临床心血管病杂志
Journal of Clinical Cardiology (China)
2015,31
(9):960－964

SSF 在改善冠状动脉 CT 图像质量中的应用

何川东[1] 刘启榆[1] 陈娇[1] 周莹[1] 林华[1] 管彬[1] 廖丽萍[1]

［摘要］ 目的:探讨冠脉运动追踪冻结平台(SSF)在改善 64 层螺旋 CT 冠状动脉图像质量中的应用价值。方法:回顾性分析行冠状动脉 CT 成像(CCTA)检查的 121 例患者的标准重建图像及基于 SSF 的运动校正图像,平均心率(HR)≤60 次/min 39 例,HR 60～70 次/min 42 例,HR＞70 次/min 40 例。分析平均 HR、HR 变异及 HR 波动对冠状动脉图像质量的影响;分析同一平均 HR 时,运动校正前后冠状动脉图像质量的差异。结果:平均 HR 是影响冠状动脉图像质量的主要因素。HR≤60 次/min 时,SSF 在改善右冠状动脉的图像质量中有价值;HR 60～70 次/min 时,SSF 在改善右冠状动脉及左冠状动脉小血管的图像质量中有价值;HR＞70 次/min 时,SSF 能显著改善左右冠状动脉的图像质量。结论:SSF 在改善冠状动脉的图像质量中有良好应用价值,特别是对高 HR 患者。

［关键词］ 冠脉运动追踪冻结平台;冠状动脉 CT 成像;图像质量;运动校正
doi:10.13201/j.issn.1001-1439.2015.09.012
［中图分类号］ R541.4 ［文献标志码］ A

The applicaton of SSF in improving image qulity of coronary CT angiography

HE Chuandong LIU Qiyu CHEN Jiao ZHOU Ying
LIN Hua GUAN Bin LIAO Liping
(Department of Radiology, Mianyang Central Hospital, Mianyang, 621000, China)
Corresponding author: LIU Qiyu, E-mail: lqy2225085@163.com

Abstract **Objective**: To assess SSF for its effect on image quality of coronary artery in 64 multislice spiral CT. **Method**: Retrospectively analysed the image qulity of standard reconstruction and motion-corrected reconstruction that based on SSF platform of one hundred and twenty-one patients who underwent coronary CT angiography. Thirty-nine patients with mean heart rate(HR) ≤60 bpm, forty-two patients with HR between 60～70 bpm and forty patients with HR ＞70 bpm. Assessed the impact of mean HR, HR variability and HR fluctuation on image qualtiy of CCTA. Compared the image quality before and after motion correction with the same mean HR. **Result**: The image quality of coronary artery was highly dependent on the mean heart rate. SSF could improve image quality of right coronary artery(RCA) when mean HR≤60 bpm. While mean HR was between 60～70 bpm, SSF had value in improving image quality of RCA and small vessels of left coronary artery. SSF could significantly improve image quality of left and right coronary artery when mean HR＞70 bpm. **Conclusion**: SSF has well application value in improving image qualtiy of coronary artery, especially for high HR patients.

Key words snapshot freeze; coronary CT angiography; image quality; motion-corrected

冠状动脉 CT 成像(coronary CT angiography, CCTA)在冠心病的诊断中应用越来越广泛,但冠状动脉图像伪影仍不可避免,特别是运动伪影。当冠状动脉运动的速度超过了 CT 扫描的时间分辨率的时候,就可能产生运动伪影[1]。GE 植入冠脉运动追踪冻结平台(snapshot freeze, SSF)的 64 层螺旋 CT 可在原始数据空间重建出冠状动脉的四维模型,使用相邻心动周期的图像信息补偿冠状动脉运动造成的伪影,从而改善冠状动脉图像质量[2]。本研究的目的即是探讨 SSF 在改善 64 层螺旋 CT 冠状动脉图像质量中的价值。

