

· 心血管影像学 ·

全心运动追踪冻结算法(SSF2)对经导管主动脉瓣植入术术前主动脉瓣环 CT 评估的图像质量及测量一致性影响

吴乃明, 卢庆, 王憬, 宫泽, 陈素萍, 赵恒宇

【摘要】 目的:评估全心运动追踪冻结技术(snapshot freeze 2.0, SSF 2)能提高在心脏增强计算机断层扫描(CT)中对经导管主动脉瓣植入术(TAVR)术前患者主动脉瓣环 CT 测量一致性和图像质量的影响。**方法:**回顾性分析 2020 年 12 月—2021 年 8 月期间 57 例主动脉瓣疾病患者用于 TAVR 术前评估的心脏增强 CT 患者检查影像学资料。所有患者在自由心率下在单次心跳期间接受前瞻性 ECG 门控同步采集的心脏增强 CT 检查。分别使用冠状动脉运动追踪冻结技术(snapshot freeze 1.0, SSF 1)和 SSF 2 后处理技术从 R-R 间隔获取的 35% 和 75% 的原始数据中获得后处理图像。每个患者的 4 组图像(SSF 1-35%、SSF1-75%、SSF 2-35%、SSF2-75%)由两个独立的盲读者测量分析主动脉瓣环面积、短轴和长轴、周长、平均直径和左、右冠状动脉高度并对整体图像质量使用 5 分 Likert 法进行主观评分。测量主动脉瓣环,左、右冠脉开口处的 CT 值、SD 值,计算信号噪声比和对比噪声比。比较分析图像质量和测量一致性。**结果:**无论在 35% 还是 75% 期相,SSF2 组图像均具有比 SSF1 图像更高的图像评分($P < 0.05$),35% 期相时 SSF2 将图像质量从不可评估(< 3 分)提高至了良好(≥ 4 分)。客观参数上在 35% 期相 SSF2 图像主动脉瓣环 SD 更低,75% 期相左冠开口 SNR 更高($P < 0.05$)。对于同一位医师 SSF1 图像与 SSF2 图像上测得的主动脉瓣环参数无统计学差异($P > 0.05$)。一致性分析显示 35% 期相图像上测量主动脉瓣环的环长轴、环短轴、平均直径、周长和面积时,SSF2 图像能获得比 SSF1 图像更窄的 Bland-Altman 一致性区间(LOA)和更高的组内相关系数(ICC),但无统计学意义。75% 期相图像上 SSF2 能提高测量平均直径,面积,左、右冠脉高度的一致性,其中对于左冠高度测量有统计学意义[SSF1-75% vs. SSF2-75%, 测量偏差: -0.2246 vs. -0.3211 , LOA: $(-3.411, 2.962)$ vs. $(-2.034, 1.392)$, ICC: 0.892 vs. 0.966 , 95% 置信区间: $(0.824, 0.935)$ vs. $(0.943, 0.98)$]。**结论:**SSF 2 可显著减少运动伪影改善心脏增强 CT 成像的图像质量,并且对于主动脉瓣环结构测量具有更好的一致性,能为 TAVR 术前评估提供重要价值。

【关键词】 主动脉瓣;经导管主动脉瓣置换;体层摄影术,X 线计算机

【中图分类号】 R322.11;R654.27;R814.42 **【文献标志码】** A

【文章编号】 1000-0313(2024)06-0746-09

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2024.06.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Impacts of whole heart motion correction algorithm (second-generation snapshot freeze) on image quality and measuring consistency in pre-TAVR aortic annulus CT evaluation WU Nai-ming, LU Qing, WANG Jing, et al. Department of Imaging, Xiamen Cardiovascular Hospital of Xiamen University, School of Medicine, Fujian 361000, China

【Abstract】 Objective: To evaluate the impacts of whole heart motion correction algorithm (snapshot freeze 2.0, SSF2) on image quality and measuring consistency in contrast-enhanced cardiac computed tomography (CT) imaging for pre-TAVR aortic annulus CT evaluation. **Methods:** The CT datasets of 57 patients (from 2020 Dec. to 2021 Aug.) with aortic valve diseases for pre-TAVR evaluation were retrospectively analyzed. All patients without control of heart rate were proceeded prospective ECG triggering contrast enhanced cardiac CT scan within a single beat. The images acquired at 35%

作者单位:361000 福建,厦门大学附属心血管病医院影像科(吴乃明、卢庆、王憬、宫泽、赵恒宇);200000 上海,美国通用电气医疗系统贸易发展有限公司(陈素萍)

