

· 影像医学研究 ·

基于3D-MATRIX序列的压缩感知技术在膝关节成像中的临床应用价值

宋春娟¹, 祁良¹, 朱晓梅¹, 唐立钧^{2*}

¹南京医科大学第一附属医院放射科, ²核医学科, 江苏 南京 210029

[摘要] 目的:探讨基于3D可调制翻转角超长回波链回聚脉冲成像(three-dimensional modulated flip angles technique in refocusing imaging with extended echo train, 3D-MATRIX)的压缩感知(compressed sensing, CS)技术在膝关节中的临床应用价值。方法:对26例患者的26个膝关节均采用CS-3D-MATRIX(CS-3D)和3D-MATRIX(传统3D)扫描。对两组图像的伪影(0~4)、锐利度(0~4)和图像综合质量(0~4)进行评分;分析两组膝关节图像中的软骨、肌肉、滑膜液、骨髓腔和前交叉韧带的信噪比(signal to noise ratio, SNR),骨髓腔-软骨、骨髓腔-滑膜液、软骨-肌肉、滑膜液-软骨、滑膜液-前交叉韧带的对比噪声比(contrast to noise ratio, CNR),并进行统计学分析。结果:两序列图像伪影和总体图像质量无明显差异,CS-3D图像锐利度略低于传统3D[(3.39±0.50)分 vs. (3.79±0.42)分, $P=0.008$]。与传统3D相比,除骨髓腔和前交叉韧带外,CS-3D获得的SNR均升高;CS-3D滑膜液-前交叉韧带、滑膜液与软骨的CNR显著提高,其他组织的CNR值略有升高但无统计学差异。CS-3D扫描时间较传统3D减少了46%。结论:与传统3D扫描序列相比,CS-3D-MATRIX序列的扫描时间缩短,但图像质量无明显差异。

[关键词] 压缩感知;3D MRI;膝关节

[中图分类号] R445.2

[文献标志码] B

[文章编号] 1007-4368(2019)10-1529-04

doi: 10.7655/NYDXBNS20191029

磁共振显像(MRI)作为一种无创性检查,具有高软组织分辨率、多方位成像等优点,是一种准确评价膝关节解剖结构和病变的技术^[1],可全面显示膝关节的损伤情况,包括半月板、韧带、关节周围软组织的损伤及关节积液等改变^[2],已广泛应用于骨关节系统损伤的诊断。二维(2-dimension, 2D)快速自旋回波序列是膝关节临床常规应用的检查方案,但存在一定的局限性:①传统2D扫描层较厚,容易导致部分容积效应,对于膝关节中细微结构的损伤判断有局限性;②对于膝关节中形态复杂或与标准解剖方位呈角度走行的结构(如前交叉韧带等)难以全程显示^[3]。三维快速自旋回波(3D-FSE)技术是在20世纪90年代初首次引入的^[4],其扫描层面薄,可以清晰显示细微结构,降低部分容积伪影,以及具有多平面重建(MPR)的能力^[5]。传统膝关节3D检查效率低,患者往往因疼痛不能耐受长时间扫描而产生运动伪影。因此,快速的MRI数据采集在膝关节成像中必不可少。压缩感知(compressed

[基金项目] 江苏省医学重点人才基金项目(ZDRCB2016003)

*通信作者(Corresponding author), E-mail: tanglijun@njmu.edu.cn

sensing, CS)技术是由图像的可稀疏性、K空间数据的非相干性采集和非线性的小波重建这几种技术共同完成^[6-7],可有效缩短图像的采集和重建时间,目前,CS技术已经成功应用于心脏、血管、儿科和头颅成像^[8]。另外,质子密度加权序列已经广泛用于临床膝关节成像,在关节液和半月板形成比较好的对比,对半月板的撕裂、关节软骨早期损伤及韧带损伤的显示非常有效^[9],本研究对CS联合3D可调制翻转角超长回波链回聚脉冲成像(three-dimensional modulated flip angles technique in refocusing imaging with extended echo train, 3D-MATRIX)的质子密度加权技术在膝关节成像中的应用进行初步探索。

