

论 著

人工智能触发技术与传统团注追踪触发技术在冠状动脉血管成像中的对比研究*

刘 杰 原 典 张怡存
高剑波*
郑州大学第一附属医院放射科
(河南 郑州 450000)

【摘要】目的 评估人工智能(AI)触发技术在冠状动脉CT血管成像(CCTA)中对血管峰值增强时间预测的准确性,并将其与传统的团注追踪技术进行比较。方法 在这项前瞻性研究中,将204名连续患者连续分为两组进行CCTA扫描:以固定的5秒触发后延迟(PTD)为特点的传统团注追踪技术组(A组);以患者特异性PTD为特点的AI触发技术组(B组)。所有扫描参数(管电压100kV结合CARE Dose 4D的智能管电流调节技术)和对比剂注射方案(320mgI/mL; 0.7mL/kg)在各组之间保持一致。一位医师评估了客观图像质量,而两位医师使用Likert 5级评分法评估主观图像质量。通过双样本t检验比较各组之间的客观图像质量,同时用卡方检验比较主观评分。结果 两组均有102名患者(A组平均年龄 50 ± 10 岁;B组平均年龄 51 ± 9 岁),具有可比较的基线特征。两位医师都对B组的主观图像质量进行了评分($P < 0.001$)。B组所有冠状动脉血管平均血管增强显著增高($P < 0.05$)。结论 与传统团注追踪技术相比,AI触发技术可以实现可靠的扫描时间,优化血管强化峰值,获得更好的CCTA图像质量。

【关键词】人工智能;冠状血管;体层摄影术;
X线计算机

【中图分类号】R445.3

【文献标识码】A

【基金项目】河南省卫生健康委员会科技攻关项目
212102310142)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2024.07.026

A Comparative Study of Artificial Intelligence Triggering Technique and Traditional Bolus Tracking Triggering Technique in Coronary CT Angiography*

LIU Jie, YUAN Dian, ZHANG Yi-cun, GAO Jian-bo*.

Department of Radiology, The First Affiliated Hospital of Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, Zhengzhou Province, China

ABSTRACT

Objective To validate the peak vessel enhancement timing of artificial intelligence (AI) trigger technique in Coronary CT angiography (CCTA) and compare its subjective and objective image quality against the traditional bolus tracking technique. **Methods** In this prospective study, 204 patients were serially divided into two groups to perform CCTA scans: traditional bolus tracking technique featuring a fixed post-trigger delay (PTD) (Group A) or AI trigger technique featuring a patient-specific PTD (Group B). All CT (tube voltage 100kV combined with intelligent tube current adjustment technology of CARE Dose 4D) and contrast media protocol parameters (320 mgI/mL; 0.7mL/kg) were kept identical between groups. One reader evaluated objective image quality, while two readers rated subjective image quality in 5-point Likert scale. Objective image quality was compared between groups via two-sample t-test, while the subjective ratings were compared with chi-square analysis. **Results** There were 102 patients in both groups (mean age 50 ± 10 years in group A; mean age 51 ± 9 years in group B). The baseline characteristics were equivalent between groups (all $P > 0.05$). Both readers rated better subjective image quality for the patient-specific PTD group ($P < 0.001$). The mean vessel enhancement was significantly higher in group B in all coronary vessels (all $P < 0.05$). **Conclusion** Compared with fixed PTD, patient-specific PTD could achieve reliable scan timing, optimize vessel opacification and obtain better image quality in CCTA.

Keywords: Artificial Intelligence; Coronary Vessels; Tomography, X-ray Computed

冠状动脉粥样硬化是一种常见的心血管疾病,近年来其发病率和死亡率仍然很高。冠状动脉CT血管成像(CCTA)提供了一种无创性诊断冠状动脉疾病的检查方法^[1-4]。对于增强CT而言,为实现均匀的血管增强效果,扫描时机的准确与否起着决定性的作用,所以对对比剂注射和图像采集的同步具有重要的临床意义。

