

压缩感知技术在头 MRA 的初步应用探索

张晓东, 朱丽娜, 马帅, 刘义, 刘水, 刘婧, 王霄英

【荐稿理由】 在 MR 成像过程中使用压缩感知(CS)技术有可能明显缩短采集时间,具有潜在的临床应用价值,是近年来 MR 成像领域的重要热点问题之一。但在广泛临床应用之前,需在各种临床实际场景下进行个性化地验证,证明其确实优于传统技术,才能逐步用于入临床实际工作中。

本文在真实临床场景中比较同一受试者的使用 CS 技术与常规 MR 技术采集的 MRA 图像质量,认为 CS 技术可用于 3.0T MR 扫描仪行头 MRA 检查,在缩短扫描时间的同时,CS-MRA 图像得到阅片者的认可,认为可进一步行诊断效能的研究,以推动实现真正的临床应用。此类 CS 临床应用研究在国内尚少有发表,有一定的先进性,故予以推荐。

(北京大学第一医院医学影像科 王霄英)

【摘要】 目的:初步探索压缩感知(CS)技术在头 MRA 检查中的可行性。**方法:**搜集 15 例行头 MRA 检查的患者资料,在 3.0T MR 扫描仪上完成常规头 MRA(regular MRA, R-MRA)和 CS-MRA 扫描,两次扫描的采集范围、空间分辨力相同。CS-MRA 扫描后使用三种降噪处理(方式 CS-DS5、CS-DS10、CS-DS20)重建。每位患者共获得 4 组图像,针对图像质量进行主观评价和客观评价。**结果:**客观评价中,CS-DS20 在 4 组图像中大脑中动脉的 SNR 最高($P < 0.05$),4 组的 CNR 差异无统计学意义。主观评价中,2 位阅片者的对图像质量评分的一致性高($k = 0.97$),阅片者倾向选择 CS-DS20 为最佳诊断图像。**结论:**CS 技术可用于 3.0T MR 扫描仪行头 MRA 检查,在缩短扫描时间的同时,提高了图像质量,推荐使用 DS20 重建。

【关键词】 压缩感知;磁共振成像;图像重建

【中图分类号】 R445.2;R741.04 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2018)03-0252-04
DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2018.03.005

A preliminary study of compressed sensing techniques in cerebral MRA ZHANG Xiao-dong, ZHU Li-na, MA Shuai, et al. Department of Radiology, Peking University First Hospital, Beijing 100034, China

【Abstract】 Objective: To explore the feasibility of compressed sensing techniques in the MR Angiography (MRA) of cerebral arteries. **Methods:** Fifteen patients suspected with cerebral artery stenosis were enrolled in the study. All underwent regular 3D TOF MRA (R-MRA) examination and compressed sensing MRA (CS-MRA) on a 3.0T MR scanner. The acquisition field and matrix were kept the same. CS-MRA sequences were reconstructed with different denoising parameters (DS5, DS10, DS20). As a result, a total of 4 groups of MRA images, i. e., R-MRA, CS-MRA-DS5, CS-MRA-DS10 and CS-MRA-DS20, were obtained for each patient, which were used to evaluate the image qualities. Subjective and objective evaluations on imaging quality were conducted by two experienced radiologists. **Results:** For objective image quality, the SNRs of MCA of four groups were different ($P < 0.05$), with the highest SNR in CS-MRA-DS20. The CNRs of MRA were not significantly different among four groups. For subjective image quality evaluation, the two radiologists gave quality scores in good agreement with each other ($k = 0.97$), and concluded that there was no significant difference among the four groups. **Conclusion:** Compared with regular MRA compressed sensing technique is feasible in cerebral MRA examination on 3.0T MR scanner with less acquisition time, better imaging quality and a potential for clinical application. DS20 of reconstruction is recommended.

