

人工智能辅助压缩感知技术在肩关节 MRI 中的应用

袁颖¹,程天馨¹,钟朝辉¹,韦捷²,于丹²,徐辉¹

(1. 首都医科大学附属北京友谊医院放射科,北京 100050;

2. 上海联影医疗科技股份有限公司,上海 201800)

[摘要] **目的:**探讨人工智能辅助下的压缩感知(Artificial intelligence compressed sensing,ACS)技术在肩关节 MRI 成像中对图像质量和缩短扫描时间的应用价值。**方法:**招募健康志愿者 27 例,应用联影 3.0T MR 行肩关节 MRI 扫描,对受试者均应用并行采集技术(PI)以及 ACS 技术扫描肩关节横轴位 PDWI、矢状位 PDWI、冠状位 T₂WI、冠状位 T₁WI 序列,4 个序列使用 PI 技术的综合加速因子分别为 1.77、1.72、1.60、1.87,使用 ACS 技术的综合加速因子分别为 3.23、3.01、2.81、2.86。由两名医师从关节图像结构显示情况、脂肪抑制情况、伪影及图像整体情况四方面进行评分。在两组图像相同层面位置测量冈上肌、肱骨头均匀组织的信号强度(SI)和噪声值(SD),计算冈上肌和肱骨头 SNR 和 CNR。采用配对样本 *t* 检验和 Mann-Whitney U 检验对主观评分和客观评价指标进行统计学分析。**结果:**PI 在横轴位 PDWI、矢状位 PDWI、冠状位 T₂WI、冠状位 T₁WI 的主观评分分别为 4.89±0.33、4.85±0.46、4.85±0.46、4.85±0.46,ACS 为 4.92±0.27、4.92±0.27、4.88±0.33、4.92±0.27,差异无统计学意义(*P*>0.05)。PI 在横轴位 PDWI、矢状位 PDWI、冠状位 T₂WI、冠状位 T₁WI 测量冈上肌 SNR 分别为 25.08±4.08、30.40±6.93、10.37±1.95、17.53±3.17,低于 ACS 的 31.77±6.83、38.95±7.05、13.22±2.47、20.09±5.95,差异有统计学意义(*P*<0.05)。ACS 组总扫描时间为 241 s,较 PI 组(438 s)比较,减少了 45%。**结论:**应用 ACS 技术扫描肩关节 MRI,可以在保证图像的质量的前提下,大幅减少扫描时间,为临床提供高效的检查。

[关键词] 肩关节;磁共振成像;人工智能

[中图分类号] R323.42;R445.2

[文献标识码] A

[文章编号] 1008-1062(2024)07-0503-05

DOI:10.12117/jccmi.2024.07.011

Application of artificial intelligence compressed sensing technique in shoulder joint MRI

YUAN Ying¹, CHENG Tian-xin¹, ZHONG Chao-hui¹, WEI Jie², YU Dan², XU Hui¹

(1. Department of Radiology, Beijing Friendship Hospital, Capital Medical University, Beijing 100050, China;