目前,临床常用的冠脉CTA的检查方法是团注追踪技术,它可以优化CCTA检查的采集时间。该方法是在预定义的血管层面连续监测跟踪CT值衰减情况,直到血管增强超过触发阈值,然后在固定的触发后延迟(PTD)之后开始图像采集。与小剂量测试技术相比,推注跟踪的主要优点包括对比剂少,辐射剂量暴露少,时间效率高^[5-6]。尽管传统的推注跟踪方法被广泛采用,但由于固定的PTD可能忽略一些个性化特征(体重,心功能等)和扫描参数(管电压,扫描持续时间等)。例如,不同心血管疾病的患者可以呈现不同的时间密度曲线,因此应调整其最佳扫描时间^[7]。在血管增强峰值之前或之后获取CCTA图像可能分别导致较差的诊断图像质量和射束硬化伪影^[8]。因此,患者特异性PTD可以解决这些现有的局限性,并为更个性化的成像带来潜力。

以前的临床研究^[9-11]试图根据不同的适应症来个体化PTD,或在监测期间手动触发扫描;然而,这些方法在很大程度上依赖于操作者的经验且引入一定的主观性。除此之外,一些研究^[5,12]进一步考虑患者的心脏功能并手动调整扫描时间,但繁琐的计算推导过程限制了其更广泛的应用。

在不断优化采集时间的过程中,我们采用了一种新的以卷积为基础算法的解决方案,该算法可以从注射的对比剂信息和对预定义层面的连续监测值中推导出患者特异性PTD;此外,该算法已被应用于临床扫描方案中以确保无缝衔接于常规CT扫描流程。之前的文章着重于研究了该算法在主动脉和腹部增强成像中的表现^[9,13-15]。我们的研究使用相同的技术算法并将其应用于冠状动脉成像中。

因此,本研究的目的是通过与传统团注追踪技术比较图像质量来验证AI触发技术对CCTA图像优化的有效性。

1 资料与方法

1.1 临床资料 2022年5月至7月期间,219名疑似患有冠状动脉疾病的我院患者被前瞻性连续纳入研究。排除具有以下特征的患者:年龄 < 18 岁;碘对比剂过敏者;肾功能不全者(血清肌酐 $\geq 120 \mu\text{mol/L}$);有呼吸系统疾病不能配合呼吸训练者;既往行冠状动脉旁路移植术者;有不稳定和/或显著心力衰竭者。在我们研究中最终纳入的204名患者随机分配到A、B两组中,102名患者被分配到实验组(B组,AI触发技术),102名患者被分配到对照组(A组,团注追踪技术)。扫描前记录患者的性别,年龄,体重,体重指

【第一作者】刘 杰,男,副主任医师,主要研究方向:心血管。E-mail: liujieict@163.com

【通讯作者】高剑波,男,主任医师,主要研究方向:腹部胃癌。E-mail: Gaojianbo654321@163.com

数(BMI)和心率。本研究方案经我院伦理委员会批准(伦理编号: 2021-KY-0976), 所有患者均检查前均签署了知情同意书。

1.2 CT检查 检查前均使用18mL的0.9%盐水以5mL/s的流速测试确保对比剂注入通畅。在两组中, 预热后的对比剂(碘克沙醇, 含碘320mgI/mL, 扬子江药业集团有限公司)通过高压注射器(CT造影注射器, 欧利奇医疗用品有限公司)在肘前静脉处完成注射。根据患者体重确定对比剂剂量和注射速率: 总量(mL)=体重(kg)×0.7(mL/kg)^[16]; 注射速率(mL/s)=总量(mL)/10s, 之后以相同的流速跟注50mL盐水。

所有CCTA检查均使用第三代双源CT(SOMATOM Force, Siemens Healthineers)进行。患者采取仰卧位, 扫描范围为气管分叉下(1-2cm)至心脏膈面下水平。检查前对每位患者进行屏气训练, 并在舌下含服0.5mg硝酸甘油。所有患者均采用前瞻性心电图采集, 扫描参数: 管电压为100kV; 管电流均采用基于自动衰减的管电流调制进行(CARE Dose4D, Siemens), 监测层面为主动脉弓, 触发阈值100HU; 准直器宽度2×192×0.6 mm; 旋转时间为250 ms。此外, CCTA图像后处理均通过迭代重建技术进行^[17](advanced modeled iterative reconstruction, ADMIRE): 强度水平3, 层厚0.75mm, 层间距0.5mm, 卷积核Bv40; 像素矩阵大小512×512。后将图像数据传送至Syngo.via(Siemens Healthcare, Forchheim, Germany)后处理工作站进行图像后处理得到多平面重组(multi-planar reformation, MPR)、曲面重组(curved planar reformation, CPR)、容积再现(volume rendering, VR)和最大密度投影(maximum intensity projection, MIP)图像。

