLR fast FSE-PDWI sequence were 62.65±18.77, 79.68±22.93, 36.10±6.52, 44.68±12.68, and the CNR values were 18.12±9.28, 35.00±15.56, 28.95±12.23, and 48.90±19.59, which were all higher than the other two groups, and the difference was statistically significant (P<0.05). The total scanning time of DLR fast FSE-PDWI was 108 seconds, a decrease of 32% compared to the conventional group (161 seconds). **Conclusion** Deep learning reconstruction algorithms can be used in temporomandibular joint MRI sequence scanning, which can significantly shorten the examination time while ensuring image quality.
Keywords: Temporomandibular; Deep Learning Reconstruction Technology; Signal to Noise Ratio; Comparison of Noise Ratio

颞下颌关节紊乱病是现阶段临床的常见病之一，该病发病机制较为复杂，精准、快速的检查方式对颞下颌关节紊乱病的诊断至关重要。MRI因其无辐射、关节软组织结构显示清楚、可以明确关节盘内病变和移位，已成为颞下颌关节紊乱病诊断的“金标准”^[1-3]。但实际操作中由于扫描时间较长，图像常因患者不能长时间制动而产生运动伪影，影响图像质量。因此，加快MRI图像检查时间具有直接的临床意义。在深度学习重建技术(deep learning reconstrution, DLR)出现以前，临床常用的MRI快速检查技术为压缩感知(compressive sensing, CS)和并行采集技术，旨在可以从较少的原始MR成像数据中重建出较高质量的图像^[4]，并行采集是利用k空间的特性，结合不同部位子线圈的灵敏度信息实现图像的加速采集^[5-6]。其加速因子受限于线圈的通道数及其空间分布，过高的加速因子会导致信噪比降低及混叠伪影。压缩感知是基于合适稀疏变换，使信号可以在远低于奈奎斯特采样定理所要求的采样率下恢复信号，其难点在于寻求合适的稀疏变换以及加速因子，加速因子过大同样会导致采样不足，噪声增加^[7]。

深度学习重建技术是一种基于人工智能和机器学习的新型算法。近年来已被广泛应用于图像后处理以及分析中。其可以在保证优质图像质量的同时大幅度缩短扫描时间，具有很高的临床应用价值^[8]。目前，已有文献表明深度学习重建技术(deep learning reconstruction, DLR)可以应用在膝关节、肩关节、手腕关节及脊柱等骨肌系统的MRI检查中，并被证实了其在缩短成像时间、提升图像信噪比和提高图像分辨率方面具有卓越表现^[9-13]。

本研究将深度学习重建算法应用于颞下颌关节MRI扫描中，旨在探讨深度学习重建算法在颞下颌关节成像的过程中对提升图像质量和缩短扫描时间的应用价值。

1 资料与方法

1.1 一般资料 本研究为前瞻性研究，经首都医科大学附属北京友谊医院伦理委员会的批准，所有受试者及家属均签署知情同意书。本研究连续纳入2024年6月到7月可疑颞下颌关节紊乱病患者42例，年龄12~71岁)。

【第一作者】穆 晶，女，初级技师，主要研究方向：医学影像技术。E-mail: 756474993@qq.com
【通讯作者】袁 颖，男，主管技师，主要研究方向：医学影像技术。E-mail: 715337108@qq.com

纳入标准：无MRI检查禁忌症；临床医生结合病史初步诊断为颞颌关节紊乱病；可以长时间制动以配合检查。排除标准：磁共振检查禁忌症；图像质量差，不满足诊断要求。

1.2 仪器与方法 采用GE750W 3.0T 磁共振扫描仪，32通道头部专用线圈。患者采用仰卧位，头先进，对患者行颞下颌关节常

规矢状位张口PDWI及闭口PDWI序列扫描，及快速矢状位张口及闭口PDWI序列扫描，最后得到三组数据集：常规PDWI扫描记作sag PDWI_{常规}，快速序列扫描所得的原始图像记作sag PDWI_{快速}，快速序列扫描所得的原始图像经深度学习重建后所得的图像记作sag PDWI_{DLR}，各项扫描参数见表1。

