

• MR 影像学新技术专题 •

运动解析压缩感知重建的自由呼吸 XD-VIBE 在肝脏富血供病变动态增强 MRI 中的应用

赵香田, 黄梦月, 朱锦霞, 车英玉, 高雪梅, 程敬亮

【摘要】 目的:评价运动解析压缩感知重建的自由呼吸额外维度 VIBE(XD-VIBE)在肝脏富血供病变(HLLs)动态增强 MRI 中的应用价值。**方法:**21 例入组患者 7 天内均行肝脏常规屏气 VIBE(BH-VIBE)多期增强和自由呼吸 XD-VIBE 连续采集(184 s)。三名高年资医师采用 5 分法评估图像质量,并记录动脉期观察到的直径 >5 mm 的 HLLs。比较两种序列之间和各序列四期图像质量及两种序列对 HLLs 的检出能力。**结果:**XD-VIBE 与 BH-VIBE 增强后三期图像质量差异均无统计学意义($P>0.05$),但 XD-VIBE 平扫图像质量较 BH-VIBE 差($P<0.05$)。XD-VIBE 中,平扫图像质量低于增强后三期(P 均 <0.05);动脉期总体图像质量、肝边缘锐度较门静脉期差(P 均 <0.05);门静脉期呼吸伪影最少(P 均 <0.05);动脉期、门静脉期及平衡期肿块显著性相当(均 $P>0.05$)。无论大小及良恶性,XD-VIBE 和 BH-VIBE 检出 HLLs 能力相当(P 均 >0.05)。**结论:**自由呼吸 XD-VIBE 可提供与常规 BH-VIBE 相当的增强后图像质量和 HLLs 检出效能。

【关键词】 图像重建;磁共振成像;动态增强;自由呼吸;压缩感知

【中图分类号】 R445.2;R735.7 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2019)11-1186-06

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2019.11.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application of free-breathing extra-dimensional VIBE with motion-resolved compressed sensing reconstruction in dynamic enhanced MRI of hypervascular liver lesions ZHAO Xiang-tian, HUANG Meng-yue, ZHU Jin-xia, et al. Department of Radiology, Guangdong Provincial People's Hospital, Guangdong Academy of Medical Sciences, Guangzhou 510080, China

【Abstract】 Objective: The purpose of this study was to evaluate the value of free-breathing extra-Dimensional VIBE (XD-VIBE) with motion-resolved compressed sensing reconstruction in dynamic enhancement MRI of hypervascular liver lesions (HLLs). **Methods:** 21 recruited patients underwent both conventional breath-holding VIBE (BH-VIBE) for multi-phases enhanced scan and free-breathing XD-VIBE for continuous acquisition (184s) within 7 days. Image quality was assessed by three senior radiologists using a 5-point scale and HLL lesions with diameter bigger than 5mm in the arterial phase were recorded. Image quality of the four phases between two sequences and within each sequence as well as detection rate of HLLs between two sequences were compared. **Results:** There was no significant difference between XD-VIBE and BH-VIBE for image quality in three contrast-enhanced phases (all $P>0.05$), whereas image quality of XD-VIBE was worse than that of BH-VIBE in non-enhanced phase ($P<0.05$). For XD-VIBE, the image quality of the non-enhanced phase was lower than that of the other three phases after enhancement (all $P>0.05$), the overall image quality and hepatic edge sharpness of the arterial phase were inferior to that of the portal venous phase (all $P<0.05$), the respiratory artifacts of the portal venous phase were the least (all $P<0.05$), and the lesion conspicuity in the arterial, portal venous, and equilibrium phases was comparable (all $P>0.05$). Whether large or small, benign or malignant, HLLs were equally capable of being detected by XD-VIBE and BH-VIBE (all $P>0.05$). **Conclusion:** Compared with conventional BH-VIBE, free breathing XD-VIBE improves

作者单位: 510080 广州, 广东省人民医院(广东省医学科学院)放射科(赵香田); 450052 郑州, 郑州大学第一附属医院磁共振科(赵香田、黄梦月、车英玉、高雪梅、程敬亮); 100102 北京, 西门子(中国)有限公司医疗业务领域磁共振科研部(朱锦霞)

作者简介: 赵香田(1983—), 女, 河南洛阳人, 博士, 主治医师, 主要从事腹部影像学研究。

通讯作者: 程敬亮, E-mail: cjr.chjl@vip.163.com

基金项目: 河南省医学科技攻关项目(201702041); 河南省卫生计生科技英才海外研修工程(2018003)

comparable image quality in contrast-enhanced phases and detection performance for HLLs.