1.3 团注追踪技术和AI触发技术 在气管分叉下(1-2cm)层面的升主动脉处监测冠状动脉的对比剂混合情况, 并将触发阈值设置为100HU。在A组中, 采集在达到阈值后以固定的5秒延迟开始(如前所述^[13,15,18])。同时, 在B组中, 使用AI人工智能触发软件通过连续监测确定患者的最佳PTD并适时启动图像采集。图像采集随时间C(t)的预测是基于对比剂注射方案IP(单位: gl/s)和患者自身动脉脉冲响应函数AIR(单位: HU/gl)之间卷积算法。在与人群平均参数化动脉血液循环曲线进行在线拟合后, 产生患者特异性PTD, 以确保在最大C(t)下进行扫描。

$$C(t) = IP(t) \otimes AIR(t)$$

公式1: 动脉脉冲函数AIR通过最小二乘法拟合监测扫描期间获得的CT值获得;考虑到扫描持续时间, 可以使用预期的对比度增强曲线来确定理想的PTD。

1.4 图像分析

1.4.1 客观图像质量 一名11年经验丰富的心血管放射科住院医师(P.L)在工作站(syngo.via, VA30, Siemens Healthineers)上进行图像分析。根据美国心血管CT协会(society of cardiovascular computed tomography, SCCT)的推荐的标准改良18分段法^[19]对冠状动脉进行分割。在三个主要冠状动脉(left anterior descending, LAD; left circumflex artery, LCX; right coronary artery, RCA)的近端, 中间和远端部分根据血管内径尽可能大地绘制圆形感兴趣区(ROI)测量CT值及噪声(SD)值。ROI的选择尽量避开动脉支架, 钙化和运动伪影^[20]。所有数据在连续3个相邻层面中进行测量取其平均值。使用以下公式^[24]计算信噪比(SNR)和对比噪声比(CNR):

$$SNR = \frac{HU_{\text{血管}}}{SD_{\text{脂肪}}}$$

$$CNR = \frac{HU_{\text{血管}} - HU_{\text{心肌}}}{SD_{\text{脂肪}}}$$

公式2: HU_{血管}是血管腔CT值的衰减; SD_{脂肪}是在右冠状动脉中段附近测量的脂肪衰减的标准差, 避开了心肌和小血管; HU_{心肌}是在四腔心脏水平测量室间隔CT值的衰减。

1.4.2 主观图像质量 由2名具有11年和23年工作经验的放射科诊断医师的医师(P.L和Y.Z)采用双盲法对两组图像质量进行主观评

分, 在正式评估图像质量之前, 两名医师对本研究外的五名随机患者的数据进行评定以达成评分标准的共识。图像的窗宽、窗位由评分者根据图像情况主观调节。使用Likert 5级评分法对管腔对比度、边缘锐利度、伪影和诊断信心等角度进行如下评分^[21-22]: 5分, 血管管腔显示清晰, 边界清楚, 无伪影, 诊断良好; 4分, 血管管腔显示良好, 边界略模糊, 轻微伪影, 基本诊断; 3分, 血管管腔显示欠清晰, 边界模糊, 中度伪影, 可大概诊断; 2分, 血管管腔显示模糊, 血管结构不连续, 伪影明显, 诊断较弱; 1分, 血管管腔显示不清, 血管结构中断, 严重伪影, 毛刺, 无法诊断。

1.5 辐射剂量分析 扫描的容积CT剂量指数(CTDIvol)和剂量长度乘积(DLP)记录在剂量报告中。通过将DLP乘以心脏转换系数k(k=0.014mSv·mGy⁻¹·cm⁻¹)^[23]来估计有效辐射剂量(ED), 即ED=DLP×k。

1.6 统计学方法 使用SPSS(IBM, version 25.0)进行统计分析。通过Shapiro-Wilk检验测试对所有数据进行的正态分布检验。符合正态分布数据表示为平均值±标准差, 非正态分布数据表示为中位数(四分位间距), 分类变量用频数表示。根据数据的正态性结果, 两组比较使用独立样本t检验和Mann-Whitney U检验, 比较两组的分类变量使用卡方检验。通过χ²检验比较各组评分的差异。使用Cohen's kappa分析两位医师的主观评分之间的一致性, P<0.05被认为具有统计学差异。