表1 各序列扫描参数

	Close sag PD _{快速}	close sag PD _{常规}	Open sag PD _{快速}	Open sag PD _{常规}
TR(ms)	1500	2300	1500	2300
TE(ms)	25	25	25	25
层厚(mm)	2	2	2	2
层间距(mm)	0	0	0	0
回波链	6	6	6	6
视野cm	12×12	12×12	12×12	12×12
采集矩阵	320×192	288×192	320×192	288×192
综合加速因子	2	2	2	2
层数	24	24	24	24
采集时间(s)	108	161	108	161
激励次数NEX	1	2	1	2

注：sag PD快速与sag PD常规均应用并采集ARC；sag PD快速设置NEX=1；sag PD常规序列设置NEX=2。

1.3 图像评价

1.3.1 图像主观评价 将图像去除序列及患者信息后传至GE工作站，由两名十年以上诊断经验的放射科医师进行双盲阅片。分别从关节结构的清晰度，伪影及图像整体质量三个方面进行LIKERT五分制法主观评分。1分：关节结构显示模糊，对比极差，伪影重，整体图像质量差且影像诊断；2分：关节结构显示不清，对比差，有伪影图像质量差且影响部分诊断；3分：关节结构显示尚可，对比中等，有伪影，图像质量较差但不影响诊断；4分：关节结构显示清晰，噪声较少对比较好，无伪影或伪影很轻，图像质量较好并诊断信心高；5分：关节结构清晰，无伪影，对比极好，图像质量极好且诊断信心高。

1.3.2 图像客观评价 将图像数据传至GE后处理工作站进行图像客观分析。分别选取三组图像中相同的序列的髁状突正中矢状层面，在颞部，髁状突颈部，翼外肌，腮腺及脂肪分别设置感兴趣区ROI，分别测量其信号强度(SI)及标准差(SD)，每个位置最终数据取3次测量的平均值，分别记作(SI₁, SI₂, SI₃, SI₄, SI₅)，以及(SD₁, SD₂, SD₃, SD₄, SD₅)，且同一患者不同序列的ROI取相同解剖位置进行测量。由于翼外肌对于评估颞下颌关节紊乱性有重要意义^[14]，所以此处对比噪声比(contrast-to-noise ratio, CNR)我们选取翼外肌作为参照标准。最终计算图像各个感兴趣区的SNR、CNR。公式如下：

$$SNR_{组织i} = SI_{组织i} / SD_{背景}; (\text{注: } i=1,2,3,4,5)$$

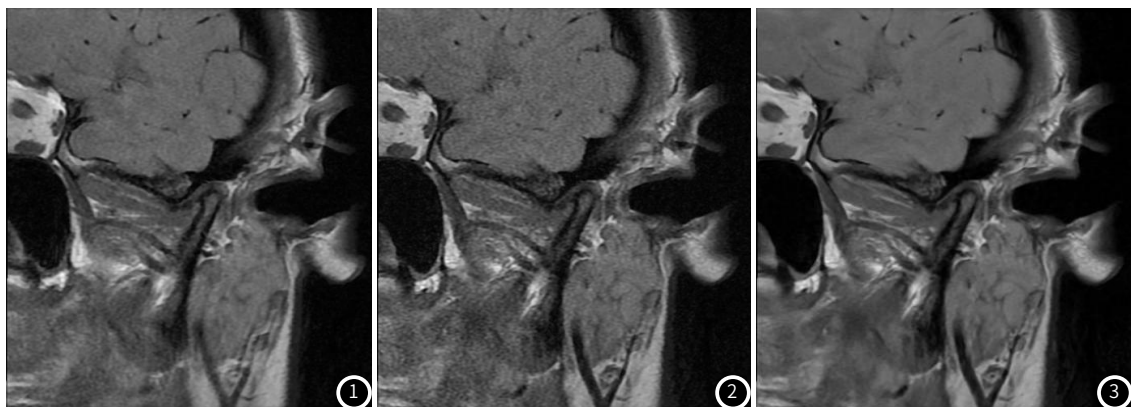
$$CNR_{组织i} = (SI_{组织i} - SI_{肌肉}) / SD_{背景}; (\text{注: } i=1,2,4,5; \text{此处选取翼外肌的信号值作为参照校准})$$