1 对象与方法

1.1 对象

回顾性分析 2014-05-10 于我院行 CCTA 检查的 224 例患者的冠状动脉图像,其中 103 例因存在呼吸伪影被筛除,121 例患者纳入最后研究。男 69 例,女 52 例;年龄 38～84 岁,平均 59.7 岁;BMI 18.36～33.30(均值 24.00)kg/m^2。

1.2 检查前准备

扫描前患者禁食禁水 4～8 h,基础心率(HR)较高者给予口服美托洛尔 25～50 mg,将 HR 尽量控制在 80 次/min 以内。为了更好地显示冠状动脉,扫描前 5 min 常规使用硝酸甘油 0.5 mg 舌下含服以扩张冠状动脉。扫描前对患者进行屏气训练。

1.3 检查方法及图像处理

采用美国 GE 公司(宝石)能谱 CT 机(Discovery CT 750HD)。受检者取双手抱头仰卧位,连接心电图导联及双筒高压注射器。利用峰值时间测定法进行扫描,经肘前静脉注射非离子型对比剂(370 mgI/ml)20 ml,流速 5 ml/s;后注射 15 ml 的 0.9%氯化钠,选取主动脉根部水平层面,由软件自动得出时间-密度曲线,计算该曲线的峰值时间,在峰值时间后再加 5～7 s 作为扫描的延迟时间。增

[1]绵阳市中心医院放射科(四川绵阳,621000)
通信作者:刘启榆,E-mail:lqy2225085@163.com

强扫描时，受检者浅吸气后屏气，以 5 ml/s 的流速注入对比剂 60～80 ml，再注入 30～40 ml 0.9%氯化钠，采用后门控螺旋扫描，扫描范围从气管隆突下 1～2 cm 至心脏膈面，扫描层厚 0.625 mm，电压 120 kV，管电流 150～750 mAs（根据患者的 BMI、HR 变化自动生成），球管转速 0.35 s/r，扫描时间（7±3）s，Pitch 值（0.20±0.02）。采用回顾性心电门控重建选择时相，获得 75%或 45%时相的单扇区标准重建（Standard reconstruction）图像，以及基于 SSF 的冠状动脉四维运动的原始图像，将原始数据传至 GE4.6 工作站，经软件自动计算获得经运动校正（motion correction，MC）后的一组新数据。利用冠状动脉分析软件，在工作站上对标准重建图像及运动校正后的重建图像进行容积再现、最大密度投影、曲面重组及多平面重组，显示心脏表面和冠状动脉各分支并进行血管分析和评估，评估时参考横断面图像。

1.4 图像评价与分析

采用美国心脏协会（American Heart Association，AHA）冠状动脉改良分段方法[3]，共分 13 段：右冠状动脉（RCA）近、中、远段（S1～S3），后降支及后侧支（S4），左主干（S5），左前降支（LAD）近、中、远段（S6～S8），第一对角支（S9），第二对角支（S10），左旋支（LCX）近、远段（S11～S12），边缘支（S13）。

由 2 名经验丰富的影像科医师独立作出，评分不一致时，请第 3 名影像科主任医师观察原始图像及重组图像，最后得出一致结论。对每个患者冠状动脉的标准重建图像（运动校正前，）及 SSF 计算后（运动校正后）的图像进行评价。评分标准采用 4 分评价法[4]：4 分为优秀（血管周围无伪影，边缘光滑、显示清晰）；3 分为良好（血管周围有少量伪影，边缘稍模糊）；2 分为一般（中等程度的伪影，血管边缘明显模糊，图像质量仍可接受，尚能满足诊断）；1 分为差（血管边缘严重模糊、失真，影响对管腔的准确评价，不具诊断价值）。评分介于 2 个标准之间时，以较低评分作为该段冠状动脉的最后评分。RCA 的评分取 S1、S2、S3 评分的最低分，LAD 取 S5、S6、S7、S8 评分的最低分，LCX 的评分取 S11、S12 评分的最低分[4]。