2 结果

2.1 一般情况 所有患者均顺利一次性完成CCTA检查, 无任何药物不良反应及身体不适, 且扫描数据均可以满足诊断要求。A组和B组两组患者的基线特征和扫描长度差异均无统计学意义(见表1), 包括性别、年龄、身高、体重、体重指数(BMI)、心率、CTDIvol、DLP、ED等。

表1 两组患者临床资料的比较

组别	A组(102例)	B组(102例)	统计值	P值
年龄(岁)	50.05±9.94	51.28±8.99	0.150 ^a	0.881
性别			0.434 ^b	0.604
女	51(50.0%)	51(50.0%)		
男	51(50.0%)	51(50.0%)		
体重(kg)	70.83±13.60	69.13±12.54	-0.933 ^a	0.352
身高(cm)	167.39±8.34	167.62±8.36	0.197 ^a	0.844
BMI(kg/cm ²)	25.18±3.62	24.51±3.55	-1.341 ^a	0.181
心率(bpm)	68.40±14.17	70.50±12.41	1.152 ^a	0.251
Delay time(s)	5	6.03±1.11	9.324 ^a	0.000
对比剂流速(mL/s)	4.96±0.95	4.84±0.88	-0.933 ^a	0.352
对比剂总量(mL)	49.58±9.52	48.39±8.78	-0.933 ^a	0.352
CTDIvol(mGy)	24.11±6.55	25.10±5.84	1.113 ^a	0.258
DLP(mGy·cm ⁻¹)	329.48±94.97	328.75±89.76	-0.056 ^a	0.955
ED(mSv)	4.61±1.33	4.60±1.26	-0.056 ^a	0.955

注: ^a: t值; ^b: χ²值; BMI: 体重指数; CTDIvol: 容积CT剂量指数; DLP: 剂量长度乘积; ED: 有效辐射剂量。正态分布数据以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 分类变量用频数表示。

2.2 客观图像质量 无论测量的分支和位置如何, B组冠状动脉的CT值显著高于A组(见表2)。而且, 当使用患者特异性PTD获得CCTA图像时, SNR和CNR在所有冠状动脉中具有统计学优势。

2.3 主观图像质量 两位医师的图像评价结果一致性良好k=0.73(95%CI:0.65-0.82), 且两位医师都对B组具有更高的图像质量评分(见表3, P均<0.001)。在同一窗宽及窗位条件下, 相比A组, B组图像的血管强化程度更高, 分支显示更丰富, 对比度高, 如图所示。

表2 冠状动脉CT血管成像图像的客观评价比较

组别		A组	B组	t值/Z值	P值
血管CT值 (HU) (平均值±标准差)	pLAD	436.70±128.17	517.58±164.59	3.932	0.000
	mLAD	358.59±111.33	407.18±148.70	2.654	0.009
	dLAD	277.59±89.01	321.41±123.86	2.915	0.004
	pLCX	418.42±124.23	504.14±170.02	4.130	0.000
	mLCX	367.24±113.61	433.44±144.21	3.656	0.000
	dLCX	281.60±93.90	343.96±138.17	3.790	0.000
	pRCA	430.20±125.20	484.92±158.83	2.744	0.007
	mRCA	396.28±136.28	453.51±162.57	2.735	0.007
	dRCA	403.61±135.52	448.20±166.98	2.102	0.037
中位数					
(四分位间距)	pLAD	22.53(7.78)	36.51(8.59)	-6.685	0.000
	mLAD	13.30(6.92)	17.83(8.01)	-4.886	0.000
	dLAD	9.65(5.53)	12.38(6.24)	-4.886	0.000
	pLCX	16.60(7.55)	22.35(8.15)	-6.324	0.000
	mLCX	14.65(7.19)	19.67(7.56)	-5.023	0.000
	dLCX	11.24(5.73)	14.59(6.89)	-4.961	0.000
	pRCA	17.29(8.40)	22.44(9.02)	-5.433	0.000
	mRCA	16.07(8.33)	20.84(9.21)	-5.033	0.000
	dRCA	15.38(8.41)	19.08(9.32)	-4.669	0.000
中位数					
(四分位间距)	pLAD	12.28(6.94)	16.85(6.63)	-6.685	0.000
	mLAD	9.23(6.03)	12.47(7.03)	-4.029	0.000
	dLAD	5.21(4.84)	6.65(5.26)	-3.055	0.002
	pLCX	12.00(6.38)	16.09(7.29)	-6.021	0.000
	mLCX	10.54(5.58)	13.46(5.89)	-4.426	0.000
	dLCX	12.75(4.91)	19.90(5.48)	-3.736	0.000
	pRCA	13.13(6.93)	16.50(6.93)	-4.851	0.000
	mRCA	11.68(6.94)	14.72(7.35)	-4.249	0.000
	dRCA	1.49(7.21)	13.33(7.45)	-3.782	0.000