【Key words】 Image reconstruction; Magnetic resonance imaging; Dynamic enhanced; Free breathing; Compressed sensing

肝脏动态增强 MRI 对于肝脏局灶性病变的检出和鉴别至关重要。目前,常规通过三维容积内插屏气检查(three-dimensional volumetric interpolated breath-hold examination, BH-VIBE)进行,具有空间分辨率及信噪比高等优点^[1-2]。但在临床实际工作中,多次反复屏气导致患者检查舒适性降低,而缩短屏气时间可使图像空间分辨率和容积覆盖受限,且部分患者可因不能耐受或配合屏气而导致图像质量差或无法实现动态增强扫描,如腹痛、幼儿、年老体弱、听力丧失和昏迷等患者。因此,本研究拟采用一种新型笛卡尔采样、额外维度 VIBE(eXtra-dimensional VIBE, XD-VIBE)序列,其结合压缩感知(compressed sensing, CS)及自门控技术,在连续采集肝脏动态数据的同时收集自导航信号,再将自导航信号进行运动状态解析重建以降低呼吸伪影^[3],从而实现自由呼吸肝脏动态增强 MRI;并与常规 BH-VIBE 的图像质量及对肝脏富血供病变(hypervascular liver lesions, HLLs)的检出能力进行对比,初步验证其临床应用价值。

材料与方法

1. 一般资料

本研究为前瞻性研究。经医院伦理委员会批准,所有患者均于检查前签署知情同意书。搜集郑州大学第一附属医院 2017 年 12 月—2018 年 4 月经 CT 或超声检查(4 周内)提示肝脏 HLL 且未针对病变做过任何治疗的成年患者。排除标准:①有 >5 个 HLLs;②广泛门静脉血栓或癌栓形成;③有磁共振检查禁忌症和/或既往含钆对比剂过敏史;④肝肾功能异常。入组患者 7 d 内均进行 BH-VIBE 及 XD-VIBE 肝脏动态增强 MRI(扫描次序由随机数字表确定)。最终共纳入 21 例受试者,男 18 例,女 3 例,年龄 33~75 岁,平均(54.6±9.4)岁。共含由手术病理、临床及影像、随访结果明确诊断的 40 个 HLLs,直径 6~69 mm,平均(23.4±18.2)mm。恶性患者 15 例,良性患者 6 例。恶性 HLLs 含肝细胞癌(hepatocellular carcinoma, HCC)22 个和转移瘤 3 个,良性 HLLs 含肝血管瘤 11 个和局灶性结节增生(focal nodular hyperplasia, FNH)4 个。21 例患者中,9 例经手术病理证实,含 HCC 10 个、FNH 1 个;余 12 例中 HLLs 经临床及影像或随访明确诊断,具体标准为^[4]:HCC 结合慢性肝病史、甲胎蛋白、影像及随访结果诊断;转移瘤根据原发恶性肿瘤病史、影像及病灶随访 12 个月后最大径增

长超过 30% 诊断;肝血管瘤根据典型影像学表现(T₂WI 明显高信号、增强早期边缘结节状强化且持续向心性强化)并随访 12 个月以上无变化作出诊断;FNH 根据无慢性肝病史、影像(包括随访期内普美显增强 MRI 肝胆期病变摄取对比剂)观察 12 个月以上无变化作出诊断。

2. 仪器与方法

采用 Siemens Prisma 3.0T MR 仪和体部 18 通道相控阵表面线圈。两次动态增强扫描均以 0.2 mL/kg 剂量、2.0 mL/s 流率经肘前静脉团注对比剂钆喷酸葡胺(Gd-DTPA),0.9%氯化钠注射液 20 mL 以同样流率冲管。常规 BH-VIBE 采集四期,含平扫、动脉期(Care Bolus 实时监测)、门静脉期(动脉期后 40 s)和平衡期(180 s),各期屏气时间 16 s。自由呼吸 XD-VIBE 在注射对比剂同时启动扫描,连续采集 184 s。扫描结束后主机基于 GPU 自动对获得的笛卡尔欠采样 k 空间数据进行迭代重建,以 9.4 s 的时间分辨率等距划分为 20 个时间点,每个时间点图像重建为 6 个运动状态,约需 10 min。两个序列均扫描横轴面,主要扫描参数保持一致:TE 1.4 ms,TR 4.3 ms,FOV 380 mm×320 mm,矩阵 320×240,翻转角 10°,层厚 3.0 mm。