1.5 统计学处理

分析扫描时平均 HR、HR 变异及 HR 波动与各段冠状动脉图像质量的相关性，HR 变异＝（最高 HR－最低 HR）/［0.5×（最高 HR＋最低 HR）］×100%[5]；HR 波动＝最高 HR－最低 HR。按平均 HR 将患者分为 3 组：1 组（低 HR 组），HR≤60 次/min；2 组（中等 HR 组），HR 60～70 次/min；3 组（高 HR 组），HR＞70 次/min。统计不同平均 HR 条件下，运动校正前、后图像质量的评分，以 $\bar{x}\pm s$ 表示；分析同一平均 HR 条件下，运动校正前后冠状动脉图像质量的差异（非参数检验－2 个相关样本的 Wlicoxon 检验）。应用 SPSS 17.0 完成统计分析，以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

扫描时的平均 HR 46～91 次/min（均值 65.5 次/min）；HR 变异 0%～85%（均值 7.43%）；HR 波动 0～68 次/min（均值 5.1 次/min）。共评价 363 支血管，1 544 个冠状动脉节段。双变量相关分析（Spearman 相关系数）显示，影响冠状动脉图像质量的主要因素为扫描时的平均 HR，平均 HR 与冠状动脉运动校正前、后的图像质量呈负相关；HR 波动与 RCA 运动校正前的图像质量呈负相关，与 RCA 运动校正后及左冠状动脉的图像质量相关性无统计学意义；HR 变异与左右冠状动脉的图像质量相关性无统计学意义。

经运动校正后（MC）的冠状动脉图像质量较运动校正前（SD）高（图 1～3，表 1）。3 组平均 HR 条件下各段冠状动脉的图像质量评分见表 1。表 1 显示随平均 HR 的增加，各段冠状动脉图像质量呈下降趋势；RCA 图像质量总体低于左冠状动脉；经 MC 后各段及各分支冠状动脉的图像评分均高于或等于 SD。表 2 显示低 HR 水平（HR≤60）时 S1、S2 段经 MC 后的图像明显优于 SD，差异有统计学意义；中等 HR（60＜HR≤70）水平时，S1、S2、S3 及 S8、S12、S13 段经 MC 后的图像明显优于 SD，差异有统计学意义；高 HR 水平（HR＞70）时，各段冠状动脉经 MC 后的图像质量均高于 SD，差异有统计学意义。图 1 显示中、高 HR 水平时冠状动脉 3 个主要分支（RCA、LAD、LCX）MC 后的图像质量高于 SD，差异有统计学意义；低 HR 水平时，LAD、LCX 运动校正前后的图像质量差异无统计学意义，RCA 运动校正前后的图像质量差异有统计学意义。

3 讨论

扫描参数、对比剂注射方案、患者呼吸配合情况、扫描时平均 HR、HR 变异及 HR 波动等都可能影响 CCTA 的图像质量。静态伪影可通过调整合适的扫描参数、选择恰当的扫描延迟时间、优化对比剂注射方案等来解决。而运动伪影主要与患者 HR 情况相关，对 CCTA 的大量研究显示，平均 HR、HR 波动、HR 变异与冠状动脉的图像质量有负相关关系[6-8]，本研究结果显示 HR 波动与左冠状动脉、HR 变异与左右冠状动脉图像质量相关性无统计学意义，可能与入组患者平均 HR 偏低，且

表 1 3 组平均 HR 条件下各段冠状动脉图像质量评分

Table 1 Mean image quality scores of respective coronary segments for each HR subgroup $\bar{x}\pm s$

