

深度学习重建算法在上腹部能谱CT小血管显示中的研究

汪 琴, 严伟杰, 袁 元, 唐鹤茜, 邓莉萍

Study of a Deep Learning Reconstruction Algorithm for Displaying Small- and Medium-sized Blood Vessels in Upper Abdominal Energy Spectrum CT

WANG Qin, YAN Weijie, YUAN Yuan, TANG Hehan, and DENG Liping

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15953/j.ctta.2024.168>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

深度学习重建算法在上腹部CT成像中的应用

Application of Deep Learning Reconstruction Algorithm in Upper Abdomen CT
CT理论与应用研究. 2022, 31(3): 329–336

能谱CT单能量结合ASiR技术对腹部静脉成像质量的优化研究

The Evaluation of Imaging Quality of Abdominal Vein by Combining Spectral CT Optimal Monotromatic Imaging and ASiR Technique
CT理论与应用研究. 2019, 28(1): 61–72

深度学习重建算法的图像质量体模研究

Image Quality Assessment for Deep Learning Image Reconstruction Algorithm: A Phantom Study
CT理论与应用研究. 2022, 31(3): 351–356

基于深度学习的低剂量CT成像算法研究进展

Advances in Research on Low-dose CT Imaging Algorithm Based on Deep Learning
CT理论与应用研究. 2022, 31(1): 117–134

双能量CT虚拟单能量成像在鉴别脊柱急性慢性压缩骨折中的应用价值

The Application Value of Dual-Energy CT Virtual Monoenergetic Imaging in the Differential Diagnosis of acute and Chronic Spinal Compression Fractures
CT理论与应用研究. 2021, 30(2): 209–216

基于深度能量模型的低剂量CT重建

Low-dose CT Reconstruction Based on Deep Energy Models
CT理论与应用研究. 2022, 31(6): 709–720



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

汪琴, 严伟杰, 袁元, 等. 深度学习重建算法在上腹部能谱 CT 小血管显示中的研究[J]. CT 理论与应用研究 (中英文), 2025, 34(1): 37-43. DOI:10.15953/j.ctta.2024.168.

WANG Q, YAN W J, YUAN Y, et al. Study of a Deep Learning Reconstruction Algorithm for Displaying Small- and Medium-sized Blood Vessels in Upper Abdominal Energy Spectrum CT[J]. CT Theory and Applications, 2025, 34(1): 37-43. DOI:10.15953/j.ctta.2024.168. (in Chinese).

深度学习重建算法在上腹部能谱 CT 小血管显示中的研究

汪琴, 严伟杰, 袁元, 唐鹤菡, 邓莉萍[✉]

四川大学华西医院放射科, 成都 610041

摘要: 目的: 探讨上腹部 CT 能谱增强扫描时, 采用深度学习重建算法 (DLIR) 的单能量图像显示腹部小血管的效果和临床价值。方法: 回顾性分析 2021 年 2 月至 2022 年 6 月在四川大学华西医院因上腹不适而行 CT 能谱增强检查的患者 28 例, 采用自适应统计迭代重建 (ASIR-V)、DLIR-M、DLIR-H 3 种重建算法进行重建, 同时通过能谱后处理软件提取 40keV 和 70keV 单能量图像, 共生成 4 组图像, 分别标记为 40keV-AV、40keV-DL-M、40keV-DL-H、70keV-AV。测量肝总动脉、胃左动脉、脾动脉、肠系膜上动脉 CT 值和 SD 值, 同时测量相同层面竖脊肌 CT 值和 SD 值, 计算各分支血管信噪比 (SNR)、对比噪声比 (CNR)。两名放射科医师对图像噪声, 图像伪影, 目标血管对比度, 图像“蜡状感”及图像整体质量做出主观评分。采用重复测量的单因素方差分析、配对 *t* 检验比较 4 组图像间 SNR、CNR 及背景噪声的差异性。Kappa 检验用于比较主观评价的一致性差异。结果: 无论客观评价还是主观评价方面, DL-H 图像的 SNR、CNR、整体图像质量评分及噪声均优于 DL-M, 两者均优于 AV 图像, SNR、CNR 和图像质量评分随 DL 强度增加而增加, 噪声随着 DL 强度增加而降低。4 组图像主观评分中, DL-H 评分高于 DL-M, DL-M 高于 AV。结论: 深度学习重建算法可提高上腹部能谱增强 CT 40keV 单能量图像中小血管显示效果, 且随强度增高, 改善图像质量和降低噪声能力增强; 与 AV 相比, DL 图像重建算法对上腹部能谱增强 CT 检查小血管的显示能力有明显的提高。

关键词: 深度学习; 能谱 CT; 虚拟单能量图像; 腹部小血管

DOI:10.15953/j.ctta.2024.168 中图分类号: O 242; R 445.3 文献标识码: A

Study of a Deep Learning Reconstruction Algorithm for Displaying Small- and Medium-sized Blood Vessels in Upper Abdominal Energy Spectrum CT

WANG Qin, YAN Weijie, YUAN Yuan, TANG Hehan, DENG Liping[✉]