作者单位: 100034 北京,北京大学第一医院医学影像科

作者简介: 张晓东(1979-),男,山西朔州人,博士,副主任技师,主要从事医学物理研究工作。

通讯作者: 王霄英, E-mail: cjr.wangxiaoying@vip.163.com

【Key words】 Compressed sensing; Magnetic resonance imaging; Image reconstruction

在 MR 检查中使用压缩感知(compressed sensing,CS)技术,可在 K 空间欠采样的情况下,利用信号处理的优化算法,得到 MR 图像^[1]。由于可以缩短 MR 信号的采集时间,CS 成为 MR 技术领域重要的研究方向之一^[2]。研究者在各个领域开展了实验和临床研究的探索^[3],结果不尽相同,共同的观点是^[4]:在开展 CS 的临床应用之前,必须不同的临床场景下进行测试,以验证其可行性及诊效能^[5-7]。目前国内关于 CS 临床研究的结果尚少,本研究对 CS 技术在头 MRA 中的应用进行了初步探索。

材料与方法

1. 病例资料

回顾性搜集 2017 年 6 月—2017 年 7 月在本院接受检查的 15 例患者,均因临床诊断需要而行头 MRA 检查。男 8 例,女 7 例,平均年龄 56 岁。

2. MRA 图像采集

在 Philips Achieva TX 3.0T MR 扫描仪上行头 MRA 扫描,采用 32 通道头线圈。扫描方案包括:常规 3D TOF MRA 序列(regular MRA, R-MRA)和 CS-MRA 序列。

R-MRA 序列的扫描参数:TR 25 ms,TE 3.5 ms,翻转角 200°,视野 200 mm×200 mm×120 mm,矩阵 444×254×171,空间分辨率 0.45 mm×0.78 mm×0.7 mm,带宽 217.2 Hz/pixel,171 层,扫描时间 5 min 49 s。

CS-MRA 序列的扫描参数与 R-MRA 完全相同,扫描位置、范围也完全相同,扫描时间 2 min 54 s。

R-MRA 按标准预设方法重建出一组图像。CS-MRA 按 3 种不同降噪水平(denoising level,DS)重建:5%、10%、20%,得到 CS-DS5、CS-DS10、CS-DS20 共三组图像。最终每位患者共得到 4 组图像进行阅片分析。

3. 图像评价

客观评价:选取大脑中动脉 M1 段显示最佳的层面,测量 M1 段的表观信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)和对比噪声比(contrast-to-noise ratio, CNR)。具体方法:测量兴趣区(regions of interest, ROI)的信号强度均值 SI_{血管},同层面脑白质区信号强度均值 SI_{脑白质}及周围空气平均信号强度 SD_{噪声}。计算公式如

下:SNR = SI_{血管}/SD_{噪声}; CNR = (SI_{血管} - SI_{脑白质})/SD_{噪声}。

主观评价:图像质量评分:由 2 名放射科医师独立盲法阅片。采用 3 级评分标准分别对图像质量进行评价,标准如下:1 分,严重的图像变形伪影、SNR 低,图像质量差,不能用于临床评估;2 分,图像变形伪影较轻,SNR 可,血管边缘可识别,图像质量中等,可用于临床评估;3 分,无明显图像变形伪影,SNR 高,血管边缘清晰锐利,图像质量优,可用于临床评估。

图像质量优选:由 2 名阅片者分别从 4 种 MRA 图像中选取最佳序列图像,并记录:倾向常规 R-MRA;倾向 CS-DS5;倾向 CS-DS10;倾向 CS-DS20。

4 统计方法

采用 SPSS 18.0 软件进行统计学分析,计量资料使用均值±标准差($\bar{x} \pm s$)描述。采用 Shapiro-Wilkins 检验数据是否服从正态分布,图像质量主观评价采用 Wilcoxon 符号秩和检验,客观评价采用单因素方差分析,组间两两比较采用 LSD 法。采用 Kappa 系数对阅片者间进行一致性分析($k \geq 0.75$ 代表一致性较好)。采用 Wilcoxon 秩和检验分别比较 CS-MRA 与 R-MRA 组图像质量评分的差异。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

1. 客观评价结果

4 组 MRA 图像(图 1)的表观 SNR 及 CNR 测量结果见表 1。4 组图像的表观 SNR 值差异有统计学意义($P < 0.05$),进一步组间两两比较,除 CS-DS5 组和 CS-DS20 组间的 SNR 值差异有统计学意义($P = 0.005$),其余各组间的 SNR 值差异均无统计学意义。4 组图像间的 CNR 值差异无统计学意义($P > 0.05$)。

2. 主观评价结果

2 位阅片者间对图像质量主观评估具有较好的一致性($k = 0.97$)。Wilcoxon 秩和检验的统计结果显示:CS 各组与 R-MRA 组图像质量评分差异无统计学意义($|Z| = 0 \sim 1, P > 0.3$)。第一位阅片者认为 CS-DS20 为最佳序列图像的比例为 73.3%(11/15),认为 R-MRA 为最佳序列图像的比例为 26.7%(4/15);第二位阅片者认为 CS-DS20 为最佳序列图像

