・影像技术学・ 人工智能辅助下的压缩感知技术在肝脏 T₂WI 中的应用价值

胡成林,柳秋风,李华玲,胡学梅,李震,杨阳

【摘要】目的:探讨人工智能辅助压缩感知(ACS)技术应用于肝脏 T2WI 的可行性。方法:前瞻性 连续纳入 2022 年 3-4 月因疑有肝脏病变而拟在本院行肝脏 MRI 检查的 31 例患者,采用呼吸触发下 螺旋桨采集的运动伪影校正成像技术(ARMS)、基于 ACS 的单次屏气采集(SBH)和基于 ACS 的双次 屏气采集(DBH)技术行 T₂WI 检查。测量 3 组图像上肝实质、竖脊肌的信号强度,并计算信噪比 (SNR)和对比噪声比(CNR)。通过 4 分法对 3 组图像的运动伪影、肝内血管清晰度、肝脏边缘锐利度、 整体图像质量和病灶的显著性进行主观评价,比较 3 种技术对肝结节性病灶的检出率。结果:与 ARMS-T₂WI 比较,SBH-T₂WI 和 DBH-T₂WI 具有更高的 SNR(P 均<0.05)。三组图像 CNR 无显著 统计学差异(P=0.432)。SBH-T₂WI 与 ARMS-T₂WI 图像比较,运动伪影更少,肝内血管清晰度、肝脏 边缘锐利度和整体图像质量评分更高(P 均<0.05)。31 例共检出 72 个肝结节病灶。三组图像对肝脏 结节性病灶检出率的差异无统计学意义(P=0.228),但是 SBH-T₂WI 和 DBH-T₂WI 两组图像上病灶 显著性的主观评分均高于 ARMS-T₂WI(P 均<0.05)。结论:ACS-T₂WI 肝脏成像较 ARMS-T₂WI 图 像具有更高的图像质量,且通过单次屏气即可完成肝脏的图像采集,具有较高的临床应用价值。

【关键词】 人工智能;压缩感知技术;肝肿瘤;磁共振成像;T2 加权成像;图像质量

【中图分类号】R445.2; R739.41 【文献标志码】A 【文章编号】1000-0313(2023)04-0508-06 DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2023.04.023 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Application value of artificial intelligence-assisted compressed sensing technique in liver T₂ WI scan HU Cheng-lin,LIU Qiu-feng,LI Hua-ling,et al.Department of Radiology,Tongji Hospital,Tongji Medical University,Huazhong University of Science and Technology,Wuhan 430030,China

(Abstract) **Objective:** The purpose of this study was to explore the clinical feasibility of T_2 weighted MRI with artificial intelligence-assisted compressed sensing (ACS) in liver imaging. Methods: Thirty-one patients with suspected liver disease prepared to undergo liver MRI examination in our hospital from March 2022 to April 2022 were consecutively enrolled in this study. Three techniques were used for T₂WI, including respiratory-triggered acquisition and reconstruction with motion suppression (ARMS), ACS-based single-breath-hold acquisition (SBH), and ACS-based dual-breathhold acquisition (DBH-T₂ WI). The signal intensity of liver parenchyma and erector spinae muscle were measured, and the signal-to-noise ratio (SRN) and contrast-to-noise ratio (CNR) were calculated for the three T₂WI sequences, respectively. Motion artifact, sharpness of intra-hepatic vessel margin, liver edge sharpness, overall image quality, lesion detection rates, and lesion conspicuity scores were subjectively evaluated using a 4-point scoring system for the three T₂ WI sequences, respectively. The detecting rates for liver nodules among the three techniques were compared statistically, **Results**: Compared with ARMS-T₂ WI, SBH-T₂ WI and DBH-T₂ WI showed significantly higher SNR (all P < 0.05). No significant difference of CNR was found among the three T_2 WI sequences (P = 0.432).Compared with ARMS-T₂WI,SBH-T₂WI showed higher scores of sharpness of intra-hepatic vessel margin, liver edge sharpness and overall image quality, and significantly lower scores of motion artifact (all $P \leq 0.05$). A total of 72 liver nodular lesions were found in the 31 patients. The difference of lesion detection rates among the three sequences was not statistically significant (P = 0.228). Lesion conspicuity scores were significantly higher on SBH-T₂WI and DBH-T₂WI than ARMS-T₂WI (P < 0.05). Conclusion: ACS-

作者单位:430030 武汉,华中科技大学同济医学院附属同济医院放射科

作者简介:胡成林(1993一),男,湖北武汉人,技师,主要从事磁共振新技术应用工作。

通讯作者:杨阳,E-mail: yangyangaddress@163.com



based T_2 WI can provide superior image quality than ARMS- T_2 WI with only single breath-hold for the scan of the whole liver, which has high clinical value.

