

Artificial intelligence assisted compressed sensing 3D reconstruction for 5.0T MR highly accelerated ultra-high resolution whole brain vessel wall imaging

人工智能辅助压缩感知 3D 重建用于 5.0T MR 加速全脑超高分辨血管壁成像

贾森^{1*}, 冯飞², 戚玉龙², 张辉², 赵佳盈¹, 程静¹, 张磊¹,
张娜¹, 刘新¹, 郑海荣¹, 梁栋^{1,3}

(1. 中国科学院深圳先进技术研究院劳特伯生物医学成像研究中心, 3. 医学人工智能研究中心, 广东 深圳 518055; 2. 北京大学深圳医院医学影像科, 广东 深圳 518036)

[Keywords] vessel wall; magnetic resonance imaging; deep learning; compressed sensing; prospective studies

[关键词] 血管壁; 磁共振成像; 深度学习; 压缩感知; 前瞻性研究

DOI: 10.13929/j.issn.1003-3289.2024.05.014

[中图分类号] R743; R445.2 [文献标识码] B [文章编号] 1003-3289(2024)05-0699-04

缺血性脑卒中是我国发病率和死亡率最高的疾病, 动脉粥样硬化斑块破裂堵塞血管形成血栓系主要病因^[1-2]。相比血管造影, MR 血管壁成像(vessel wall imaging, VWI)检测颅内斑块、区分管壁病变等的敏感度和特异度均更高; 但颅内血管走行迂曲, 紧邻脑脊液、脑实质等周边组织, 而 VMI 信噪比低、扫描时间长, 无法以高分辨率显示颅内血管^[3]。并行成像和压缩感知(compressed sensing, CS)技术已广泛用于临床以缩短 3.0T 高分辨率 VMI 扫描时间^[4-5], 但存在重建较为耗时、算法调整参数困难及显示管壁易模糊等问题。为此有研究^[6]以超高场 7.0T MR 仪行各向同性 0.4 mm 分辨率成像, 但用时约需 11 min, 且磁场不均匀性影响图像质量。近年来, 基于深度学习(deep learning, DL)的重建方法已用于 3.0T MRI。本研究观察人工智能辅助 CS(artificial intelligence assisted CS 3D, ACS 3D)重建技术用于改善 5.0T MR VMI 质量的价值。

1 资料与方法

1.1 研究对象 于 2023 年 11 月前瞻性招募 3 名男性(年龄分别为 24、71 和 25 岁)及 1 名 22 岁女性健康

志愿者, 均无脑血管疾病史及相关风险因素。本研究获院伦理委员会批准(SIAT-IRB-180315-H0228)。受试者均签署知情同意书。

1.2 仪器与方法 采用联影 uMR Jupiter 5.0T MR 仪、48 通道收发一体头部线圈。嘱受试者仰卧, 采集各向同性 0.4 mm 分辨率全脑矢状位 VMI, 10 倍加速扫描时间 6 min; 参数: 非选择性激发 T1W 可变翻转角快速自旋回波(modulated flip angle technique in refocused imaging with extended echo train, MATRIX)序列, FOV 170 mm×192 mm×156 mm, 矩阵 416×480×388; 采用 ACS 3D 算法进行重建, 之后对图像进行 1.5 倍插值, 分别基于 B1 场图和 N4 算法进行不均匀校正。

1.2.1 对比 5.0T 不同重建算法 针对其中的 24 岁男性基于传统并行成像 Fast 2D 及 CS 重建全脑 VMI, 并与 ACS 3D 重建算法进行对比。基于 71 岁男性采用 CS 重建颅内血管段(大脑中动脉、椎动脉、大脑后动脉)VMI, 人为调整稀疏约束权重, 并与 ACS 3D 重建算法对比。