Department of Radiology, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China

Abstract: Objective: To investigate the effectiveness and clinical value of using a deep learning reconstruction algorithm (DLIR) to display small blood vessels in upper abdominal computed tomography (CT) with an enhanced energy spectrum. Methods: Using three reconstruction algorithms, a retrospective analysis was performed on 28 patients with upper abdominal discomfort who underwent enhanced CT spectrum examination at the West China Hospital of Sichuan University from February 2021 to June 2022. The three reconstruction algorithms were adaptive statistical iterative reconstruction (ASIR-V), DLIR-M, and DLIR-H. Simultaneously, 40 keV and 70 keV single-energy images were extracted using energy spectrum post-processing software, and four groups of images were generated, which were labeled as 40 keV-AV, 40 keV-DL-M, 40 keV-DL-H, and 70 keV-AV, respectively. The CT and standard deviation (SD) values of common hepatic, left gastric, splenic, and superior mesenteric arteries were measured, and the CT and SD values of the vertical spinal muscle at the same level were measured. In addition, the signal-to-noise (SNR) and contrast-to-noise (CNR) ratios of each branch vessel were calculated. Two radiologists provided subjective scores on image noise, image artifacts, target blood vessel contrast, image “waxiness,” and overall image quality. Differences in SNR, CNR, and background noise among the four groups of images were compared using one-way analysis of variance (ANOVA) and paired *t*-tests. The kappa test was used to compare differences in the consistency of the subjective evaluations. Results: In both objective and subjective evaluations, the SNR, CNR, overall image quality score, and noise of the DL-H images were superior to those of the DL-M images, where the latter in turn were superior to those of the AV images. The SNR, CNR, and image quality score increased and the noise decreased with an increase in DL

收稿日期: 2024-07-31。

第一作者: 汪琴, 女, 技师, 主要从影像技术工作, E-mail: 1046442487@qq.com。

通信作者: 邓莉萍[✉], 医学影像技术硕士, 副主任技师, 主要研究方向为 CT 及磁共振成像新技术, E-mail: parsley1126@126.com。

intensity. In the subjective scores of the four groups of images, the DL-H score was higher than the DL-M score, and the DL-M score was higher than the AV score. Conclusion: The DLIR can improve the display of small- and medium-sized vessels in upper abdomen energy spectrum enhanced CT 40 keV single-energy images. With an increase in intensity, the image quality is improved and noise is reduced. Compared with AV, the DLIR significantly improves the display capabilities of upper abdominal energy spectrum-enhanced CT in the examination of small blood vessels.

Keywords: deep learning; gemstone spectral CT; virtual monoenergetic imaging; small abdominal vessels

能谱 CT 低能级虚拟单能量图像 (virtual monoenergetic imaging, VMI), 可以提高组织结构和病变的对比, 优化小病灶和小血管的图像质量, 在上腹部疾病诊断中应用广泛。但由于低能级光子穿透能力弱, 使其在 CT 低能级单能量图像中噪声明显增高, 临床应用受到限制。如何改善低单能量图像质量, 提高血管显示率和病灶检出率历来都是研究的热点和难点。优化图像重建算法可能在一定程度上提高图像质量。

如目前临床应用广泛的自适应统计迭代重建算法 (adaptive statistical iteration reconstruction-V, ASIR-V), 能一定程度上降低图像噪声, 改善图像质量。但其在降噪的同时, 降低了图像空间分辨率, 对小血管等细微解剖结构的显示能力相对不足。

近年来, 基于人工智能平台的深度学习图像重建 (deep learning image reconstruction, DLIR) 算法, 将深度卷积神经网络 (deep convolutional neural networks, DCNN) 纳入到图像重建算法中, 用高质量的 CT 图像数据集进行训练, 以学习如何区分噪声和信号, 进而降噪提高图像质量^[1]。与 AV 相比, DL 算法可以在不改变噪声纹理或影响解剖病理结构情况下, 抑制噪声的同时获得较高的空间分辨率^[2], 且随着 DL 的强度增高 (DL-M, DL-H) 图像呈现为更高的信噪比、对比信噪比和更优质的病变显示趋势^[3]。随着微创手术的广泛应用, 腹部微小血管如胃左动脉, 其走形和变异情况对在以胃癌根治术及其胃肠消化道等手术过程中具有重要的指导意义^[4]。研究表明^[1], 40keV 单能量图像结合深度学习图像重建算法可改善胸腹部大血管的图像质量, 但其对腹部较小血管的应用研究鲜有报道。

本研究拟通过比较自适应统计迭代重建算法与深度学习图像重建算法在上腹部能谱增强 CT 40keV 单能量图像中小血管显示的图像质量, 分析评价该场景下 DLIR 的临床应用价值。

1 材料与方法

1.1 一般资料

1.1.1 研究对象

回顾性收集四川大学华西医院 2021 年 2 月至 2022 年 6 月行能谱 CT 上腹部增强扫描的患者 28

例, 其中: 男性患者 12 例, 女性患者 16 例, 年龄 (38.35 ± 10.83) 岁, BMI 指数 (23.83 ± 2.05) kg/m^2 。