作者简介:吴乃明(1991—),男,福建宁德人,主管技师,主要从事心血管影像技术研究工作。

通讯作者:赵恒宇, E-mail: zzzx_paper@163.com

基金项目:厦门市科技计划项目(3502Z202373114)

and 75% R-R interval were both post-processed by coronary artery motion correction algorithm (snapshot freeze 1.0, SSF1) and SSF2, thus four data sets (SSF1-35%, SSF1-75%, SSF2-35%, SSF2-75%) were obtained. The measurement of area, short/long axis, perimeter, mean diameter, left and right coronary height were performed by two independent radiologists blinded to the reconstruction information. The subjective evaluation on overall image quality was also conducted by them using 5-point Likert score. CT values and SD values on aortic annulus, openings of left coronary and right coronary were measured, then signal to noise ratio (SNR) and contrast to noise ratio (CNR) were measured. Then the image quality and measuring consistency were compared. **Results:** SSF2 images had higher subjective scores than SSF1 images ($P < 0.05$) at both 35% and 75% R-R intervals, therein, for images acquired at 35% R-R interval, SSF2 improved the subjective image scoring from non-interpretable (< 3 points) to good (≥ 4 points). In terms of objective image quality, at 35% phase, SSF2 images had lower SD on aortic annulus, and at 75% phase, SSF2 images had higher SNR on opening of left coronary (both $P < 0.05$). For the specific radiologist, the measurements of aortic annulus were not statistically different between SSF1 and SSF2 images (all $P > 0.05$). As shown in consistency analysis, for images acquired at 35% R-R interval, SSF2 images resulted in narrower limit of agreement (LOA) in Bland-Altman results and higher interclass correlation coefficients (ICC) than SSF1 images when measuring the long axis, short axis, mean diameter, perimeter and area of aortic valve annulus, but there was no statistical difference. For 75% images, SSF2 also led to narrower LOA and higher ICC on measured mean diameter, area and the height of the left and right coronary arteries. Therein, for the measurement of the height of the left coronary artery, [SSF1-75% vs SSF2-75%, bias: -0.2246 vs. -0.3211 , LOA: $(-3.411, 2.962)$ vs. $(-2.034, 1.392)$; ICC: 0.892 vs. 0.966 , 95% confidence interval: $(0.824, 0.935)$ vs. $(0.943, 0.98)$], the consistency improvement by SSF2 was statistically significant. **Conclusion:** SSF2 could greatly reduce motion artifacts and improve the image quality of cardiac CT imaging, leading to higher consistency for the measurement of aortic annulus, which is valuable for the pre-TAVR evaluation of patients.

【Key words】 Aortic valve; Transcatheter aortic valve replacement; Tomography, X-ray computed

经导管主动脉瓣置换术 (transcatheter aortic valve replacement, TAVR) 被广泛用于重度主动脉瓣狭窄 (AS) 及单纯严重主动脉瓣反流 (AR) 引起的一些临床症状患者的首选干预措施^[1]。TAVR 的术前评估中心脏增强 CT 扫描目前是测量主动脉瓣环大小、评估瓣环损伤和冠状动脉闭塞风险的有效手段^[2]。然而, 在很多情况下心脏增强 CT 图像可能会受到主动脉瓣运动及一些其他的伪影限制, 从而影响测量结果。运动校正算法可以减少运动伪影, 提高成像质量, 但迄今为止心脏上的运动追踪冻结算法仅限于冠状动脉的运动校正^[3]。而一种新发展的全心运动追踪冻结技术 (SSF 2) 将运动校正扩展到了整个心脏, 但对于 TAVR 术前患者的主动脉瓣环测量的影响尚未研究。因此, 本研究主要分析全心运动追踪冻结技术 (snapshot freeze 2.0, SSF 2) 对 TAVR 术前主动脉瓣环数据测量一致性和图像质量的影响。

材料与方法

1. 研究对象及分组

本回顾性研究得到了厦门大学附属心血管病医院的伦理委员会批准, 并获得了知情同意书的豁免。本研究回顾性分析 2020 年 12 月—2021 年 8 月期间于厦门大学附属心血管病医院怀疑重度主动脉瓣狭窄 (AS) 及单纯严重主动脉瓣反流 (AR) 须行 TAVR 术前 CT 评估的患者心脏增强 CT 检查数据。其中排除标准: ① 对比剂使用禁忌症; ② 烦躁不安, 不能配合者。本研究最终纳入 57 名患者。

