

论 著

四维降噪与运动矫正对
下肢动脉4D-CTA的图像
质量影响的应用研究*

刘苗苗 郝 艳* 舒 政

上海市中西医结合医院影像科(上海 200082)

【摘要】目的 探究四维降噪与运动矫正技术对下肢4D-CTA图像质量的影响。方法 收集在西门子双源CT进行下肢动脉4D-CTA扫描的患者31例,扫描范围涵盖膝下三支动脉。将图像输入Syngo Via VB40软件,获得四维降噪和运动矫正处理前和处理后的4D-CTA最大密度投影图和动态电影图。对处理前后的图像进行Likert视觉评分(1-4分,1分为最差,4分为最佳),并进行组间比较。结果 处理前动态电影图像Likert视觉评分3分占54.8%(17/31),4分占16.1%(5/31),处理后3分占25.8%(8/31),4分占64.5%(20/31),四维降噪和运动矫正处理提高了下肢动脉4D-CTA图像的Likert评分,且差异具有统计学意义($P<0.01$)。结论 四维降噪与运动矫正可以提高下肢动脉4D-CTA的图像质量,对膝下三支动脉的动态成像具有优化作用。

【关键词】 下肢动脉; CT血管成像;
降噪; 运动矫正

【中图分类号】 R658.3

【文献标识码】 A

【基金项目】 虹口区卫生健康委员会医学
科研课题计划资助(虹卫1801-04)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2025.09.056

The Impact of Four-dimensional Noise
Reduction and Motion Correction on Image
Quality in 4D-CTA of Lower Limb Arteries*

LIU Miao-miao, XI Yan*, SHU Zheng.

Department of Radiology, Shanghai TCM-Integrated Hospital, Shanghai University of TCM, Shanghai 200082, China

ABSTRACT

Objective To investigate the impact of four-dimensional noise reduction and motion correction techniques on the image quality of lower extremity 4D-CTA. **Methods** A total of 31 patients undergoing lower extremity arterial 4D-CTA scans with a Siemens dual-source CT were enrolled. The scan range covered the three arteries below the knee. The images were processed using the Syngo Via VB40 software to obtain the maximum density projection images and dynamic movie images before and after the application of four-dimensional noise reduction and motion correction. The image quality was evaluated using Likert visual scores (1-4, with 1 being the worst and 4 being the best) for both pre- and post-processed images, and comparisons between the groups were conducted. **Results** Before processing, the Likert visual scores for dynamic movie images were 3 in 54.8% (17/31) of cases and 4 in 16.1% (5/31) of cases. After processing, the scores were 3 in 25.8% (8/31) and 4 in 64.5% (20/31) of cases. The application of four-dimensional noise reduction and motion correction significantly improved the Likert scores of the lower extremity arterial 4D-CTA images, with the difference being statistically significant ($P<0.01$). **Conclusion** Four-dimensional noise reduction and motion correction techniques significantly enhance the image quality of lower extremity arterial 4D-CTA, particularly improving the dynamic imaging of the three arteries below the knee.

Keywords: Lower Limb Artery; Computer Tomography Angiography; Noise Reduction; Movement Correction

随着CT扫描技术的发展,特别是西门子第三代双源CT(SOMATOM Force)扫描仪的引入,容积灌注计算机扫描(volume perfusion computer tomography, VPCT)的动态采集范围可高达83cm,管球旋转速度高达250 ms,时间分辨率高达66ms,低剂量70KV技术可以使得多期成像的叠加的辐射剂量明显减低,使用CT动态血管成像软件处理VPCT图像可获取全时相的动态4D-CTA的图像^[1-3]。基于以上技术,理论上下肢动脉大范围的4D-CTA成像能满足膝下三支动脉的血流灌注的动态观察并提供更全面的诊断信息。目前VPCT和4D-CTA技术已广泛应用于神经血管疾病成像^[4,5],但国内外在下肢动脉显像方面研究和应用较少,并且尚缺少CT动态血管成像软件的后处理和图像的优化的相关研究。因此,本研究通过双源CT进行下肢VPCT扫描获取4D-CTA的原始图像,探究降噪和运动矫正处理在下肢4D-CTA图像质量改进中的应用。