[Key words] Artificial intelligence; Compressed sensing technique; Liver neoplasms; Magnetic resonance imaging; T₂-weighted imaging; Image quality

肝脏 MRI 是肝脏疾病诊断、疗效评估的重要检查 手段,相比于其他的检查具有安全无辐射,多参数、多 方位成像的优势^[1-2]。T₂WI 是肝脏磁共振成像中不 可或缺的序列,常用于局灶性肝脏病变的诊断和监 测^[3]。然而常规肝脏 T₂WI 扫描多采用呼吸门控或患 者多次屏气的方式采集图像,扫描时间长,图像质量受 患者呼吸是否规律或屏气能力影响^[4,5]。因此,亟需 一种快速、无明显运动伪影的肝脏 T₂WI 成像方法。

人工智能辅助下的压缩感知技术(artificial intelligence-assisted compressed sensing, ACS) 集合了压 缩感知、并行采集成像和半傅立叶采集等技术,以智能 化迭代算法重建图像,在保证图像质量的同时能显著 缩短扫描时间,为快速肝脏 T₂WI 提供了新的方 案^[6-8]。尽管 ACS 加速技术结合智能化算法可以通过 有限的采样数据获得高质量的图像,但是过高的加速 因子在缩短扫描时间的同时,不可避免的带来图像质 量的下降^[9]。本研究通过比较螺旋桨采集运动伪影校 正成像技术在呼吸触发下采集的 T_2 WI(respiratorytriggered acquisition and reconstruction with motion suppression, ARMS-T₂WI)、基于 ACS 的单次屏气采 集(single-breath-hold acquisition, SBH)-T2WI 和基 于 ACS 的双次屏气采集(dual-breath-hold acquisition,DBH)-T₂WI的图像质量,旨在探索ACS技术应 用于肝脏 T_2 WI 的可行性。

材料与方法

1. 病例资料

本研究中连续纳入 2022 年 3-4 月在本院拟行肝 脏 MRI 检查的患者。排除标准:有 MRI 检查禁忌证; 屏气不配合。最终纳入 31 例患者,男 15 例,女 16 例, 年龄 23~71 岁,平均(49.29±15.56)岁。本研究已通 过本院伦理委员会的批准。所有患者签署了知情同意 书。

2. 检查方法

使用联影 UMR790 3.0T 磁共振扫描仪、12 通道 腹部相阵线圈和脊柱矩阵线圈。患者检查前禁食、禁 水 6 h,采用仰卧位、足先进。常规 T₂WI 采用 ARMS 技术。ACS-T₂WI 依次采用单次屏气、双次屏气的采 集方式。其中双次屏气采集,每次屏气采集 15 层图 像,共获采集 30 层图像。具体扫描参数见表 1。

成像参数	ARMS-T ₂ WI	$SBH-T_2WI$	$DBH-T_2WI$
层厚/mm	5.0	5.0	5.0
层间距/mm	1.0	1.0	1.0
视野/mm ²	360×360	280×420	280×420
矩阵	304×304	243×456	243×456
回波链长度	33	48	60
TR/ms	4000.00	10785.00	6293.00
TE/ms	136.00	96.12	132.08
带宽/kHz	500	485	525
扫描时间/s	$240\!\sim\!420$	17	25