纳入标准: ① 年龄 ≥ 18 周岁; ② 所得图像能够符合诊断要求, 临床医师能根据所得影像做出影像学判断; ③ 上腹部无明显病变。排除标准: ① 患者呼吸配合欠佳等因素导致的图像质量差而无法进行准确图像评估和数据测量者; ② 影像数据不全者。

1.1.2 仪器与方法

纳入研究的所有图像均采用 GE 公司 256 层宽体探测器 CT 扫描仪 (Revolution Apex CT; GE Healthcare) 采集。检查体位为头先进, 仰卧位, 双上肢保持上举, 屏气后扫描, 扫描范围为膈顶至肾脏下缘。

扫描参数。平扫采用常规螺旋扫描模式, 管电压 120kVp, 开启自动管电流调制技术。螺距 0.992:1, 球管转速 0.5s/r, 噪声指数 8, 重建层厚 5mm, 重建重叠 5mm; 动脉期和静脉期均采用能谱扫描模式 (gemstone spectral imaging, GSI), ASIR-V 前置权重 30%, 管电压 80kVp/140kVp 瞬时切换, 管电流 355mA, 螺距 0.992:1, 重建层厚 0.625mm, 重建重叠 0.625mm。

采用自动跟踪阈值触发法确定动脉期延迟时间, 监测兴趣区 (region of interest, ROI) 为腹腔干层面腹主动脉内, 阈值 150HU, 触发后延迟 6s 扫描动脉期, 注射对比剂后 65~75s 扫描静脉期。采用高压注射器经肘正中静脉团注对比剂碘美普尔 (碘浓度为 400mg/mL), 注射速率为 3mL/s, 根据体重计算用量为 1mL/kg。

1.1.3 图像重建

采用 AV 和 DL 两种算法重建动脉期图像, 其中 AV 采用 50% 的后置混合权重方式, DL 采用中等强度水平 (DL-M) 和高强度水平 (DL-H) 两种方式。因 CT 能谱序列 DL 重建算法未广泛应用于临床, 本研究中的 DL 重建数据由 GE 公司技术供应商完成。

1.2 图像处理与数据测量

1.2.1 图像分析

将各种图像重建算法的动脉期能谱图像传输至

GE 影像工作站 (Advantage Workstation 4.7, adw4.7) 提取 3 种算法在 40keV 能量水平下的虚拟单能量图像, 分别标记为 40keV-AV、40keV-DL-M、40keV-DL-H; 提取 AV 算法在 70keV 能量水平下的虚拟单能量图像, 标记为 70keV-AV。每例患者一共生成 4 组影像图像, 隐藏图像中患者基本信息、图像重建方式和相关参数。

在肝总动脉、胃左动脉、脾动脉以及肠系膜上动脉最大层面内放置圆形或类圆形 ROI, 测量 ROI 内 CT 值及标准差 (standard deviation, SD), 每个兴趣区测量 3 次, 取平均值, 需注意避开血管管腔和钙化。同时, 测量相同层面竖脊肌 CT 值和 SD 值, 多次测量取平均值。保证同一患者的相同能级不同算法之间、相同算法不同能级图像之间 ROI 形状、大小、位置一致。计算各目标血管信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 及对比噪声比 (contrast to noise ratio, CNR), 计算公式^[1]:

$$\text{SNR} = \text{CT}_{\text{目标血管}} / \text{SD}_{\text{目标血管}}, \quad (1)$$

$$\text{CNR} = (\text{CT}_{\text{目标血管}} - \text{CT}_{\text{竖脊肌}}) / \text{SD}_{\text{竖脊肌}}。 \quad (2)$$

由两名具有 14 年以上阅片经验且不知晓图像重建信息的放射科医师分别评价 CT 图像质量, 预设窗宽和窗位分别为 300HU 和 45HU, 也可进行适当调整。采用 5 分法对重建图像进行主观评价, 评价内容包括图像噪声, 图像伪影, 目标血管对比度, 图像“蜡状感”, 图像整体质量。

评分标准^[5-8]。图像噪声: 1 分, 噪声严重; 2 分, 噪声较重; 3 分, 噪声明显; 4 分, 噪声轻微; 5 分, 噪声几乎不可见。图像伪影: 1 分, 伪影严重; 2 分, 伪影较重; 3 分, 伪影明显; 4 分, 伪影轻微; 5 分, 伪影几乎不可见。目标血管对比度: 1 分, 血管边缘非常模糊; 2 分, 血管边缘很模糊; 3 分, 血管边缘较模糊; 4 分, 血管边缘较清晰; 5 分, 血管边缘锐利。图像“蜡状感”: 1 分, “蜡状感”严重, 细节丢失严重; 2 分, “蜡状感”较重, 细节显示模糊; 3 分, “蜡状感”明显, 细节显示一般; 4 分, “蜡状感”轻微, 细节显示较清晰; 5 分, “蜡状感”几乎不可见, 细节显示清晰。图像整体质量: 1 分, 整体质量很差; 2 分, 整体质量较差; 3 分, 整体质量一般; 4 分, 整体质量较好; 5 分, 整体质量优。