1 资料与方法

1.1 研究对象 收集2022年8月到2023年3月期间于上海市中西医结合医院影像科行双源下肢VPCT扫描的患者。入组条件:(1)年龄 ≥ 18 岁;(2)全扫描时相的多组原始图像完整;(3)软件可识别图像并成功计算。删除条件:(1)图像不完整;(2)软件不能识别和计算。最终入组31例,其中男19名,女12名,平均年龄 64.10 ± 12.30 岁(37~87岁),所有患者均诊断为下肢动脉硬化疾病。

1.2 扫描仪器与图像后处理 CT扫描仪器为第三代双源西门子扫描仪(SOMATOM Force),受检者采取仰卧位,足先进,将固定带放于双膝处进行固定。VPCT的扫描参数:使用高压注射器将40mL非离子碘对比剂(Ultravist 370mgI/mL),以4mL/s的流率注入肘正中静脉,再用40mL的生理盐水以相同的速度冲洗,使用自适应4D螺旋模式,推注对比剂 15s后开始扫描,管电压80KVp,管电流40mA,扫描范围从从髌上区域-足尖区域(包全膝下三支动脉区域),全长630mm,头尾方向使用摇篮床穿梭技术进行多次采集,共15次采集,前12次穿梭,每次穿梭2.5s,后3次穿梭,每次5s,总共用时45s,准直器宽度为 192×0.6 mm,球管旋转时间0.17s,扫描层厚5mm,扫描层间距5mm,重建层厚1.5mm,重建间隔1.0mm,卷积核Bv36,矩阵 512×512 。VPCT扫描的平均CTDI vol 为 14.34 ± 1.12 mGy,平均 DLP为 857.8 ± 2.37 mGy.cm,平均ED为 11.99 ± 0.59 mSv。

VPCT图像输入西门子Syngo Via VB40软件进行后处理,程序选用CT动态血管成像得到最大密度投影图像和动态电影图像,并使用四维降噪和运动矫正技术进一步处理进行对比。

1.3 辐射剂量的计算 记录CT扫描的辐射剂量参数,包括电压(Kv)、容积CT剂量指数(CT dose index volume, CTDIvol)和剂量长度乘积(dose length product, DLP)。根据美国医学物理师协会(American Association of Physicists in Medicine, AAPM)推荐有效剂量计算方法^[6-7],有效辐射剂量(effective dose, ED)=DLP $\times$ K,公式中K为组织权重

【第一作者】刘苗苗,女,住院医师,主要研究方向:MRI、CT诊断。E-mail: 1107572039@qq.com

【通讯作者】郝 艳,女,主治医师,主要研究方向:MRI、CT诊断。E-mail: 1165372392@qq.com

因子, 下肢的K为 $0.014 \text{ mSv} \times \text{mGy}^{-1} \times \text{cm}^{-1}$ 。

1.4 图像质量的评估 两名具有5年以上放射诊断经验的医生评估处理前和处理后的最大密度投影图像与动态电影图像, 图像质量采用4级Likert视觉评分^[8](范围为1-4分), 1分: 最差, 图像噪声大, 管腔显示不清或图像存在严重阶梯样伪影, 不能满足诊断需求; 2分: 差, 图像噪声较大, 动脉管腔有中度伪影, 但能满足最低诊断需求; 3分: 良好, 图像噪声小, 动脉管腔有轻度伪影; 4分: 最佳, 图像噪声小, 动脉管腔边界清晰连续无伪影, 完全能满足诊断需求。两名医生存在争议时, 通过协商进行统一评分。

1.5 统计学分析 使用SPSS 26.0对数据进行统计学分析, 定量资料的表达采用均值±标准差($\bar{x} \pm s$), Likert视觉评分属于等级资

料, 表达采用计数或比率(%), 等级资料的比较采用Pearson卡方检验, 当单元格的频数<5的单元格个数超过20%时, 使用Fisher确切概率检验, 双侧 $P < 0.05$ 认为组间差异具有统计学意义。

2 结果

VPCT扫描的平均CTDI vol 为 $14.34 \pm 1.12 \text{ mGy}$, 平均DLP为 $857.8 \pm 2.37 \text{ mGy} \cdot \text{cm}$, 平均ED为 $11.99 \pm 0.59 \text{ mSv}$ 。4D-CTA的最大密度投影原始图像和动态电影图像的Likert视觉评分在使用降噪和运动矫正后有所提高(图1和图2), 且差异具有统计学意义(参照表1)。

