•影像技术学•

Karl、DL 重建算法对上腹部 CT 图像质量和辐射剂量的影响

王诗瑜,刘义军,李贝贝,赵明月,王旭,张竞颐

【摘要】目的:探讨不同级别 Karl 迭代重建技术和深度学习(DL)重建算法对上腹部 CT 图像质量及辐射剂量的影响。方法:应用联影 uCT-760 对腹部仿真模体(CDP-2)分别采用 $10\sim150$ mAs(间隔 20 mAs)行上腹部 CT 扫描,管电压 120 kV,螺距 0.9875,转速 0.5 s/r,扫描层厚 5 mm,层间距 5 mm,重复扫描三次。对原始数据分别采用滤波反投影法(FBP)、Karl $(1\sim9$ 级)、DL $(1\sim4$ 级)算法重建 1 mm图像。在轴面图像上测量肝脏及同层腹壁脂肪的 CT 值和 SD 值并计算信噪比(SNR)和对比信噪比(CNR),记录容积 CT 剂量指数(CTDIvol)和剂量长度乘积(DLP)。以常规剂量(150 mAs)FBP 重建图像为对照,由两位观察者采用五分法评估各组重建图像的主观质量并行 kappa 一致性检验,采用 Kruskal-Wallis H 检验比较各组主客观图像质量。结果:各组 FBP、Karl $(1\sim9$ 级)、DL $(1\sim4$ 级)重建图像的 CT 值差异无统计学意义(P>0.05)。随着 Karl/DL 等级的增加,相应组别的 SD 值降低(P<0.05),SNR 和 CNR 升高(P<0.05)。两位观察者对各组图像主观评分的一致性较好(kappa = $0.721\sim0.837$),50 mAs(DL-2)、70 mAs(Karl-6)图像与 150 mAs 的 FBP 图像质量差异无统计学意义(P>0.05),辐射剂量分别降低了 53.3%、66.7% (P<0.05)。结论:与常规剂量(150 mAs)FBP 算法相比,在获得相同图像质量情况下,应用 Karl 和 DL 算法能显著降低辐射剂量。

【关键词】 腹部模体; Karl 算法; DL 算法; 辐射剂量; 图像质量

【中图分类号】R814.42 【文献标志码】A 【文章编号】1000-0313(2023)05-0626-05

DOI: 10.13609/j. cnki. 1000-0313. 2023. 05. 017 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



The effect of KARL and DL reconstruction algorithms on image quality and radiation dose of upper abdominal CT WANG Shi-yu, LIU Yi-jun, LI Bei-bei, et al. Department of Radiology, the First Affiliated Hospital of Dalian Medical University, Liaoning 116011, China

[Abstract] Objective: To explore the effects of Karl's (Keep Artifact Really Low) iterative reconstruction technique and deep learning (DL) reconstruction algorithm on upper abdominal CT image quality and radiation dose at different levels. Methods: The abdominal simulation phantom (CDP-2) was scanned with a UCT-760 scanner at $10{\sim}150 \mathrm{mAs}$ (20mAs interval) and $120 \mathrm{kVp}$. The scanning parameters included pitch of 0.9875, rotational speed of 0.5s/r, slice thickness of 5mm and slice interval of 5mm. The scanning was repeated three times. FBP, Karl (level $1 \sim 9$) and DL (level $1 \sim 4$) algorithms were used to reconstruct images with 1mm thickness from the original data. CT and SD values of liver and abdominal wall fat were measured on axial images, and SNR and CNR were calculated. CT-DIvol and DLP were recorded as well. The images reconstructed by FBP at the conventional dose (150mAs) were considered a control group. Two observers were selected to evaluate the subjective quality of reconstructed images in each group with the quintic method and Kappa consistency test. The Kruskal-Wallish test was conducted to compare the subjective and objective image quality. Results: The CT values of images reconstructed by FBP, Karl (grade $1\sim9$) and DL (grade $1\sim4$) demonstrated no difference among all groups (P > 0.05). With the increase of Karl/DL grade, the SD value of corresponding groups decreased (P < 0.05), whereas SNR and CNR increased (P < 0.05). The subjective scores of the two observers in each group were consistent (Kappa=0.721~0.837). No significant statistical difference was found between the image quality of 50mAs (DL-2), 70mAs (Karl-6) and 150mAs (FBP) (P>0.05), and compared with FBP, the radiation dose of DL-2 and Karl-6 decreased