2. United Imaging Healthcare, Shanghai 201800, China)

Abstract: Objective: To explore the application value of artificial intelligence compressed sensing (ACS) technology in shoulder joint MRI imaging for image quality and shortening scanning time. **Methods:** Twenty-seven healthy volunteers were recruited, and the shoulder joint MRI scanning was performed using 3.0T MR scanner. Parallel acquisition technology (PI) and ACS technology were used to scan shoulder joint transverse PDWI, sagittal PDWI, coronal T₂WI, and coronal T₁WI sequences in all subjects. The combined acceleration factors for the four sequences were 1.77, 1.72, 1.60, and 1.87 by using the PI technique; 3.23, 3.01, 2.81, and 2.86 by using the ACS technique, respectively. Two doctors scored the joint image structure display, fat suppression, artifacts and the overall image. The signal intensity(SI) and noise value(SD) of the homogenous tissue of the supraspinatus muscle and humeral head were measured at the same level of the two images, and the SNR and CNR of the supraspinatus muscle and humeral head were calculated. Statistical analyses of subjective scores and objective evaluation indicators were performed using paired-sample *t*-tests and Mann-Whitney U-tests. **Results:** The subjective scores of PI on axial PDWI, sagittal PDWI, coronal T₂WI and coronal T₁WI were 4.89±0.33, 4.85±0.46, 4.85±0.46 and 4.85±0.46, while those of ACS were 4.92±0.27, 4.92±0.27, 4.88±0.33 and 4.92±0.27, with no significant statistical difference(*P*>0.05). The SNR of the supraspinatus muscle measured by PI on axial PDWI, sagittal PDWI, coronal T₂WI and coronal T₁WI were 25.08±4.08, 30.40±6.93, 10.37±1.95 and 17.53±3.17, which were lower than 31.77±6.83, 38.95±7.05, 13.22±2.47 and 20.09±5.95 of ACS, and the difference was statistically significant (*P*<0.05). The total scan time in the ACS group was 241 s, which was a 45% reduction compared to the PI group (438 s). **Conclusion:** The application of ACS technology to scan shoulder joint MRI can significantly reduce the scanning time and provide efficient examination for the clinic on the premise of ensuring the image quality.

Key words: Shoulder Joint; Magnetic Resonance Imaging; Artificial Intelligence

肩关节是人体上肢最为灵活的关节,解剖结构复杂,韧带、孟唇、肌肉等的损伤^[1]。常规 X 线、CT 扫描技术比较复杂。临床上常见的肩关节损伤主要是指肩袖、韧带、孟唇、肌肉等的损伤^[1]。常规 X 线、CT 扫描技术虽然在显示骨性结构方面具有一定的优势,但是

[收稿日期] 2023-11-14;**[修回日期]** 2023-12-12

[作者简介] 袁颖(1987-),男,北京人,主管技师。E-mail:715337108@qq.com

[通信作者] 徐辉,首都医科大学附属北京友谊医院放射科,100050。E-mail:mr_xuhui@163.com

[基金项目] 科技部重点研发计划(2022YFC2409403);国家自然科学基金项目(52227814)。

软组织对比显示不佳。MRI 检查具有无创、较高的软组织分辨率和无辐射危害等特点,已成为肩关节疾病的首选检查^[2-3]。临床上肩关节 MRI 扫描时间较长,图像常因患者不能长时间固定不动而产生运动伪影,影响诊断结果。并行采集技术(Parallel imaging,PI)是根据 K 空间的特性利用线圈灵敏度信息实现图像加速采集,其中加速因子的使用受限于线圈通道数及其空间分布^[4]。压缩感知是在合适的变换域中开发稀疏性,从而从欠采样 K 空间中恢复图像信息,其中压缩感知的难点之一是找到合适的稀疏变换^[5],过高的加速因子会使图像产生伪影和信噪比降低。

人工智能辅助下的压缩感知(Artificial intelligence compressed sensing,ACS)技术由美国食品药品监督管理局认证,采用卷积神经网络来加速图像获取过程。尽管过往基于卷积神经网络的方法展示出卓越的重建质量,但由于这些网络固有的“黑箱”特性,它们在临床环境中的性能和可靠性往往难以预测。为了解决这种不确定性,ACS 通过将训练后的人工智能模块的输出作为额外的约束条件,融合进压缩感知框架中。这种整合是通过引入一个正则项实现的,该项负责处理重建图像与人工智能预测图像之间的差异^[6]。ACS 神经网络的训练使用了由水膜(2%)和志愿者(98%)获取的两百万张完全采样的图像数据集。同时,迭代过程中采用的架构设计源于 K 空间,包含多尺度稀疏化。这一数学模型综合了压缩感知、部分傅里叶和并行成像的组成部分^[7]。根据模拟测试,ACS 能够纠正人工智能模型输出的

错误,与完全采样的金标准达到高度一致。国内外已有少量临床研究^[8-9]发现应用 ACS 技术可以在保障图像质量的前提下,大幅缩短扫描时间。国内 ACS 技术应用于肩关节的文献报道较少。本研究将 ACS 这一新技术应用于肩关节 MRI 扫描,通过与常规 PI 技术进行比较,探讨 ACS 技术在肩关节 MRI 成像中对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

