

Ultra-fast scanning scheme based on deep learning reconstruction for cervical MR examination

RAO Xianfeng¹, YANG Shuwen¹, CHEN Jing², KANG Zhengwen³, CHEN Jianwei¹,
WU Zetao¹, WANG Tong¹, WANG Bo¹, ZHANG Qiusheng^{1*}

(1. Department of Neurosurgery, 2. Department of Radiology, the First Affiliated Hospital of Shenzhen University, Shenzhen Second People's Hospital, Shenzhen 518000, China; 3. Department of Neurosurgery, Guangdong 999 Brain Hospital, Guangzhou 510000, China)

[Abstract] **Objective** To explore the feasibility and diagnostic value of ultra-fast scanning scheme based on deep learning-based reconstruction (DLR) for cervical MR examination. **Methods** Thirty-six subjects were prospectively enrolled and underwent both conventional scheme (scan time: 6 min 14 s) and ultra-fast scheme (2 min) cervical spine MR scanning to acquire encompassing sagittal T1WI, sagittal adipose suppression T2WI and axial T2WI. The ultra-fast MRI were reconstructed using DLR method. The subjective and objective evaluations on imaging qualities of different MRIs were compared, along with the inter-observer agreement for diagnosing intervertebral disc degeneration and herniation. **Results** Compared with conventional MRI, artifacts in ultra-fast DLR images significantly reduced ($P < 0.05$). The subjective evaluation results of MRI had good agreement (all Kappa ≥ 0.60). Compared with conventional MRI, the sagittal T1WI, T2WI and axial T2WI obtained with ultra-fast DLR showed significantly improved signal-to-noise ratio (SNR) of the spinal cord, cerebrospinal fluid (CSF) and vertebral body, as well as the spinal cord/CSF contrast (all $P < 0.001$). The Kappa value of 2 physicians for diagnosing intervertebral disc degeneration based on ultra-fast DLR and conventional scheme images was 0.94 and 1.00, respectively, of intervertebral disc herniation was 0.96 and 0.98, respectively. **Conclusion** Compared with conventional scanning scheme, using ultra-fast DLR scheme in cervical MR examination could shorten scanning time while achieve similar image quality and diagnostic accuracy.

[Keywords] cervical vertebrae; magnetic resonance imaging; deep learning

DOI: 10.13929/j.issn.1003-3289.2024.06.010

基于深度学习重建超快速扫描方案用于颈椎 MR 检查

饶显锋¹, 杨舒文¹, 陈静², 康正文³, 陈剑威¹, 吴泽涛¹, 汪童¹, 王波¹, 张秋生^{1*}

(1. 深圳大学第一附属医院 深圳市第二人民医院神经外科, 2. 放射科, 广东 深圳 518000;

3. 广东三九脑科医院神经外科, 广东 广州 510000)

[摘要] **目的** 观察基于深度学习重建(DLR)的超快速扫描方案用于颈椎 MR 扫描的可行性及其诊断价值。**方法** 前瞻性对 36 名受试者分别采用常规(扫描时间 6 min 14 s)及超快速(2 min)扫描方案采集颈椎 MR 矢状位 T1WI、脂肪抑制矢状位图像及轴位 T2WI;以 DLR 方法重建超快速 MRI。比较不同图像质量主、客观评价结果,以及观察者间诊断椎间盘退行性病变和椎间盘突出的一致性。**结果** 与常规图像相比,超快速-DLR 图像伪影显著减少($P < 0.05$)。观察者间主观评估图像质量结果的一致性均为良好(Kappa 均 ≥ 0.60)。相比常规图像,超快速-DLR 矢状位 T1WI、T2WI 及轴位

[基金项目] 深圳市自然科学基金面上项目(JCYJ20230807115301003)。

[第一作者] 饶显锋(1998—),男,四川内江人,硕士。研究方向:神经外科脊髓脊柱。E-mail: raioxianfeng2021@163.com

[通信作者] 张秋生,深圳大学第一附属医院 深圳市第二人民医院神经外科,518000。E-mail: shinezqs@163.com

[收稿日期] 2023-11-21 **[修回日期]** 2023-12-23

T2WI 中,脊髓、脑脊液(CSF)和椎体信噪比及脊髓/CSF 对比度均显著提高(P 均 <0.001)。2 名医师基于超快速-DLR 和常规图像诊断椎间盘退行性病变的 Kappa 值分别为 0.94、1.00,诊断椎间盘突出时分别为 0.96、0.98。**结论** 相比常规扫描方案,超快速-DLR 用于颈椎 MR 检查可缩短扫描时间,而所获图像质量及诊断效能与之相似。