作者简介:王诗瑜(1986一),女,辽宁营口人,硕士,主管技师,主要从事医学影像技术工作。

通讯作者:刘义军,E-mail:yijunliu1965@126.com

by 53. 3% and 66. 7%, respectively (P < 0.05). Conclusion: Compared with conventional FBP (150mAs), Karl and DL algorithms can significantly reduce the required radiation dose while obtaining the same image quality.

[Key words] Abdominal phantom; FBP, Karl, DL algorithm; Radiation dosage; Image quality

近年来,随着 CT 图像重建技术的不断发展,迭代重建算法和深度学习(deep learning, DL)重建算法已广泛应用于 CT 图像重建^[1],与传统的滤波反投影法(filtered back projection, FBP)算法相比,迭代算法和DL 算法能够降低图像噪声,改善图像质量^[2],在满足临床诊断要求的同时有效降低辐射剂量^[3]。当前针对迭代、DL 算法的各项临床研究较多^[4-6],但对于各种算法之间的横向比较少有文献报道。基于模体的研究是 CT 图像质量控制规范化的一种有效手段。模体研究对 CT 参数优化的可重复性好,从而为制定更加合理的 CT 检查方案提供依据。本研究采用仿真模体上腹部开展实验,探讨迭代重建技术(keep artifact really low, Karl)、DL 重建算法对上腹部 CT 图像质量及辐射剂量的影响。

材料与方法

1. 扫描方案

应用 uCT-760(上海联影) 螺旋 CT 对仿真模体 (CDP-2)上腹部进行扫描,管电压 $120 \,\mathrm{kV}$,管电流 $10 \sim 150 \,\mathrm{mAs}$ (间隔 $20 \,\mathrm{mAs}$),视野 $350 \,\mathrm{mm} \times 350 \,\mathrm{mm}$,准直器宽度 $40 \,\mathrm{mm}$,层厚 $1 \,\mathrm{mm}$,螺距 0.9875,转速 $0.5 \,\mathrm{s/r}$,每一管电流均重复扫描三次,记录容积 CT 剂量指数 (volume CT dosimetry index,CTDIvol)和剂量长度 乘积(dose length product,DLP),扫描范围从膈顶至 肝脏下缘,共获得 $8 \,\mathrm{4lg}$ 始数据。将不同管电流扫描 的原始数据上传至联影 uCT-960 后处理工作站,分别 采用 FBP、Karl $(1\sim 9 \,\mathrm{4y})$ 、DL $(1\sim 4 \,\mathrm{4y})$ 不同算法进行重建,重建层厚、层间距均为 $1 \,\mathrm{mm}$,重建卷积核 B_SOFT_B,窗宽 $300 \,\mathrm{HU}$,窗位 WL $40 \,\mathrm{HU}$ 。 获得 FBP $(150 \,\mathrm{mAs})$ $1 \,\mathrm{4l}$ 、Karl $(1\sim 9 \,\mathrm{4y})$ 72 $\mathrm{4l}$ 、DL $(1\sim 4 \,\mathrm{4y})$

32 组图像。

2. 图像客观评价

在轴面图像肝脏显示最佳的三个相同层面测量肝组织及同层腹壁脂肪均匀处 CT 值和 SD 值,各组ROI测量位置及大小(约 300 mm²)均保持一致(图1),重复测量 3 次取其均值。以腹壁脂肪 SD 值作为背景噪声,计算图像的信噪比(signal noise ratio, SNR)和对比信噪比(contrast noise ratio, CNR),具体计算公式为