1.2.2 对比不同场强 ACS 3D 重建算法 对 25 岁男

[基金项目] 国家自然科学基金(62301548)。

[第一作者] 贾森(1988—), 男, 河南驻马店人, 博士, 助理研究员。研究方向: 快速磁共振成像技术及应用。

[通信作者] 贾森, 中国科学院深圳先进技术研究院劳特伯生物医学成像研究中心, 518055。E-mail: sen.jia@siat.ac.cn

[收稿日期] 2023-12-29 [修回日期] 2024-05-08

性行全脑 3.0T MR VMI,分辨率、序列、参数及重建方法同 5.0T,并与 5.0T 重建 VMI 对比。

1.2.3 对比 5.0T 不同分辨率成像 基于 22 岁女性行各向同性 0.5 mm 分辨率全脑 VMI,并与 0.4 mm 分辨率 VMI 对比。

2 结果

2.1 对比 5.0T 不同重建算法 并行成像 Fast 2D 重建 VMI 可见明显噪声,而 CS 和 ACS 3D 重建算法均可有效抑制噪声,见图 1。相比 CS,ACS 3D 重建图像可清晰显示颅内血管(大脑中动脉、椎动脉及大脑前动脉)血管壁,于高倍欠采样加速时对细节具有高保真作用,见图 2。

2.2 对比不同场强 ACS 3D 重建算法 相比 3.0T,基于 5.0T MRI 的 ACS 3D 重建 VMI 显示血管壁更清晰。见图 3。

2.3 对比 5.0T 不同分辨率成像 相比 0.5 mm 分辨率,基于 5.0T MRI 的 0.4 mm 分辨率 VMI 显示血管壁更清晰。见图 4。

3 讨论

ACS 3D 通过无缝融合部分傅里叶、并行成像、CS 和人工智能加速技术,综合利用 K 空间相位先验、多通道并行接收线圈提供的空间编码先验、图像稀疏先验及人工智能大数据先验而实现精准估计及恢复高度欠采数据;其数学模型表示为:

$$\min_x \|Dx - y\|_2^2 + \lambda_1 \|(G - D)x\|_2^2 + \lambda_2 \|Wx\|_1 + \lambda_3 TV(x) + \lambda_4 \|T(x_{pred}, x)\|_1$$

其中, x 表示待重建的多通道图像, D 表示欠采样算子(以 K 空间采样位置值为 1、未采样位置值为 0), y 表示 K 空间采样数据, $\|Dx - y\|_2^2$ 表示采样数据保