注：正态分布数据以 $\bar{x} \pm s$ 表示，非正态分布数据以M(IQR)表示；PA：肺动脉；
Ao：主动脉根部；pLAD：左前降支近段；mLAD：左前降支中段；dLAD：左前降支远段；pLCX：左回旋支近段；mLCX：左回旋支中段；dLCX：左回旋支远段；
pRCA：右冠状动脉近段；mRCA：右冠状动脉中段；dRCA：右冠状动脉远段。

表3 冠状动脉CT血管成像图像主观评分结果

	组别	A组	B组	χ^2 值	P值
医师1	5分	44	79	25.102	0.000
	4分	55	22		
	3分	3	1		
医师2	5分	53	82	18.817	0.000
	4分	44	19		
	3分	5	1		

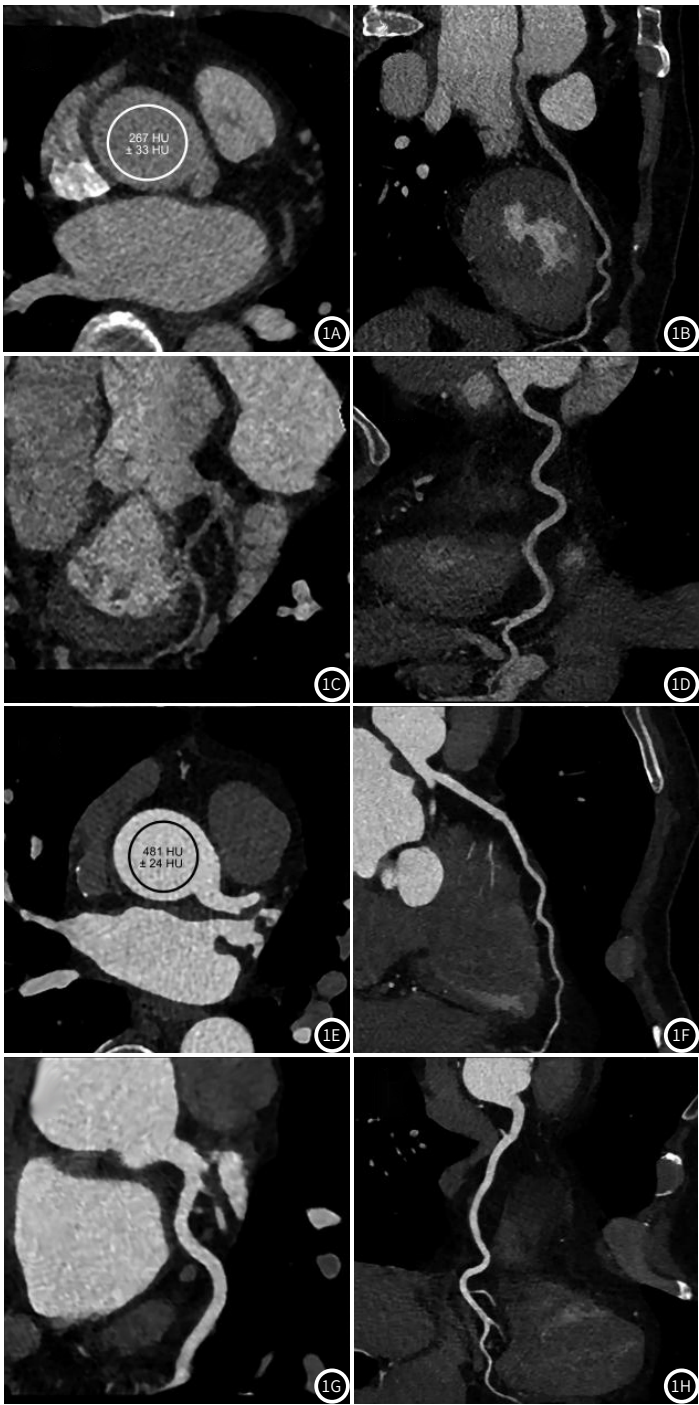


图1A-图1D: A组, 女, 57岁, 体重指数(BMI) 22.8kg/m², 延迟时间固定为5秒, 心率86次/分(bpm)。图1A-1D是该患者的迭代重建轴面、曲面重组(CPR)图像。图1B-1D依次为前降支(LAD)、回旋支(LCX)和右冠支(RCA); LAD、LCX和RCA的衰减为254 HU、179 HU和283 HU; 医师判断冠状动脉的增强达不到诊断要求。
图1E-图1H: B组, 女, 52岁, 体重指数(BMI) 23.6kg/m², AI预测延迟时间为7s, 心率89次/分(bpm)。图1E-1H是该患者的迭代重建轴面、曲面重组(CPR)图像。图1B-1D依次为LAD、LCX和RCA; LAD、LCX和RCA的衰减为434 HU、439 HU和419 HU。

3 讨 论

在本研究中, 我们假设患者特异性延迟会产生更高的血管强化, 因此在接受冠状动脉CT血管成像的患者中评估了一种新的AI技术, 它可以根据对受试者的实时扫描监测预测出最佳触发延迟时间。我们将使用AI技术与使用固定延迟技术获得的图像进行比较, 发现前者可以实现更高的血管CT值和更好的图像质量。
我们的研究为血管对比度强化预测算法的迭代开发和验证增加了更多证据。Korporaal等人在以前的文章中报道了该算法的强大