2. 仪器与检查方法

57 例患者均在 256 排 16 cm 宽体探测器 CT 扫描仪 (Revolution CT, GE Healthcare, 美国) 上行心脏增强 CT 扫描, 患者置于检查床, 双手上举伸直。以前瞻性 ECG 门控触发轴扫模式, 于 1 个心动周期内采集全部图像。采用双筒高压注射器, 通过 20G 规格留置针于肘正中静脉, 先以 $4.0 \sim 5.0$ mL/s 流率注射 $45 \sim 55$ mL 对比剂 (碘佛醇 350 mg I/mL), 再以 $4.5 \sim 5.5$ mL/s 流率注射 $45 \sim 65$ mL 生理盐水。探测器 z 轴长度为 160 mm; 管电压: 120 kV, 自动曝光控制调节管电流范围: $250 \sim 650$ ms, 噪声指数为 25, 矩阵 $512 \times$

512, 扫描层厚 0.625 mm, 机架转速 0.28 s/r, 扫描范围: 至少覆盖主动脉根部, 包括整个心脏最佳。使用自动对比剂跟踪技术启动扫描, 选取气管隆突水平进行同层动态扫描, 于升主动脉内选取感兴趣区域(ROI), 阈值设为 150 HU, 延迟 8 s 后开始扫描。检查前心率整齐时扫描曝光时间窗范围为 0~100% 的 R-R 间期, 如遇到心率不齐时扫描曝光时间窗会相应的扩大, 峰值管电流应设置在收缩及舒张期。以标准算法重建图像, 厚度为 0.625 mm 层厚, 层间隔 0.625 mm, 并采用自适应统计迭代重建(ASIR-V 70%)进行回顾性重建。

3. 图像重建及后处理

根据主动脉瓣周期运动变化规律, 临床最终选择收缩末期(35%)和舒张中期(75%)进行数据重建^[4-5], 获取的常规扫描重建图像在后处理工作站 AW 4.7 (GE Healthcare, 美国)上分别应用 SSF1、SSF 2 后处理技术对 R-R 间期中以 35% 和 75% 时相为中心的原图像进行处理, 最后每个患者将获得 4 组数据集(SSF1-35% SSF1-75%, SSF2-35%, SSF2-75%)。

4. 图像评价与测量

处理后图像共同传送至 GE 工作站 AW4.7 上进行分析。

主观图像评价: 由两位资深放射学医师采用双盲法, 根据 5 分 Likert 评分表^[6]对主动脉瓣情况进行彼此独立的评分。评分细则为 1 分: 非常差(主动脉瓣膜叶结构与边缘无法辨识, 运动伪影重, 不可评估); 2 分: 较差(主动脉瓣膜叶结构无法辨识, 边缘稍模糊, 运动伪影重, 不可评估); 3 分: 一般(主动脉瓣膜叶结构显示一般, 边缘可辨识, 运动伪影中度, 可满足评估); 4 分: 良好(主动脉瓣膜叶结构显示较好, 边缘可辨识, 运动伪影较轻, 可满足评估); 5 分: 优秀(主动脉瓣膜叶结构显示清晰, 边缘轮廓清晰, 无运动伪影); 其中评分大于等于 3 分认为图像可评估, 满足诊断要求。如两位医生评分不一致则集中讨论后达成一致。

客观图像评估: 由一位放射学医师通过多平面重建方式在轴面上分别找到主动脉瓣环层面、左、右冠状动脉开口层面图像并记录放置在主动脉瓣环、室间隔壁、左、右冠状动脉开口以及冠脉周围脂肪中的圆形感兴趣区(regions of interest, ROI)中的 CT 值和图像噪声[CT 值的标准偏差(SD)]。主动脉瓣环层面和心室间隔壁圆形 ROI 的大小约为 5.0~10.0 mm²; 左、右冠状动脉开口和冠脉周围脂肪的圆形 ROI 大小约 1.0~5.0 mm²。根据测量值使用以下公式计算信号噪声比(SNR)=ROI CT 值/ROI SD; 对比度噪声比(CNR)=(主动脉瓣环/左、右冠状动脉开口 CT 值-心室间隔壁/冠脉周围脂肪 CT 值)/(心室间隔壁/冠脉周围脂