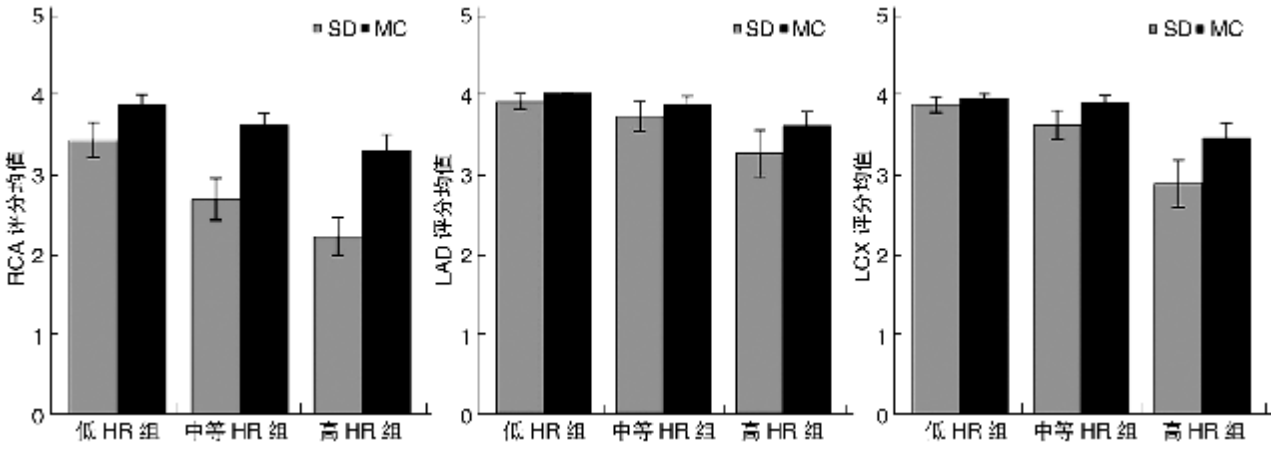
冠状动脉分段	HR≤60 次/min			60 次/min<HR≤70 次/min			HR>70 次/min		
	例数	SD	MC	例数	SD	MC	例数	SD	MC
S1	39	3.9±0.4	4.0±0.2	42	3.6±0.8	4.0±0.2	40	3.0±0.8	3.7±0.5
S2	39	3.5±0.6	3.9±0.4	42	2.8±0.8	3.6±0.5	40	2.4±0.8	3.3±0.7
S3	39	3.9±0.4	4.0±0.2	42	3.6±0.8	4.0±0.2	40	3.3±0.9	3.9±0.3
S4	39	4.0±0.2	4.0±0.2	42	3.9±0.5	4.0±0.2	40	3.4±0.8	3.9±0.3
S5	39	4.0±0.2	4.0±0.0	42	3.9±0.3	4.0±0.0	40	3.7±0.7	3.9±0.3
S6	39	4.0±0.0	4.0±0.0	42	3.9±0.3	4.0±0.2	40	3.6±0.8	3.8±0.4
S7	39	4.0±0.0	4.0±0.0	42	3.8±0.5	4.0±0.2	40	3.6±0.7	3.9±0.3
S8	39	4.0±0.2	4.0±0.0	42	3.7±0.6	3.9±0.3	40	3.4±0.8	3.7±0.5
S9[1)]	38	4.0±0.0	4.0±0.0	42	3.9±0.3	4.0±0.2	38	3.4±0.7	3.7±0.5
S10[2)]	37	4.0±0.2	4.0±0.0	39	3.9±0.3	4.0±0.2	30	3.5±0.7	3.8±0.4
S11	39	4.0±0.2	4.0±0.0	42	3.9±0.3	4.0±0.2	40	3.5±0.7	3.7±0.5
S12	39	3.9±0.3	4.0±0.2	42	3.7±0.6	4.0±0.2	40	3.0±1.0	3.6±0.6
S13[3)]	38	3.9±0.3	4.0±0.2	37	3.7±0.6	3.9±0.3	35	3.3±1.0	3.9±0.4
RCA	39	3.4±0.7	3.9±0.4	42	2.7±0.8	3.6±0.5	40	2.2±0.7	3.3±0.6
LAD	39	3.9±0.3	4.0±0.0	42	3.7±0.6	3.9±0.4	40	3.3±0.9	3.6±0.5
LCX	39	3.9±0.3	4.0±0.2	42	3.6±0.6	3.9±0.3	40	2.9±0.9	3.5±0.6