1 对象和方法

1.1 对象

选择2018年8月—2019年1月因有膝关节临床症状(排除膝关节手术、肿瘤、感染)而在本院行MRI检查的27例患者进行前瞻性研究,其中1例因前交叉韧带断裂无法测量,实际纳入研究患者26例。其中男15例,女11例,年龄(40.0±13.9)岁。本研究经医院伦理委员会批准,所有患者知情同意。

1.2 方法

1.2.1 MRI检查

采用联影uMR780 3.0T超导型MRI扫描仪和12通道的相控阵线圈组,体位是足先进仰卧位,患侧膝关节外旋15°,髌骨下缘置于膝关节线圈中心。所有患者进行CS-3D-MATRIX(CS-3D)和3D-MATRIX(传统3D)扫描,具体参数见表1。

表1 CS-3D及传统3D序列扫描参数

序列名称	CS-3D	传统3D
TR(ms)	1 000	1 000
TE(ms)	33.1	33.1
回波链	46	46
带宽(Hz/px)	500	500
矩阵	256×100	256×100
体素	0.6×0.6×0.6	0.6×0.6×0.6
层间距	0	0
采集时间(s)	233	435
加速因子	5	无

1.2.2 图像分析

主观分析:由2位经验丰富的放射科医生对CS-3D和传统3D图像进行主观分析。包括:图像伪影(运动伪影、血管搏动伪影)、锐利度(膝关节软骨、韧带、肌肉边缘的清晰程度)和图像综合质量。伪影分级评分:0分,图像有严重伪影(不能诊断);1分,伪影在中度和重度之间,图像尚可以诊断;2分,有中度伪影;3分,有轻度伪影;4分,没有伪影。锐利度分级评分:0分,膝关节软骨、韧带及肌肉边缘极度模糊,无法区分;1分,上述解剖结构模糊;2分,上述解剖结构稍模糊;3分,上述解剖结构清晰但不锐利;4分,上述解剖结构清晰而锐利。图像综合评估(综合上述2项的主观评分):0分,不能诊断;1分,差;2分,可接受;3分,好;4分,优秀。

客观分析:①信噪比(signal to noise ratio, SNR):在膝关节的股骨下端骨髓腔及软骨、滑膜液、前交叉韧带和肌肉分别勾画圆形感兴趣区(region of interest, ROI),同一个部位连续测量3次,然后取其平均值获得ROI信号强度值(signal intensity, SI),以相同大小ROI测量4个角的背景噪声标准差

(standard deviation, SD),取其平均数,用组织的标准差代替背景噪声计算SNR, $SNR = SI_{组织} / SD_{背景}$ 。②组织的对比噪声比(contrast to noise ratio, CNR) = $(SI_{组织1} - SI_{组织2}) / SD_{背景}$,分别得出骨髓腔与软骨、骨髓腔与滑膜液、软骨与肌肉、滑膜液与软骨、滑膜液和前交叉韧带的CNR。

1.3 统计学方法

采用SPSS 20.0统计学分析软件对数据进行处理,定量资料以均数±标准差($\bar{x} \pm s$)表示,采用Shapiro-Wilk法进行正态性检验,两组间比较采用t检验。等级资料的比较,采用Wilcoxon秩和检验。采用Kappa系数对阅片者进行一致性分析(Kappa≥0.75为一致性良好)。定量资料的比较采用配对样本t检验, $P \leq 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 扫描时间

应用CS技术,膝关节矢状位三维各向同性的扫描时间由435 s缩短到233 s,扫描时间缩短46%。CS-3D重建时间略延长,但不影响扫描流程,符合检查要求。

2.2 背景噪声

CS-3D序列背景噪声标准差为 27.23 ± 8.20 ,传统3D标准差为 32.02 ± 9.51 ,CS-3D标准差小于传统3D,差异具有统计学意义($P=0.026$)。由于组织的标准差可代替背景噪声,因此CS-3D序列的背景噪声小于传统3D。