招募 2023 年 8—10 月在我院行肩关节 MRI 检查的健康志愿者 27 例,男 10 例,女 17 例,年龄 23~70 岁,平均(35.11±10.53)岁。纳入标准:无肩关节手术史者。排除标准:体内有植入物(如心脏起搏器、电子耳蜗、金属血管夹等)、无法长时间配合检查者、孕妇及哺乳期女性。

本研究经我院伦理委员会通过,所有患者均签署知情同意书。

1.2 仪器与方法

采用联影 uMR Athena 3.0T 超导 MRI 扫描仪,12 通道肩关节 MRI 专用线圈。患者扫描采用头先进、仰卧位扫描,双手臂置于体侧、掌心朝前,线圈包裹肩关节并使用绑带固定,使其更好贴近肩关节,人体适当倾斜(抬高健侧肩关节),并尽量使肩关节靠近检查床中央。对受试者均应用并行 PI 以及 ACS 技术扫描肩关节横轴位 PDWI、矢状位 PDWI、冠状位 T₂WI、冠状位 T₁WI 序列,记作 PI 组和 ACS 组。各序列扫描参数见表 1。

表 1 各序列扫描参数

	轴位 PDWI		矢状位 PDWI		冠状位 T ₂ WI		冠状位 T ₁ WI	
	PI	ACS	PI	ACS	PI	ACS	PI	ACS
TR(ms)	2000	2000	2000	2000	2698	3501	500	500
TE(ms)	25	25	25	25	70	70	9	15
层厚	3	3	3	3	3	3	3	3
层间距	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
带宽(Hz/pixel)	400	400	400	400	400	400	400	400
回波链	7	7	7	8	15	19	3	3
视野(mm×mm)	160×160	160×160	160×160	160×160	160×160	160×160	160×160	160×160
采集矩阵	320×240	320×240	304×228	304×228	320×240	320×240	304×243	304×243
综合加速因子	1.77	3.23	1.72	3.01	1.6	2.81	1.87	2.86
层数	20	20	20	20	20	20	20	20
采集时间(s)	122	66	134	66	105	59	77	50

1.3 图像评价

1.3.1 图像主观评价

将图像上传本院 PACS 系统。去除图像上显示的序列参数,由 2 名 5 年以上骨关节 MRI 诊断经验的医师双盲阅片,从关节图像结构显示情况、脂肪抑

制情况、伪影及图像整体情况(即诊断信心)四方面进行评分:5 分:组织结构显示佳,无伪影,脂肪抑制序列脂肪得到充分抑制,诊断信心高;4 分:组织结构显示较好,脂肪抑制序列脂肪得到较好抑制,诊断信心较高;3 分:组织结构显示中等,脂肪抑制序列

脂肪得到部分抑制,诊断信心中等;2分:组织结构显示尚可,有伪影但不影响诊断,脂肪抑制序列脂肪得到少量抑制,诊断信心尚可;1分:组织结构显示不清楚,伪影较严重,脂肪抑制序列脂肪无抑制,影响诊断。整体图像质量评分 ≥ 3 分为符合诊断要求。取2名医师的评分均值作为主观评价结果。

1.3.2 图像客观评价

将图像传至联影后处理工作站,由一位具有5年以上MRI诊断经验医师独立进行ROI的选取和客观数据分析。分别选取两组图像中相同序列的同一层面,在肱骨头、冈上肌肌腹及背景中勾画ROI,避开伪影区域,ROI面积分别为20~30mm²、70~100mm²、70~100mm²,测量其信号强度(Signal intensity,SI)及标准差(Standard deviation,SD),每个位置测量3次取平均值。同一患者两组ROI取相同位置,计算图像的SNR和CNR。

公式:SNR_{冈上肌}=SI_{冈上肌}/SD_{冈上肌};

SNR_{肱骨头}=SI_{肱骨头}/SD_{肱骨头};