3. 图像分析

由 1 名主任医师在 XD-VIBE 连续图像中选出与 BH-VIBE 四期图像最为匹配的 4 个时间点,并确定每期最佳运动状态;将 XD-VIBE 第一个时间点图像作为“平扫”与常规 BH-VIBE 平扫进行比较。随后两组 VIBE 图像随机分配给另外 3 名高年资医师进行双盲法阅片,每位医师每次完成一组,至少 2 周后完成另一组;每位医师以 5 分制对图像质量(包括总体图像质量、肝脏边缘锐度、呼吸伪影及肿块显著性)进行主观评分^[5],评分 1~5 分,总体图像质量≥3 分视为满足诊断要求;同时详细记录动脉期观察到的>5 mm 的 HLLs 数目、肝段定位及横轴面最大直径。

4. 统计学方法

使用 SAS 9.4 软件进行统计学分析。采用均数±标准差($\bar{x} \pm s$)描述图像质量评分。采用组内相关系数(intraclass correlation coefficient, ICC)评价 3 名医师图像质量评分一致性。两组序列各期之间图像质量评分比较采用 Wilcoxon 符号秩检验,序列内四期图像质量评分比较采用 Friedman 检验并 Bonferroni 法校正。率的比较采用 Macnemar 检验。以 $P < 0.05$ 为

差异有统计学意义。

结 果

XD-VIBE 自导航信号呈周期性正弦曲线,运动状态 1 对应于呼气末位置,自运动状态 1~6 呼吸伪影增加、图像质量下降,因此运动状态 1 被用于后续图像质量分析。3 名医师所有图像质量评分均为一致性中等或良好(0.68~0.97)。

XD-VIBE 和 BH-VIBE 间四期图像质量比较见

表 1。平扫 BH-VIBE 图像质量评分优于 XD-VIBE(P 均 <0.05);动脉期、门静脉期及平衡期的两组序列图像质量评分相当(P 均 >0.05 ,图 1)。

XD-VIBE 中,20 例(20/21,95.2%)均获得晚动脉期图像且增强后三期图像质量均符合诊断要求,其中动脉期成像时间点确定为注射对比剂后 33.3 s 19 例、23.6 s 1 例;1 例(1/21,4.8%)呈动脉期扫描过早。BH-VIBE 中,16 例(16/21,76.2%)各期图像质量均符合诊断要求;5 例(5/21,23.8%)因患者屏气能力不

表 1 BH-VIBE 和 XD-VIBE 组间四期图像质量评分及比较

图像质量/期相	XD-VIBE	BH-VIBE	Z	P
总体图像质量				
平扫	3.12±0.78(1.7,5)	4.65±0.51(3,5)	-3.787	<0.001*
动脉期	4.08±0.58(3,5)	4.30±0.83(2,5)	-1.137	0.255
门静脉期	4.61±0.34(3.7,5)	4.45±0.75(2.7,5)	-0.596	0.551
平衡期	4.21±0.54(3.2,5)	4.52±0.76(2.5,5)	-1.531	0.126
肝边缘锐度				
平扫	3.12±0.78(1.7,5)	4.70±0.47(3.2,5)	-3.776	<0.001*
动脉期	4.09±0.58(3,5)	4.30±0.83(2,5)	-1.177	0.239
门静脉期	4.63±0.33(3.8,5)	4.45±0.78(2.7,5)	-0.594	0.553
平衡期	4.20±0.57(3.2,5)	4.56±0.74(2.5,5)	-1.570	0.116
呼吸伪影				
平扫	3.03±0.81(1.7,5)	4.66±0.50(3,5)	-3.788	<0.001*
动脉期	4.05±0.58(3,5)	4.31±0.85(2,5)	-1.331	0.183
门静脉期	4.59±0.37(3.7,5)	4.43±0.79(2.7,5)	-0.467	0.641
平衡期	4.15±0.54(3.2,5)	4.54±0.79(2.3,5)	-1.775	0.076
肿块显著性				
平扫	2.25±1.40(1,5)	3.14±1.53(1,5)	-4.034	<0.001*
动脉期	4.06±1.26(1,5)	4.54±0.83(1,5)	-1.918	0.055
门静脉期	3.64±1.26(1,5)	3.50±1.12(1,5)	-1.328	0.184
平衡期	3.55±1.42(1,5)	3.56±1.46(1,5)	-0.372	0.710