[1)] 121 个患者共 118 个 S9 段显示；[2)] 121 个患者共 106 个 S10 段显示；[3)] 121 个患者共 110 个 S13 段显示；SD：标准重建算法（运动校正前）；MC：基于 SSF 平台下运动校正重建算法。

表 2 各段冠状动脉运动校正前、后图像质量比较

Table 2 P value of mean image quality scores compared before and after MC for each coronary segment *P* 值

平均 HR/(次·min^{-1})	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13
HR≤60	0.03	0.00	0.18	1.00	0.16	1.00	1.00	0.16	1.00	0.32	0.32	0.08	0.31
60<HR≤70	0.01	0.00	0.00	0.10	0.08	0.08	0.06	0.03	0.05	0.32	0.08	0.00	0.04
HR>70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02

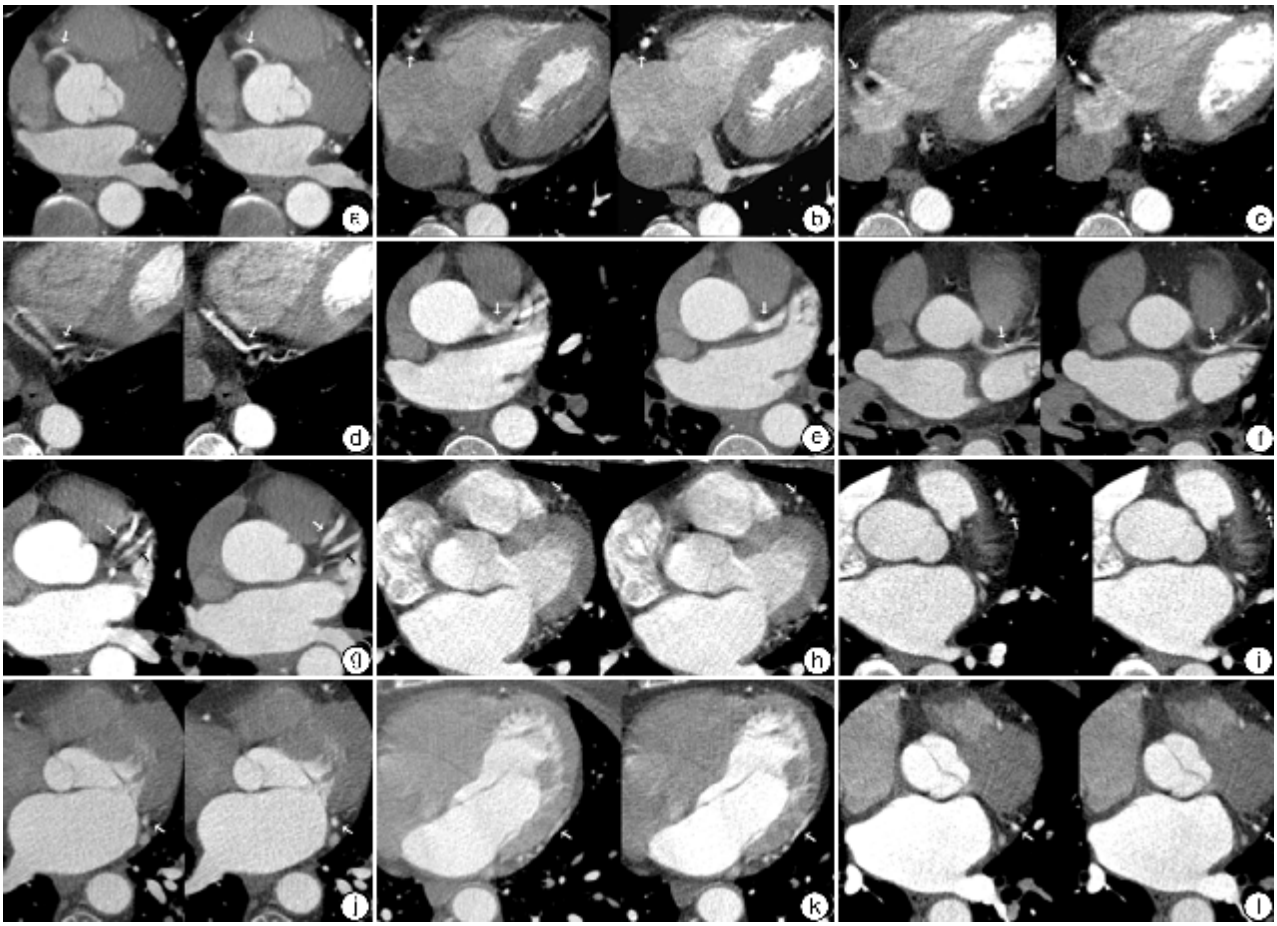


与运动校正前比较，[1)] $P<0.05$。

图 1 RCA、LAD、LCX SD 与 MC 的图像质量比较

Figure 1 Comparison of bar graph of image quality wihout and with MC for RCA, LAD, LCX

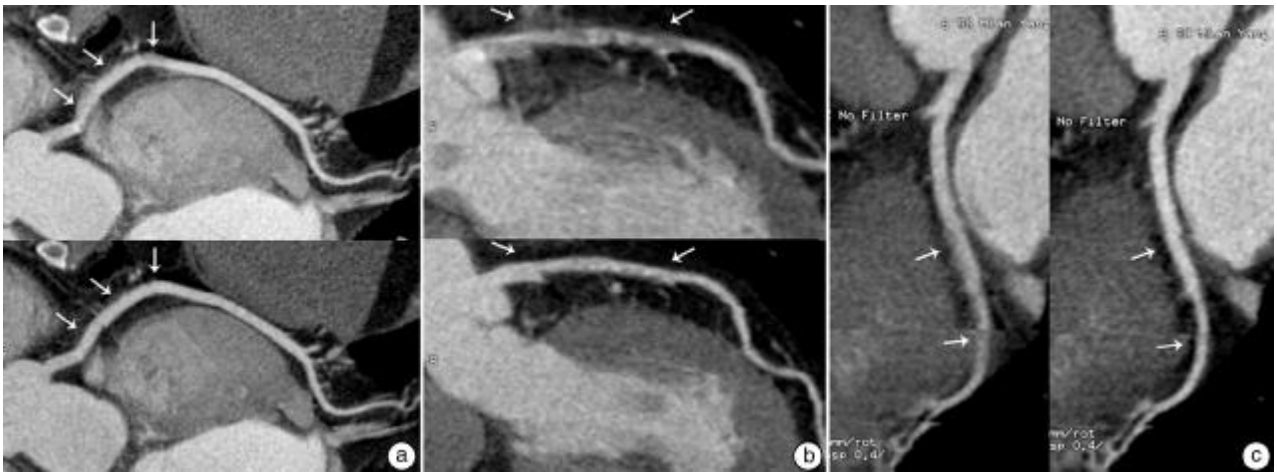
HR 波动与 HR 变异均较小有关，赵红等[9]对 64 层 CCTA 研究结果显示 HR 波动>20 次/min 才引起冠状动脉图像质量明显下降，本组中 97% 的患者 HR 波动<20 次/min。心脏是人体运动最快的器官，在心动周期内，冠状动脉经历着不规则的三维运动，其形态也发生相应的改变[10]，因此冠状动脉的运动伪影一直是 CCTA 的一个挑战。目前的 64 层 MSCT 时间分辨率能达到 83 ms，但是由于冠状动脉运动造成的伪影仍不可避免。且高 HR 时，冠状动脉的运动速度更快，特别是 RCA，增加了产生