1.2.2 统计分析

采用 SPSS 25.0 软件进行统计分析, 以 $(\bar{x} \pm s)$ 表示服从或近似服从正态分布的资料。40keV 单能

量图像的 3 种重建方式组间的差异性比较采用重复测量的单因素方差分析, 70keV-AV 图像分别与 40keV 单能量图像的 3 种重建方式的组间差异性比较采用配对样本 t 检验, $P \leq 0.05$ 为差异具有统计学意义。

采用 Kappa 检验分析两名放射科医师主观评分的一致性, $k \geq 0.80$ 认为一致性极高, $0.60 \leq k < 0.80$ 高度一致性, $0.40 \leq k < 0.60$ 中度一致性, $0.20 \leq k < 0.40$ 一致性较差, $k \leq 0.20$ 一致性极差。计算两名医师主观评分值的平均值。

采用重复测量的单因素方差分析对组间评分的平均值进行两两比较, $P \leq 0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 客观评价结果

在 AV、DL-M 及 DL-H 3 种重建方式下, 40keV 单能量图像的 SD 值、SNR 及 CNR 的比较结果见表 1。

按照 40keV-DL-H、40keV-DL-M 和 40keV-AV 排序顺序, 呈现出 SD 值由低到高, SNR 值及 CNR 值由高到低的趋势, 且 3 组结果的差异性均具有统计学意义。40keV-DL-M 组与 40keV-AV 组相比, SD 值除胃左动脉不具有差异性外, 肝总动脉、脾动脉及肠系膜上动脉均具有差异性; SNR 在肝总动脉及胃左动脉中不具有差异性, 在脾动脉及肠系膜上动脉中具有差异性; CNR 在 4 组目标血管中均具有差异性。40keV-DL-H 组与 40keV-AV 组相比, 40keV-DL-H 组与 40keV-DL-M 组相比, SD 值、SNR 及 CNR 在 4 组目标血管中均具有差异性; DL-H 图像与 DL-M 图像相比, SD 值、SNR 及 CNR 在 4 组目标血管中均具有差异性。

40keV-DL-H、40keV-DL-M 和 40keV-AV 3 组与 70keV-AV 组图像比较结果见表 2。目标血管 SNR 值及 CNR 值从高到低的排序均为 40keV-DL-H、40keV-DL-M、40keV-AV 和 70keV-AV。两两比较, 差异均具有统计学意义。

2.2 主观评价结果

Kappa 一致性检验结果显示 (表 3), 两名放射科医师对图像质量的主观评价在图像噪声、图像伪影、目标血管对比度、图像“蜡状感”及整体图像质量 5 组评分中均具有较好的一致性 ($k = 0.539 \sim 0.868$)。图像噪声、图像伪影、目标血管对比度及整体图像

表 1 40 keV 下 3 种重建方式图像 SD 值、SNR 及 CNR 差异性检验
Table 1 Difference tests of SD, SNR, and CNR of three reconstruction methods at 40 keV

项目	目标血管	$(\bar{x} \pm s)$			统计检验		成对比较 P		
		AV	DL-M	DL-H	F	P	AV 与 DL-M	AV 与 DL-H	DL-M 与 DL-H
SD 值	肝总动脉	55.12 ± 22.95	53.34 ± 21.93	49.69 ± 22.10	26.64	< 0.001	0.032	< 0.001	< 0.001
	胃左动脉	61.72 ± 41.30	60.24 ± 42.22	58.30 ± 41.47	7.33	0.007	0.131	0.006	< 0.001
	脾动脉	51.57 ± 30.22	49.09 ± 27.85	44.51 ± 27.52	46.16	< 0.001	0.003	< 0.001	< 0.001
	肠系膜上动脉	43.18 ± 14.43	40.23 ± 12.29	33.56 ± 10.03	42.84	< 0.001	0.002	< 0.001	< 0.001
SNR	肝总动脉	19.4 ± 10.58	19.67 ± 10.23	21.96 ± 12.07	26.62	< 0.001	0.515	< 0.001	< 0.001
	胃左动脉	15.63 ± 8.47	17.08 ± 11.68	17.88 ± 12.54	4.22	0.046	0.101	0.036	0.007
	脾动脉	20.48 ± 10.10	21.22 ± 10.20	24.05 ± 11.73	51.52	< 0.001	0.004	< 0.001	< 0.001
	肠系膜上动脉	24.18 ± 9.60	25.59 ± 9.74	30.56 ± 11.56	61.99	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
CNR	肝总动脉	19.47 ± 6.65	23.01 ± 7.72	30.50 ± 12.02	74.67	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	胃左动脉	15.10 ± 5.36	17.92 ± 6.51	23.14 ± 9.02	95.10	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	脾动脉	19.10 ± 6.55	23.00 ± 8.21	30.06 ± 11.81	89.12	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	肠系膜上动脉	21.13 ± 7.29	25.36 ± 8.82	33.08 ± 12.91	88.61	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001