注:数据为平均值±标准差(范围),使用 Wilcoxon 符号秩检验,* $P<0.05$ 。

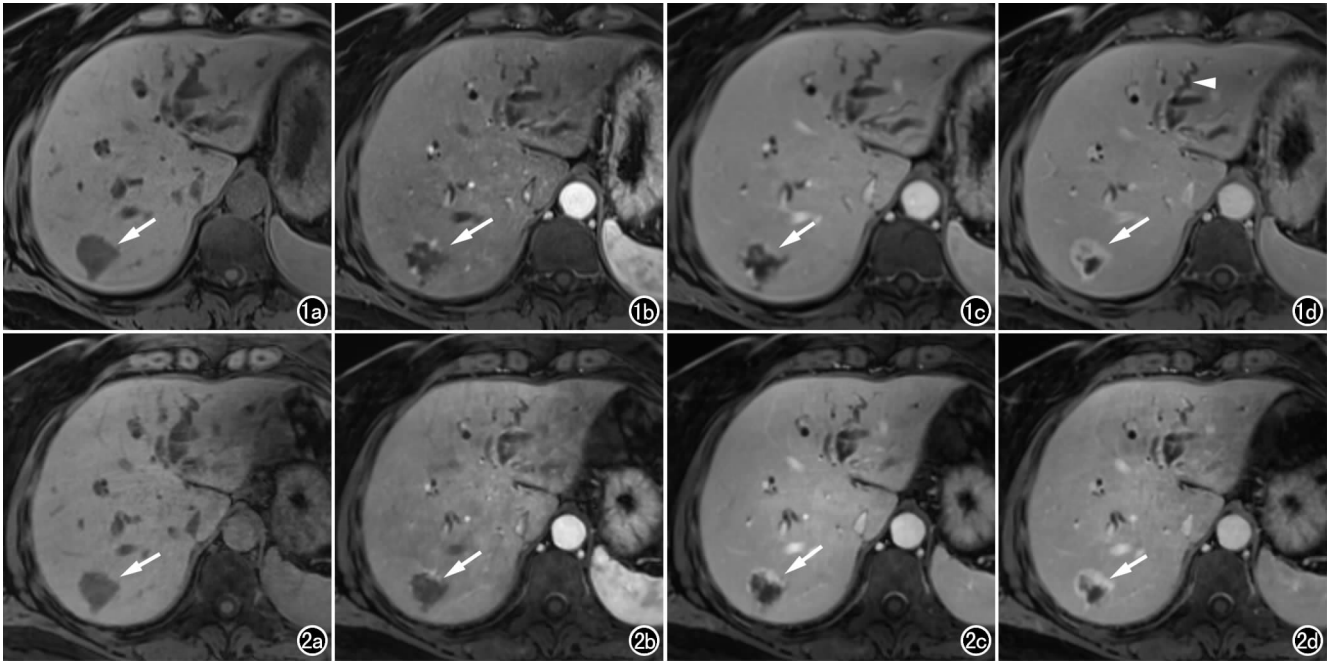


图 1 女,57 岁,血管瘤(箭),a~d 为常规 BH-VIBE 序列,e~h 为自由呼吸 XD-VIBE 序列。a、e 平扫;b、f 动脉期;c、g 门静脉期;d、h 平衡期。同时存在肝外胆管癌而导致的肝内胆管扩张(箭头)。

稳定导致部分期相图像呼吸伪影明显而未达到诊断要求,但其相应的 XD-VIBE 图像质量均达到了诊断要求(图 2)。

XD-VIBE 和 BH-VIBE 各自四期图像质量比较见表 2。在 XD-VIBE,总体图像质量及肝边缘锐度以平扫最差(P 均 <0.05),动脉期较门静脉期差(P 均 <0.05)、与平衡期相当(P 均 >0.05),门静脉期较平衡期相当(P 均 >0.05);呼吸伪影以平扫时最明显(P 均 <0.05),门静脉期最小(P 均 <0.05);肿块显著性以平扫时最差(P 均 <0.05),增强后三期相当(P 均 >0.05)。在 BH-VIBE,总体图像质量、呼吸伪影各期相当(P 均 >0.05);肝边缘锐度平扫优于动脉期($P<0.05$)、余各期相当(P 均 >0.05);肿块显著性以动脉