[关键词] 颈椎;磁共振成像;深度学习

[中图分类号] R684; R445.1 [文献标识码] A [文章编号] 1003-3289(2024)06-0843-05

临床诊断颈椎病需结合症状、体征及影像学表现等进行综合判断。MRI 常用于诊断脊柱疾病^[1],但采集高分辨率颈椎图像较为耗时^[2]。人工智能辅助重建图像有助于缩短 MR 扫描时间^[3],并能通过增强视觉逼真度而使医师聚焦于解剖细节和脊柱病理改变,进而提高诊断准确率^[4]。利用深度学习重建(deep learning-based reconstruction, DLR)可显著减少噪声和伪影,用于 MR 检查解剖结构复杂、存在空气填充腔的脊柱具有明显优势^[5-6],并可与并行采集、部分傅里叶和压缩感知等加速技术无缝集成,进一步缩短采集时间^[7]。既往相关研究^[8]主要集中在验证该技术显示正常结构的降噪效果。本研究观察将超快速-DLR 用于颈椎 MR 扫描的可行性及其诊断价值。

1 资料与方法

1.1 研究对象 2021 年 2 月—2022 年 3 月于深圳市第二人民医院前瞻性招募 45 名接受脊柱 MR 检查的受试者,排除体内存在金属内植物及图像伪影严重后,最终纳入 36 名,男 22 名、女 14 名,年龄 30~80 岁、平均(53.4±11.4)岁;于其中 34 人检出 1 或多种病变,包括椎间盘退行性病变 33 例、椎间盘突出 32 例及其他病变 17 例。本研究经院伦理委员会批准(20210107001),检查前所有受试者均知情同意。

1.2 仪器与方法 采用 Siemens Aera 1.5T MR 扫描仪、24 通道头颈线圈。嘱受试者仰卧,头先进,分别以常规和超快速方案采集颈椎矢状位及轴位图像;先行常规扫描,扫描时间 6 min 14 s,之后行超快扫描,用时 2 min,层厚均为 3.0 mm,加速因子均为 2,其他参数见表 1。

以基于人工智能的 iQMR(Medic Vision Imaging Solutions, Tirat Carmel)扫描后处理去噪系统提高超快速扫描图像分辨率并降低噪声。随机设置图像顺序并隐藏受试者临床信息及扫描方案后,由 2 名具有 2 年以上工作经验的影像科医师分别观察图像,以 1~5 分对伪影大小、边界清晰度、显示病变清晰度及图像整体质量进行主观评估,评分越高代表图像质量越好;以 0~4 评估椎间盘退行性病变和椎间盘突出,级别越高代表病变程度越重(图 1、2);2 名医师评价结果不一致时,经协商达成共识。分别于脊髓、脑脊液(cerebrospinal fluid, CSF)、椎体及椎间盘勾画直径 3 mm 的 ROI(图 3),测算其信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)、脊髓/CSF 对比度和结构相似性指数(structural similarity index measure, SSIM)以客观评估图像质量,以 2 名医师测值的平均值作为最终结果。

1.3 统计学分析 采用 Matlab R2018a 统计分析软件。以 Cohen 加权 Kappa 检验评估观察者间对于图像质量的主观评价结果的一致性:Kappa <0.20 为一致性差,0.20 \leq Kappa <0.40 为一致性一般,0.40 \leq Kappa <0.60 为一致性中等,0.60 \leq Kappa <0.80 为一致性良好,Kappa ≥ 0.80 为一致性极好。以 $\bar{x}\pm s$ 表示计量资料,行 t 检验。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 图像质量主观评估结果 与常规方案相比,超快速-DLR 图像伪影显著减少($P<0.05$);2 种图像显示解剖结构边界、病变清晰度及整体图像质量评分差异均无统计学意义(P 均 >0.05)。观察者间对于图像质量的主观评价结果的一致性均良好。见表 2。