CNR=(SI_{冈上肌}-SI_{肱骨头})/SD_{背景}。

1.4 统计学分析

采用统计学软件SPSS 21.0进行数据分析。对计量资料先进行正态性和方差齐性检验,如果数据符合正态分布且方差齐,采用配对样本 t 检验进行组比较;不符合正态分布或方差不齐,则采用Mann-Whitney U检验。所有数据以 $\bar{x}\pm s$ 表示, $P<$

0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 主观评价结果

两组图像的主观评价结果见表2和图1~8。两组图像整体评分均 >3 分,满足诊断要求。两组图像在关节图像结构显示情况、脂肪抑制情况及图像整体情况主观评分比较均无统计学差异($P>0.05$)。冠状位T₁WI序列ACS组的伪影评分高于PI组,差异有统计学意义($P<0.05$)。

2.2 客观评价结果

两组图像的客观数据比较结果见表3。ACS组四个序列的SNR_{冈上肌}和SNR_{肱骨头}均高于PI组,差异均有统计学意义(均 $P<0.05$)。两组的CNR数值差异无统计学意义(均 $P>0.05$)。ACS组总扫描时间为241s,较PI组的438s减少了45%。

3 讨论

肩关节MRI检查时间较长,由于疼痛影响或患者不耐受等原因,易产生运动伪影,影响诊断结果。针对这个问题,临床上可使用两种方法:K空间螺旋桨采集技术^[10-11]和快速采集技术^[12]。K空间螺旋桨采集技术是FSE与K空间放射状填充技术的结合,通过放射状的填充K空间方式增加K空间中心区域信号重叠,消除层面内的运动伪影^[13],其缺点是扫描