期最佳(P 均 <0.05)。
对 40 个 HLLs,无论肿瘤大小或良恶性,XD-VIBE 和 BH-VIBE 检出能力相当(P 均 >0.05 ,表 3)。

表 3 XD-VIBE 和 BH-VIBE 动脉期对 40 个 HLLs 检出率

序列	医师 1	医师 2	医师 3	平均
BH-VIBE				
≤2cm	91(21/23)	87(20/23)	91(21/23)	90(62/69)
>2cm	100(17/17)	100(17/17)	100(17/17)	100(51/51)
良性	87(13/15)	80(12/15)	87(13/15)	84(38/45)
恶性	100(25/25)	100(25/25)	100(25/25)	100(75/75)
全部	95(38/40)	93(37/40)	95(38/40)	94(113/120)
XD-VIBE0				
≤2cm	87(20/23)	83(19/23)	91(21/23)	87(60/69)
>2cm	100(17/17)	100(17/17)	100(17/17)	100(51/51)
良性	93(13/15)	93(14/15)	93(14/15)	91(41/45)
恶性	96(24/25)	88(22/25)	96(24/25)	93(70/75)
全部	93(37/40)	90(36/40)	95(38/40)	93(111/120)

注:数据为百分比(计算百分比的病变数)。

表 2 XD-VIBE 和 BH-VIBE 组内四期图像质量评分比较

扫描序列	P							
	χ^2	P	A vs. B	A vs. C	A vs. D	B vs. C	B vs. D	C vs. D
XD-VIBE								
总体图像质量	48.629	$<0.001^*$	0.001 *	$<0.001^*$	$<0.001^*$	0.002 *	0.591	0.010
肝边缘锐度	48.495	$<0.001^*$	0.002 *	$<0.001^*$	$<0.001^*$	0.001 *	0.370	0.012
呼吸伪影	50.152	$<0.001^*$	0.002 *	$<0.001^*$	$<0.001^*$	$<0.001^*$	0.403	0.007 *
肿块显著性	33.043	$<0.001^*$	$<0.001^*$	$<0.001^*$	$<0.001^*$	0.242	0.279	0.931
BH-VIBE								
总体图像质量	12.549	0.006 *	0.012	0.282	1.000	0.151	0.012	0.282
肝边缘锐度	13.829	0.003 *	0.004 *	0.310	0.676	0.064	0.014	0.550
呼吸伪影	11.234	0.011 *	0.020	0.310	1.000	0.189	0.020	0.310
肿块显著性	30.503	$<0.001^*$	$<0.001^*$	0.279	0.166	0.001 *	0.001 *	0.762

注: * 指差异具有统计学意义,其中两两比较的 P 值进行 Bonferroni 校正、以 0.05/6 作为阈值。A 为平扫;B 为动脉期;C 为门静脉期;D 为平衡期。

