

# 基于压缩感知的三维快速 MR 血管壁成像临床应用研究

窦末末<sup>1,2</sup>, 陈 凯<sup>1,3</sup>, 刘远健<sup>1</sup>, 雷 益<sup>1</sup>, 成官迅<sup>2,4</sup>

(1.深圳市萨米医疗中心/深圳市第四人民医院医学影像科, 广东 深圳 518118;

2.汕头大学医学院, 广东 汕头 515000;

3.医学影像人工智能湖南省重点实验室/湘南学院, 湖南 郴州 423000;

4.北京大学深圳医院医学影像科, 广东 深圳 518000)

**摘要:**目的 评价压缩感知(CS)在高分辨率颅内血管壁成像(HR-MR VWI)中的临床应用价值。方法 回顾性分析 2022 年 1 月-2023 年 4 月萨米医疗中心招募的 14 例健康志愿者及 14 例动脉粥样硬化患者(动脉粥样硬化斑块 32 个)的 MRI 检查影像资料, 均接受了 T1mx3d-uCS 和 T1mx3d-nonCS 序列检查, 对其血管壁图像质量进行盲法独立评分, 分析 T1mx3d-uCS 和 T1mx3d-nonCS 序列图像质量、序列管径宽度及序列斑块性质。结果 与 T1mx3d-nonCS 相比, T1mx3d-uCS 的扫描覆盖全脑+颈动脉分叉以上血管壁成像, 扫描时间缩短; T1mx3d-nonCS 和 T1mx3d-uCS 在不同血管分段的图像质量、清晰度及伪影评分比较, 差异无统计学意义( $P>0.05$ ); T1mx3d-uCS 序列扫描图像识别未出现漏诊情况; T1mx3d-nonCS 和 T1mx3d-uCS 两组扫描序列对斑块狭窄程度分级和斑块强化分级检出率比较, 差异无统计学意义( $P>0.05$ )。结论 与 T1mx3d-nonCS 相比, T1mx3d-uCS 可实现高分辨率、各向同性、全脑+颈动脉分叉以上血管壁成像, 图像质量可接受, 不影响诊断性能, 同时缩短扫描时间。

**关键词:** 动脉粥样硬化; 斑块; 高分辨率磁共振血管壁成像; 压缩感知

中图分类号: R445

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-1959.2024.21.013

文章编号: 1006-1959(2024)21-0061-05

## Clinical Application of Rapid Three Dimensional MR Angiography Based on Compressed Sensing

DOU Mowei<sup>1,2</sup>, CHEN Kai<sup>1,3</sup>, LIU Yuanjian<sup>1</sup>, LEI Yi<sup>1</sup>, CHENG Guanxun<sup>2,4</sup>

(1.Department of Medical Imaging, Shenzhen Samii Medical Center/the Fourth People's Hospital

of Shenzhen, Shenzhen 518118, Guangdong, China;

2.Medical College of Shantou University, Shantou 515000, Guangdong, China;

3.Medical Image Artificial Intelligence, Hunan Key Laboratory/Xiangnan University, Chenzhou 423000, Hunan, China;

4.Department of Medical Imaging, Shenzhen Hospital, Peking University, Shenzhen 518000, Guangdong, China)

**Abstract:** Objective To evaluate the clinical application value of compressed sensing (CS) in high resolution magnetic resonance vascular wall imaging (HR-MR VWI). Methods The MRI imaging data of 14 healthy volunteers and 14 patients with atherosclerosis (32 atherosclerotic plaques) recruited from Sami Medical Center from January 2022 to April 2023 were retrospectively analyzed. All patients underwent T1mx3d-uCS and T1mx3d-nonCS sequence examinations. The image quality of the vascular wall was scored independently by blind method, and the image quality, sequence diameter width and sequence plaque properties of T1mx3d-uCS and T1mx3d-nonCS sequences were analyzed. Results Compared with T1mx3d-nonCS, the scanning of T1mx3d-uCS covered the whole brain+carotid artery bifurcation, and the scanning time was shortened. There was no significant difference in image quality, clarity and artifact score between T1mx3d-nonCS and T1mx3d-uCS in different vascular segments ( $P>0.05$ ). There was no missed diagnosis in T1mx3d-uCS sequence scanning image recognition. There was no significant difference in the detection rate of plaque stenosis grade and plaque enhancement grade between T1mx3d-nonCS and T1mx3d-uCS scanning sequences ( $P>0.05$ ). Conclusion Compared with T1mx3d-nonCS, T1mx3d-uCS can achieve high resolution, isotropic, whole brain+carotid artery bifurcation vascular wall imaging, and the image quality is acceptable, which does not affect the diagnostic performance and shortens the scanning time.