1.4 统计学分析 采用统计学软件SPSS 24.0对图像数据进行统计学分析。应用组内相关系数ICC检验分析两名观察者主观评分的一致性，其值<0.4表示一致性较差，0.41~0.6一致性中等，0.61~0.8一致性良好，0.8以上一致性极好。对SNR、CNR及主观评分进行S-W正态性检验，服从正态分布(P>0.05)的定量资料采用平均数±标准差表示，组间应用单因素方差分析分析其是否具有统计学差异。对于不服从生态分布的定量资料采用中位数(四分位数)M(P₂₅, P₇₅)表示，组间应用Friedman秩检验对其进行统计学分析。P<0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 入组患者资料 本研究依照排除标准排除2名患者，最终纳入42名患者，平均年龄(29±14)岁。重建组Sag PDWI_{DLR}和Sag PDWI_{快速}序列组扫描时间均为108s与常规颞下颌关节矢状位Sag PDWI_{常规}(161s)序列组相比，扫描时间缩短了32%。

2.2 主观评分结果 所有患者的图像整体质量的均可满足诊断要求，如图1-6。两位观察着对三组图像主观评分的一致性检验如表2，一致性较好(ICC=0.7~0.8, P<0.05)。两名医师对三组图像的主观评分结果采用中位数(四分位数)M(P₂₅, P₇₅)描述。PDWI_{DLR}序列的图像结构及边缘清晰度、伪影、图像质量整体评分均与PDWI_{常规}组相当或高于常规组(表3)。三组图像的组间图像整体质量均具有统计学差异(P<0.05)，可见经DLR的图像的总图像质量在统计学上与常规扫描得到的颞颌关节图像相当或主观上优于常规扫描图像。



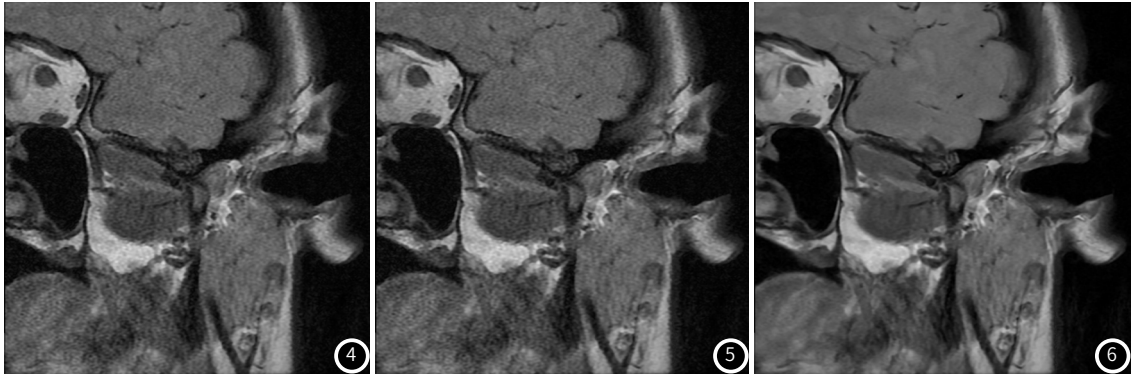


图1-图6 TMJ常规扫描图像和基于DLR的TMJ扫描序列原始图像及重建后图像。图1-3分别为张口位PDWI常规图像、PDWIDLR原始图像、和PDWIDLR重建后图像；图4-6分别为闭口位PDWI常规图像、PDWIDLR原始图像、和PDWIDLR重建后图像。
注：FSE：快速自旋回波；DLR：深度学习重建；PDWI：质子密度加权成像。