3. 图像客观质量分析

将所有图像传输到联影 UWS-MR-R005 工作站 上进行处理分析。由一名具有 8 年工作经验的放射科 医师采用盲法、以随机顺序分别在每例患者的 ARMS-T₂WI、SBH-T₂WI 和 DBH-T₂WI 图像上测量肝实质 和竖脊肌的信号强度。具体步骤:选取肝门层面,分别 在肝右前叶、右后叶、左内叶和左外叶、右侧竖脊肌及 相位编码方向上视野内组织外的图像背景内勾画 ROI(大小为 200 mm²),测量肝脏、竖脊肌和背景区域 的信号强度(signal intensity,SI),ROI 应该放置于肝 脏信号均匀处,尽量避开血管和胆管。取肝内 4 个 ROI 所测数据的平均值。SD_{常素}为背景区域 SI 的标准 差。为了比较 3 个序列 T₂WI 的图像质量,各组图像 上的 ROI 应该放置在相同层面和位置。随后,计算图 像质量的客观评价指标即信噪比(SNR)和对比噪声比 (CNR);

SNR=	$\frac{SI_{\text{H}\underline{k}}}{SD_{\frac{4}{7}}}$					(1)
	LOT	OT	1			

$$CNR = \frac{|SI_{\text{FE}}|_{\text{SD}_{\#\#}}}{|SD_{\#\#}|}$$
(2)

4. 图像质量的主观评价

由两位放射科医师(分别有 8 和 15 年诊断经验) 分别采用盲法和随机顺序对 ARMS-T₂WI、SBH-T₂WI和 DBH-T₂WI 三组图像进行图像质量的主观 评价,采用4级评分法,各指标评分标准如下。①运动 伪影:1分,图像上有重度伪影,影响影像诊断;2分,中 度伪影,干扰影像诊断;3分,少许伪影,不影响影像诊 断;4分:无可见的伪影。②肝内血管清晰度:1分,肝 内血管边缘难以辨认;2分,血管边缘非常模糊;3分, 血管边缘中度模糊;4分,血管清晰。③肝脏边缘的锐 利度:1分,无明确边缘;2分,部分边缘难以明确;3 分,边缘模糊;4分,边缘清楚。④整体图像质量:1分, 差;2分,一般;3分,好;4分,极好^[10-11]。 5. 对肝脏结节性病变的评估

由一位放射科医师(有 20 年影像诊断经验)综合 所有序列的图像对肝脏病灶的部位和数目进行评估, 以其诊断结果作为参照标准,来分析3组T。WI图像 对肝脏病灶的诊断结果。由2位放射科医师(分别有 8 和 15 年影像诊断经验)分别对 3 组 T₂WI 图像进行 阅片分析,观察病灶的部位、数目和病灶显著性,并测 量病灶的最大直径。病变显著性评分标准:1分,病灶 未见显示:2分,病灶仅部分可见:3分,病灶显示清楚, 边缘模糊:4分,病灶清晰可见,边缘清楚。

6. 统计学分析

使用 SPSS 23.0 软件进行统计学分析。图像质量 客观评价指标(SNR、CNR)的3组间比较采用方差分 析,组间两两比较采用 LSD-t 检验。主观评分指标 (肝脏边缘锐利度、肝内血管清晰度、运动伪影、图像整 体质量和病灶显著性)的组间比较采用多配对样本 Friedman M 检验。利用 Kappa 检验分析主观评分指 标的观察者间一致性(Kappa值0~0.20为一致性极 低;0.210.40 为一致性一般;0.41~0.60 为一致性中 等:0.71~0.80 为一致性良好:0.81~1.00 表示一致性 高^[12]。利用组内相关系数(ICC)分析病灶最大直径的



图 1 三个序列 T₂WI 图像质量客观评价指标值的箱式图及统计分析结 果。a)肝实质的信噪比,以 DBH-T₂WI 为最高;b)肝实质的对比噪声的图像对肝脏病灶的部位和数量进行 比,以DBH-T2WI为最高。

观察者间测量的一致性,(ICC 值低于 0.40 一致性低, 0.41~0.75 一致性良好,0.76~1.00 一致性高)^[13]。采 用 Bland-Altman 图描述各个序列测量的病灶最大盲 径的一致性。以 P<0.05 为差异有统计学意义。

结 果

1. 图像质量客观评分

三个序列 T₂WI 图像质量客观评分的比较结果见 表 2 和图 1。方差分析结果显示三组之间 SNR 的差 异有统计学意义(P<0.05),三组之间 CNR 的差异无 统计学意义(P = 0.432);进一步对 SNR 的组间差异 进行两两比较,结果显示 DBH-T,WI 和 SBH-T,WI 的 SNR 显著高于 ARMS-T₂WI, DBH-T₂WI 的 SNR 亦高于 SBH-T₂WI,差异均有统计学意义(P < 0.05)。