2.3 主观评价结果

CS-3D序列和传统3D序列的图像伪影($P=0.096$)和图像综合评价($P=0.157$)没有统计学差异,而图像的锐利度具有统计学差异($P=0.008$,表2),CS-3D图像稍模糊(图1)。2名医生对图像质量的主观评分具有良好的一致性(Kappa>0.75,表2)。

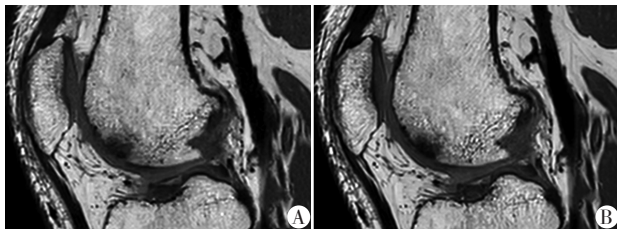
2.4 客观评价结果

膝关节软骨($P=0.011$)、滑膜液($P=0.010$)和肌肉($P=0.032$)的SNR在CS-3D序列上优于传统3D,但两序列在膝关节的骨髓腔($P=0.073$)和前交叉韧带($P=0.168$)方面差异无统计学意义(图2,表3)。

表2 膝关节CS-3D与传统3D成像的主观图像质量分析

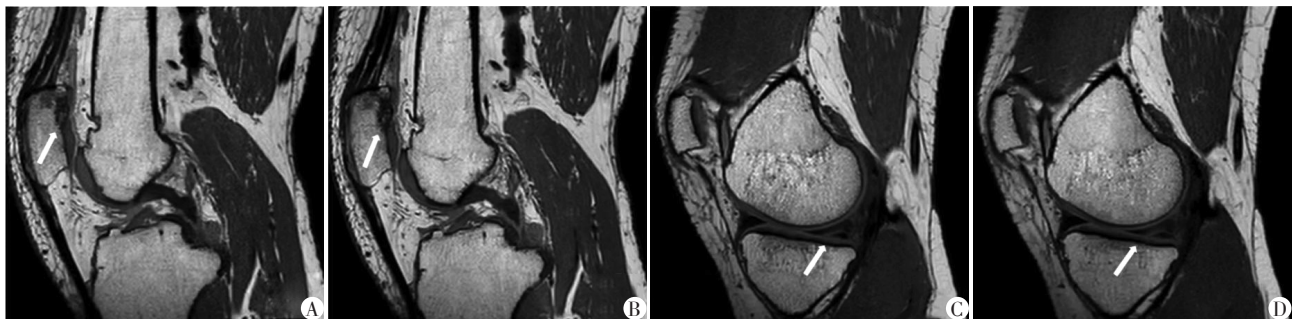
(n)

评价标准	CS-3D组					传统3D组					z值	P值	Kappa值
	0分	1分	2分	3分	4分	0分	1分	2分	3分	4分			
伪影	0	0	0	4	22	0	0	0	8	18	1.677	0.096	0.876
锐利度	0	0	0	18	8	0	0	0	4	22	2.668	0.008	0.906
综合评价	0	0	0	6	20	0	0	0	4	22	1.414	0.157	0.873



患者男, 51岁, 右膝关节疼痛, CS-3D(A)的图像其界面相对模糊, 而传统3D(B)显示清晰的软骨和软骨下骨轮廓, 股骨下端显示清晰的骨髓水肿信号。

图1 同一患者CS-3D和传统3D的膝关节图像



患者女, 54岁, 左膝关节疼痛, CS-3D(A)和传统3D(B)图像都显示出髁骨后缘偏上方软骨变薄信号, 欠均匀, 边缘欠光整(箭头); 患者女, 29岁, 右膝关节损伤, CS-3D(C)和传统3D(D)图像显示出内侧半月板后角撕裂(箭头)的相似外观。

图2 不同患者CS-3D和传统3D的膝关节图像

表3 CS-3D和传统3D序列膝关节成像的SNR和CNR值
($\bar{x} \pm s$)