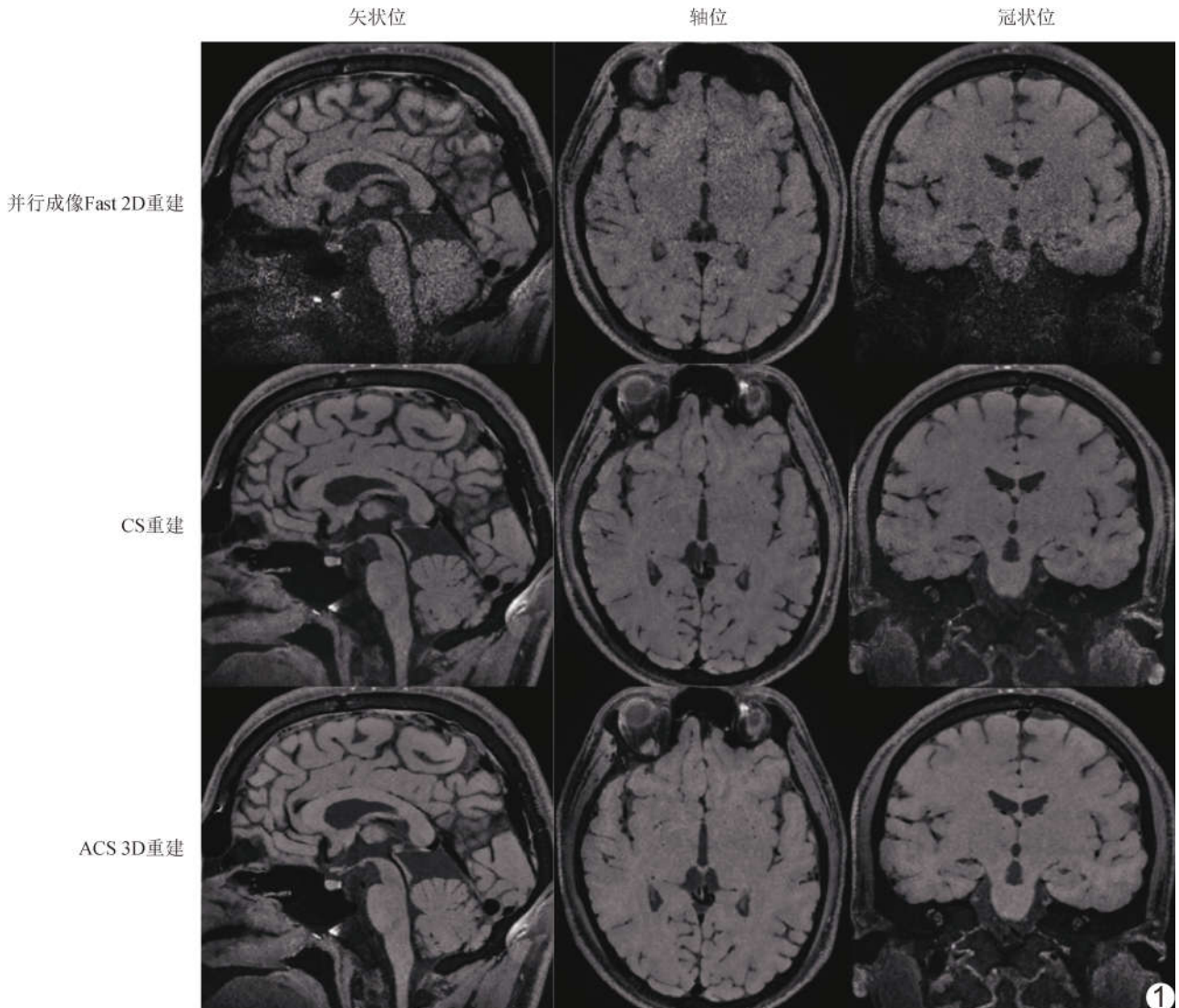


图 1 基于 5.0T MRI 以不同算法重建全脑 VMI