2. 图像质量的主观评分

两位医师对三组图像质量各项主观评价指标的评 分一致性均为良好或高,Kappa 值均大于 0.7(表 3)。 因此,后续的分析中对3组图像的主观评分进行比较 时,采用第一位医师的评估结果。

三个序列 T₂WI 图像质量主观评分的比较结果见 表4。在运动伪影、肝内血管清晰度、肝脏边缘锐利度

> 和整体图像质量方面,SBH-T,WI显 著优于ARMS-T。WI(图 2),差异均有 统计学意义(P < 0.05)。DBH-T₂WI 与 SBH-T₂WI 之间、DBH-T₂WI 与 ARMS-T₂WI之间在运动伪影、肝内 血管清晰度、肝脏边缘锐利度和整体 图像质量方面的差异均无统计学意义 (P > 0.05)

> > 3. 对肝脏结节病灶的评估

由一位高年资医师综合所有序列 评估,共检出72个肝内结节病灶。两

表 2 三个序列 T₂WI 图像质量客观评分的比较结果

					LSD-t 检验 P 值				
指标	$SBH-T_2WI$	$DBH-T_2WI$	ARMS-T ₂ WI	Р值♯	SBH-T ₂ WI vs. ARMS-T ₂ WI	DBH-T ₂ WI vs. ARMS-T ₂ WI	SBH-T ₂ WI vs. DBH-T ₂ WI		
SNR	117.07 ± 47.05	147.75 ± 62.39	79.90 ± 30.02	0.017	0.014	0.014	0.003		
CNR	27.79 ± 31.59	27.99 ± 25.23	16.92 ± 17.05	0.432	0.974	0.974	0.095		

注: # 为三组间比较的方差分析结果。

表3 三个	·序列 T	WI	图像	质量	主观	【评分	•的观	察者	间一	致!	性
-------	-------	----	----	----	----	-----	-----	----	----	----	---

やた	SBH-T ₂ WI(68例)			DBH	[-T ₂ WI(68 例)	ARMS-T2WI(64 例)			
7日 小小	Reader 1	Reader 2	Kappa 值	Reader 1	Reader 2	Kappa 值	Reader 1	Reader 2	Kappa 值	
运动伪影	3.94 ± 0.25	3.90 ± 0.30	0.783	3.55 ± 0.51	3.52 ± 0.51	0.935	3.13 ± 0.92	3.13 ± 0.88	0.898	
血管清晰度	3.94 ± 0.25	3.87 ± 0.43	0.786	3.71 ± 0.46	3.74 ± 0.44	0.919	3.35 ± 0.84	3.32 ± 0.83	0.945	
边缘锐利度	3.90 ± 0.30	3.94 ± 0.25	0.783	3.65 ± 0.55	3.68 ± 0.54	0.927	3.19 ± 0.79	3.23 ± 0.76	0.950	
整体图像质量	3.90 ± 0.30	3.87 ± 0.34	0.839	3.68 ± 0.48	3.65 ± 0.49	0.928	3.32 ± 0.79	3.29 ± 0.78	0.948	
病灶显著性	3.81 ± 0.48	3.74 ± 0.58	0.788	3.71 ± 0.59	3.68 ± 0.60	0.917	3.19 ± 0.87	3.19 ± 0.83	0.899	



缘锐利度和整体图像质量。a) ARMS-T₂WI;b) SBH-T₂WI;c) DBH-T₂WI。 图 3 T₂WI 图像上肝脏结节性病灶的显著性分析。a) ARMS-T₂WI,肝内结节灶仅部分可见(箭);b) SBH-T₂WI,肝内病灶 清晰可见,边缘清楚(箭);c) DBH-T₂WI,肝内病灶清晰可见,边缘清楚 (箭);d) DWI(b=1000s/mm²)显示肝内病灶呈高信号(箭)。

表 4	三个序列	利 T:	WI	图像	质量	主观	评	分	的	比	较	结	栗
-----	------	------	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---