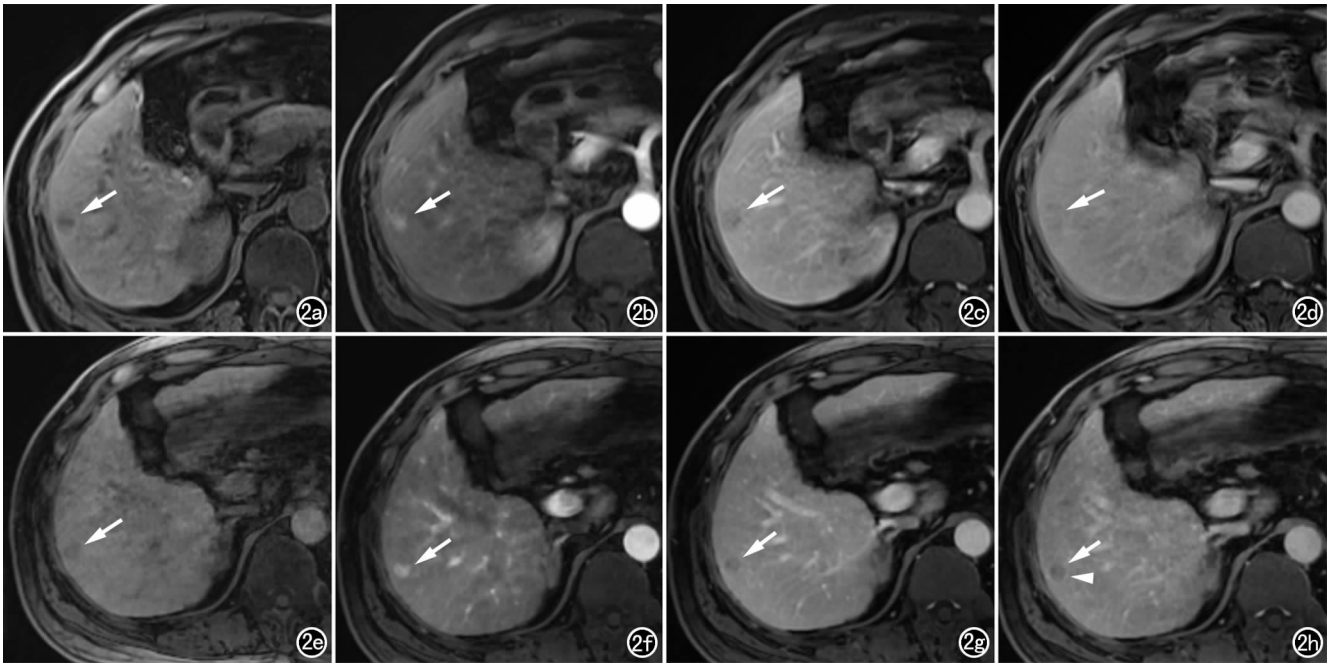


图 2 男,54 岁,早期 HCC(箭),a~d 为常规 BH-VIBE 序列,e~h 为自由呼吸 XD-VIBE 序列。a、e)平扫;b、f)动脉期;c、g)门静脉期;d、h)平衡期,XD-VIBE 平衡期 HCC 的“廓清”和“包膜征”(箭头)显示较 BH-VIBE 更清晰。因患者屏气能力不稳定,自由呼吸 XD-VIBE 增强三期较相应 BH-VIBE 图像质量评分高。

讨 论

CS 是近年来兴起的一种新的信号获取与处理理论^[6-7],其利用信号在特定变换域上的稀疏性及可压缩性在远小于 Nyquist 采样率条件下采集数据,再从少量稀疏测量数据中通过优质重构算法精确恢复出原始信号,既缩短信号采集时间、减少计算量,也保持了原始信号的重建质量要求,从而显著降低采集时间而不降低图像质量。动态对比增强 MRI 是应用 CS 的理想领域,因同一肝脏在不同时刻的系列多幅图像存在广泛时空相关性和平滑的信号改变;同理,呼吸运动也是高度相关的,也具备 CS 应用的前提——可压缩性。本研究采取的自由呼吸 XD-VIBE,连续采集肝脏动态对比增强数据同时收集自导航信号,然后利用对比增强维度和呼吸状态维度的稀疏性,采用 CS 算法重建运动状态的欠采样数据集,最终在每个对比增强时间点生成多维动态图像集;且由于自导航信号重建是直接由原始 k 空间数据中提取运动信息,此过程无需使用特定的运动模型,故不受插值误差的影响,可明显减少呼吸伪影。这也解释了 XD-VIBE 可实现增强后各期图像质量与 BH-VIBE 相当的原因。鉴于导航信号的均匀性直接决定呼吸伪影程度而影响图像质量,故患者在 XD-VIBE 采集前均被告知尽量平稳呼吸。尽管如此,部分年老体弱的患者仍呈不规律的呼吸导航信号曲线。但本研究 21 例 XD-VIBE 增强后图像质量均达到了诊断要求。甚至在屏气能力不稳定导致 BH-VIBE 部分期相呼吸伪影大而无法用于诊断的患者,相应 XD-VIBE 呼吸伪影更小而达到诊断要求,结果进一步验证了这一新型运动补偿方法的优势,与既往研究结果一致^[3,8]。此外, XD-VIBE 还被证明较硬门控重建可显著改善 CS-VIBE 动脉期、门静脉期图像质量^[5],也比视图重建等更节省时间,具有较大的临床应用前景。