2.3 客观评分结果 三组图像的客观数据比较见表4及表5。Sag PDW_{DLR}组图像的SNR、CNR均高于Sag PDWI_{快速}组和Sag PDWI_{常规}组，且差异具有统计学意义($P<0.05$)。同时，重建组Sag PDW_{DLR}图像的SNR及CNR均高于常规序列Sag PDWI_{常规}组的快速序列Sag PDWI_{快速}组，且差异具有统计学意义($P<0.05$)。

表2 图像主观评分一致性比较

评价指标	组内相关系数ICC	P值
组织结构显示清晰度	0.779	$P=0.000<0.05$
伪影	0.737	$P=0.000<0.05$
图像整体质量	0.741	$P=0.000<0.05$

表3 三组图像的主观评分结果M(P₂₅,P₇₅)

开口位	评价指标	PDWI _{快速}	PDWI _{常规}	PDWI _{DLR}	P值
	图像结构及边缘清晰度	4(4,4)	5(4,5)	5(5,5)	0.001
	伪影	4(3,4)	5(4,5)	5(4,5)	0.032
	图像整体质量评分	4(4,4)	5(4,5)	5(5,5)	0.013
闭口位	图像结构及边缘清晰度	4(4,4)	5(4,5)	5(5,5)	0.003
	伪影	4(3,4)	4(4,5)	5(4,5)	0.013
	图像整体质量评分	4(4,4)	4(4,5)	5(5,5)	0.042

注：P值为Friedman秩检验结果，sag PDWI_{快速}为N=1的快速FSE序列，PDWI_{常规}为常规扫描序列，sag PDWI_{DLR}为重建后序列。

表4 闭口位三组序列的客观数据对比

参数		常规	快速	DLR	F/t	P值
CNR	颞部	29.99±5.63	45.18±8.21	67.64±18.62	56.96	<0.05 ①②③
	髁突	27.57±11.64	17.75±6.31	39.73±17.32	30.92	<0.05 ①②③
	腮腺	6.31±4.25	22.07±6.50	32.54±12.68	71.02	<0.05 ①②③
	脂肪	21.16±9.96	36.77±11.08	54.93±21.75	72.63	<0.05 ①②③
SNR	颞部	20.58±5.63	31.5±8.21	36.44±18.62	74.34	<0.05 ①②③
	髁突	59.59±13.68	38.97±8.51	87.91±25.35	82.25	<0.05 ①②③
	腮腺	35.87±7.53	54.09±9.31	81.50±21.26	74.34	<0.05 ①②③
	翼外肌	21.7±6.03	32.01±6.25	48.96±13.90	76.14	<0.05 ①②③

注：①代表常规序列与快速序列的Friedman事后两两比较，②快速序列与重建序列的Friedman事后两两比较，③分别代表常规序列与重建序列的Friedman事后两两比较。

表5 开口位三组序列的客观数据对比

参数		常规	快速	DLR	F/t	P值
CNR	颞部	8.71±3.37	12.2±5.00	18.12±9.28	50.09	<0.05 ①②③
	髁突	17.05±6.23	24.26±10.6	35.00±15.56	59.9	<0.05 ①②③
	腮腺	14.12±4.66	20.14±7.13	28.95±12.23	61.80	<0.05 ①②③
	脂肪	22.10±7.47	33.44±11.20	48.90±19.59	66.91	<0.05 ①②③
SNR	颞部	30.60±5.06	41.65±9.69	62.65±18.77	67.36	<0.05 ①②③
	髁突	38.98±7.65	53.66±14.61	79.68±22.93	71.75	<0.05 ①②③
	腮腺	73.63±21.62	49.92±12.18	36.10±6.52	71.89	<0.05 ①②③
	翼外肌	21.98±4.44	29.77±8.54	44.68±12.68	69.51	<0.05 ①②③