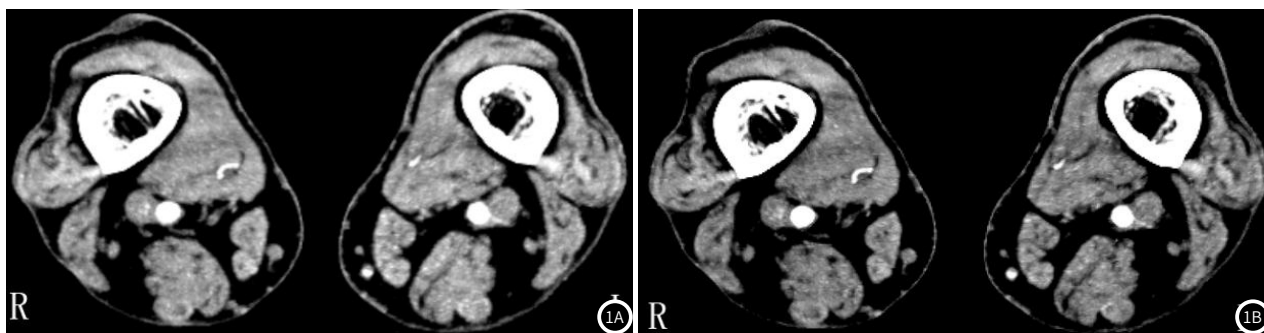


图1 男, 65岁, 临床诊断为下肢动脉硬化, 1A图为四维降噪前的最大密度投影图像(maximum intensity projection, MIP), Likert视觉评分为3分, 1B为四维降噪后的MIP图, 同1A具有相同的窗宽(150)和窗位(70), 1B较1A肌肉信号更均匀, 腘动脉边界更清楚和锐利, Likert视觉评分为4分, 这表明经过四维降噪后图像质量提高。