以往有研究^[5]显示 XD-VIBE 动脉期图像质量较常规 BH-VIBE 差,与本研究结果不同,推测可能与本研究时间分辨率更高(9.4 s vs. 11.57 s)及研究对象自身差异有关。此外,本研究中 XD-VIBE 平扫图像质量显著低于增强、且较 BH-VIBE 平扫差,推测是因用于分析的 XD-VIBE“平扫”图像其实是连续采集的第 1 个时相,此时突然的对比剂注射可引起患者呼吸急剧变化而导致图像呼吸伪影增大,但这可通过后期优化扫描方案、采用导航回波^[9]或自由呼吸放射状采集 VIBE 序列^[10]等来改善。同理,门静脉期患者呼吸趋于稳定,因此其呼吸伪影最小、图像质量优于动脉期;而平衡期患者依从性开始下降,图像质量也趋于下降;到了增强后期,图像质量随时间延长缓慢降低,等距重

建时间点的信息可能愈发冗余,此时可通过非等距时间点重建导航信号来避免。

近年来,一种可实现自由呼吸肝脏动态对比增强 MRI 的黄金角径向稀疏并行采样(golden-angle radial sparse parallel, GRASP)技术成为研究的热点^[8,11-12]。此方法可连续采集 k 空间数据,而无需预定义时间分辨率,可实现与屏气扫描相当的增强后图像质量;但 GRASP 重建中固有的运动平均效应有时仍然会导致相对较差的图像质量和运动模糊^[13]。此外,虽然非笛卡尔采样已显示出独特优势,但与笛卡尔采样相比也带来了一些挑战,比如对失谐效应、梯度延迟和非理想梯度放大器响应不敏感,也可能导致图像失真或模糊^[14]。非笛卡尔采样重建过程复杂且耗时,而笛卡尔采样允许对高维数据集进行快速的在线重建。本研究中,包括所有 6 个运动状态的 XD-VIBE 重建时间不足 10 min,更有望整合在日常临床工作中发挥作用。

有研究证实 XD-VIBE 对于检出肝转移瘤与 BH-VIBE 能力相当^[5],但尚无有关 XD-VIBE 检出 HLLs 能力的报道,鉴于之前对其动脉期图像质量的担忧,其临床价值尚不明确。本研究证实无论大小及良恶性,9.4 s 时间分辨率的 XD-VIBE 可实现与 BH-VIBE 相当的 HLLs 检出效能;在无法很好配合屏气的患者, XD-VIBE 肿块显著性更佳。因此,对于无法配合屏气的患者, XD-VIBE 也许较常规 BH-VIBE 更有前景,未来值得大样本量的研究进一步证实。

本研究存在一定的局限性。首先,样本量相对较小,无法在目前初步的可行性研究中实现屏气能力较差患者的分层分析,因这类患者也许是 XD-VIBE 的最大受益人群,这也是本课题组的后续研究方向。其次,仅对呼气末的重建图像进行评估,丢弃了大量潜在有用的数据,而弹性配准等算法也许可组合多个运动状态的数据而实现更好的图像质量。

总之,本研究所提出的笛卡尔采样 XD-VIBE 结合了 CS 及自导航信号的运动状态解析重建,可提供与常规 BH-VIBE 相当的增强后图像质量和动脉期 HLLs 检出效能;尤其对于屏气能力较差的患者,可能是一种很有前途的替代方案。

参考文献:

- [1] Lee VS, Lavelle MT, Rofsky NM, et al. Hepatic MR imaging with a dynamic contrast-enhanced isotropic volumetric interpolated breath-hold examination: feasibility, reproducibility, and technical quality[J]. Radiology, 2000, 215(2):365-372.
- [2] Yu MH, Lee JM, Yoon JH, et al. Clinical application of controlled aliasing in parallel imaging results in a higher acceleration (CAIPIRINHA)-volumetric interpolated breathhold (VIBE) sequence for gadoteric acid-enhanced liver MR imaging[J]. J Magn Reson Imaging, 2013, 38(5):1020-1026.