表 1 颈椎常规和超快速 MR 扫描方案参数及扫描时间

扫描方案	TR(ms)	TE(ms)	FA(°)	FOV(mm)	矩阵	ETL	NEX	扫描时间
矢状位 T1W								
超快速	440	11	150	240×240	256×180	3	2	47 s
常规	440	11	150	240×240	384×268	3	4	2 min 22 s
脂肪抑制矢状位 T2W								
超快速	2 700	78	150	240×240	256×204	18	1	27 s
常规	2 700	78	150	240×240	384×308	18	2	1 min 24 s
脂肪抑制轴位 T2W								
超快速	383	18	30	180×180	256×204	1	1	46 s
常规	447	21	30	180×180	384×308	1	2	2 min 28 s



图 1 男, 36 岁, C3~C6 椎间盘退行性变 A. 超快速 DLR 后处理矢状位 T2WI, 病变评级为 3 级; B. 常规方案矢状位 T2WI, 病变评级为 3 级
图 2 女, 54 岁, C5~C6 椎间盘突出 A. 超快速方案 DLR 后处理矢状位 T2WI, 病变评级为 2 级; B. 常规矢状位 T2WI, 病变评级为 2 级

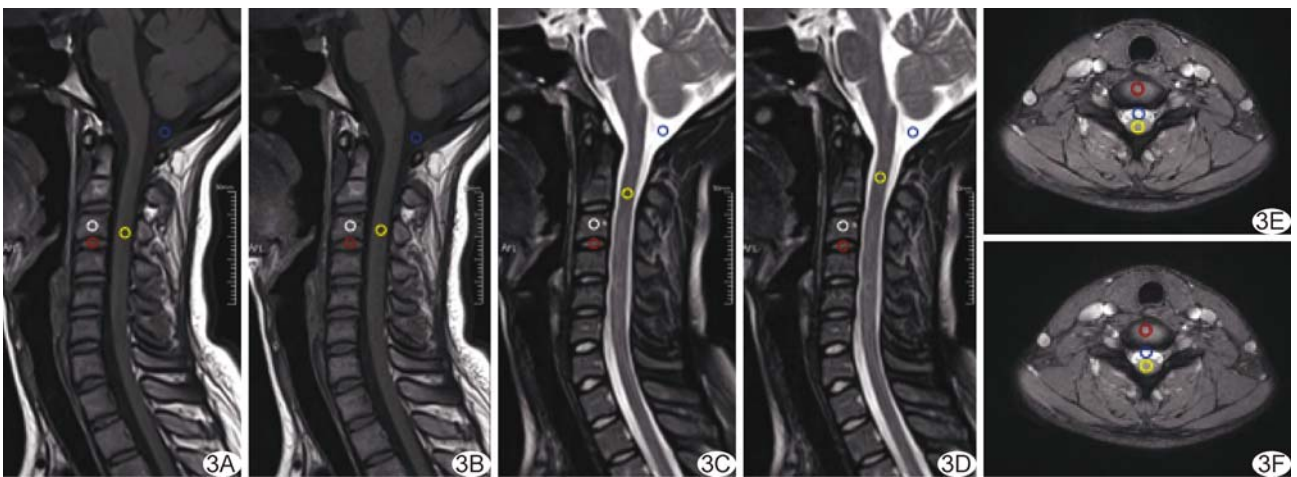


图 3 于颈椎 MRI 中勾画 ROI 示意图 A. 超快速 DLR 后处理矢状位 T1WI; B. 常规矢状位 T1WI; C. 超快速 DLR 后处理脂肪抑制矢状位 T2WI; D. 常规脂肪抑制矢状位 T2WI; E. 超快速 DLR 后处理脂肪抑制轴位 T2WI; F. 常规方案脂肪抑制轴位 T2WI (白圈、红圈、黄圈、蓝圈分别为椎体、椎间盘、脊髓及 CSF 的 ROI)

表 2 2 名医师对颈椎常规与超快速 MRI 的主观评价结果比较 (n=36)