a～d：同一患者（平均 HR 77 次/min，HR 波动 4 次/min，HR 变异 5.19%），依次为 S1～S4，SD 评分为 2、2、1、2 分，MC 为 3、3、3、4 分。e、g、j：同一患者（平均 HR 63 次/min，HR 波动 6 次/min，HR 变异 9.52%），依次为 S5、S7、S9（图 g 中黑箭所示）、S11，SD 评分分别为 2、3、2、2，MC 为 3、4、4、3 分；f：S6（平均 HR 91 次/min，HR 波动 2 次/min，HR 变异 2.20%），SD 为 2 分，MC 为 3 分。h：S8（平均 HR 61 次/min，HR 波动 3 次/min，HR 变异 4.96%），SD 为 3 分，MC 为 4 分；i：S10（平均 HR 67 次/min，HR 波动 2 次/min，HR 变异 2.99%），SD 为前 3 分，MC 为 4 分；k、l：同一患者（平均 HR 83 次/min，HR 波动 7 次/min，HR 变异 8.38%），依次为 S12、S13，SD 分别为 3、3 分，MC 为 4、4 分。

图 2　SD（左）及 MC（右）的各段冠状动脉横断面图像

Figure2　Examples of axial images with SD（left） and with MC（right） for each coronary segment



a：RCA SD 时前 S1 段变形，局部无法评估，S2 段管壁明显模糊，MC 管腔规则、管壁稍显模糊；b：LAD SD 时前 S6、S7 段管壁明显模糊，管腔狭窄程度难以准确评估，MC 管壁光滑，斑块显示清晰；c：LCX SD 时前 S11、S12 段管壁明显模糊，易误诊断为软斑块形成，MC 管壁稍显模糊，无确切斑块形成。

图 3　SD（上）及 MC（下）的重建图像

Figure 3　SD（up） and MC（low） reconstruction images

运动伪影的概率，Pontone 等[11]的研究显示冠状动脉 10%～16%节段率的不可评估主要是由运动伪影造成的。解决运动伪影的关键是提高时间分辨率，时间分辨率的提高一个是从硬件上，如双源 CT 能将时间分辨率提高到 75 ms[12]；软件水平可在图像重建方法上压缩重建时间窗[13]，如多扇区重建，从不同的心动周期和不同排列的探测器上采集相同时相不同角度的原始数据进行重组，由于每个扇区的宽度相对于单一扇区有明显缩小，从而显著提高时间分辨率。另一种改善运动伪影的图像重建方法是对冠状动脉四维运动的图像进行运动校正，该方法利用靶期相邻近期相的数据信息，采用运动校正算法，确定靶期相中血管的准确位置，并且适当地补偿靶期相中血管的剩余运动，有效地缩减了重建的时间窗[13]。植入 SSF 平台的 MSCT 可进行冠状动脉四维运动的扫描及数据采集，后经运动信息编码、模型迭代重建，可获得经运动校正后的冠状动脉图像。

本研究结果显示，平均 HR 是影响 64 层螺旋 CT 冠状动脉图像质量的主要因素。经运动校正后，冠状动脉 3 个主要分支的图像质量能普遍提高（图 1、3）。即使是低 HR 水平时，RCA 的 S1、S2 段仍可出现伪影，经运动校正后图像质量能得到明显改善。中等 HR 水平时，经运动校正后，除能改善 RCA 图像质量外，在提高左冠状动脉小血管（S8、S12、S13）的图像质量中也有价值。高 HR 水平时，经运动校正后，左右冠状动脉的图像质量都能得到良好改善，与 Leipsic 等[13]对一组未经药物控制 HR 的患者的研究结果具有一致性的结论。SSF 在进行运动信息编码时利用的是同一心动周期中的数据信息，不易受心脏跳动不一致的影响，且 Rohkohl 等[14]对运动校正算法在提高冠状动脉最佳期相图像质量的研究结果显示，靶心动期相较短的扫描间隔足以获得重建良好图像质量的数据信息，所以运动校正重建在前门控心电触发 CCTA 中具有潜在应用价值，从而能有效降低受检者辐射剂量。