肪 SD)^[7-8](图 1)。

之后运用 TAVI 分析软件进行主动脉瓣环测量分析, 由 2 位经验丰富, 独立且对图片特征信息不知情的医师进行。通过推荐的标准方法测量主动脉瓣环平面^[9]。分别测量主动脉瓣环短轴和环长轴、面积、平均直径、周长和左、右冠状动脉高度 7 项数据(图 2)。

5. 辐射剂量

从存储的剂量报告中记录 CT 剂量容积指数[CTDIvol (mGy)]、剂量长度乘积[DLP (mGy·cm)]。并计算有效剂量(ED): ED (mSv) = DLP (mGy·cm) · 0.014 mSv/mGy·cm。

6. 统计学处理

统计学方法: 使用 SPSS 26.0 进行数据管理与统计分析。分类变量统计为频数与频率形式, 连续变量经过 Shapro-Wilk 检验服从正态分布的表示为均值±标准差的形式, 使用独立样本 *t* 检验; 不服从正态分布的连续变量表示为中位数(四分位间距)形式, 使用 Kruskal-Wallis *H* 检验或 Mann-Whitney *U* 检验。统计学差异由 *P* < 0.05 决定。两位医生的主观图像评分一致性由 Kappa 值分析, 其中 *k* < 0.4: 一致性较差; 0.4 < *k* < 0.6: 一致性一般; 0.6 < *k* < 0.8: 较高一致性; *k* > 0.8: 一致性很好。对 SSF1 和 SSF2 图像上对主动脉瓣结构测量的一致性使用 Bland-Altman 法进行分析并计算组内相关系数(intraclass correlation efficient, ICC)和 95% 置信区间。图片使用 Graphpad Prism 9.0 进行绘制。

结 果

1. 患者一般资料

57 例患者中 41 名(71.93%)男性, 16 名(28.07%)女性。患者平均年龄为(71.49±8.75)岁(范围为 29~86 岁)。BMI 值平均值为(22.44±3.49) kg/m²(范围为 14.69~30.08 kg/m²)。平均心率是(69.52±15.26)次每分钟(bpm)(范围为 32~113 bpm), 其中心率大于 75 bpm 的 17 人(29%)。窦性心律 35 人(61%), 心律不齐 22 人(38%), 房颤 14 人(24%)。CT 扫描后经过 3~6 个月后回访, 有 36 例接受了 TAVR 手术, 11 例接受外科换瓣手术, 10 例未手术(4 例符合 TAVR 手术指征未行手术, 6 例放弃手术)。

2. 辐射剂量

57 例患者的 CTDIvol 为(35.57±13.50) mGy, DLP 为(567.03±217.94) mGy·cm, ED 为(7.94±3.05) mSv。