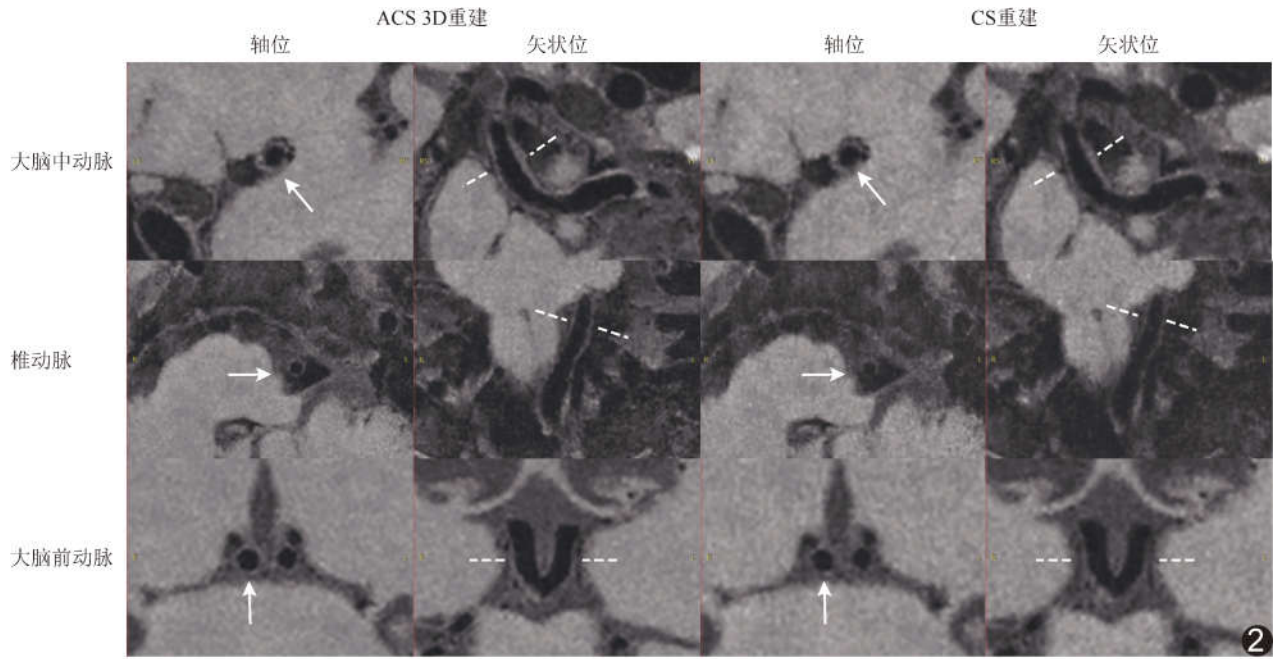


图 2 基于 5.0T MRI 以不同算法重建颅内血管段 VMI (箭示血管壁,虚线示轴位血管壁横断面对应位置)