おた	SBH vs.	ARMS	DBH vs.	ARMS	SBH vs. DBH		
7日 7小	q 值	P 值	<i>q</i> 值	P 值	<i>q</i> 值	P 值	
运动伪影	3.620	0.001	1.905	0.170	1.715	0.259	
肝内血管清晰度	2.667	0.023	1.715	0.259	0.953	1.000	
肝脏边缘锐利度	3.048	0.007	1.905	0.170	1.143	0.759	
整体图像质量	3.048	0.007	1.905	0.170	1.143	0.759	
病灶显著性	2.985	0.009	2.540	0.033	0.445	1.000	

位稍低年资的放射科医师基于 ARMS-T₂WI 均检出 64 个病灶,检出率为 88.9%;而基于 SBH-T₂WI 或 DBH-T₂WI,均检出 68 个病灶,检出率为 94.4%。基 于 ACS 的 T₂WI(SBH-T₂WI 和 DBH-T₂WI)对肝内 病灶的检出率较 ARMS-T₂WI 提高了 5.6%,差异有 统计学意义(P=0.228),其额外发现的 4 例肝结节病 灶的直径均<2.0 mm。三组图像检出的病灶中均无 假阳性病灶。

SBH-T₂WI和DBH-T₂WI上病灶显著性的主观 评分均高于ARMS-T₂WI(图 3),差异均有统计学意 义(P < 0.05),详见表 4。

两位放射科医师分别在3组图像上独立测量病灶 的最大直径,测量值的观察者间一致性均为良好(ICC 均>0.75)。ARMS-T₂WI:(7.69±8.60) vs.(7.58± 8.38)mm,ICC=0.998;SBH-T₂WI:(7.22±8.48) vs. (7.13±8.48)mm,ICC=0.999;DBH-T₂WI:(7.25± 8.46) vs. (7.21 ± 8.31) mm, ICC = 0.999。根据 Bland-Altman 图显示第一位放射科医师在3组图像 上测量的病灶最大直径,大多数测量值位于95%CI 内,一致性均较高(图4)。

讨 论

本研究结果表明,与 ARMS-T₂WI 相比,基于 ACS 的肝脏 T₂WI 具有更高的信噪比、更少的呼吸运 动伪影及更清晰的血管和病灶显示,而且通过单次屏 气采集即可获得满足临床诊断要求的高质量图像。

过长的采集时间一直是 MRI 面临的巨大困境。 目前,主要通过快速成像序列或应用部分 k 空间数据 重建算法等方式缩短采集时间。快速成像序列无疑会 降低图像的分辨率和信噪比^[14-15]。而包括压缩感知、 并行采集和半傅里叶变换等传统的 k 空间欠采样算法 常带来各种重建伪影,尤其是采用较高的加速因子



图 4 三组图像上测量的病灶最大直径的一致性分析 Bland-Altman 图。a)SBH-T₂WI与 ARMS-T₂WI上 测量的病灶最大直径的一致性较好,大多数测量值位于 95%CI内;b)DBH-T₂WI与 ARMS-T₂WI上测量的病灶最大直径的一致性较好,大多数测量值位于 95%CI内;c)SBH-T₂WI与 DBH-T₂WI 图像测量的病灶最大直径的一致性较好,大多数测量值位于 95%CI内。

时^[16-18]。ACS 技术融合了压缩感知、并行采集和半傅 里叶变换等多种重建算法,突破了常规单一加速方式 所带来的限制,通过训练深度神经网络来重建欠采样 的 k 空间数据,可以在不牺牲图像质量的情况下缩短 扫描时间,减少运动伪影和重建伪影^[6,19-20]。本团队 前期的研究中将 ACS 技术应用于肾脏成像,可以将扫 描时间缩减至 17 s,显著提升了临床肾脏 MRI 的效 率^[21]。在本研究中,肝脏的 ACS-T₂WI 可以通过单次 或双次屏气采集,显著缩短扫描时间。与 ARMS-T₂WI 比,具有更高的信噪比和对比噪声比、更少的运 动伪影和更高的血管清晰度。因此,为肝脏 T₂WI 提 供了更好的扫描方案。