**Key words:** Atherosclerosis; Plaque; High resolution magnetic resonance vascular wall imaging; Compressed sensing

基金项目: 1.深圳市萨米医疗中心院内课题基金(编号:SSMC-2023-A6); 2.医学影像人工智能湖南省重点实验室开放课题(编号:YXZN2022001)

作者简介: 窦末末(1990.10-), 女, 广东深圳人, 硕士, 住院医师, 主要从事神经影像学诊断及脑功能影像学研究

通讯作者: 成官迅(1966.2-), 男, 湖北天门人, 博士, 主任医师, 教授, 硕士生导师, 主要从事神经影像学诊断及脑功能影像学研究

高分辨率颅内血管壁成像(high resolution magnetic resonance vascular wall imaging, HR-MR VWI)以动脉血管壁为成像目标,可直接显示动脉粥样硬化斑块的大小、形态和组成成分,评估动脉硬化管腔的狭窄程度、斑块分布、斑块信号特点等,为临床治疗提供更多的有用信息<sup>[1]</sup>。为了减少采集时间,既往临床常采用并行采集技术(parallel acquisition technique, PAT)。2006年,Candes EJ等<sup>[2]</sup>提出了压缩感知(compressed sensing, CS)理论,其与PAT组合可提高大多数MRI序列的扫描速度,广泛应用于乳房、颈动脉斑块、腹部和肌肉骨骼疾病中<sup>[3-6]</sup>。本研究旨在评价CS在HR-MR VWI中的临床应用价值,现报道如下。

## 1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性分析2022年1月-2023年4月深圳市萨米医疗中心招募的14例健康志愿者及14

例动脉粥样硬化患者(动脉粥样硬化斑块32个)的MRI检查影像资料,均接受了T1mx3d-uCS和T1mx3d-nonCS序列检查。纳入标准:18~85岁;能顺利完成各项相关检查、临床资料齐全。排除标准:行T1mx3d扫描没有uCS;核磁共振成像有严重运动伪影。健康志愿者男5例,女9例;年龄18~85岁,平均年龄(45.65±13.84)岁;动脉粥样硬化患者男9例,女5例;年龄18~85岁,平均年龄(53.64±8.64)岁。两组性别、年龄比较,差异无统计学意义( $P>0.05$ ),具有可比性。本研究报告并通过深圳市萨米医疗中心伦理委员会评审(文件编码,F-LL-02-CZGC-14-1-0),所有参与者自愿接受本项目临床观察并签署知情同意书。

1.2 方法 所有图像均使用配备32通道头部线圈和8通道颈部线圈的3.0T MR(联影U780)采集,扫描参数见表1。

表1 3D T<sub>1</sub>WI扫描参数

成像序列	T1mx3d-uCS/CE-T1mx3d-uCS	T1mx3d-nonCS/CE-T1mx3d-nonCS
TR(ms)	800	800
TE(ms)	13.98	13.98
FOV(mm)	172×220	172×220
层内分辨率(mm)	0.4×0.4	0.4×0.4
层间分辨率(mm)	0.4	0.4
层数	360	360
加速因子	5	2.2
采集时间	4 min 55 s	7 min 46 s