3. 图像质量

两位医生的主观图像评分 Kappa 值为 0.83, 具有很好一致性。SSF1-35%, SSF2-35%, SSF1-75% 和

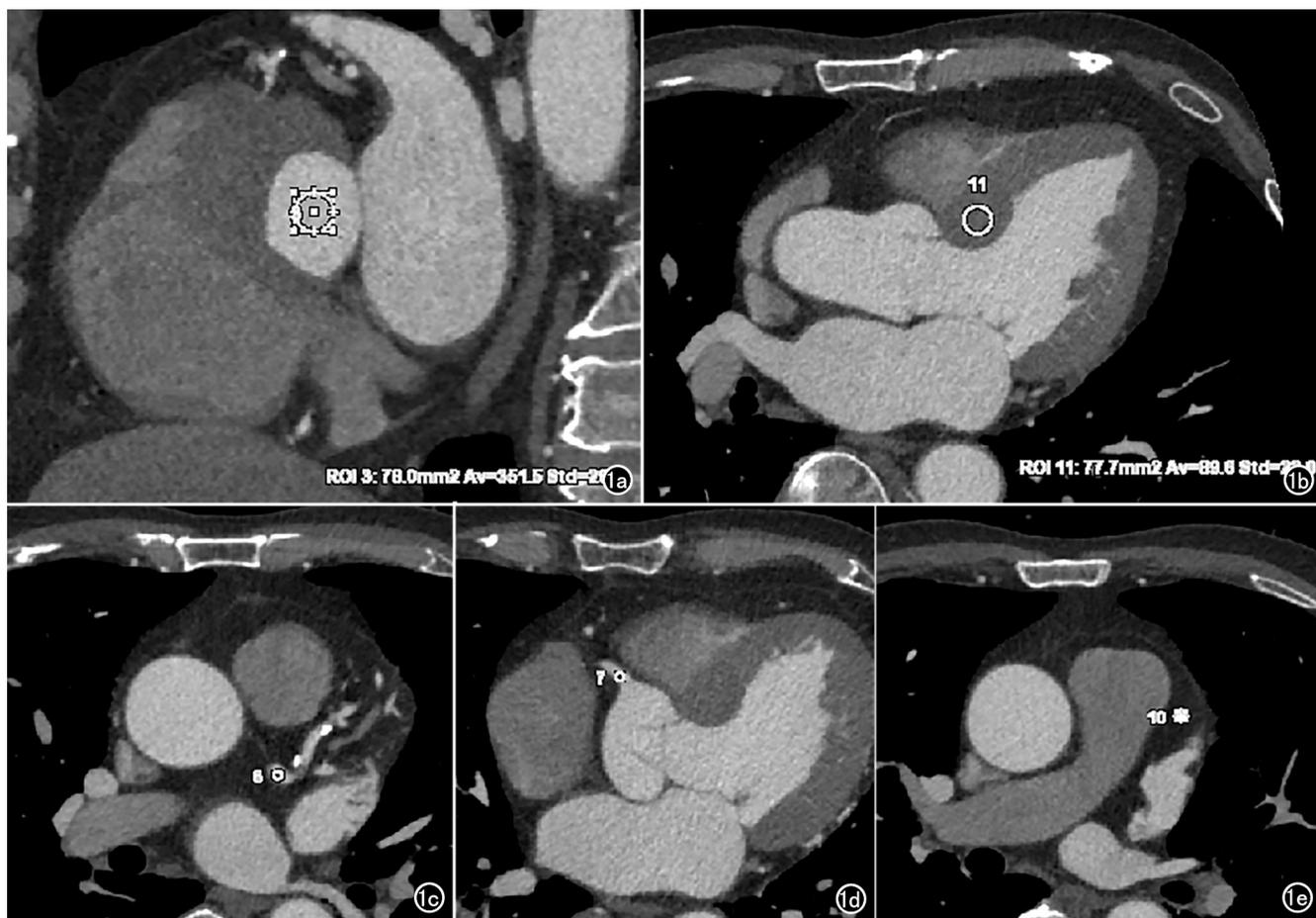


图 1 a) 主动脉瓣环层面: 为测量瓣环数据层面, 放置 ROI 进行 CT 值及 SD 测量并记录; b) 左室流出道层面: 选择室间隔靠近基底部位置, 放置 ROI 进行 CT 值及 SD 测量并记录; c) 左冠开口层面: 选择左冠状动脉开口位置, 放置 ROI 进行 CT 值及 SD 测量并记录; d) 右冠开口层面: 选择右冠状动脉开口位置, 放置 ROI 进行 CT 值及 SD 测量并记录; e) 冠周脂肪层面: 选择冠状动脉周围脂肪, 放置 ROI 进行 CT 值及 SD 测量并记录。圆圈示意 ROI。

SSF2-75% 4 组图像的评分差异有统计学意义 ($P = 0.000$)。SSF2 图像在 35% 与 75% 时相时均具有比 SSF1 图像更高的主观图像评分, 其差异具有统计学意义。35% 期相时 SSF1-35% 与 SSF2-35% 评分分别为 2.79 ± 0.991 和 4.18 ± 0.865 , $P = 0.000$; SSF2 将图像质量由不可评估 (< 3 分) 提高至良好 (≥ 4 分)。在 75% 时 SSF1-75% 与 SSF2-75% 评分分别为 3.15 ± 1.13 和 4.45 ± 0.705 , $P = 0.000$ 。如图 3 所示 35% 期相时 SSF1-35% 图像: 主动脉瓣膜叶结构无法辨识, 边缘稍模糊, 主动脉瓣运动伪影较重 (2 分); SSF2-35% 图像: 主动脉瓣膜叶结构显示清晰, 边缘轮廓清晰, 无明显运动伪影 (5 分); 在 75% 期相时, SSF1-75% 图像: 主动脉瓣膜叶结构显示一般, 边缘可辨识, 主动脉瓣运动伪影中度 (3 分); SSF2-75% 图像: 主动脉瓣膜叶结构显示清晰, 边缘轮廓清晰, 无明显运动伪影 (5 分)。如图 4 所示在心率不齐合并高心率患者中 35% 期相时 SSF1-35% 与 SSF2-75% 图像中主动脉