SSF 在改善冠状动脉图像质量中有良好应用价值，特别是对高 HR 患者，低 HR 水平时，对提高 RCA 的图像质量仍有一定价值。本研究中最高平均 HR 未超过 100 次/min，更高 HR 时，只利用同一心动周期内靶期相邻近期相的数据信息是否能显著提高冠状动脉的图像质量需要进一步研究证实。由于本研究中患者 HR 波动、HR 变异较小，HR 波动、HR 变异较大时，SSF 在改善冠状动脉图像质量中的效果、价值需要更深入的研究。

参考文献

[1] RITCHIE C J, GODWIN J D, CRAWFORD C R, et al. Minimum scan speeds for suppression of motion artifacts in CT[J]. Radiology, 1992, 185: 37－42.

[2] 范丽娟，孙凤伟，张计旺，等. 冠状动脉追踪冻结技术对不控制心率受试者 CT 冠状动脉成像质量的影响[J]. 中华放射学杂志，2014，48(2)：105－108.

[3] 黄美萍，刘其顺，刘辉，等. 多层螺旋 CT 冠状动脉成像质量及对冠状动脉病变诊断准确性的评价[J]. 中华放射学杂志，2006，40(9)：984－987.

[4] OHASHI K, ICHIKAWA K, HARA M, et al. Examination of the optimal temporal resolution required for computed tomography coronary angiography[J]. Radiol Phys Technol, 2013, 6: 453－460.

[5] SEIFARTH H, WIENBECK S, PUSKEN M, et al. Optimal systolic and diastolic reconstruction windows for coronary CT angiography using dual-source CT [J]. AJR Am J Roentgenol, 2007, 189: 1317－1323.

[6] NAGATANI Y, TAKAHASHI M, TAKAZAKURA R, et al. Multidetector-row computed tomography coronary angiography: optimization of image reconstruction phase according to the heart rate[J]. Circ J, 2007, 71: 112－121.

[7] 刘斌，赵红，吴兴旺，等. 64 层螺旋 CT 冠状动脉成像图像质量的相关影响因素分析（心脏体模模拟实验）[J]. 中华放射学杂志，2006，40(9)：980－983.

[8] SUN G, LI M, JIANG X S, et al. 320-detector row CT coronary angiography: effects of heart rate and heart rate variability on image quality, diagnostic accuracy and radiation exposure[J]. Br J Radiol, 2012, 85: e388－e394.

[9] 赵红，刘斌，吴兴旺，等. 64 层螺旋 CT 冠状动脉成像质量的心率变化及其对图像质量的影响[J]. 实用放射学杂志，2007，23(2)：145－149.

[10] DING Z, FRIEDMAN M H. Quantification of 3-D coronary arterial motion using clinical biplane cineangiograms[J]. Int J Card Imaging, 2000, 16: 331－346.

[11] PONTONE G, ANDREINI D, BARTORELLI A L, et al. Feasibility and accuracy of a comprehensive multidetector computed tomography acquisition for patients referred for balloon-expandable transcatheter aortic valve implantation[J]. Am Heart J, 2011, 161: 1106－1113.

[12] FLOHR T G, BRUDER H, STIERSTORFER K, et al. Image reconstruction and image quality evaluation for a dual source CT scanner[J]. Med Phys, 2008, 35: 5882－5897.

[13] LEIPSIC J, LABOUNTY T M, HAGUE C J, et al. Effect of a novel vendor-specific motion-correction algorithm on image quality and diagnostic accuracy in persons undergoing coronary CT angiography without rate-control medications[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2012, 6: 164－171.

[14] ROHKOHL C, BRUDER H, STIERSTORFER K, et al. Improving best-phase image quality in cardiac CT by motion correction with MAM optimization[J]. Med Phys, 2013, 40: 031901.

（收稿日期：2014-12-08；修回日期：2015-03-20）