注：①代表常规序列与快速序列的Friedman事后两两比较，②快速序列与重建序列的Friedman事后两两比较，③分别代表常规序列与重建序列的Friedman事后两两比较。

3 讨论

颞下颌关节的MRI常规扫描时间较长,患者常因疼痛而不能长时间制动,易产生运动伪影,影响图像质量。既往临床中常用的快速成像技术主要有并行采集和压缩感知。并行采集是通过减少k空间相位编码线的采集密度从而缩短扫描时间^[15]。但原始数据的欠采样会引起的图像信噪比和分辨率的下降。压缩感知是利用MRI在变换域中的稀疏性,直接采集压缩后的信号,并利用合适的重构算法实现快速信号重建^[7]。但使用过高的加速因子时,不充分的稀疏采集会导致噪声样的混叠伪影^[16]。因此,该两种快速在临床上应用均有一定局限性。

本文中所应用的AIR Recon DL是一种从欠采样的k空间数据中重建高质量MR图像的方发。通过使用卷积神经网络CNN对400余万个重建前的原始数据进行训练^[17],训练不同的网络架构与带噪声或无噪声的图像样本对原始图像进行降噪处理,试图从带噪声的输入中推断出“纯净”图像,并显示接近于全采样的图像细节^[18]。本研究首次将深度学习重建技术应用于临床颞下颌关节MRI临床扫描中,探讨其在临床应用中的可行性。

结果发现,快速扫描序列组相比常规扫描序列组,SNR、CNR均有不同程度的降低,差异具有统计学意义($P<0.05$)。这是由于在加速因子和相位编码矩阵相同的情况下,快速序列组使用较少激励次数,图像采集时间减少的同时牺牲了SNR。但经DLR处理后的图像的SNR、CNR显著提升,优于常规序列组,且差异具有统计学意义($P<0.05$)。常规扫描序列应用的并行采集技术,虽能加快扫描速度,但k空间的欠采样降低了图像的SNR。此外,DLR技术是通过算法去除图像噪声,可以通过应用经过数千万次的拟合迭代计算、深度优化后的深度卷积神经网络模型有针对性的减少噪声和截断伪影^[13]。因此,DLR技术在降低MR图像噪声,提高图像SNR方面优势显著,这与张雨^[12]应用DLR在腰椎方面降噪研究,武夏夏等^[13]应用DLR技术在膝关节MR扫描研究,王绎忱^[19]等在应用DLR技术的前列腺MR扫描研究的结果相一致。

在主观评价上,经DLR重建后图像的结构及边缘清晰度,伪影,图像质量整体评分均优于快速扫描序列组及常规扫描序列组,且评分有统计学差异($P<0.05$),可见DLR相较于常规重建算法可以获得更好图像锐利度,清晰度,细节显示能力。此外,颞下颌关节PDWI_{DLR}序列组相较于常规序列组,扫描时间缩短了32%。因此,DLR可以降低扫描时间的同时改善由于采样数据不足及传统重建算法所导致的图像质量下降,一定程度上弥补了原有颞下颌关节MRI快速成像技术的缺点。

本研究具有一定的局限性:(1)研究样本量不足,后期需累积扩大样本量。(2)本研究序列据经验所设置的并行采集加速因子为2,在满足图像质量的前提下,进一步的增大加速因子可以大幅度减少扫描时间,在以后研究中,可以尝试设置不同的加速因子,以寻求更高的扫描效率。(3)本研究并未与压缩感知进行对比,后期可以继续研究深度学习结合压缩感知技术应用于颞下颌关节扫描的可行性。

4 结论

综上所述,FSE PDWI_{DLR}可以明显缩短颞下颌关节的扫描时间,并且其图像质量在主观评分及客观定量上均优于原始图像,同时具有与原始图像相同的诊断效能,可以代替和补充常规PDWI序列用于颞下颌关节的扫描。