$$SNR = \frac{CT_{\text{ff fil}}}{SD_{\text{ff fil}}} \tag{1}$$

 $CNR = |CT_{Fik} - CT_{gehib}|SD_{gehib}$

3. 图像主观评价

由 2 位具有 5 年以上影像诊断经验的医师采用 5 分制对各组图像进行独立双盲主观评价,具体评分标准见表 1,评分≥3 分即符合临床诊断要求。

表 1 图像质量主观评价标准

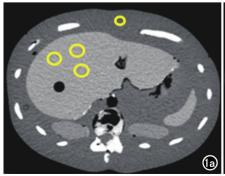
证人	评价标准
评分	计价标准

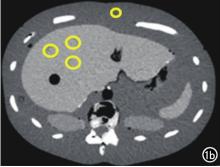
- 1分 解剖结构无法分辨,锐利度差,噪声大,颗粒感及蜡状伪影明显
- 2分 解剖细节不足以被发现,锐利度低,噪声及蜡状伪 影相对明显
- 3分 大部分解剖结构较清楚,细节显示欠清,锐利度、噪声及蜡状伪影较低但可接受
- 4分解剖结构和细节较清楚,对比度较高,锐利度稍降低,噪声及蜡状伪影不明显
- 5分 解剖细节清晰,对比度高,层次感强,锐利度好,无 噪声及蜡状伪影

4. 辐射剂量

记录 CTDIvol 和 DLP, 计算有效辐射剂量 ED (effective dose, ED), 计算公式为 ED=DLP×k, k=0.015。

5. 统计学分析





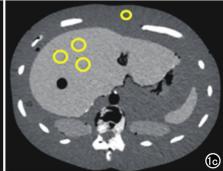


图 1 不同算法重建图像及 ROI 放置位置。a)管电流为 150 mAs 的 FBP 重建图像;b)管电流为 70 mAs 的 Karl-6 重建图像;c)管电流为 50 mAs 的 DL-2 重建图像。

采用 SPSS 24.0 软件进行统 计学分析。计量资料以 亚士 s 表 示,对符合正态分布的计量资料采 用单因素方差分析进行组间比较, 而非正态分布的计量资料采用 Kruskal-Wallis H 检验进行组间 比较。比较不同重建算法、不同 mAs 图像各感兴趣区的 CT 值、 SD值、SNR及CNR的差异,两位 观察者对图像主观质量评分的一 致性采用 kappa 检验进行评价,观 察者一致性较好则采用标准差较 小的一组进行 Kruskal-Wallis H 检验各组图像主观质量的差异。 各组辐射剂量的比较采用 Kruskal-Wallis H 检验。以 P < 0.05 为差异有统计学意义。

结 果

1. 图像客观评价

在不同 mAs、不同重建算法下,Karl(1 \sim 9级)、DL(1 \sim 4级)与FBP重建图像各ROI的CT值差异无统计学意义(P>0.05)。

随着 Karl、DL 级别升高,图像 SD 值降低(P<0.05),其中 DL-4(150 mAs)最低; SNR 和 CNR 升高, DL-4 (150 mAs)最高;随着 mAs 的增加, Karl (1~9 级)、DL(1~4 级)的 SNR、CNR 均升高,在最低(10 mAs)时, Karl-9 与 DL-4 的 SNR 分别为(4.72±0.19)、(5.26±0.97)、CNR 分别为(5.37±023)、(6.48±0.02),DL-4 优于 Karl-9(图 2); Karl-6(70 mAs)与DL-2(50 mAs)的 SD、SNR、CNR 差异均有统计学意义(P<0.001,表 2),且 DL-2(50 mAs)的 SD 低于 Karl-6(70 mAs),SNR、CNR 优于 Karl-6(70 mAs)。

2. 图像主观评价

两位观察者对各组图像主观评分的一致性较好 $(kappa=0.721\sim0.837)$,不同级别的 $Karl(1\sim9~9)$ 算法的重建图像、 $DL(1\sim4~9)$ 算法的重建图像与 FBP 重建图像主观评分的差异均有统计学意义 (P<

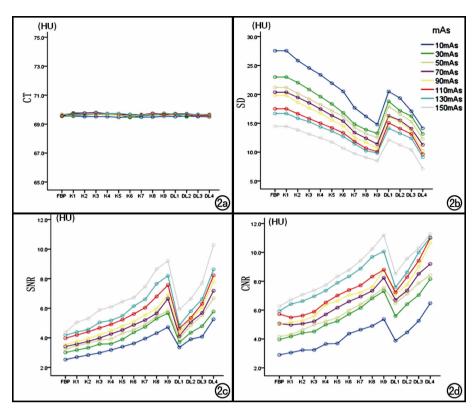


图 2 FBP、Karl 1~9级(K1~K9)、DL 1~4级(DL1~4)不同算法、不同mAs下CT、SD、SNR和CNR的变化趋势图。a)CT值的变化趋势图;b)SD的变化趋势图;c)SNR的变化趋势图;d)CNR的变化趋势图。