注:在静脉注射造影剂5 min后进行增强后3D T<sub>1</sub>WI成像,先进行CE-T1mx3d-uCS,然后再进行CE-T1mx3d-nonCS。

## 1.3 图像分析

1.3.1 图像质量评估 由2位具有10年以上经验的神经放射科医生R1和R2分别对研究对象的血管壁图像质量进行盲法独立评分。完整的颅内和颈动脉血管床分为3个节段进行图像分级评估。1段:大脑中动脉(middle cerebral artery, MCA)的M<sub>1-2</sub>节段和颈内动脉(internal carotid artery, ICA)的C<sub>6-7</sub>节段;2段:基底动脉(basilar artery, BA)和椎动脉(vertebral artery, VA)的V<sub>3-4</sub>段;3段:C<sub>1-5</sub>、颈总动脉(common carotid artery, CCA)和颈外动脉(external carotid artery, ECA)。分级有3个定性因素:血管壁的图像质量、清晰度和伪影的存在<sup>[8]</sup>。每个因素按0~5分的顺序分级,0分表示无法识别且完全模糊的动脉壁

和血管边缘,伴有粗大的伪影;1分表示无法识别且明显模糊的动脉壁和血管边缘有大量伪影;2分表示可识别但严重模糊的动脉壁和血管边缘有较大的伪影;3分表示可识别但部分模糊的动脉壁和血管边缘有中等伪影;4分表示血管壁和管腔边缘良好且清晰,有轻微伪影;5分表示血管壁和管腔边缘良好且清晰,没有伪影。评分≥3分定义为可接受。

1.3.2 斑块特征评估 ①狭窄程度:轻度(狭窄<50%),中重度(狭窄50%~99%)以及闭塞;②斑块内高信号(hyperintensity within plaque, HIP)定义为增强前图像上斑块内的最大信号强度比参考血管壁(邻近正常脑组织或邻近肌肉)信号强度高150%<sup>[9]</sup>;③增强后HR-MR VWI图像分级:0级为强化小于或等于

同一患者无斑块的颅内动脉壁;1 级为介于 0~2 级;2 级为强化大于或等于垂体柄<sup>[9]</sup>。

1.4 统计学方法 采用 SPSS 27.0.1 统计学软件进行数据统计分析。计量资料以( $\bar{x}\pm s$ )表示,采用  $t$  检验;计数资料以[n(%)]表示,采用  $\chi^2$  检验。以  $P<0.05$  表示差异有统计学意义。

2 结果

2.1 T1mx3d-nonCS 和 T1mx3d-uCS 两组序列图像质量比较 在所有案例中,T1mx3d-nonCS 和 T1mx3d-uCS 在不同血管分段的图像质量、清晰度及伪影评

分比较,差异无统计学意义( $P>0.05$ ),见表 2。

2.2 T1mx3d-nonCS 和 T1mx3d-uCS 两组序列管径宽度比较 在所有案例中,T1mx3d-nonCS 和 T1mx3d-uCS 两组序列上在 3 段测量的动脉血管管径宽度比较,差异无统计学意义( $P>0.05$ ),见表 3。

2.3 T1mx3d-nonCS 和 T1mx3d-uCS 两组序列斑块性质比较 T1mx3d-uCS 序列扫描图像识别未出现漏诊情况;T1mx3d-nonCS 和 T1mx3d-uCS 两组扫描序列对斑块狭窄程度分级和斑块强化分级检出率比较,差异无统计学意义( $P>0.05$ ),见表 4、图 1。

表 2 T1mx3d-nonCS 和 T1mx3d-uCS 两组序列图像质量比较( $\bar{x}\pm s$ ,分)