性能^[15,18]。随着该算法的软件进一步实践到扫描协议中, 这种方法的应用可以与未来临床工作无缝衔接, 并带来更广泛的好处。
之前的研究集中讨论AI技术在其他身体部位进一步提高图像质量的表现, 比如比较患者特异性PTD和固定PTD在主动脉和腹部CT血管成像的图像质量^[9,13,14]; 除此之外另一项研究评估了一项基于团注跟踪的算法, 该算法可以预测患者特定的动脉峰值增强时间, 并将该算法的性能与当前团注跟踪技术的最佳情况进行

比较^[15]。以上这些研究证明, AI技术计算的患者特异性PTD可以优化CT增强成像的图像质量。而我们的研究正是使用相同的技术将其应用扩展到冠状动脉并继续其优势。

其他的研究也在不断探索如何提高CCTA的图像质量。例如, 先前的研究已经尝试了使用稀释的对比剂^[24-25], 使用适应体重的CCTA扫描^[16,26-27]和使用迭代重建方法^[28]。多项研究表示^[5,16,29-34]血管强化的条件源于以下因素: 扫描方案, 患者自身状况和对比度注射方案。在众多影响因素中, 心输出量(CO)等心功能参数是影响动脉强化的基本生理参数。CO与动脉强化程度呈负相关, 特别是在首过动力学中; 高CO患者的动脉强化程度低于低CO患者, 尽管后者的峰值增强时间较迟。因此, 需要考虑首过动力学中血管成像的个体差异以优化血管的对比剂强化。AI技术通过整合所有监测跟踪信息, 可以最大化利用患者心功能的可用信息, 并用于实时预测患者个性化扫描时间。对于临床工作而言, 该技术的最大优点是不必为特定的注射方案预定义PTD, 从而降低了在扫描定时中手动引入系统或随机错误的风险。

我们的研究有几个局限性: 患者均来自研究人员有限的单一中心机构; 只有一位医师评估客观图像质量。未来需要努力减少潜在的选择偏倚。为了尽量减少影响血管强化的可能混杂因素, 我们的研究限制了对比剂浓度和管电压设置, 没有根据不同的体型进行调整。因此, 未来的努力促使我们扩大该技术在冠状动脉成像中的通用性。