0.05)。在不同 mAs、不同重建算法下,对于 Karl 算法和 DL 算法,随着等级的增加,主观评分均表现为先升高后下降的趋势,其中 Karl 算法中 Karl-6(70 mAs)组主观评分最高,Karl-1组主观评分最低; DL 算法中DL-2(50 mAs)组主观评分最高,DL-4主观评分最低;且 DL-2(50 mAs)组的主观评分高于 Karl-6(70 mAs)(表 2)。

3. 辐射剂量

管电压为 120 kV 时,随着管电流的增加,CTDIvol 和 DLP 均逐渐增大,Karl-6(70 mAs)与 DL-2(50 mAs)的 ED 较 FBP(150 mAs)分别降低了 53.3%和 66.6%。

讨论

CT重建算法对图像质量及辐射剂量的影响是近

表 2 常规剂量(150mAs)FBP、Karl-6(70mAs)与DL-2C主客观质量比较

项目	FBP (150mAs)	Karl-6(70mAs)	DL-2(50mAs)	F/χ^2 值	P 值
CT(HU)	69.56 ± 0.31	69.65 ± 0.13	69.67 \pm 0.11	1.173ª	0.461
SD(HU)	14.60 ± 0.27	14.35 ± 0.12	13.31 \pm 0.35	98.406°	<0.001
SNR(HU)	5.72 ± 0.89	6.49 ± 0.99	6.66 ± 0.70	498.466ª	<0.001
CNR(HU)	6.25 ± 0.97	7.09 ± 0.11	7.27 ± 0.77	489.758a	<0.001
主观评分(分)	4 (3,4)	4 (3,4)	4 (3,4)	0.440 ^b	0.803

表 3 不同辐射剂量比较

管电流 (mAs)	CTDIvol (mGy)	DLP (mGy • cm)	ED (mSv)
50	4.17	200.38	3.01
70	5.84	280.76	4.21
150	12.51	601.25	9.02

注:CTDIvol:容积CT剂量指数;DLP:剂量长度乘积

年来业界研究的热点,特别是 Karl、DL 算法的临床应 用,在保证图像质量的同时可进一步降低辐射剂量。 但是不同型号 CT 设备的成像参数不同,如何制定具 体设备的人体扫描方案是CT质量控制的重要内容。 本文应用 uCT-760(上海联影)螺旋 CT 对仿真模体 (CDP-2)上腹部进行扫描,评估 FBP、Karl、DL 三种不 同图像算法对CT图像质量及辐射剂量的影响。应用 仿真模体,可以在不涉及伦理问题的前提下,对其进行 重复扫描。而且,CDP-2 仿真模体具有与人体相近的 组织器官,具有高度形态相似性和内部结构仿真性,与 人体组织器官密度等效,具有相同的 X 线吸收衰减效 应及 CT 值,有利于为临床人体 CT 扫描提供参数优 化方案,实现 CT 质量控制的标准化[7]。目前关于低 剂量 CT 成像的研究大多通过降低管电压或管电流、 增加螺距和应用迭代重建算法等方法[8-10]。其中, 迭 代重建算法的应用与发展为降低辐射剂量开辟了新的 路径,应用迭代重建算法对低剂量图像进行优化而获 得优质图像。本文基于仿真模体,以传统 FBP 算法 (150 mAs)为对照组,旨在探讨在满足影像诊断需求 前提下,低辐射剂量扫描时各算法的最佳权重。