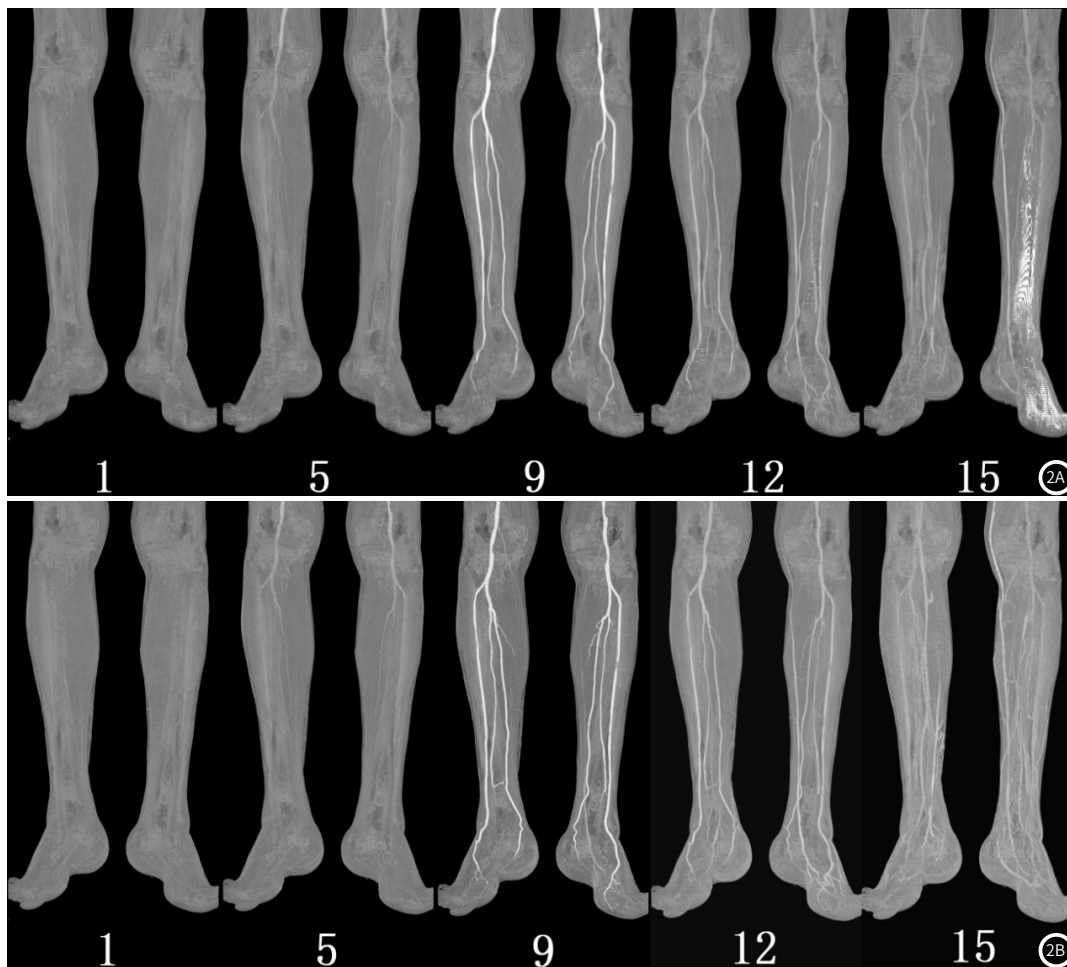


图2 与图1是同一例患者, 2A为四维降噪和运动矫正前的动态电影图像(1/5/9/12/15期图像), Likert视觉评分为3分, 2B为处理后的动态电影图像(1/5/9/12/15期图像), Likert视觉评分为4分, 2B图较2A图像去骨图的杂质更少, 动脉管壁更加清晰。

表1 4D-CTA图像的Likert视觉评分比较

项目	组别	Likert视觉评分				统计值*	P值
		1分	2分	3分	4分		
最大密度投影图	处理前						
	噪声	0	10	19	2	22.99	<0.01
	处理后	0	2	10	19		
动态电影图像	处理前	0	9	17	5	10.77	<0.01
	处理后	0	3	8	20		

注释：“*” 由于表格<5的数目大于20%，使用Fisher确切概率法。

3 讨 论

本研究发现，经过四维降噪和运动矫正后最大密度投影图像和动态电影图像的图像质量得到了优化(表1)。第三代DSCT扫描仪的66ms高时间分辨率允许长节段(630mm)的下肢VPCT扫描，第三代西门子双源CT具有宽探测器、Bv40卷积和全模迭代算法ADMIRE的优势，可以降低VPCT原始图像重建的噪声。我们进行的下肢VPCT是15次的采集，每次采集的范围为630mm，如果使用常规的150Kv、200mAs的剂量，会使辐射剂量大大增加，为了减低辐射剂量，故此使用80Kv的管电压，40mAs的管电流，理论上辐射剂量越小，图像内量子数越少，导致图像噪声越低^[9]。此外动脉管壁钙化、相邻骨质及动脉内支架等过度吸收X线的物质会导致金属伪影或容积伪影，亦可导致图像噪声增高^[10-11]。VPCT生成的4D-CTA图像显示膝下三支动脉的清晰度与运动伪影关系密切，虽然我们在VPCT检查过程中进行了下肢的固定，但使用摇篮床技术在检查床穿梭过程中产生的运动伪影仍不可避免。鉴于此，本研究基于软件的四维降噪有效减低了图像噪声，基于软件的运动矫正减低了运动伪影。

影响CT图像噪声的因素主要是以下三个方面，第一，图像采集因素：管电流、管电压和准直等。第二，图像重建算法：基于原始数据的图像重建算法，如滤波反投影、迭代重建算法、人工智能重建算法，其中人工智能重建用于提高低剂量CT扫描的图像质量获得越来越高的关注^[12]。第三,基于软件的上述重建图像的图像后处理算法。图像采集主要改变辐射剂量来影响图像质量,图像重建则在不改变辐射剂量的情况下减少图像噪声^[13]。本研究主要通过第三种方法改善图像噪声，薄层重建的图像可以基于Syngo Via VB40的四维降噪程序获得噪声更低和质量更高的图像，四维降噪程序将图像分解为低频数据和高频数据，使用多频带滤波器应用于降噪，按时间顺序连续的图像的低频数据被一起处理以减少噪声，然后与高频数据重新组合以获得改进的图像。因此四维降噪在三维降噪的基础上加入时间线，其本质是多期多组图像的综合降噪。Yi等^[14]主要将四维降噪应用于心脏VPCT并获得了良好的图像质量评分，本研究则通过四维降噪获得的下肢VPCT最大密度投影图像和动态电影图像获得了更高的Likert评分。