总之, AI技术的应用可以实现可靠的扫描定时, 提高血管强化并改善冠状动脉CT血管成像的图像质量, 而无需增加对比剂剂量或修改对比剂注射方案, 未来对血管双低成像奠定了强有力的理论基础, 临床推广应用潜力很大。

参考文献

- [1]Murgia A, Balestrieri A, Crivelli P, et al. Cardiac computed tomography radiomics: an emerging tool for the non-invasive assessment of coronary atherosclerosis [J]. *Cardiovasc Diagn Ther*, 2020, 10(6s): 2005-2017.
- [2]El nabawi Y A, Dey A K, Mehta N N. Emerging applications of coronary CT angiography in coronary heart disease: getting better with time [J]. *Eur Heart J*, 2018, 39(41s): 3682-3684.
- [3]赵丹, 杨茂生. 冠脉CTA在冠心病患者临床诊断中的应用价值分析 [J]. *影像研究与医学应用*, 2021, 5(16): 2.
- [4]中华医学会放射学分会心胸学组. 《中华放射学杂志》心脏冠状动脉多排CT临床应用指南写作专家组. 心脏冠状动脉CT血管成像技术规范应用中国指南 [J]. *中华放射学杂志*, 2017, 51(10): 732-743.
- [5]Scholtz J E, Ghoshhajra B. Advances in cardiac CT contrast injection and acquisition protocols [J]. *Cardiovasc Diagn Ther*, 2017, 7(5s): 439-451.
- [6]刘飞, 李仁民. 阈值触发法与小剂量测试法在CTA冠状动脉峰值采集中的对比分析 [J]. *医疗卫生装备*, 2021, 42(3): 4.
- [7]田敏, 王贵良. 观察静脉注射碘对比剂对冠脉CTA检查患者心率的影响 [J]. *国际心血管病杂志*, 2017, 44(A01): 1.
- [8]Kidoh M, Nakaura T, Funama Y, et al. Paradoxical effect of cardiac output on arterial enhancement at computed tomography: does cardiac output reduction simply result in an increase in aortic peak enhancement [J]. *J Comput Assist Tomogr*, 2017, 41(3s): 349-353.
- [9]Gutjahr R, Fletcher J G, Lee Y S, et al. Individualized delay for abdominal computed tomography angiography bolus-tracking based on sequential monitoring: increased aortic contrast permits decreased injection rate and lower iodine dose [J]. *J Comput Assist Tomogr*, 2019, 43(4s): 612-618.
- [10]Shirasaka T, Hiwatashi A, Yamashita K, et al. Optimal scan timing for artery-vein separation at whole-brain CT angiography using a 320-row MDCT volume scanner [J]. *Br. J. Radiol.*, 2017, 90(1070s): 20160634.
- [11]Shirasaka T, Nagao M, Yamasaki Y, et al. Feasible scan timing for 320-row coronary CT angiography generated by the time to peak in the ascending aorta [J]. *Clin. Imaging*, 2019, 54: 153-158.
- [12]Miller R J H, Eisenberg E, Friedman J, et al. Impact of heart rate on coronary computed tomographic angiography interpretability with a third-generation dual-source scanner [J]. *Int. J. Cardiol.*, 2019, 295: 42-47.
- [13]Hinzpeter R, Eberhard M, Gutjahr R, et al. CT angiography of the aorta: contrast timing by using a fixed versus a patient-specific trigger delay [J]. *Radiology*, 2019, 291(2s): 531-538.
- [14]Yu J, Lin S, Lu H, et al. Optimize scan timing in abdominal multiphase CT: bolus tracking with an individualized post-trigger delay [J]. *Eur. J. Radiol.*, 2021, 148: 110139.