常规 FBP 算法需要投影数据的完备和精确的定 量,在低剂量条件下 FBP 图像存在颗粒感大、图像噪 声大、细节显示不佳等缺点,从而会对影像质量造成一 定的不利影响。与传统 FBP 重建相比,为了进一步降 低辐射剂量,Karl 迭代重建算法将每次迭代所采集到 的数据与计算机投影数据进行比较,在CT扫描剂量 降低幅度较大时, Karl 迭代重建技术能够降低 CT 图 像噪声[11],达到常规剂量图像质量的标准[12],共分为 9个等级。本研究结果显示,图像噪声、SNR、CNR与 Karl 算法不同重建等级呈线性关系[13],即图像噪声随 着 Karl 重建等级的增加逐渐减低,而 SNR、CNR 则逐 渐升高。Karl 在不同剂量下,其降噪幅度大致相同, 在低剂量情况下, Karl-1 重建图像噪声最大, 颗粒感明 显,主客观结果均不佳,远低于 FBP(150 mAs)。Karl-9 重建图像的 SNR 及 CNR 最高,但其主观评分较低, 原因在于高权重的迭代算法,虽然可大幅降低图像噪 声,但肝脏边缘过度平滑、软组织间缺乏对比,存在明 显的塑料化伪影。综合主客观评价,Karl-6(70 mAs) 组图像噪声、SNR及CNR适中,主观评分最高,为最 佳的 Karl 迭代等级。

DL 算法是以高剂量下的 FBP 图像作为训练模 型,通过使用深度卷积神经网络(deep convolutional neural networks, DCNN)对低剂量图像不断进行优 化,可以在不改变图像纹理或影响解剖和病理结构的 情况下,达到抑制噪声的效果,已广泛用于医学图像处 $\overline{\mathbf{u}}^{[14]}$, \mathbf{u} CT-760 的 DL 算法共 4 个重建等级 $(1 \sim 4)$ 级)。本研究结果显示,在DL1~3级时随着重建算法 等级的升高,SD降低,SNR和CNR升高。DL-4时, 降噪比例与图像质量不呈线性关系[15],降噪水平发挥 不稳定,可能是由于 DL 算法使用非线性运算,所以在 不同剂量水平下,降噪幅度变化较大,在低剂量时会有 一些非线性变化,较高等级的 DL 算法尚不稳定,仍需 进一步训练,且有文献表明高等级的 DL 算法会出现 "过度平滑"现象,这是不同于迭代算法塑料化伪影的 新伪影[16]。因此本研究中虽然 DL-4 的客观图像质量 高于 DL(1~3 级)组,但是其主观评分较低,其中 DL-2(50 mAs)的主客观图像质量最好,为最佳的 DL 等 级。

与常规剂量 FBP(150 mAs)算法相比,Karl-6 (70 mAs),DL-2(50 mAs)图像的 SD 值均小于 FBP (150 mAs),SNR 和 CNR 均高于 FBP(150 mAs),且图像主观质量差异无统计学意义,表明 DL 算法在低剂量下,发挥了更大的作用,低剂量联合 DL 算法重建将会获得更佳的图像质量。

综上所述, Karl、DL 算法能够保证 CT 图像质量情况下,有效降低辐射剂量,其中 Karl-6 和 DL-2 算法效果最佳。本研究不足之处:模体虽保证了研究的科学性,但与临床人体扫描仍存在差异,下一步将在临床实践中借助模体扫描参数研究不同体型人体的扫描方案。

参考文献:

- [1] 李娟,汤翔宇,沈逸,等. 基于卷积神经网络的深度学习算法对颅内出血的类型识别及血肿分割一致性的研究[J]. 放射学实践, 2021,36(1):7-12.
- [2] 彭薇,李琛玮,杨利霞,等. Karl 迭代技术降低 16 层 CT 胸部扫描 辐射剂量的水模和临床研究[J]. 放射学实践,2015,(4):328-331.
- [3] Goo HW. CT radiation dose optimization and estimation: an update for radiologists[J]. Korean J Radiol, 2012, 13(1):1-11.
- [4] Higaki T, Nakamura Y, Zhou J, et al. Deep learning reconstruction at CT: phantom study of the image characteristics[J]. Acad Radiol, 2020, 27(1):82-87.
- [5] Greffier J. Hamard A. Pereira F. et al. Image quality and dose reduction opportunity of deep learning image reconstruction algorithm for CT: a phantom study[J]. Eur Radiol. 2020. 30(7): 3951-3959.
- [6] Kanii Y, Ichikawa Y, Nakayama R, et al. Usefulness of dictionary learning based processing for improving image quality of sub millisievert low dose chest CT; initial experience[J]. Jpn J Radiol,

2020,38(3):215-221.