表 2 40 keV 下 3 种重建方式图像 SNR 及 CNR 与 70 keV-AV 的差异性比较
Table 2 Comparisons between SNR and CNR of three reconstruction methods and 70 keV-AV under 40 keV

项目	目标血管	$(\bar{x} \pm s)$				成对比较 P		
		70 keV-AV	40 keV-AV	40 keV-DL-M	40 keV-DL-H	70 keV-AV 与 40 keV-AV	70 keV-AV 与 40 keV-DL-M	70 keV-AV 与 40 keV-DL-H
SNR	肝总动脉	16.72 ± 7.92	19.47 ± 10.58	19.67 ± 10.23	21.96 ± 12.07	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	胃左动脉	14.49 ± 7.96	15.63 ± 8.47	17.08 ± 11.68	17.88 ± 12.54	0.030	0.018	0.009
	脾动脉	16.68 ± 7.64	20.48 ± 10.10	21.22 ± 10.20	24.05 ± 11.73	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	肠系膜上动脉	19.07 ± 6.31	24.18 ± 9.60	25.59 ± 9.74	30.56 ± 11.56	< 0.001	< 0.001	< 0.001
CNR	肝总动脉	13.60 ± 4.46	19.47 ± 6.65	23.01 ± 7.72	30.50 ± 12.02	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	胃左动脉	10.90 ± 3.47	15.10 ± 5.36	17.92 ± 6.51	23.14 ± 9.02	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	脾动脉	13.12 ± 4.42	19.10 ± 6.55	23.00 ± 8.21	30.06 ± 11.81	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	肠系膜上动脉	14.51 ± 4.80	21.13 ± 7.29	25.36 ± 8.82	33.08 ± 12.91	< 0.001	< 0.001	< 0.001

质量的主观评分值在 40keV-AV 组、40keV-DL-M 组、40keV-DL-H 组之间依次升高；同时，与 70keV-AV 组相比，40keV-DL 组评分较高，且 DL-H 高于 DL-M。另外，4 组图像“蜡状感”的评分均较高，除 40keV-DL-H 组略低，其余 3 组无明显差异。

4 组重建图像的主观评分的差异性成对比较结果显示 (表 4)，除 70keV-AV 组与 40keV-DL-M 组在图像伪影评分中不具有差异性，以及在图像“蜡状感”评分中 70keV-AV、40keV-AV、40keV-DL-M 3 组之间两两不具有差异性外，其余组间比较结果均具有统计学意义。

3 讨论

本次研究结果表明，40keV 能级下图像在 AV 和 DL 重建后均可以一定程度减少噪声，提高图像质量。DL 与 AV 相比，由 AV、DL-M 到 DL-H，各目标血管部位 SD 值逐渐降低，SNR、CNR 值逐

渐增大。这一结果表明 DL 降噪能力更强，且 DL-H 优于 DL-M，可以更好的显示小血管及其他组织结构。与 70keV-AV 图像相比，40keV 能级中 AV 和 DL 图像的 SNR、CNR 值均较高，且 DL-H 高于 DL-M。这一结果表明经 AV 和 DL 重建降噪后的 40keV 能级图像在目标小血管中图像质量优于 70keV-AV 图像，且 DL-H 较 DL-M 效果更优。能谱 CT 中 70keV 能级图像与常规能量下 (即混合能量 120kV) 的图像接近，故可将其结果类比常规能量 CT，这表明 AV 和 DL 重建算法均有助于实现 40keV 的最低 keV 设置，显著提高 SNR 及 CNR，达到满足临床需求的图像质量。

40keV 能级下主观图像质量评分在图像噪声、图像伪影、目标血管对比度及整体图像质量 4 个方面的结果均表现为 DL-H 高于 DL-M，DL-M 高于 AV，与客观结果一致，表明 DL 算法的应用可以显著降低图像噪声，增高细微结构和目标小血管的

表 3 图像质量主观评分分析
Table 3 Image quality subjective scoring analysis

图像评价指标	观察者	($\bar{x} \pm s$)			
		70 keV-AV	40 keV-AV	40 keV-DL-M	40 keV-DL-H
图像噪声	医生 1	3.93 ± 0.66	3.50 ± 0.51	4.18 ± 0.48	4.71 ± 0.46
	医生 2	3.89 ± 0.63	3.54 ± 0.58	4.21 ± 0.50	4.68 ± 0.48
	<i>k</i>	0.684 [*]	0.624 [*]	0.738 [*]	0.747 [*]
图像伪影	医生 1	3.86 ± 0.65	3.32 ± 0.55	4.11 ± 0.50	4.57 ± 0.50
	医生 2	3.82 ± 0.61	3.29 ± 0.46	4.07 ± 0.47	4.64 ± 0.49
	<i>k</i>	0.803 [*]	0.548 [*]	0.837 [*]	0.851 [*]
目标血管对比度	医生 1	3.79 ± 0.69	3.29 ± 0.46	4.25 ± 0.59	4.71 ± 0.46
	医生 2	3.75 ± 0.75	3.36 ± 0.49	4.29 ± 0.66	4.68 ± 0.48
	<i>k</i>	0.600 [*]	0.783 [*]	0.651 [*]	0.747 [*]
图像“蜡状感”	医生 1	4.54 ± 0.58	4.50 ± 0.58	4.61 ± 0.50	4.14 ± 0.52
	医生 2	4.57 ± 0.57	4.46 ± 0.64	4.57 ± 0.50	4.21 ± 0.50
	<i>k</i>	0.620 [*]	0.539 [*]	0.779 [*]	0.781 [*]
图像整体质量	医生 1	3.86 ± 0.65	3.50 ± 0.51	4.36 ± 0.49	4.82 ± 0.39
	医生 2	3.82 ± 0.67	3.54 ± 0.51	4.29 ± 0.46	4.86 ± 0.36
	<i>k</i>	0.816 [*]	0.742 [*]	0.783 [*]	0.868 [*]