表 1 4 组 MRA 图像的表观 SNR 及 CNR

参数	R-MRA	CS-DS5	CS-DS10	CS-DS20	F	P
SNR	227.71±74.73	181.50±54.68	211.48±65.34	255.73±82.03	2.951	0.040
CNR	169.55±56.94	137.12±46.00	160.01±55.03	193.75±69.17	2.505	0.068

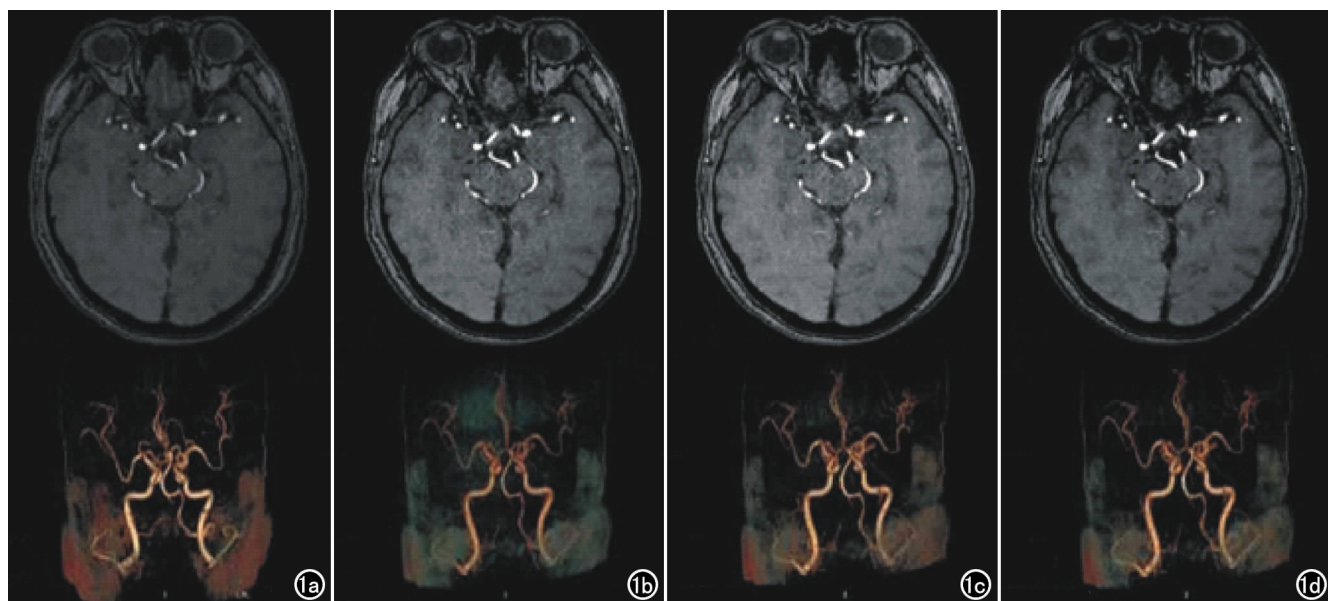


图 1 同一患者的头 MRA 图像。a) 常规 MRA; b) CS-MRA-DS5; c) CS-MRA-DS10; d) CS-MRA-DS20。

的比例为 60.0%(9/15),认为 CS-DS10 为最佳序列图像的比例为 6.7%(1/15),认为 R-MRA 为最佳序列图像的比例为 33.3%(5/15)。

讨 论

MRI 是常用的临床检查手段,但因其检查时间长降低了性价比。CS 可通过信号处理过程,利用 k 空间亚采样的数据生成 MR 图像,与常规方法比较可缩短 MRI 检查的时间。CS 理论认为,如果能将信号变换到一个变换域中,使其具备稀疏的特性,用一个与其变换基不相干的观测矩阵对这个信号进行观测,可以将变换之前的高维信号投影到一个低维空间上,然后通过求解一个优化问题,就可以从这些少量的投影中以高概率重构出原信号^[8-9]。在 MRI 检查中,实现 CS 的要求是^[1]:①MR 图像的稀疏表达,目标图像在已知转换域中具有稀疏表达特性,也就是说图像具有可压缩性;②k 空间亚采样引起的混叠伪影在该转换域中不相干;③非线性重建方法强化重建图像的稀疏性和数据的一致性。