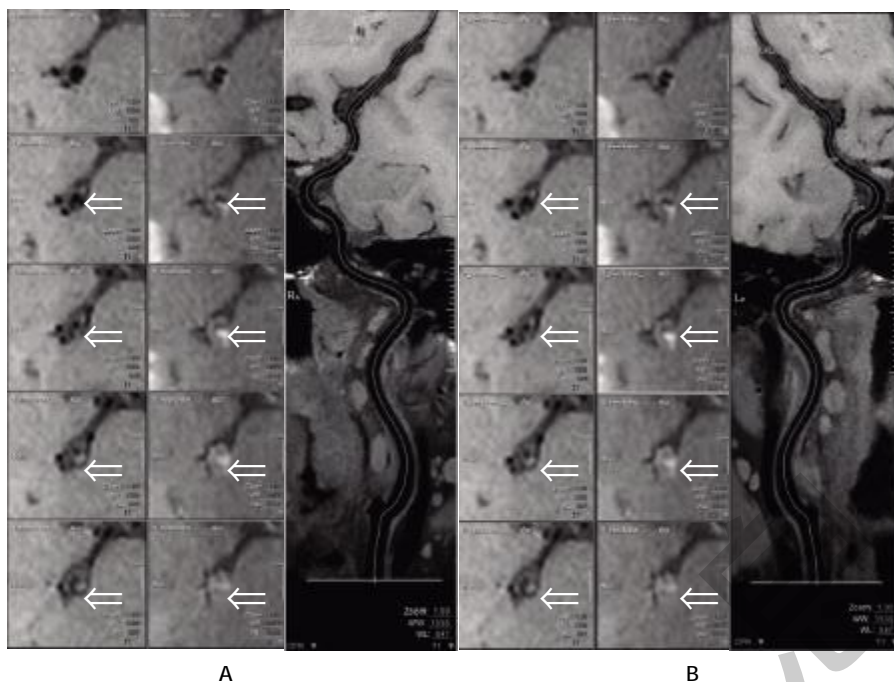
血管分段	图像分级定性因素	T1mx3d-nonCS	T1mx3d-uCS	$t$	$P$
C <sub>6-7</sub> 、MCA	图像质量	4.14±0.36	3.96±0.43	1.695	0.096
	清晰度	4.11±0.31	3.93±0.38	1.921	0.060
	伪影	4.18±0.39	4.18±0.39	0.000	1.000
BA、VA	图像质量	3.79±0.57	3.61±0.63	1.115	0.270
	清晰度	3.64±0.62	3.50±0.69	0.812	0.421
	伪影	3.79±0.57	3.64±0.62	0.898	0.373
CCA、C <sub>1-5</sub> 、ECA	图像质量	3.93±0.47	3.82±0.55	0.788	0.434
	清晰度	3.89±0.42	3.71±0.53	1.395	0.169
	伪影	3.96±0.43	3.96±0.43	0.000	1.000

表 3 T1mx3d-nonCS 和 T1mx3d-uCS 管径宽度测量比较( $\bar{x}\pm s$ ,mm)

血管分段	T1mx3d-nonCS	T1mx3d-uCS	$t$	$P$
C <sub>6-7</sub> 、MCA	3.20±0.50	3.27±0.59	-0.452	0.653
BA、VA	3.61±0.40	3.65±0.42	-0.374	0.710
CCA、C <sub>1-5</sub> 、ECA	7.41±1.19	7.40±1.17	0.017	0.987

表 4 T1mx3d-nonCS 和 T1mx3d-uCS 两组序列斑块性质比较[n(%)]

斑块特征	T1mx3d-nonCS( $n=32$ )	T1mx3d-uCS( $n=32$ )	$\chi^2$	$P$
斑块内高信号的识别	2(6.25)	2(6.25)		
斑块狭窄程度分级			0.091	0.763
轻度	26(81.25)	24(75.00)		
中重度	6(18.75)	8(25.00)		
闭塞	0	0		
斑块强化分级			0.075	0.963
0 级	11(34.38)	10(31.25)		
1 级	18(56.35)	19(59.38)		
2 级	3(9.38)	3(9.38)		



注:1例51岁左侧大脑中动脉斑块的女性患者的T1mx3d-nonCS/CE-T1mx3d-nonCS(A)和T1mx3d-uCS/CE-T1mx3d-uCS(B)MPR曲线及断层图像;两组序列均能清楚显示斑块呈明显强化(箭头)。

图 1 左侧大脑中动脉斑块的女性患者 MPR 曲线及断层图像

### 3 讨论

将 CS 用于 3D 颅内血管壁成像的研究尚在探索阶段,其对血管壁的诊断性能尚不十分明确,因此对其进行深入研究具有重要临床意义<sup>[7]</sup>。本研究使用的 CS 技术既减少了扫描时间,同时能保持良好的图像质量。CS 技术的应用改善了患者的舒适度,降低了运行成本,并可能提高 MRI 检查的成功率,并且有助于 HR-MR VWI 在临床环境中的应用。