注：*表示 kappa 检验中的 $P < 0.05$ ，差异具有统计学意义。

表 4 4 组重建图像主观评分值的差异性成对比较结果
Table 4 Differences of subjective scores of four reconstructed images compared in pairs

图像评价指标	70 keV-AV 与 40 keV-AV	70 keV-AV 与 40 keV-DL-M	70 keV-AV 与 40 keV-DL-H	40 keV-AV 与 40 keV-DL-M	40 keV-AV 与 40 keV-DL-H	40 keV-DL-M 与 40 keV-DL-H
图像噪声	< 0.001	0.003	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
图像伪影	< 0.001	0.090	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
目标血管对比度	< 0.001	0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.004
图像“蜡状感”	0.526	0.774	0.003	0.456	0.019	0.001
图像整体质量	0.004	0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001

空间分辨力。此结果与 Zhong 等^[9]和 Sato 等^[10]研究中的主观评价结论一致。同时，虽然本次研究的图像未见明显的“蜡状感”失真表现，但在图像“蜡状感”评分中，DL-H 略低于 DL-M，这表明随着深度重建算法等级的增高，图像出现“蜡状感”的程度也会相应增加。

另外，与 70keV-AV 图像评分相比，在图像噪

声、图像伪影、目标血管对比度及整体图像质量 4 个方面的结果均表现为 40keV-DL 更高，且 DL-H 高于 DL-M。同时，进一步重建出三维血管图像（图 1），能够更直观地表现出显示上腹部小血管的效果差异。图像结果显示，40keV-DL 能够显示出更多细小的腹部血管，且 40keV-DL-H 效果最佳。这表明在 DL 算法的作用下，40keV 的最低 keV 能

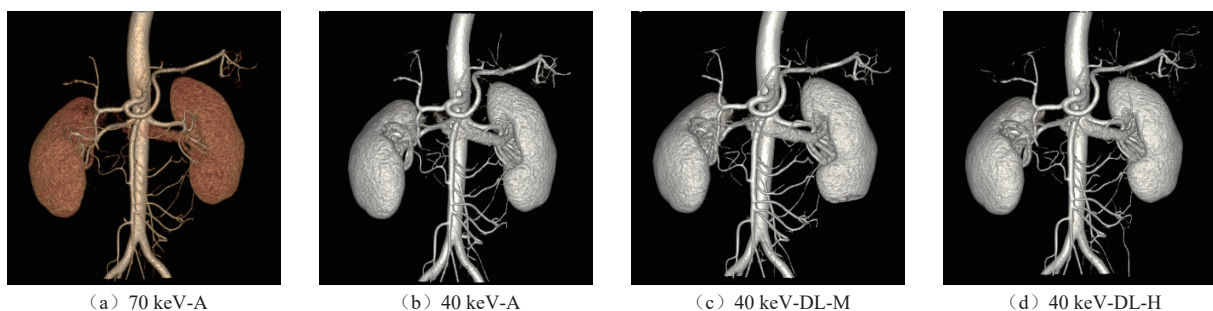


图 1 4 组上腹部三维后处理重建图像

Fig.1 Four groups of upper abdomen 3D post-processing reconstruction images

级的图像质量在主观阅片感受方面优于 70keV-AV 图像,有助于将 40keV 作为腹部能谱增强 CT 中常规低 keV VMI 重建的新标准。

高质量的上腹部增强图像可为外科手术中病变的准确诊断和术前的全面评估提供帮助,具有重要的临床价值^[11]。

能谱 CT 低能级单能量图像可以提高图像对比度,有利于小血管和小病灶的显示^[8]。如何改善低能级 VMI 进行降噪处理以提高图像质量具有重要的临床意义。基于 DL 重建算法可降低图像噪声的同时,保留解剖结构细节,保持较高空间分辨率的优势,有望改善 AV 劣势区域(低 keV 范围内) VMI 小血管等组织结构显示不清的情况。现有 DL 重建算法对能谱 CT VMI 降噪效果的相关研究集中于改善整体图像质量、实质脏器以及大血管的显示能力或体模前瞻性研究^[3,12-14],而对重要腹部小血管(如肝总动脉、胃左动脉、脾动脉、肠系膜上动脉等)相关情况的研究较少。