本研究选择 3D-MRA 成像进行 CS 应用的测试,是综合考虑上述各种因素而决定的。在 3D-MR 成像中,其相位编码(ky)和层选相位编码(kz)均可以实现亚采样,即 CS 采样矩阵是二维的,比 2D 成像的采样矩阵高出一个维度^[1],其转换域中的信号相关程度更低,很好地满足了 CS 原理的前提条件^[5-7]。3D TOF MRA 为神经系统血管病变的常规检查方法,针对这个序列的临床应用探索如果取得有效的结果,受益的临床检查数量将会很多。

本研究中 CS-MRA 与 R-MRA 序列中设置的 TR

时间相同,均为 25ms,其他采集参数也完全相同。由于 TR 时间是固定不变的,两个序列的时间分辨率 tRes 由相位编码和层选编码步数决定。CS 加速序列中 NP 和 NS 经过 CS 编码后减少了编码步数,因而直接缩短了采样时间,提高了成像的时间分辨率。在 3D-MRA 序列全采样时采集到的 k 空间点数假设为 S_0 ,根据 CS 优化后的亚采样轨迹, $S_i/S_0 = 1/2$,实现了 2 倍加速成像,扫描时间由 5min49s 减少到了 2min54s。

通常情况下,如果对亚采样数据进行直接傅里叶重建,图像会出现混叠伪影,这是由于 k 空间数据填充过程中丢失了部分数据点,重建时发生能量泄漏产生了类似于噪声的伪影。根据 CS 原理及重建算法,则能有效恢复出目标图像^[10-12]。在 CS 重建过程中,可选择不同权重去除伪影,而产生多组图像,如 DS5、DS10、DS20,其中 DS20 的图像噪声最高。同时应注意到,图像的诊断效能并非只由噪声水平决定,而是多种因素共同作用的结果,因此主观评价的结果对临床应用的指导意义更大。CS 图像的 SNR 与传统 SNR 的概念不完全相同,传统意义的 SNR 测量不适合用于评估 CS 的非线性重建图像。例如,想得到很高的 SNR 时,可将正则化参数(regularization parameter)设为较大的值,但重建结果可能对临床是不利的。这样处理的结果虽然可以得到“干净”的图像,但小病灶的细节不能显示,图像对比变差。因此在不同临床场景下,CS 的降噪参数如何设定必须由医生根据实际情况决定,这也是本研究测试的主要内容之一。主观评价的结果显示两位阅片者较多地选择 DS20 做为最佳图像用于诊断,提示未来使用类似本研究中的序列参

数进行头 MRA 扫描时,可以首选 DS20 进行 CS 图像的重建。

本研究的特点之一是直接使用同一受试者的 R-MRA 与 CS-MRA 扫描数据进行比较。由于 CS 原理是 k 空间的亚采样,所以理论上可以使用 k 空间全采样的数据,抛弃其中一部分数据后再进行反向傅里叶变换,也可认为是得到了“模拟”CS 图像。在既往 CS 的研究中多使用这种模拟的方法,而本研究在大量前期测试的基础上^[5-7],在真实临床场景下直接使用 CS 扫描,结果更加可信。在初步验证了 CS-MRA 检查的可行性之后,应进一步研究其诊断效能,理想的方法是进行大规模、多中心临床试验以在不同疾病情况下,比较 CS-MRA 与 R-MRA 对疾病诊断效能的差异。

虽然对 CS 临床应用的初步探索得到较好的结果,但是应注意到 CS 技术的局限性,在临床常规应用之前,仍有很多问题需要解决,其中最重要的是各个检查部位的 CS 参数选择和优化,这是 CS 临床应用的必要前提条件^[13]。CS 在不同部位使用时,采样方式、扫描参数、稀疏变换的选择和设定等,需要大量测试以达到优化的组合。在真实的临床场景下,对每个患者的 MR 扫描都进行大量试错是不现实的,这是 CS 临床应用的最大困难。目前临床工作中,重建图像时间较长也是影响其临床应用的因素之一。可能的解决方案是针对不同的、特定解剖区域的图像进行 CS 测试,由于固定区域的 MR 观察任务常常是确定的,图像特征有较强的一致性,所以 CS 参数可以设置得相近。