图像配准可分为刚性配准和柔性配准，分类主要根据是配准过程中目标形状是否变化^[15]。柔性图像配准指的是可变形图像配准，也称为非刚性医学图像配准，它主要基于相互信息的方法来匹配不同期像的同一层图像，从而有效地解决了运动位移的影响^[16]。下肢VPCT和衍生的4D-CTA属于多时相序列，运动矫正/图像配准主要针对时间序列配准，基于Syngo Via VB40软件的运动矫正主要使用的是体部运动矫正，体部运动矫正解决下肢解剖结构在不同时间的图像中的位置对应问题，属于柔性配准。本研究经过运动矫正后，膝下三支动脉管腔显示更加清晰和连续，重建的4D-CTA动态电影图像质量更高。柔性配准作为医学图像的配准已广泛应用于临床及科研当中，其中包括CT、MRI、超声及PET/CT的图像优化^[16-18]。

综上所述，本研究证实了第三代西门子双源CT的下肢动脉4D-CTA大范围成像(630mm)的可行性，为下肢动脉4D-CTA在下肢动脉病变诊断的应用研究打下基础。更重要的是，四维降噪联合运动矫正使下肢VPCT的最大密度投影图像和4D-CTA运动电影图像获得了更高的图像质量，提高了诊断准确性，证实了基于软件的图像优化是VPCT后处理过程中不可或缺的重要步骤，为下肢4D-CTA的影像诊断提供重要参考。

参考文献

[1]Gawlitza J,Haubenreisser H,Meyer M,et al.Comparison of organ-specific-radiation dose levels between 70 kVp perfusion CT and standard tri-phasic liver CT in patients with hepatocellular carcinoma using a Monte-Carlo-simulation-based analysis platform[J].Eur J Radiol Open,2016,7,3:95-99.

[2]Takafuji M,Kitagawa K,Ishida M,et al.Myocardial coverage and radiation dose in dynamic myocardial perfusion imaging using third-generation dual-source CT[J].Korean J Radiol,2020,21(1):58-67.

[3]陈钰,金征宇.第3代双源CT的临床应用现状与展望[J].中国医学科学院学报,2017,39(1):1-3.

[4]Denby CE,Chatterjee K,Pullicino R,et al.Is four-dimensional CT angiography as effective as digital subtraction angiography in the detection of the underlying causes of intracerebral haemorrhage:a systematic review[J].Neuroradiology,2020,62(3):273-281.

[5]Liu J,Wang C,Li Q,et al.Free-breathing,non-gated heart-to-brain CTA in acute ischemic stroke:a feasibility study on dual-source CT[J].Front Neurol,2022,22;13:616964.

[6]Zhao A,Fopma S,Agrawal R.Demystifying the CT Radiation Dose Sheet.Radiographics,2022,42(4):1239-1250.

[7]王强,付强,林琳.两种方法估算双源CT胸部螺旋扫描有效剂量比较[J].中华放射医学与防护杂志,2016,36(10):777-779.

[8]Phelps AS,Naeger DM,Courtier JL,et al.Pairwise comparison versus Likert scale for biomedical image assessment[J].AJR Am J Roentgenol,2015,204(1):8-14.

[9]李娟.CT重建降噪技术辅助灌注CT替代常规增强CT在胰腺实性肿瘤中的应用研究[D].北京协和医学院,2022.

[10]周海,万金笔.浅析CT性能参数与影响噪声的因素[J].科技展望,2016,26(15):142.

[11]黄霞,许乙凯,张煜.基于卷积神经网络的宫颈CT图像的金属伪影去除[J].中国医学物理学杂志,2022,39(12):1466-1472.

[12]Immonen E,Wong J,Nieminen M,et al.The use of deep learning towards dose optimization in low-dose computed tomography:a scoping review[J].Radiography (Lond),2022,28(1):208-214.

[13]Diwakar M,Kumar M.A review on CT image noise and its denoising[J].Biomedical Signal Processing and Control,2018,42(APR.):73-88.

[14]Yi Y,Wu W,Lin L,et al.Single-phase coronary artery CT angiography extracted from stress dynamic myocardial CT perfusion on third-generation dual-source CT:validation by coronary angiography[J].Int J Cardiol,2018,269:343-349.

[15]薛鹏.肺部4D CT图像配准及其在呼吸运动估计和通气量估计中的应用研究[D].山东大学,2021.

[16]杜永浩,梁挺,张硕,等.3D非刚性图像配准在DCE-MRI诊断肺结节/肿块良恶性中的应用价值[J].现代肿瘤医学,2020,28(14):2478-2481.

[17]陶永鹏,项聪.医学图像非刚性配准的技术难点及应用[J].中外交流,2018(3):47.

[18]姬东岑.医学图像配准算法的研究[D].哈尔滨工业大学,2020.