图像种类	伪影评分	边界清晰度评分	病变可见性评分	整体图像质量评分
超快速-DLR	3.2±0.8	3.5±0.7	3.6±0.7	3.4±0.6
常规	2.8±0.6	3.8±0.9	3.8±0.8	3.5±0.8
t 值	2.400	1.579	1.129	0.600
P 值	0.019	0.119	0.263	0.550
Kappa(97.5%CD)	0.61(0.60,0.62)	0.65(0.63,0.67)	0.67(0.66,0.68)	0.70(0.68,0.72)

2.2 客观评估结果 相比常规图像,超快速-DLR 矢状位 T1WI、T2WI 及轴位 T2WI 中,脊髓、CSF 和椎体的 SNR 及脊髓/CSF 对比度均显著提高 (P 均 < 0.001),见表 3。超快速扫描重建前后图像相似性评估结果显示,SSIM 为 0.981±0.011。

2.3 诊断椎间盘病变 2 名医师基于超快速-DLR 及常规 MRI 诊断椎间盘退行性病变的 Kappa 值 (97.5%CD) 分别为 0.94(0.93,0.95) 及 1.00(1.00, 1.00),诊断椎间盘突出时分别为 0.96(0.95,0.97) 及 0.98(0.97,0.99)。

表 3 2 名医师对颈椎常规与超快速-DLR 图像质量的客观评估结果比较 (n=36)

图像种类	矢状位 T1WI				
	脊髓 SNR	CSF SNR	椎体 SNR	椎间盘 SNR	脊髓/CSF 对比度
超快速-DLR	106.84±34.76	50.64±16.22	179.55±66.24	104.92±35.55	56.24±18.54
常规	57.81±20.23	27.73±9.44	97.13±32.44	56.63±19.25	30.13±9.42
t 值	7.293	7.517	6.790	7.075	7.420
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
图像种类	矢状位 T2WI				
	脊髓 SNR	CSF SNR	椎体 SNR	椎间盘 SNR	脊髓/CSF 对比度
超快速-DLR	130.62±69.34	336.73±132.22	71.75±33.21	71.52±34.43	206.14±70.45
常规	64.63±22.31	165.15±58.23	35.82±11.44	35.04±12.05	100.52±32.83
t 值	5.468	7.158	6.210	6.157	8.141
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
图像种类	轴位 T2WI				
	脊髓 SNR	CSF SNR	椎体 SNR	椎间盘 SNR	脊髓/CSF 对比度
超快速-DLR	163.24±56.35	217.76±73.44	60.41±19.04	141.63±45.72	54.51±18.42
常规	95.84±32.76	128.64±43.35	35.83±11.32	74.83±25.15	32.83±10.42
t 值	6.185	6.303	6.559	7.678	6.410
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

3 讨论

随着人口老龄化加剧,颈椎病发病率逐年增高^[9]。颈椎常规 MR 检查时间长,导致部分患者依从性较差^[10-12];减少扫描时间有助于提高患者舒适度及其整体体验^[13]。本研究发现超快速扫描方案所用时间约为常规扫描的 32.09%,且 DLR 图像质量与常规 MRI 无显著差异,图像伪影更有所减少,与既往研究^[14]相符。DLR 系统利用脊柱 MRI 噪声分布的统计先验及最先进方法改进 SNR、增强图像和迭代重建,以修复因曝光参数相对较差(如快速或低分辨率扫描)所致细节欠佳并提高图像质量;该系统首先将输入数据集(MRI)分解为 3D 模块,计算每个模块的多个特征并将其转换至特征空间,再根据相似性度量对其进行分组,结合特征之间的相似性及噪声统计估计进一步提高图像质量。本研究相似性评估结果显示,对源图像进行深度学习(deep learning, DL)所获图像与前者所示解剖结构高度相似。

既往研究^[3]显示,MR 图像质量与扫描速度及图像背景噪声呈负相关。为获得更高 SNR 和/或空间分辨率,传统图像重建需要更多扫描时间。基于 DLR 可通过快速序列在缩短扫描时间的同时兼顾去噪声和图像质量,以满足诊断需求^[3]。本研究结果显示,与常规图像相比,利用基于 AI 的扫描后处理去噪系统的超快方案能在更短时间内生成具有同等 SNR 的脊柱 MRI,进一步证实了 DL 用于提高 MR 扫描速度和图像保真度的潜力及将该技术用于诊断颈椎疾病的可行