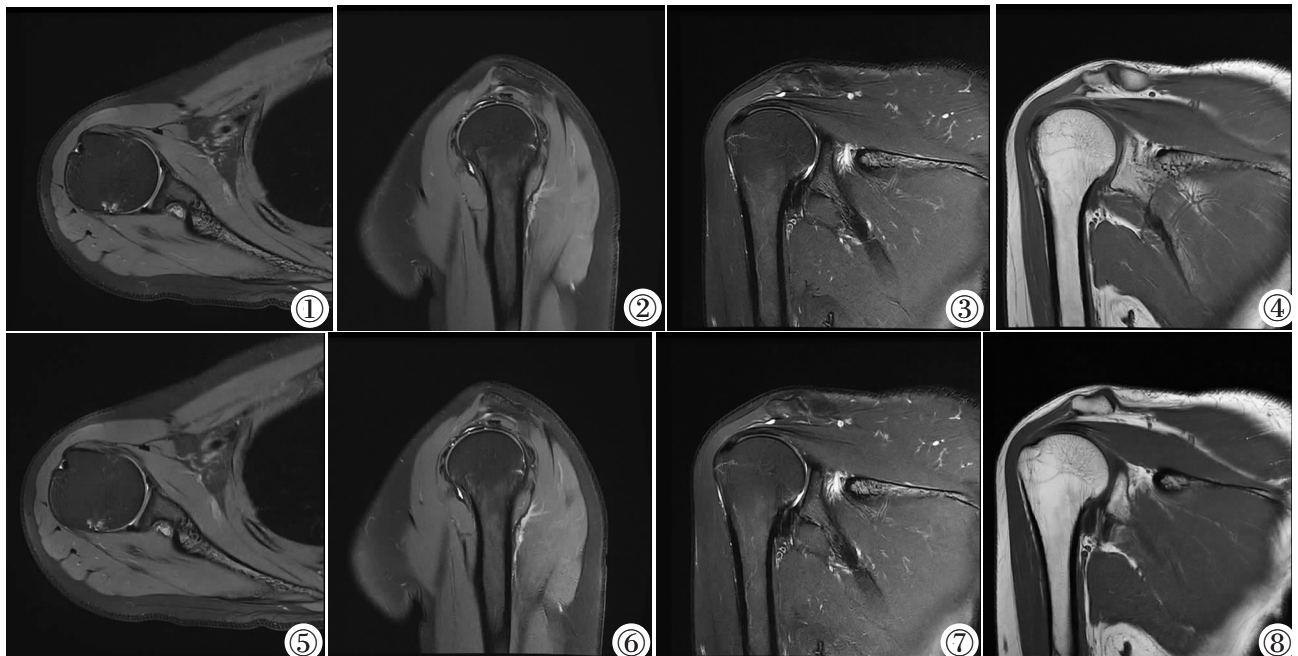


图1~8 PI组和ACS组肩关节MRI图像。图1~4分别为PI组肩关节横轴位PDWI、矢状位PDWI、冠状位T₂WI、冠状位T₁WI图像。图5~8分别为ACS组肩关节横轴位PDWI、矢状位PDWI、冠状位T₂WI、冠状位T₁WI图像。两组图像主观评价无显著差异。

Figure 1-8. MRI images of the shoulder joint in the PI group and ACS group. Figure 1~4 show the transverse axial PDWI, sagittal PDWI, coronal T₂WI and coronal T₁WI images of the shoulder joint in the PI group, respectively. Figure 5~8 show the transverse axial PDWI, sagittal PDWI, coronal T₂WI, and coronal T₁WI images of the shoulder joint in the ACS group, respectively. There is no significant difference in subjective evaluation between the two groups.

表 2 ACS 与 PI 图像主观数据比较

		组织结构显示			伪影			脂肪抑制			诊断信心		
		评分	P	Z	评分	P	Z	评分	P	Z	评分	P	Z
轴位 PDWI	PI	4.85±0.37	0.39	-0.86	5	0.564	-0.578	5	1	0	4.89±0.33	0.641	-0.466
	ACS	4.92±0.27											
矢状位 PDWI	PI	4.96±0.20	0.086	-1.719	4.85±0.46	0.721	-0.358	5	1	0	4.85±0.46	0.616	-0.501
	ACS	4.81±0.40											
冠状位 T ₂ WI	PI	4.85±0.37	0.39	-0.86	4.54±0.81	0.199	-1.214	5	1	0	4.85±0.46	0.96	-0.05
	ACS	4.92±0.27											
冠状位 T ₁ WI	PI	4.85±0.37	0.017	-2.38	4.65±0.56	0.035	-2.113	5	1	0	4.85±0.46	0.616	-0.501
	ACS	4.54±0.51											

表 3 ACS 与 PI 图像客观数据比较

		SNR _{网上肌}			SNR _{股骨头}			CNR		
		数值	P	Z/F	数值	P	Z/F	数值	P	Z/F
轴位 PDWI	PI	25.08±4.08	<0.001	-3.752	8.80±1.88	0.001	-5.783	83.18±14.29	0.362	0.847
	ACS	31.77±6.83								
矢状位 PDWI	PI	30.40±6.93	0.001	-4.777	9.97±2.05	0.001	-3.175	78.54±18.41	0.277	1.208
	ACS	38.95±7.05								
冠状位 T ₂ WI	PI	10.37±1.95	<0.001	-4.575	8.03±1.66	<0.001	-4.118	18.30±7.93	0.341	-0.952
	ACS	13.22±2.47								
冠状位 T ₁ WI	PI	17.53±3.17	0.012	-3.789	21.32±6.88	0.001	-2.974	153.58±40.15	0.129	2.381
	ACS	20.09±5.95								

时间较长且易产生麦芒伪影,影响诊断结果。并行采集技术和部分傅里叶采集技术是临床常用的快速采集技术,其利用 K 空间的特性减少数据的采集从而减少扫描时间,但过少的数据采集会带来各种伪影^[14]。压缩感知技术利用 MRI 在变换域中的稀疏性,再从欠采样 K 空间中恢复图像信息,但在使用高加速因子时,不充分的稀疏采集会导致噪声样的混叠伪影^[15]。ACS 技术是在压缩感知技术的基础上结合卷积神经网络,从大量全采样的图像中学习图像结构与内容信息,再将此类先验信息应用到亚采样图像重建中,减少图像重建所需的采样点数目,从而缩短采集时间并提供满足临床诊断的图像^[16]。Zhao 等^[17]通过比 ACS、压缩感知和 PI 在踝关节 MRI 应用中发现 ACS 在设置加速因子为 3.2~3.3 时,可以获得与常规扫描相同诊断效能的图像,扫描时间缩短 32%~43%,因此本研究设置 ACS 加速因子为 2.81~3.23,通过与常规 PI 技术进行比较,探讨 ACS 技术在肩关节 MRI 成像中对图像质量和缩短扫描时间的应用价值。