一项对 28 名受试者(包括 20 例中风患者)的基于压缩感知的头颈联合高分辨血管壁成像的研究表明<sup>[6]</sup>,CS 将扫描时间减少了近一半,且不影响血管壁管径宽度的测量及图像质量。有研究<sup>[8,11-13]</sup>在 HR-MR VWI 对 CS 使用了 1.5 到 10 的加速系数,结果显示加速系数为 1.5 的 CS 提供了稳健和可重复的结果;此外,加速系数为 3~5 的 CS 应用于颅内 HR-MR VWI 可产生更高的图像质量,可能因为扫描时间显著缩短,运动等伪影也相应减少。与原始图像相比,CS 图像看起来略有模糊,可能是由于 CS 重建中的去噪效果所致<sup>[14]</sup>。本研究中部分患者 T1mx3d-uCS 序列图像中存在管壁边缘的模糊现象,可能会影响正常和病变壁的描绘,从而导致视觉评分的降

低；然而，T1mx3d-uCS 图像质量与 T1mx3d-nonCS 图像质量的评估是相当的。因此，T1mx3d-uCS 图像中少许管壁边缘显示的模糊现象并不会影响血管管径测量和斑块的识别及性质判断，这可能是 CS 重建中去噪过程的结果。

本结果显示,T1mx3d-uCS/CE-T1mx3d-uCS与mx3d-nonCS/CE-T1mx3d-nonCS比较,三段血管中无论是在图像质量评分、图像清晰度评分还是在图像伪影评估评分均高于Park CJ等<sup>[14]</sup>的研究结果,且两者间均无统计学意义。可能因为本研究所用研究序列T1mx3d-uCS/CE-T1mx3d-uCS(4 min 55 s)及mx3d-nonCS/CE-T1mx3d-nonCS(7 min 46 s)均短于Park CJ等<sup>[14]</sup>所用序列(时间分别为7 min 14 s及8 min 21 s);且Li B等<sup>[15]</sup>的研究分别分析了加速因子为1×、2×、3×、4×、5×的图像,而本研究只比较了加速因子为5×及并行采集加速因子为2.2×的图像,这也大大减少了志愿者扫描所需要的时间,减少运动等伪影的产生。

本研究中在不同节段的血管中,MCA 的图像评分最好,而 BA 的图像评分最差,这可能是因为颅内的 BA 和 VA 距离体表线圈更远,信号灵敏度降低,

头部和颈部线圈交界处缺乏线圈覆盖<sup>[6]</sup>。另本研究采用矢状位成像,与既往全脑研究<sup>[12]</sup>类似,且扫描时间控制在 5 min 以内。增强后图像是磁共振成像的重要组成部分,因为其有助于检测病变并确定管腔狭窄的原因<sup>[1]</sup>。本研究通过比较 T1mx3d-nonCS 和 T1mx3d-uCS 两组序列图像,发现 T1mx3d-uCS 提供了与 T1mx3d-nonCS 相当的整体图像质量,对血管管径定量测量、斑块狭窄程度和斑块增强情况的识别均无差异,且不同测量者间一致性高,对斑块数量、斑块内高信号存在情况识别均精确,并未出现漏诊情况。而且在临床应用环境中,大多数 MRI 序列的扫描时间都在 5 min 以内。因此,该方案在常规临床扫描中具有很高的应用潜力<sup>[16]</sup>。

综上所述,将 CS 应用于 HR-MR VWI 图像时可实现高分辨率、各向同性、全脑+颈动脉分叉以上血管壁成像,与 mx3d-nonCS 相比,具有可接受的图像质量,斑块特征分析不会漏诊,同时减少扫描时间。本研究的局限性在于:第一,本研究只在一小部分志愿者中进行了评估,且本研究病例中没有急重症患者纳入,下一步可加大样本量的研究,并适当增加一些重症患者的加入;第二,研究中只评估了 T<sub>1</sub> 加权成像技术,下一步可进一步的研究来评估压缩感知在 T<sub>2</sub> 加权快速自旋回波成像中的性能。