指标	CS-3D组	传统3D组	P值
SNR			
骨髓腔	207.34 ± 63.64	186.22 ± 55.40	0.073
软骨	81.78 ± 23.98	70.45 ± 20.58	0.011
滑膜液	106.55 ± 35.56	88.10 ± 28.43	0.010
前交叉韧带	39.00 ± 18.47	33.79 ± 15.32	0.168
肌肉	66.97 ± 22.83	57.69 ± 19.64	0.032
CNR			
骨髓腔-软骨	125.57 ± 42.57	115.77 ± 35.70	0.227
骨髓腔-滑膜液	100.79 ± 38.52	98.12 ± 31.01	0.702
软骨-肌肉	14.81 ± 8.91	12.76 ± 8.62	0.225
滑膜液-软骨	24.77 ± 15.72	17.65 ± 13.49	0.050
滑膜液-前交叉韧带	68.95 ± 20.48	55.22 ± 26.31	0.008

等^[11]将CS用于3.0T头颅MRA检查, 缩短扫描时间的同时, 提高了图像质量。李爽等^[12]发现CS技术在心脏MRI的应用中极大地提高了扫描速度, 同时保证不牺牲空间分辨率。本研究结果表明, CS膝关节图像的SNR和CNR无明显降低, 与既往研究结果相似。Ding等^[13]分析了不同降噪因子的CS方法在MR重建中的噪声特性, 证明了CS重构的去噪能力。本研究结果显示CS-3D图像的背景噪声较小, 与此结果一致。背景噪声的标准差是影响图像信噪比的

CS-3D序列的滑膜液与前交叉韧带($P=0.008$)、滑膜液与软骨($P=0.050$)的CNR高于传统3D, 而两序列在骨髓腔与软骨、骨髓腔与滑膜液、软骨与肌肉之间的差异无统计学意义(表3)。

3 讨论

2007年, Lustig等^[10]最先将CS理论应用于MRI成像领域(简称CS-MRI), 通过K空间部分数据成功重构出原始图像, 并加快了MRI成像速度。张晓东

主要原因, CS-3D的背景噪声的标准差较低, 信噪比较高^[14]。

CS-3D降低了膝关节的软骨、软骨下骨、韧带和肌肉边缘的锐利度, 可能与CS重建的去噪效果有关^[15-16]。图像的对比度源自于K空间中央区域, 而清晰度和解剖细节源自于K空间的边缘区域, CS重建时在K空间中央区域获得的回波比高于K空间边缘, 从而导致图像轻微模糊。但是少许的图像模糊并没有降低图像的质量。

最早的CS理论指出: 对于具有可压缩性或者在某个变换域上具有稀疏性的信号, 运用一定的方法在小于奈奎斯特采样率条件下采集数据, 通过优质重构算法进行图像的重建^[17]。传统的MRI采集K空间的信号后通过傅里叶转换获得图像数据, 这需要K空间的信号数等于图像的像素数, 因此需要花费大量的时间, 而CS技术通过欠采样获取图像中的任意一小部分, 通过L1范数极小化的算法, 填充缺失的像素, 然后经过反复迭代重建, 得到完整的高分辨图像^[18]。本研究中采用5倍的加速采集, 扫描时间从435 s缩短到233 s, 同时具有与传统三维扫描相同的空间分辨率($0.6 \times 0.6 \times 0.6$), 因此, CS-3D结合MPR重建, 有效解决了膝关节特殊解剖结构的不连续性, 便于影像医生和临床医生从多方位观察评价

病变结构。CS技术使膝关节各向同性扫描时间缩短了近50%,而图像的SNR和诊断性能没有相应地降低。如果选择合适的加速倍数,甚至可以替代常规的各项同性的高分辨率膝关节扫描。

本研究尚存在一些不足。首先,参与研究的患者数量较少,不能完全评估大样本量的情况。其次,本研究证实5倍加速可以满足临床需求,CS的加速倍数越高,扫描时间越短。同时欠采样会导致图像质量下降,因此,未来还需研究其他的加速因子对图像质量和诊断性能的影响,包括对图像中特定解剖结构和病变的评价^[19]。临床上还需要进行更多的研究,如与常规2D序列的膝关节图像进行比较,并用手术的金标准评估诊断的准确性。本研究证实了CS联合不压脂的质子密度加权序列的膝关节成像的可行性,但还需进一步探索CS与其他序列结合的临床应用。