本研究通过对比 PI 组和 ACS 组图像质量发现,ACS 组四个序列的 SNR_{网上肌}和 SNR_{股骨头}均高于 PI 组,差异均有统计学意义(均 P<0.05),其主要原因是 PI 组应用并行采集技术,有研究发现^[18]在高低场强的头颅 MRI 中,当加速因子小于 2.5 时,其降低 SNR 的缺陷和伪影几乎可以忽略。肩关节扫描易

受患者呼吸和运动的影响,为了减少并采伪影,加速因子设置较低(AF=1.6~1.87),扫描时间减少 50%左右,但同时也降低了图像的 SNR。压缩感知技术加速因子的最优设置是当前研究的热点^[19],张浩南等^[20]在探索压缩感知高倍数加速因子对颈动脉 3D-TOF-MRA 的影响研究中发现,压缩感知加速因子设置为 6 时,可确保图像质量前提下并降低扫描时间 46.51%;加速因子为 8 时,图像质量减低,影响诊断,可见压缩感知应用高加速因子会带来漏诊、误诊的风险。潘珂等^[21]在对比压缩感知和 ACS 在膝关节 MRI 应用中发现 ACS 具有更高加速效率,在膝关节质子密度加权序列中,在保证图像质量的前提下能将扫描时间缩短 57%。本研究 ACS 组应用 ACS 技术,加速因子设置为 2.81~3.23,总扫描时间为 241 s,与 PI 组比较(438 s),减少了 45%。主观评价方面,两组图像在关节图像结构显示情况、脂肪抑制情况及图像整体情况主观评分比较均无统计学差异(P>0.05),与查福祥等^[22]在探索 ACS 技术在宫颈癌中的应用价值的结果一致,可见 ACS 技术可以在保障图像质量的前提下大幅缩短扫描时间。ACS 组冠状位 T₁WI 图像的伪影评分高于 PI 组,差异有统计学意义(P<0.05),这可能与脂肪抑制和扫描时间有关:冠状位 T₁WI 没有抑制脂肪信号,脂肪在 T₁WI 是高信号,使用 ACS 技术扫描时间短,患者发生运动的几率降低,不易产生伪影。此外有研究表明^[23],ACS 技

术中的人工智能模块能在高速加速水平的同时,减轻传统重建方法所导致的伪影,在提高成像速度的同时抑制运动伪影的产生。

本研究具有一定的局限性:第一,图像均来自健康志愿者,无肩关节疾病影响,需要纳入临床肩关节疾病的患者开展进一步探究;第二,采集样本较小,可能有偏差,需积累扩大样本量,本研究的目的在于探究 ACS 是否能得到足够的图像质量,基于这一目的,本研究的样本已经可以得出初步可靠结果;第三,本研究采用的 ACS 技术加速因子设置为 2.81~3.23,在保证图像质量的前提下,扫描时间减少约 45%,进一步加大加速因子可更大幅度减少扫描时间,但有可能降低图像质量,后期可以设置不同的加速因子,寻找能满足临床需求的最佳数值,最大程度的降低扫描时间;第四,本研究没有与压缩感知对比,后期可以设置相关内容,探讨 ACS 与压缩感知对图像影响的差异。

综上所述,肩关节 MRI 结合 ACS 技术克服了常规扫描时间长的缺点,在保证图像质量的前提下,缩短了扫描时间。对肩关节疼痛不能长时间保持固定姿势的患者,可以在 5 分钟内完成检查,为临床提供高效的检查方案。

[参考文献]