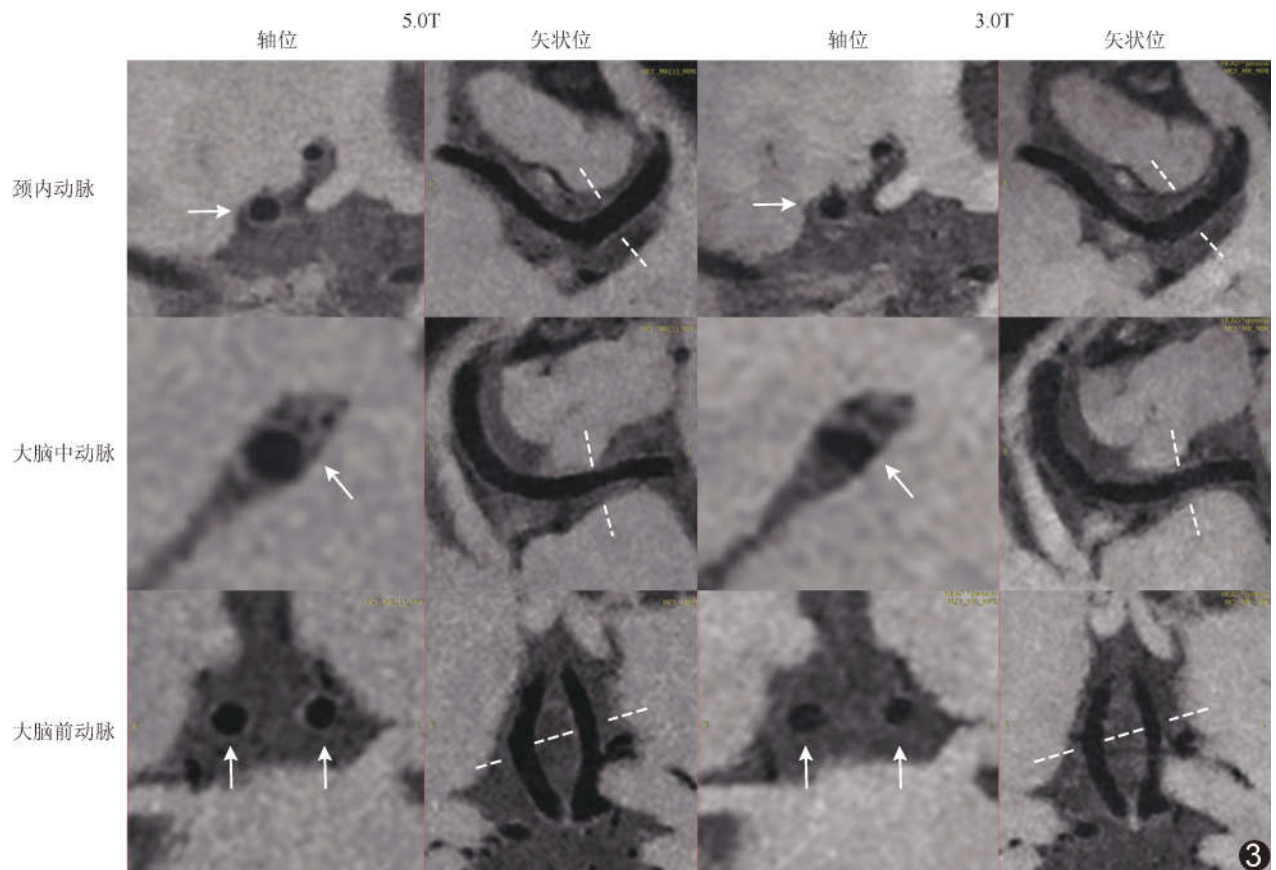


图 3 基于不同场强 MRI 以 ACS 3D 重建 VMI (箭示血管壁,虚线示轴位血管壁横断面对应位置)