据文献报道^[15],随着单能量图像能级的降低,组织结构 CT 值增高,血管对比增加,低能级单能量图像在血管显示方面具有明显的优越性,但较低能级单能量图像噪声增加显著,如 40keV 单能量图像在血管的应用受到一定限制。

随着深度学习图像重建技术的应用,研究显示^[16]其降噪能力在低能级图像中呈现更大的优势,且 40keV 图像质量得到显著改善。因此本次研究尝试针对 40keV 单能量能级图像开展,希望评估 DL 算法在常规 40keV 低能级水平上对上腹部小血管的降噪能力。

本研究的局限性。① 样本量相对较少,还应加大样本量进一步验证研究结果;② 由于部分小血管的位置特殊性,放置感兴趣区后血管平均 CT 值和 SD 值将会受到实质脏器的影响而呈现不太稳定的变化趋势;③ 本研究仅与 AV 50% 权重方式进行比较,虽有研究表明在 50% 下 AV 效果较好^[17-19],但后续仍可与其他权重相对比进行研究来验证其在腹部小血管方面的应用规律。

除此之外,本次研究只选择了 40keV 的单能量图像,有文献报道^[15]40keV 单能量图像结合深度学习图像重建算法在腹部图像质量的改善方面效果显著,因此本文在此研究的基础上,探讨深度学习图像重建算法下 40keV 单能量图像对于上腹部小血管的显示效果。

在未来进一步的研究中,将纳入更多能级以探究在不同能级下深度学习图像重建算法联合单能量

成像技术的优势和特点,使研究更全面、更丰富。

综上所述,针对 40keV 能级 VMI 图像,DL 算法相较于传统 AV 算法具有更优秀的降噪能力,且随 DL 强度的增加,降噪效果也随之提高。DL 算法有望在未来成为临床常规使用的能谱 CT 重建算法,对提高小血管成像质量具有十分重要的临床作用。

参考文献

- [1] 陆晓军,罗春材,齐叶青,等.深度学习图像重建算法在胸腹主动脉 CTA 图像质量中的临床应用研究[J]. *临床放射学杂志*, 2022, 41(7): 1359-1364. DOI:10.3969/j.issn.1001-9324.2022.7.lcfsxzz202207032.
- LU X J, LUO C C, QI Y Q, et al. Clinical application value of deep learning image reconstruction algorithm in improving thoracic and abdominal aorta image quality[J]. *Journal of Clinical Radiology*, 2022, 41(7): 1359-1364. DOI:10.3969/j.issn.1001-9324.2022.7.lcfsxzz202207032. (in Chinese).
- [2] 方天琦,陈奕宇,宾果,等.能谱 CT 在肝癌中的研究进展[J]. *国际医学放射学杂志*, 2017, 40(2): 165-169.
- FANG T Q, CHAN Y Y, BIN G, et al. An overview on the research of spectral CT in liver cancer[J]. *International Journal of Medical Radiology*, 2017, 40(2): 165-169. (in China).
- [3] AGRAWAL M D, OLIVEIRA G R, KALVA S P, et al. Prospective comparison of reduced-iodine-dose virtual monochromatic imaging dataset from dual-energy CT angiography with standard-iodine-dose single-energy CT angiography for abdominal aortic aneurysm[J]. *American Journal of Roentgenology*, 2016, 207(6): W125-W32.
- [4] 陈楚韩,綦维维,刘晓怡,等.深度学习重建算法结合低管电压技术提高常规腹部增强 CT 图像小血管显示水平的价值[J]. *中华放射学杂志*, 2022, 56(11): 1168-1174. DOI:10.3760/cma.j.cn112149-20220218-00131.
- CHEN C H, QI W W, LIU X Y, et al. Value of the deep learning image reconstruction algorithm combined with low-kV technique in improving small vessel display level at routine abdominal contrast enhanced CT imaging[J]. *Chinese Journal of Radiology*, 2022, 56(11): 1168-1174. DOI:10.3760/cma.j.cn112149-20220218-00131. (in Chinese).
- [5] 游永春,李万江,钟思华,等. AIIR 重建算法对 70 kVp 低管电压扫描主动脉 CTA 图像质量影响的研究[J]. *中国医疗设备*, 2021, 36(10): 75-79. DOI:10.3969/j.issn.1674-1633.2021.10.018.
- YOU Y C, LI W J, ZHONG S H, et al. Effect of AIIR reconstruction algorithm on image quality of 70 kVp low tube voltage scanned aortic CTA[J]. *China Medical Devices*, 2021, 36(10): 75-79. DOI:10.3969/j.issn.1674-1633.2021.10.018. (in Chinese).
- [6] 陈海静,李青青,赵卫,等.光谱 CT 显示左结肠动脉