常规 T₂WI 通常采用 FSE 序列,需要通过前瞻性 呼吸触发、基于导航的呼吸触发或多次屏气采集等方 式来完成扫描^[14,22]。既往有研究表明, 肝脏 FSE-T₂WI 序列是 MRI 扫描中最经常需要重复扫描的序 列,高达55%的患者由于运动伪影而需要再次进行该 序列的扫描^[23]。在临床实践中,目前通常利用 k 空间 螺旋桨填充技术来减轻患者呼吸运动对图像采集的影 响。螺旋桨去伪影技术以 k 空间中心区域为中心,通 过旋转运动的方式在平面内采样,从而使 k 空间中心 区域被反复填充,中心数据明显多于外周,再经过相位 校正、平移校正及图像重建和合成等步骤剔除较低权 重的失真数据,以达到减少伪影的目的。但是 k 空间 重复采集数据,不可避免带来采集时间的延长[24]。 ACS-T₂WI可以实现屏气采集,肝脏处于相对静止的 状态,能有效地抑制呼吸伪影的产生,在扫描方式上优 于呼吸触发的 T₂WI。其次, ACS 中的人工智能模块 能在高速加速水平下,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伪影的产生。

本研究中还比较了两种屏气方案的肝脏 ACS-

T₂WI的图像质量。单次屏气的ACS-T₂WI通过较高的加速技术及使用较长的回波链等方法,在单个TR内完成单层图像的数据采集。双次屏气的ACS-T₂WI 序列通过增加激励次数、采用更长的回波链和增加采样时间来提高图像的信噪比。但是与单次屏气采集相比,双次屏气的采集方式更易受患者呼吸运动的影响,存在患者两次屏气程度不同导致漏扫或错层的风险。本研究结果表明,单次与双次屏气的T₂WI相比,对比噪声比、运动伪影、肝内血管清晰度、肝脏边缘锐利度和整体图像质量并无显著差异。因此在临床工作中, 单次屏气采集即可实现肝脏T₂WI的快速高质量扫描。值得注意的是,单次屏气需要患者屏气时间达 17 s以上,对于难以配合长时间屏气的患者,双次屏气 扫描减少了每次屏气的时间,可以作为单次屏气 T₂WI不能配合时的补充方案。

本次研究尚存在一些不足之处:一、研究的样本量 较少,可能存在样本数据的偏倚;二、本研究是使用 3.0T磁共振扫描仪完成的,在 1.5T 磁共振仪上基于 ACS 技术的 T₂WI 的图像质量及诊断效能需要进一 步验证。因此,在后期的研究中我们要继续增加样本 量、尽可能的扩大疾病研究范围,进一步验证基于 ACS 技术的肝脏 T₂WI 在不同场强的磁共振仪中的 应用价值,并优化扫描参数。

综上所述, ACS-T₂WI 克服了 ARMS-T₂WI 的扫 描时间长、呼吸伪影重等缺点,通过单次屏气的采集方 式即可获得满足临床诊断要求的高质量图像,值得在 临床工作中推广。

参考文献:

- [1] Budjan J, Schoenberg SO, Attenberger UI.CT and MRI of the liver:when.what.why[J].Radiology,2017,57(5):366-372.
- [2] 姚纯,邓君良,杨志企,等.MRI 纹理分析和 LI-RADS 分类鉴别诊

断肝硬化小肝癌与不典型增生结节的价值比较[J].放射学实践, 2022,37(8):995-999.