- [15]Korporaal J G, Bischoff B, Arnoldi E, et al. Evaluation of a new bolus tracking-based algorithm for predicting a patient-specific time of arterial peak enhancement in computed tomography angiography [J]. *Invest Radiol*, 2015, 50(8s): 531-538.
- [16]van den Boogert T P W, Lopes R R, Lobe N H J, et al. Patient-tailored contrast delivery protocols for computed tomography coronary angiography: lower contrast dose and better image quality [J]. *J. Thorac. Imaging*, 2021, 36(6s): 353-359.
- [17]Gordic S, Desbiolles L, Stolzmann P, et al. Advanced modelled iterative reconstruction for abdominal CT: Qualitative and quantitative evaluation [J]. *Clin. Radiol.*, 2014, 69(12s): e497-e504.
- [18]Korporaal J G, Mahnken A H, Ferda J, et al. Quantitative evaluation of the performance of a new test bolus based computed tomographic angiography contrast enhancement prediction algorithm [J]. *Invest Radiol*, 2015, 50(1s): 1-8.
- [19]Leipsic J, Abbata S, Achenbach S, et al. SCCT guidelines for the interpretation and reporting of coronary CT angiography: a report of the Society of Cardiovascular Computed Tomography Guidelines Committee [J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2014, 8(5s): 342-358.
- [20]Nebelung H, Brauer T, Seppelt D, et al. Coronary computed tomography angiography (CCTA): effect of bolus-tracking ROI positioning on image quality [J]. *Eur. Radiol.*, 2021, 31(2s): 1110-1118.
- [21]Benz D C, Grani C, Mikulicic F, et al. Adaptive statistical iterative reconstruction-V: impact on image quality in ultralow-dose coronary computed tomography angiography [J]. *J Comput Assist Tomogr*, 2016, 40(6s): 958-963.
- [22]Apfalter G, Szolar D H, Wurzinger E, et al. Impact on image quality and radiation dose of third-generation dual-source computed tomography of the coronary arteries [J]. *Am J Cardiol*, 2017, 119(8s): 1156-1161.
- [23]Albrecht M H, Nance J W, Schoepf U J, et al. Diagnostic accuracy of low and high tube voltage coronary CT angiography using an X-ray tube potential-tailored contrast medium injection protocol [J]. *Eur. Radiol.*, 2018, 28(5s): 2134-2142.
- [24]Kawaguchi N, Kurata A, Kido T, et al. Optimization of coronary attenuation in coronary computed tomography angiography using diluted contrast material [J]. *Circ J*, 2014, 78(3s): 662-70.
- [25]王怡宁, 金征宇. 碘对比剂在冠状动脉CT血管成像中的应用及常见问题解析 [J]. *中华放射学杂志*, 2019, 53(12): 6.
- [26]Mihl C, Kok M, Altintas S, et al. Evaluation of individually body weight adapted contrast media injection in coronary CT-angiography [J]. *Eur. J. Radiol.*, 2016, 85(4s): 830-6.
- [27]Xing Y, Azati G, Pan C X, et al. Improving patient to patient ct value uniformity with an individualized contrast medium protocol tailored to body weight and contrast medium concentration in coronary ct angiography [J]. *PLoS One*, 2015, 10(7s): e0132412.
- [28]Halpern E J, Gingold E L, White H, et al. Evaluation of coronary artery image quality with knowledge-based iterative model reconstruction [J]. *Acad. Radiol.*, 2014, 21(6s): 805-811.
- [29]Albrecht M H, Nance J W, Schoepf U J, et al. Diagnostic accuracy of low and high tube voltage coronary CT angiography using an X-ray tube potential-tailored contrast medium injection protocol [J]. *Eur. Radiol*, 2018, 28(5s): 2134-2142.
- [30]潘存雪, 索伦格, 党军, 等. 不同扫描触发阈值设定对双能量冠状动脉CT血管成像效果的影响 [J]. *中华放射学杂志*, 2018, 52(2): 7.
- [31]于易通, 尹卫华, 马伟, 等. 冠状动脉CTA个体化对比剂注射方案实现图像质量均一化的可行性研究 [J]. *放射学实践*, 2019, 34(4): 5.
- [32]马伟, 尹卫华, 于易通, 等. 基于碘速率注射方案实现冠状动脉CT血管成像质量均一化的可行性研究 [J]. *中华放射学杂志*, 2020, 53(6): 492-496.
- [33]罗娜, 贺露瑶, 田祥洁, 等. 西门子Force双源CT在冠脉CTA成像中的影响因素及解决方案 [J]. *中国CT和MRI杂志*, 2024, 22(03): 68-70.
- [34]王勇, 武汉忠, 常燕翔, 等. 冠心病患者主要不良心脏事件的相关因素及CTA相关参数的诊断价值研究 [J]. *中国CT和MRI杂志*, 2023, 21(08): 82-84.

(收稿日期: 2023-11-08)

(校对编辑: 韩敏求)