- [3] Chandarana H, Feng L, Ream J, et al. Respiratory motion-resolved compressed sensing reconstruction of free-breathing radial acquisition for dynamic liver magnetic resonance imaging[J]. Invest Radiol, 2015, 50(11):749-756.
- [4] Marin D, Nelson RC, Samei E, et al. Hypervascular liver tumors: low tube voltage, high tube current multidetector CT during late hepatic arterial phase for detection—initial clinical experience[J]. Radiology, 2009, 251(3):771-779.
- [5] Kaltenbach B, Bucher AM, Wichmann JL, et al. Dynamic liver magnetic resonance imaging in free-breathing: feasibility of a cartesian T₁-weighted acquisition technique with compressed sensing and additional self-navigation signal for hard-gated and motion-resolved reconstruction[J]. Invest Radiol, 2017, 52(11):708-714.
- [6] 张晓东, 朱丽娜, 马帅, 等. 压缩感知技术在头 MRA 的初步应用探索[J]. 放射学实践, 2018, 33(3):252-255.
- [7] Geethanath S, Reddy R, Konar AS, et al. Compressed sensing MRI: a review[J]. Crit Rev Biomed Eng, 2013, 41(3):183-204.
- [8] Feng L, Axel L, Chandarana H, et al. XD-GRASP: golden-angle radial MRI with reconstruction of extra motion-state dimensions using compressed sensing[J]. Magn Reson Med, 2016, 75(2):775-788.
- [9] Young PM, Brau AC, Iwadata Y, et al. Respiratory navigated free breathing 3D spoiled gradient-recalled echo sequence for contrast-enhanced examination of the liver: diagnostic utility and comparison with free breathing and breath-hold conventional examinations[J]. Am J Roentgenol, 2010, 95(3):687-691.
- [10] Azevedo RM, de Campos RO, Ramalho M, et al. Free-breathing 3D T₁-weighted gradient-echo sequence with radial data sampling in abdominal MRI: preliminary observations[J]. Am J Roentgenol, 2011, 197(3):650-657.
- [11] Feng L, Grimm R, Block KT, et al. Golden-angle radial sparse parallel MRI: combination of compressed sensing, parallel imaging, and golden-angle radial sampling for fast and flexible dynamic volumetric MRI[J]. Magn Reson Med, 2014, 72(3):707-717.
- [12] Heacock L, Gao Y, Heller SL, et al. Comparison of conventional DCE-MRI and a novel golden-angle radial multicoil compressed sensing method for the evaluation of breast lesion conspicuity[J]. J Magn Reson Imaging, 2017, 45(6):1746-1752.
- [13] Chandarana H, Feng L, Block TK, et al. Free-breathing contrast-enhanced multiphase MRI of the liver using a combination of compressed sensing, parallel imaging, and golden-angle radial sampling[J]. Invest Radiol, 2013, 48(1):10-16.
- [14] Feng L, Benkert T, Block KT, et al. Compressed sensing for body MRI[J]. J Magn Reson Imaging, 2017, 45(4):966-987.

(收稿日期:2019-09-02 修回日期:2019-10-13)

欢迎订阅 2020 年《放射学实践》

《放射学实践》是由国家教育部主管,华中科技大学同济医学院主办,与德国合办的全国性影像学学术期刊,创刊至今已 35 周年。2018 年 8 月,《放射学实践》杂志再次入选北京大学和北京高校图书馆期刊工作研究会共同主持的国家社会科学基金项目“学术期刊评价及文献计量学研究”研究成果——《中国核心期刊要目总览》。这是继 1999 年之后的第 4 次入选临床医学/特种医学类核心期刊。

本刊坚持服务广大医学影像医务人员的办刊方向,关注国内外影像医学的新进展、新动态,全面介绍 X 线、CT、磁共振、介入放射及放射治疗、超声诊断、核医学、影像技术学等医学影像方面的新知识、新成果,受到广大影像医师的普遍喜爱。

本刊为国家科技部中国科技论文核心期刊、中国科学引文数据库统计源期刊,在首届《中国学术期刊(光盘版)检索与评价数据规范》执行评优活动中,被评为《CAJ—CD 规范》执行优秀期刊。

主要栏目:论著、继续教育园地、专家荐稿、研究生展版、图文讲座、本刊特稿、实验研究、传染病影像学、影像技术学、外刊摘要、学术动态、请您诊断、病例报道、知名产品介绍、信息窗等。

本刊为月刊,每册 25 元,全年定价 300 元。

国内统一刊号:ISSN 1000-0313/CN 42-1208/R 邮政代号:38-122

电话:(027)69378385

E-mail:fsxsjzz@163.com 网址:http://www.fsxsj.net

编辑部地址:430199 武汉市蔡甸区中法新城同济医院专家社区别墅 C 栋