- [3] Fowler KJ, Brown JJ, Narra VR. Magnetic resonance imaging of focal liver lesions: approach to imaging diagnosis[J]. Hepatology, 2011,54(6):2227-2237.
- [4] Nanko S, Oshima H. Watanabe T, et al. Usefulness of the application of the BLADE technique to reduce motion artifacts on navigation-triggered prospective acquisition correction (PACE) T₂weighted MRI (T₂WI) of the liver[J].J Magn Reson Imaging, 2009,30(2):321-326.
- [5] Lee SS, Byun JH, Hong HS, et al. Image quality and focal lesion detection on T₂-weighted MR imaging of the liver: comparison of two high-resolution free-breathing imaging techniques with two breath-hold imaging techniques[J].J Magn Reson Imaging, 2007, 26(2):323-330.
- [6] Srinivasan K, Ankur A, Sharma A. Super-resolution of magnetic resonance images using deep convolutional neural networks[J/ OL].IEEE Int C Electr Ta, 2017 July 27. DOI: 10.1109/ICCE-China.2017.7990985.
- [7] Dong C, Loy CC, He KM, et al. Image super-resolution using deep convolutional networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2016, 38(2): 295-307.
- [8] Kozak BM, Jaimes C, Kirsch J, et al. MRI techniques to decrease imaging times in children [J]. Radiographics, 2020, 40 (2): 485-502.
- [9] Feng L, Benkert T, Block KT, et al. Compressed sensing for body MRI[J].J Magn Reson Imaging, 2017, 45(4):966-987.
- Li H. Hu C, Yang Y, et al. Single-breath-hold T₂ WI MRI with artificial intelligence-assisted technique in liver imaging: As compared with conventional respiratory-triggered T₂ WI [J/OL]. Magn Reson Imaging, 2022, 93: e175-e180. DOI: 10.1016/j.mri. 2022.08.012.
- [11] Bae K, Jeon KN, Hwang MJ, et al. Respiratory motion-resolved four-dimensional zero echo time (4D ZTE) lung MRI using retrospective soft gating: feasibility and image quality compared with 3D ZTE[J].Eur Radiol,2020,33(1):5130-5138.
- [12] Landis JR, Koch GG. The measurement of observer agreement for categorical data[J].Biometrics, 1977, 33(1):159-174.
- [13] Kundel HL, Polansky M. Measurement of observer agreement [J].Radiology,2003,228(2):303-308.
- [14] Shanbhogue K, Tong A, Smereka P, et al. Accelerated single-shot

 T_2 -weighted fat-suppressed (FS) MRI of the liver with deep learning-based image reconstruction; qualitative and quantitative comparison of image quality with conventional T_2 -weighted FS sequence[J].Eur Radiol,2021,31(11);8447-8457.

- [15] Herrmann J. Gassenmaier S. Nickel D. et al. Diagnostic confidence and feasibility of a deep learning accelerated HASTE sequence of the abdomen in a single breath-hold[J].Invest Radiol, 2021,56(5):313-319.
- [16] Lustig M, Donoho D, Pauly JM. Sparse MRI: the application of compressed sensing for rapid MR imaging[J]. Magn Reson Med, 2007,58(6):1182-1195.
- [17] Fruehwald-Pallamar J, Szomolanyi P, Fakhrai N, et al. Parallel imaging of the cervical spine at 3T:optimized trade-off between speed and image quality[J].AJNR,2012,33(10):1867-1874.
- [18] Li G, Hennig J, Raithel E, et al. An L1-norm phase constraint for half-Fourier compressed sensing in 3D MR imaging [J]. MAG-MA, 2015, 28(5): 459-472.
- [19] 朱文珍,吕文志.医疗人工智能发展现状及展望[J].放射学实践, 2022,37(1):1-3.
- Xiang L, Chen Y, Chang W, et al. Ultra-fast T₂-weighted MR reconstruction using complementary T₁-weighted information[J/OL]. Med Image Comput Comput Assist Interv, 2018; e215-e223. Published 2018 September 26. DOI: 10.1007/978-3-030-00928-1_25.
- Zhao Y, Peng C, Wang S, et al. The feasibility investigation of AI-assisted compressed sensing in kidney MR imaging; an ultra-fast T₂WI imaging technology[J/OL]. BMC Med Imaging, 2022, 22 (1); e119. Published 2022 July 4. DOI: 10.1186/s12880-022-00842-1.
- [22] Donato H, Franca M, Candelaria I, et al. Liver MRI: from basic protocol to advanced techniques[J/OL]. Eur J Radiol, 2017, 93: 30-39. Published 2017 May 25. DOI:10.1016/j.ejrad.2017.05.028.
- [23] Schreiber-Zinaman J. Rosenkrantz AB. Frequency and reasons for extra sequences in clinical abdominal MRI examinations[J]. Abdom Radiol (NY),2017,42(1);306-311.
- [24] Rosenkrantz AB.Patel JM.Babb JS.et al.Liver MRI at 3T using a respiratory-triggered time-efficient 3D T₂-weighted technique: impact on artifacts and image quality[J].AJR, 2010, 194(3): 634-641.

(收稿日期:2022-09-06 修回日期:2022-11-11)