性,与 GASSENMAIER 等^[15]的结果相符;提示利用 DL 进行替代重建能在降噪过程中保持或增加病变可视度。

综上所述,与常规扫描方案相比,利用超快速-DLR 方案能在缩短扫描时间的同时获得相似图像质量和诊断效能。但本研究为单中心分析,样本量较小,且数据均来自同台 MR 设备,有待扩大样本量进行多中心研究进一步观察。

利益冲突:全体作者声明无利益冲突。

作者贡献:饶显锋研究实施、撰写文章;杨舒文研究实施、修改文章;陈静研究实施;康正文、陈剑威、吴泽涛和汪童图像分析、数据和统计分析;王波图像分析;张秋生研究设计、修改文章。

[参考文献]

[1] 梁艳山,张小安,赵鑫,等. MRI 诊断胎儿脊柱脊髓畸形及序列选择[J]. 中国医学影像技术, 2020, 36(1): 111-115.

[2] MOSER E, STADLBAUER A, WINDISCHBERGER C, et al. Magnetic resonance imaging methodology [J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2009, 36(Suppl 1): S30-S41.

[3] JOHNSON P M, RECHT M P, KNOLL F. Improving the speed of MRI with artificial intelligence [J]. Semin Musculoskelet Radiol, 2020, 24(1): 12-20.

[4] KASHIWAGI N, SAKAI M, TSUKABE A, et al. Ultrafast cervical spine MRI protocol using deep learning-based reconstruction:

- Diagnostic equivalence to a conventional protocol [J]. *Eur J Radiol*, 2022, 156:110531.
- [5] JARDON M, TAN E T, CHAZEN J L, et al. Deep-learning-reconstructed high-resolution 3D cervical spine MRI for foraminal stenosis evaluation [J]. *Skeletal Radiol*, 2023, 52(4):725-732.
- [6] ARNDT C, GÜTTLER F, HEINRICH A, et al. Deep learning CT image reconstruction in clinical practice [J]. *Rofo*, 2021, 193(3):252-261.
- [7] FUJIWARA M, KASHIWAGI N, MATSUO C, et al. Ultrafast lumbar spine MRI protocol using deep learning-based reconstruction: Diagnostic equivalence to a conventional protocol [J]. *Skeletal Radiol*, 2023, 52(2):233-241.
- [8] UETANI H, NAKAURA T, KITAJIMA M, et al. A preliminary study of deep learning-based reconstruction specialized for denoising in high-frequency domain: Usefulness in high-resolution three-dimensional magnetic resonance cisternography of the cerebellopontine angle [J]. *Neuroradiology*, 2021, 63(1):63-71.
- [9] WANG C, TIAN F, ZHOU Y, et al. The incidence of cervical spondylosis decreases with aging in the elderly, and increases with aging in the young and adult population: A hospital-based clinical analysis [J]. *Clin Interv Aging*, 2016, 11:47-53.
- [10] 张刚, 尚晓静, 刘波, 等. 多体位颈椎 MRI 诊断颈椎病 [J]. *中国医学影像技术*, 2013, 29(6):985-988.
- [11] PARIKH P, KLANDERMAN M, TECK A, et al. Effects of patient demographics and examination factors on patient experience in outpatient MRI appointments [J]. *J Am Coll Radiol*, 2024, 21(4):601-608.
- [12] NGUYEN X V, TAHIR S, BRESNAHAN B W, et al. Prevalence and financial impact of claustrophobia, anxiety, patient motion, and other patient events in magnetic resonance imaging [J]. *Top Magn Reson Imaging*, 2020, 29(3):125-130.
- [13] OZTEK M A, BRUNNQUELL C L, HOFF M N, et al. Practical considerations for radiologists in implementing a patient-friendly MRI experience [J]. *Top Magn Reson Imaging*, 2020, 29(4):181-186.
- [14] UEDA T, OHNO Y, YAMAMOTO K, et al. Deep learning reconstruction of diffusion-weighted MRI improves image quality for prostatic imaging [J]. *Radiology*, 2022, 303(2):373-381.
- [15] GASSENMAIER S, AFAT S, NICKEL D, et al. Deep learning-accelerated T2-weighted imaging of the prostate: Reduction of acquisition time and improvement of image quality [J]. *Eur J Radiol*, 2021, 137:109600.