真项; G 表示 K 空间内 SPIRiT 卷积算子, I 表示单位
对角阵, $\|(G - D)x\|_2^2$ 表示 SPIRiT 卷积自一致约束

项; W 代表二维图像稀疏变换, $\|\cdot\|_1$ 代表稀疏正则化
项的 l_1 范数。

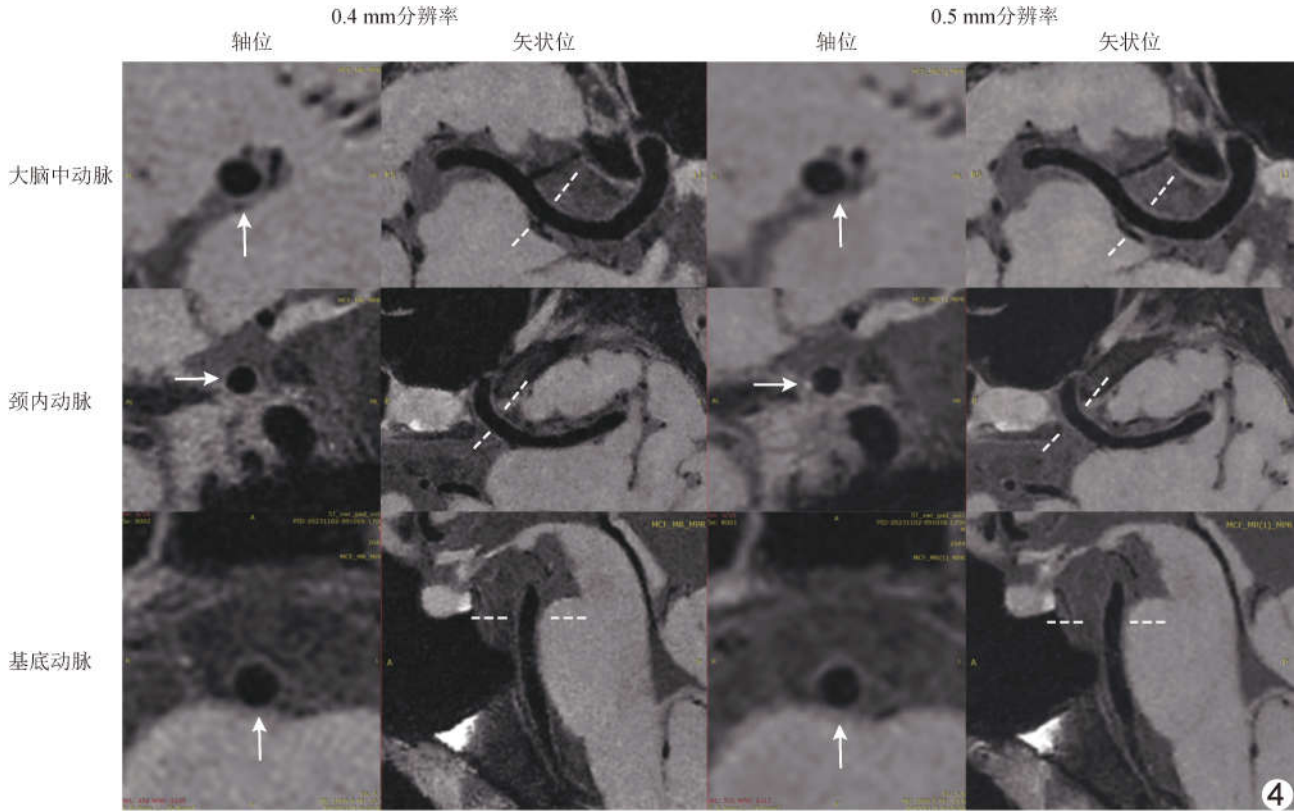


图 4 基于 5.0T MRI 以不同分辨率行全脑 VMI (箭示血管壁,虚线示轴位血管壁横断面对应位置)

ACS 3D 中的 DL 神经网络模块基于 CS 迭代计算,可利用大量高质量数据进行训练,并受部分傅里叶、并行成像和 CS 模块成像物理和数学模型约束,故可克服人工智能的“黑盒”效应,并可在保证图像质量的同时缩短扫描时间^[7]。ACS 3D 重建技术通过神经网络实现深度学习先验知识,用于 5.0T MR VMI 时可获得较传统技术更高的加速因子;这是由于 5.0T 场强可显著提高 0.4 mm 分辨率 VMI 信噪比,而进一步结合 ACS 3D 重建可有效抑制 10 倍高度欠采样导致的伪影和噪声,将全脑超高分辨率 VMI 扫描时间缩短至临床更易接受的 6 min 内。

本研究基于 5.0T MR 仪和 48 通道收发一体头线圈提供的高信噪比,采用 ACS 3D 重建实现了高达 10 倍加速的超高分辨率(各向同性 0.4 mm)全脑 VMI,且所获重建图像质量优于传统重建算法及 3.0T。

利益冲突:全体作者声明无利益冲突。

作者贡献:贾森撰写文章、研究设计、研究实施、图像处理、经费支持;冯飞、张辉图像分析;戚玉龙图像及数据分析;赵佳盈查阅文献、研究实施;程静研究实施、修改文章;张磊研究设计、研究实施;张娜修改文章;刘新审阅文章;郑海荣指导;梁栋指导、审阅文章。

[参考文献]

- [1] ZHOU M, WANG H, ZENG X, et al. Mortality, morbidity, and risk factors in China and its provinces, 1990-2017: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017 [J]. *Lancet*, 2019, 394(10204):1145-1158.
- [2] MANDELL D M, MOSSA-BASHA M, QIAO Y, et al. Intracranial vessel wall MRI: Principles and expert consensus recommendations of the American Society of Neuroradiology [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2017, 38(2):218-229.
- [3] FAN Z, YANG Q, DENG Z, et al. Whole-brain intracranial vessel wall imaging at 3 Tesla using cerebrospinal fluid-attenuated T1-weighted 3D turbo spin echo [J]. *Magn Reson Med*, 2017, 77(3):1142-1150.
- [4] ZHU C, TIAN B, CHEN L, et al. Accelerated whole brain intracranial vessel wall imaging using black blood fast spin echo with compressed sensing (CS-SPACE) [J]. *MAGMA*, 2017, 31(3):457-467.
- [5] 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]. *Eur Radiol*, 2020, 30(1):119-127.
- [6] FENG J, LIU X, ZHANG Z, et al. Comparison of 7 T and 3 T vessel wall MRI for the evaluation of intracranial aneurysm wall [J]. *Eur Radiol*, 2022, 32(4):2384-2392.
- [7] 黄超, 胡军武, 李丽, 等. 人工智能辅助压缩感知技术用于腰椎 MRI [J]. *中国医学影像技术*, 2023, 39(7):1080-1083.