#### 参考文献:

- [1]Saba L,Yuan C,Hatsukami TS,et al.Carotid Artery Wall Imaging: Perspective and Guidelines from the ASNR Vessel Wall Imaging Study Group and Expert Consensus Recommendations of the American Society of Neuroradiology [J].American Journal of Neuroradiology,2018,39(2):E9-E31.
- [2]Candes EJ,Tao T.Near-Optimal Signal Recovery From Random Projections:Universal Encoding Strategies? [J].IEEE Transactions on Information Theory,2006,52:5406-5425.
- [3]Feske SK.Ischemic Stroke[J].The American Journal of Medicine, 2021,134(12):1457-1464.
- [4]Feng X,Chan KL,Lan L,et al.Stroke Mechanisms in Symptomatic Intracranial Atherosclerotic Disease[J].Stroke,2019,50(10): 2692269-9.
- [5]Kleindorfer DO,Towfighi A,Chaturvedi S,et al.2021 Guideline for the Prevention of Stroke in Patients With Stroke and Transient Ischemic Attack:A Guideline From the American Heart Association/American Stroke Association[J].Stroke,2021,52(7):e364-e467.
- [6]Jia S,Zhang L,Ren L,et al.Joint intracranial and carotid vessel wall imaging in 5 minutes using compressed sensing accelerated DANTE-SPACE[J].European Radiology,2019,30(1):119-127.
- [7]Jia L,Zhang N,Kukun H,et al.Three-dimensional intra- and extracranial arterial vessel wall joint imaging in patients with cerebrovascular disease [J].European Journal of Radiology,2020,126: 108921.
- [8]Wan L,Zhang N,Zhang L,et al.Reproducibility of simultaneous imaging of intracranial and extracranial arterial vessel walls using an improved T1-weighted DANTE-SPACE sequence on a 3 T MR system[J].Magnetic Resonance Imaging,2019,62:152-158.
- [9]Leng X,Lan L,Ip HL,et al.Hemodynamics and stroke risk in intracranial atherosclerotic disease [J].Annals of Neurology,2019,85 (5):752-764.
- [10]Ran Y,Wang Y,Zhu M,et al.Higher Plaque Burden of Middle Cerebral Artery Is Associated With Recurrent Ischemic Stroke[J].Stroke,2020,51(2):659-662.
- [11]Suh CH,Jung SC,Lee HB,et al.High-Resolution Magnetic Resonance Imaging Using Compressed Sensing for Intracranial and Extracranial Arteries:Comparison with Conventional Parallel Imaging[J].Korean Journal of Radiology,2019,20(3):487-497.
- [12]Wu G,Wang H,Zhao C,et al.Large Culprit Plaque and More Intracranial Plaques Are Associated with Recurrent Stroke:A Case-Control Study Using Vessel Wall Imaging [J].American Journal of Neuroradiology,2022,43(2):207-215.
- [13]Yuan J,Usman A,Reid SA,et al.Three-dimensional black-blood multi-contrast carotid imaging using compressed sensing:a repeatability study [J].Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine,2017,31(1):183-190.
- [14]Park CJ,Cha J,Ahn SS,et al.Contrast-Enhanced High-Resolution Intracranial Vessel Wall MRI with Compressed Sensing: Comparison with Conventional T1 Volumetric Isotropic Turbo Spin Echo Acquisition Sequence[J].Korean Journal of Radiology, 2020,21(12):1334-1344.
- [15]Li B,Li H,Kong H,et al.Compressed sensing based simultaneous black- and gray-blood carotid vessel wall MR imaging [J].Magnetic Resonance Imaging,2017,38:214-223.
- [16]Tian X,Shi Z,Wang Z,et al.Characteristics of culprit intracranial plaque without substantial stenosis in ischemic stroke using three-dimensional high-resolution vessel wall magnetic resonance imaging[J].Frontiers in Neuroscience,2023,17:1160018.

收稿日期:2023-09-26;修回日期:2023-11-10

编辑/杜帆