参考文献

- [1]Taskaya-Yilmaz N, Ogutcen-Toller M, Saracy S.Relationship between the TMJ disc and condyle position on MRI and occlusal contacts on lateral excursions in TMD patients[J].J Oral Rehabil, 2004,31(8):754-758.
- [2]ZHAO L Q, WEN H, LI J Y, et al.Improving image quality in portal venography with spectral CT imaging[J].Eur J Radiol, 2012,81(8):1677-1681.
- [3]Fiona Mmcqueen,Nealstewart,Jeffcrabbe,et al.Magnetic resonance imaging of the wrist in early rheumatoid arthritis reveals progression of erosions despite clinical improvement[J].Annals of Rheumatic Diseases, 1999, 58(3): 156-163.
- [4]Lustig M, Donoho D, Pauly JM. Sparse MRI: the application of compressed sensing for rapid MR imaging. Magnet Reson Med, 2007, 58: 1182-1195.
- [5]Fritz J, Guggenberger R, Del Grande F. Rapid musculoskeletal MRI in 2021: clinical application of advanced accelerated techniques[J]. AJR Am J Roentgenol, 2021, 216(3): 718-733.
- [6]Grisworld MA, Jakob PM, Heidmann RM, et al. Generalized autocalibrating partially parallel acquisition (GRAPPA) [J]. Magn Reson Med, 2002 47(6): 1202-1210.
- [7]张桂珊,肖刚,戴卓智,等.压缩感知技术及其在MRI上的应用[J].磁共振成像, 2013(4): 314-320.
- [8]Shanshan Wang, Zhenghang Su, Leslie Ying, et al. Accelerating magnetic resonance imaging via deep learning[C]. 2016 IEEE 13th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI 2016) IEEE, 2016.
- [9]Qiu D F, Zhang S X, Liu Y, et al. Super-resolution reconstruction of knee magnetic resonance imaging based on deep learning[J]. Comput Methods Programs Biomed, 2020, 187: 105059.
- [10]Kaniewska M, Deininger-Czermak E, Getzmann J M, et al. Application of deep learning-based image reconstruction in MR imaging of the shoulder joint to improve image quality and reduce scan time[J]. European Radiology, 2022: 1-13.
- [11]Herrmann J, Gassenmaier S, Keller Gabriel, et al. Deep Learning MRI reconstruction for accelerating turbo spin echo hand and wrist imaging: a comparison of image quality, visualization of anatomy, and detection of common pathologies with standard image[J]. Academic radiology, 2023, 30(11): 2606-2615.
- [12]张雨,徐旭,肖奕,等.基于深度学习重建算法在腰椎MRI中的降噪应用研究[J],中国医疗设备 2021, 36(10): 19-23.
- [13]武夏夏,陆雪芳,刘昌盛,等.深度学习图像重建算法在膝关节加速MRI中的临床应用研究[J],磁共振成像, 2023, 14(5): 53-59.
- [14]裴宇文,曾春光,杨光明,等.颞下颌关节紊乱综合征的MRI诊断价值[J].江西医药, 2020, 55(10): 1522-1524.
- [15]朱熹,叶靖,王志军,等.并行采集技术在头颅磁共振中产生伪影的原因及处理方法[J].中国物理杂志, 2019, 36(09): 1039-1044.
- [16]杨晶,李琼阁,吴涛,等.深度学习重建法提高磁共振高分辨海马冠状位图像质量的比较研究.磁共振成[J], 2023, 14(5): 21-24, 30.
- [17]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.
- [18]Eo T, Jun Y, Kim T, et al. KIKI-net: cross-domain convolutional neural networks for reconstructing undersampled magnetic resonance images[J]. Magnetic Resonance in Medicine, 2018.
- [19]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.

(收稿日期: 2024-11-15)

(校对编辑: 赵望洪、江丽华)