- [7] 张琳琳,浦仁旺.利用双低扫描方案进行仿真模体血管成像的可行性研究[J].医学影像学杂志,2015,25(5):902-906.
- [8] 沈艺,李露露,宋建,等. 低剂量条件下深度学习图像重组算法与多模型迭代重组算法对腹部增强 CT 图像质量的影响[J]. 临床放射学杂志,2022,41(3):566-570.
- [9] Mangold S, Wichmann JL, Schoepf UJ, et al. Automated tube voltage selection for radiation dose and contrast medium reduction at coronary CT angiography using 3(rd) generation dual-source CT [J]. Eur Radiol, 2016, 26(10); 3608-3616.
- [10] Zhang LJ. Wang Y, Schoepf UJ, et al. Image quality, radiation dose, and diagnostic accuracy of prospectively ECG-triggered high-pitch coronary CT angiography at 70kVp in a clinical setting: comparison with invasive coronary angiography [J]. Eur Radiol, 2016, 26(3):797-806.
- [11] 华海琴,康德强,徐晓娟,等. 低管电压结合自动毫安技术对降低 头颈部数字减影 CTA 辐射剂量的可行性研究[J]. 放射学实践, 2016,31(8):781-785.

- [12] 常蕊,杨琰昭,孔德艳,等.不同管电压、管电流扫描方案联合 Karl 迭代重建在新型冠状病毒肺炎疫情期间胸部 CT 筛查中的 应用研究[J].诊断学理论与实践,2020,19(2):182-187.
- [13] Lancellotta V, Iacco M, Perrucci E, et al. Comparing four radiotherapy techniques for treating the chest wall plus levels III-W draining nodes after breast reconstruction[J]. Br J Radiol, 2018, 91(1086):20160874.
- [14] 杨勤顺,彭德华,丁凯俊,等. 不同 Karl 迭代重建等级对低管电压 胸部 CT 图像质量的影响[J]. 实用医学影像杂志,2021,22(5): 439-441.
- [15] Chartrand G, Cheng PM, Vorontsov E, et al. Deep learning: a primer for radiologists [J]. Radiographics, 2017, 37 (7): 2113-2131.
- [16] Hassani C.Ronco A.Prosper AE, et al. Forward projected model based iterative reconstruction in screening low dose chest CT: comparison with adaptive iterative dose reduction 3D[J]. AJR Am J Roentgenol, 2018, 211(3):548-556.

(收稿日期:2022-06-29 修回日期:2022-10-27)

原创专著《感悟医学影像技术学》出版发行

王骏、吴虹桥的原创专著《感悟医学影像技术学》由辽宁科学技术出版社出版发行。该书汇总了130余篇作者在《健康报》、《中国医药报》、《中国医学论坛报》、《医师报》、《中国科技翻译》、《中华医院管理杂志》、《中华放射学杂志》、《国外医学临床放射学分册》、《国外医学放射医学核医学分册》、《国外医学医院管理分册》、《中国大学生就业》等数十家国内顶级报纸、期刊上刊发的"工作随笔"。书里汲取并融合了数十位院士的学术思想,数十位将军级教授的学术理念,数十位主委的学术智慧及数以百计的专家、学者观点的结晶,是对我国及全球医学影像技术学界36年来突飞猛进发展史的梳理和高度概括与总结。全书分为"踏进医学影像技术的大门"、"著名专家眼中的医学影像"、"图书是提升专业水平的快速路"、"从学术会议和论文把握医学影像学的脉搏"、"我对医学影像技术学的思考"、"尾声"共六篇,忠实记录了作者自己在医学影像技术专业发展进程中的学习和思考。全书51.8万字,80余幅图片,近500页,全彩印刷。可作为医学影像技术专业大学生入学教育的"头本书",用以稳固专业思想;同时,也是医学影像工作者发奋图强、催我自新的励志教材。

(王骏)