总之,CS-3D-MATRIX膝关节MRI序列产生的图像质量是可以接受的,极大地缩短了扫描时间,提高了MRI检查的舒适性。随着CS理论和重建算法的不断发展、加速因子和参数的不断优化,CS在临床应用中具有更广阔的前景^[20]。

[参考文献]

- [1] 赵志根,苏振刚. 四肢专用磁共振诊断交叉韧带损伤42例错误原因分析[J]. 南京医科大学学报(自然科学版),2004,24(4):432-433
- [2] 杨春霞,毛存南,王书智,等. MRI诊断膝关节撕脱骨折的应用[J]. 南京医科大学学报(自然科学版),2010,30(10):1505-1508
- [3] Lim D, Lee YH, Kim S, et al. Clinical value of fat-suppressed 3D volume isotropic spin-echo(VISTA)sequence compared to 2D sequence in evaluating internal structures of the knee[J]. Acta radiol, 2016, 57(1):66-73
- [4] Yuan C, Schmiedl UP, Weinberger E, et al. Three-dimensional fast spin-echo imaging: pulse sequence and in vivo image evaluation[J]. J Magn Reson Imaging, 1993, 3(6): 894-899
- [5] Jung JY, Yoon YC, Kim HR, et al. Knee derangements: comparison of isotropic 3D fast spin-echo, isotropic 3D balanced fast field-echo, and conventional 2D fast spin-echo MR imaging[J]. Radiology, 2013, 268(3):802-813
- [6] 黄敏,林颖,陈军波. 压缩感知磁共振成像脉冲序列的设计与实现[J]. 生物医学工程研究, 2015, 34(2): 67-73
- [7] Graff CG, Sidky EY. Compressive sensing in medical imaging[J]. Appl Opt, 2015, 54(8):C23-C44
- [8] Geethanath S, Reddy R, Konar AS, et al. Compressed sensing MRI: a review [J]. Crit Rev Biomed Eng, 2013, 41(3):183-204
- [9] 周进,刘四斌,胡玖益,等. 3D-CUBE PD序列在膝关节外伤中的医用价值[J]. 长江大学学报(自然版), 2017, 14(12):41-43
- [10] 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
- [11] 张晓东,朱丽娜. 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
- [12] 李爽,陆敏杰,赵世华. 压缩感知技术及其在心脏核磁共振中的应用进展[J]. 磁共振成像, 2018, 9(4): 299-302
- [13] Ding Y, Ying L, Zhang N, et al. Noise behavior of Mr brain reconstructions using compressed sensing [J]. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc, 2013, 2013:5155-5158
- [14] Lee SH, Lee YH, Song HT, et al. Rapid acquisition of magnetic resonance imaging of the shoulder using three-dimensional fast spin echo sequence with compressed sensing [J]. Magn Reson Imaging, 2017, 42: 152-157
- [15] Worters PW, Sung K, Stevens KJ, et al. Compressed-Sensing multispectral imaging of the postoperative spine [J]. J Magn Reson Imaging, 2013, 37(1):243-248
- [16] Lu WM, Pauly KB, Gold GE, et al. Slice encoding for metal artifact correction with noise reduction [J]. Magn Reson Med, 2011, 65(5):1352-1357
- [17] Donoho DL. Compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4):1289-1306
- [18] 袁静. 基于压缩感知的核磁共振成像重构算法[J]. 计算机工程, 2015, 41(10):270-274
- [19] Zhang T, Chowdhury S, Lustig M, et al. Clinical performance of contrast enhanced abdominal pediatric MRI with fast combined parallel imaging compressed sensing Reconstruction [J]. J Magn Reson Imaging, 2014, 40(1): 13-25
- [20] 葛永新,林梦然,洪明坚. 联合局部和全局稀疏表示的磁共振图像重建方法[J]. 重庆大学学报, 2017, 40(1): 93-102

[收稿日期] 2019-05-29