- 的最佳虚拟单能量[J]. 放射学实践, 2024, 39(3): 388-392.
- CHEN H J, LI Q Q, ZHAO W, et al. The optimal virtual single energy of spectral CT for displaying the left colonic artery[J]. Radiologic Practice, 2024, 39(3): 388-392. (in Chinese).
- [7] 孙杰, 倪亚博, 沈云, 等. 联合全新迭代算法 (ASiR-V) 的 Revolution CT 低 keV 单能量优化腹部血管成像的价值[J]. 放射学实践, 2022, 37(10): 1238-1242.
- SUN J, NI Y B, SHEN Y, et al. The optimization abdominal angiography value of revolution CT low-keV single energy combines with the new Iterative algorithm (ASiR-V)[J]. Radiologic Practice, 2022, 37(10): 1238-1242. (in Chinese).
- [8] 董江宁, 李乃玉, 刘同柱, 等. 能谱 CT 最佳单能量技术优化腹部恶性肿瘤供血动脉血管成像图像质量的研究[J]. 中华放射学杂志, 2013, 47(7): 638-642. DOI:10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2013.07.013.
- DONG J N, LI N Y, LIU T Z, et al. A preliminary study of improving quality of CT angiography on small feeding arteries of abdominal tumors with optimizing gemstone spectral imaging technique using single source dual-energy CT[J]. Chinese Journal of Radiology, 2013, 47(7): 638-642. DOI:10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2013.07.013. (in Chinese).
- [9] ZHONG J, WANG L, SHEN H, et al. Improving lesion conspicuity in abdominal dual-energy CT with deep learning image reconstruction: A prospective study with five readers[J]. European Radiology, 2023, 33(8): 5331-5343. DOI:10.1007/s00330-023-09556-6.
- [10] SATO M, ICHIKAWA Y, DOMAE K, et al. Deep learning image reconstruction for improving image quality of contrast-enhanced dual-energy CT in abdomen[J]. European Radiology, 2022, 32(8): 5499-5507. DOI:10.1007/s00330-022-08647-0.
- [11] 唐友发, 王秋霞, 张进华. 深度学习重建算法在肠系膜上动脉 CT 血管成像中的应用评估[J]. 暨南大学学报 (自然科学与医学版), 2023, 44(3): 316-322.
- TANG Y F, WANG Q X, ZHANG J H. Evaluation of the application of deep learning reconstruction algorithm in superior mesenteric artery CT angiography[J]. Journal of Jinan University (Natural Science & Medicine Edition), 2023, 44(3): 316-322. (in Chinese).
- [12] ERIC F, MARK P, NAVEEN K, et al. Image quality evaluation in dual-energy CT of the chest, abdomen, and pelvis in obese patients with deep learning image reconstruction[J]. Journal of Computer Assisted Tomography, 2022, 46(4): 604-611. DOI:10.1097/RCT.0000000000001316.
- [13] NODA Y, NAKAMURA F, KAWAMURA T, et al. Deep-learning image-reconstruction algorithm for dual-energy CT angiography with reduced iodine dose: Preliminary results[J]. Clinical Radiology: Journal of the Royal College of Radiologists, 2022, 77(2): E138-E46.
- [14] TATSUGAMI F, HIGAKI T, NAKAMURA Y, et al. Deep learning-based image restoration algorithm for coronary CT angiography[J]. European radiology, 2019, 29(10): 5322-5329. DOI:10.1007/s00330-019-06183-y.
- [15] XU J J, LONN L, BUDTZ-JORGENSEN E, et al. Quantitative and qualitative assessments of deep learning image reconstruction in low-keV virtual monoenergetic dual-energy CT[J]. European Radiology, 2022, 32(10): 7098-107.
- [16] 吕培杰, 刘娜娜, 王落桐, 等. 深度学习重建算法优化能谱 CT 低单能量图像质量及检测肝脏低对比度小病灶能力[J]. 中国医学影像技术, 2023, 39(1): 104-108.
- LV P J, LI N N, WANG L T, et al. Deep learning image reconstruction for optimizing image quality of low-energy spectral monochromatic CT and detecting liver small low-contrast lesions[J]. Chinese Journal of Medical Imaging Technology, 2023, 39(1): 104-108. (in Chinese).
- [17] PARK C, CHOO K S, JUNG Y, et al. CT iterative vs deep learning reconstruction: Comparison of noise and sharpness[J]. European Radiology, 2020, 31(5): 3156-3164.
- [18] 孙钰舒, 王瑶, 王国华, 等. 基于深度学习的重建算法对腹部胰腺和门静脉 CT 图像质量的改善价值[J]. 医学影像学杂志, 2022, 32(1): 99-103. DOI:10.3969/j.issn.1006-9011.2022.1.xyxxzz202201026.
- SUN Y S, WANG Y, WANG G H, et al. The improvement value of deep learning-based reconstruction algorithm on CT image quality of abdominal pancreas and portal vein[J]. Journal of Medical Imaging, 2022, 32(1): 99-103. DOI:10.3969/j.issn.1006-9011.2022.1.xyxxzz202201026. (in Chinese).
- [19] 张超, 董栋, 王铭君, 等. 深度学习图像重建算法在提高 CCTA 图像质量中的临床价值研究[J]. 临床放射学杂志, 2021, 40(6): 1126-1130.
- ZHANG C, DONG D, WANG M J, et al. Clinical application value of deep learning image reconstruction algorithm in improving CCTA image quality[J]. Journal of Clinical Radiology, 2021, 40(6): 1126-1130. (in Chinese).