- [1]邓兴,祁艳梅,陈晓飞,等. 3D MRI 评价肩关节损伤的技术进展[J]. 临床放射学杂志,2020,39(11):2346-2349.
- [2]廖荣信,张亚林,瞿中威,等. 3.0T MR 肩关节造影对肩袖损伤的诊断价值分析[J]. 医学影像学杂志,2019,29(1):120-123.
- [3]李潇,徐繁,李桂萍,等. 磁共振平扫及关节腔造影在肩关节损伤诊断的价值研究[J]. 河北医学,2019,25(1):160-162.
- [4]Griswold MA, Jakob PM, Heidemann RM, et al. Generalized Autocalibrating Partially Parallel Acquisitions (GRAPPA) [J]. Magn Reson Med, 2002, 47(6): 1202-1210.
- [5]Geethanath S, Reddy R, Konar AS, et al. Compressed sensing MRI: a review[J]. Crit Rev Biomed Eng, 2013, 41(3): 183-204.
- [6]Li G, Hennig J, Raithel E, et al. An L1-norm phase constraint for half-Fourier compressed sensing in 3D MR imaging[J]. MAGMA, 2015, 28(5): 459-472.
- [7]Kozak BM, Jaimes C, Kirsch J, et al. MRI Techniques to Decrease Imaging Times in Children [J]. Radiographics, 2020, 40(2): 485-502.
- [8]许桂晓,刘海彬,吴尚远,等. 直肠癌 MRI:人工智能辅助压缩感知技术与并行成像技术的对照研究 [J]. 放射学实践,2023,38(4): 446-451.
- [9]Wang Q, Zhao W, Xing X, et al. Feasibility of AI-assisted compressed sensing protocols in knee MR imaging: a prospective multi-reader study[J]. Eur Radiol, 2023, 33(12): 8585-8596.
- [10]朱海安. 磁共振成像螺旋桨采集技术对肩关节扫描图像质量的影响[J]. 实用医学影像杂志,2020,21(5):537-538.
- [11]刘咏梅. 3.0T MRI 肩关节磁共振螺旋桨采集技术与常规扫描技术的诊断价值[J]. 医疗装备,2019,32(3):37-38.
- [12]杨正汉,冯逢,王霄英. 磁共振成像技术指南——检查规范,临床策略及新技术(修订版)[J]. 中国医学影像学杂志,2010,18(4): 312.
- [13]Dietrich TJ, Ulbrich EJ, Zanetti M, et al. PROPELLER technique to improve image quality of MRI of the shoulder[J]. Am J Roentgenol, 2011, 197(6): W1093-100.
- [14]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]. 中国医学物理学杂志,2019,36(9):1039-1044.
- [15]Feng L, Benkert T, Block KT, et al. Compressed sensing for body MRI[J]. J Magn Reson Imaging, 2017, 45(4): 966-987.
- [16]Wang XZ, Ma JF, Bhosale P, et al. Novel deep learning-based noise reduction technique for prostate magnetic resonance imaging[J]. Abdom Radiol(NY), 2021, 46(7): 3378-3386.
- [17]Zhao Q, Xu J, Yang YX, et al. AI-assisted accelerated MRI of the ankle: clinical practice assessment[J]. Eur Radiol Exp, 2023, 7(1): 62.
- [18]Aja-Fernández S, Vegas-Sánchez-Ferrero G, Tristán-Vega A. Noise estimation in parallel MRI: GRAPPA and SENSE[J]. Magn Reson Imaging, 2014, 32(3): 281-290.
- [19]肖顺,储呈晨,王源冰,等. 压缩感知技术在磁共振成像技术中的应用进展分析[J]. 中国医疗设备,2021,36(11):4-9.
- [20]张浩南,宋清伟,王家正,等. 初探压缩感知高倍数加速因子对颈动脉 3D-TOF-MRA 的影响 [J]. 临床放射学杂志,2021,40(6): 1079-1083.
- [21]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.
- [22]查福祥,彭成东,邹乾,等. 探索联影 ACS 在宫颈癌中的应用价值[J]. 中国医疗设备,2021,36(10):40-43.
- [23]胡成林,柳秋风,李华玲,等. 人工智能辅助下的压缩感知技术在肝脏 T₂WI 中的应用价值[J]. 放射学实践,2023,38(4):508-513.