在选择临床应用场景时,要考虑到各个部位疾病的特点。图像压缩后不能影响诊断,这是 CS 应用的前提条件,而“影响诊断”的图像因素很多,包括:SNR、CNR、体素大小、特定疾病的影像特征等^[14]。即使是图像性质相同,图像中的病变不同时,CS 的诊断效能也可能不同^[15]。从影像特征角度考虑,由于 MRA 图像中的观察目标比较单一,仅为高亮信号的血管,所以 CS 应用较易获得推广^[16]。而对于实质脏器的观察,CS 图像质量的评估则要更复杂^[17]。因此 CS 临床应用的另一个前提条件是,应针对不同解剖区域,建立一套特定的 CS 图像质量评价方法,做到对图像质量和诊断效能的标准化验证。只有经过上述验证后,才能将 CS 设置到常规临床扫描方案中。影像专家应在充分了解 CS 技术对解剖结构和疾病显示的影响后,才能有信心地应用这项技术。随着 CS 理论和算法本身的不断发展,在临床应用中的探索应是持续进行的^[12]。目前评价 CS 图像质量的方法通常是由影像科医师盲法阅片、主观定性评价的,未来应建立起一套针对 CS 的图像质量评价标准,自动地进行图像质量的评价,包括对图像中特定解剖结构和病变的评价等。

总之,CS 技术可用于 3.0T MR 扫描仪行头 MRA 检查,初步探索的结果证明,缩短扫描时间的 CS-MRA 图像得到阅片者的认可,可进一步行诊断效能的研究,以推动实现真正的临床应用。

(志谢:感谢飞利浦公司卓芝政在技术上的支持。)

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Geethanath S, Reddy R, Konar AS, et al. Compressed sensing MRI: a review[J]. Crit Rev Biomed Eng, 2013, 41(3): 183-204.
- [3] Compressed Sensing MRI: a review of the clinical literature[J]. Br J Radiol, 2015, 88(1056): 20150487.
- [4] 王水花, 张煜东. 压缩感知磁共振成像技术综述[J]. 中国医学物理学杂志, 2015, 32(2): 158-162.
- [5] Chen B, Zhao K, Li B, et al. High temporal resolution dynamic contrast-enhanced MRI using compressed sensing-combined sequence in quantitative renal perfusion measurement[J]. Magn Reson Imaging, 2015, 33(8): 962-969.
- [6] Li B, Li H, Li J, et al. Relaxation enhanced compressed sensing three-dimensional black-blood vessel wall MR imaging: Preliminary studies[J]. Magn Reson Imaging, 2015, 33(7): 932-938.
- [7] Li B, Dong L, Chen B, et al. Turbo fast three-dimensional carotid artery black-blood MRI by combining three-dimensional MERGE sequence with compressed sensing[J]. Magn Reson Med, 2013, 70(5): 1347-1352.
- [8] Candes EJ, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. IEEE Trans Inf Theory, 2006, 52(2): 489-509.
- [9] Donoho DL. Compressed sensing[J]. IEEE Trans Inf Theory, 2006, 52: 1289-1306.
- [10] 康瑞瑞, 曹斌, 王斌, 等. 基于小波与剪切波的压缩感知纵向 MR 成像[J]. 北京交通大学学报, 2017, 41(3): 127-132.
- [11] 张红雨. 基于向量稀疏和矩阵低秩的压缩感知核磁共振图像重建算法[J]. 天津理工大学学报, 2017, 33(1): 25-29.
- [12] 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.
- [13] Sharma SD, Fong CL, Tzung BS, et al. Clinical image quality assessment of accelerated magnetic resonance neuroimaging using compressed sensing[J]. Invest Radiol, 2013, 48(8): 638-645.
- [14] Chan KK, Lou SL, Huang HK. Full-frame transform compression of CT and MR images[J]. Radiology, 1989, 171(3): 847-851.
- [15] Ozturk-Isik E, Marshall I, Filipiak P, et al. Workshop on reconstruction schemes for magnetic resonance data: summary of findings and recommendations[J]. R Soc Open Sci, 2017, 4(2): 160731.
- [16] Fushimi Y, Okada T, Kikuchi T, et al. Clinical evaluation of time-of-flight MR angiography with sparse undersampling and iterative reconstruction for cerebral aneurysms[J]. NMR Biomed, 2017, 30(11): 3774.
- [17] 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: 2017-12-14)