瓣膜叶结构均显示一般, 边缘可辨识, 主动脉瓣运动伪影中度 (3 分); 75% 期相时 SSF2-35% 与 SSF2-75% 图像: 主动脉瓣膜叶结构均显示清晰, 边缘轮廓清晰, 无明显运动伪影 (5 分)。

在客观图像质量评估中 (表 1) 35% 期相的主动脉瓣环和左冠开口处, 75% 期相的 3 个位置, SSF2 的图像质量客观参数均优于 SSF1, 但只有 35% 期相的左冠开口 SNR 值和 75% 期相的主动脉瓣环 SD 值有统计学意义 ($P < 0.05$)。

4. 主动脉瓣环测量一致性分析 (表 2)

对于两位医师, 在 35% 和 75% 期相各自在 SSF1 和 SSF2 图像上测量得到的瓣环参数没有统计学差异 ($P > 0.05$)。通过 Bland-Altman (B-A) 分析 35% 期相时 SSF2 图像上环短轴、面积、周长及平均直径一致性极限 (limit of agreement, LOA) 更窄 (图 5), 对于环长轴测量两者一致性相似 [SSF1-35% vs. SSF2-35%, 偏差: 0.05439mm 与 0.04912mm , 一致性极限 (limit

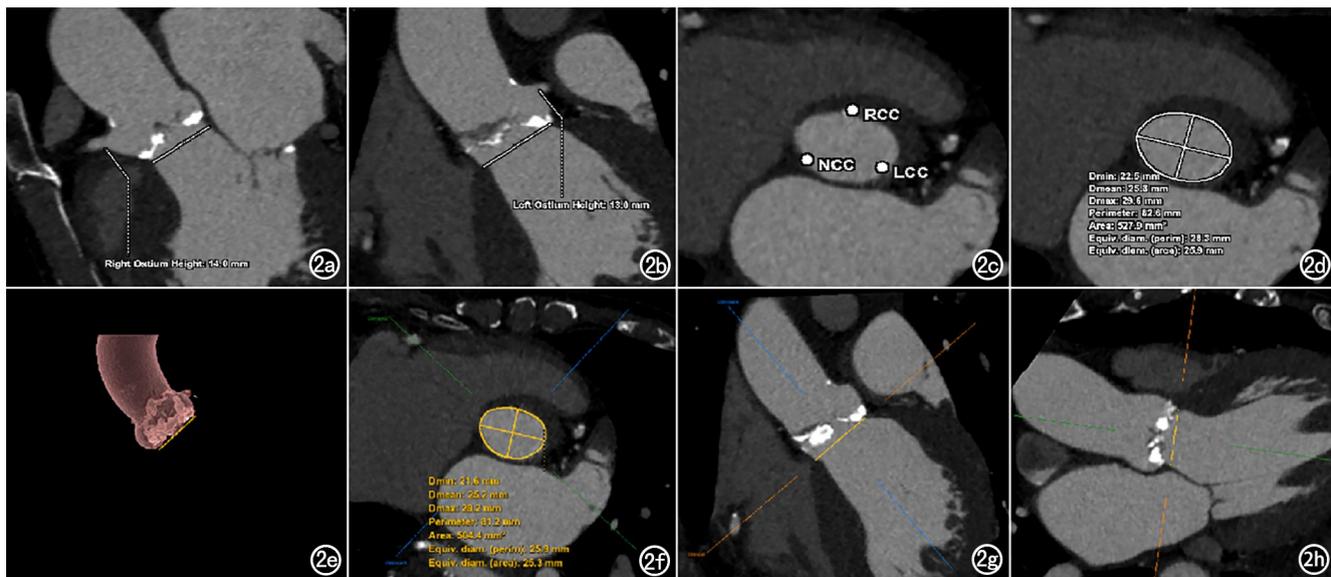


图 2 冠状动脉开口高度测量,在冠状动脉开口显示最佳切面测量冠状动脉开口最低点到主动脉瓣环的垂直距离。a)左冠高度 13 mm;b)右冠高度 14 mm;c)主动脉瓣环瓣叶最低点层面选择:选择主动脉瓣每个瓣叶最低点以定义瓣环层面(RCC:右冠窦,LCC:左冠窦,NCC:无冠窦);d)利用半自动化软件进行主动脉瓣环层面定位选择以及主动脉瓣环勾画并进行人工校对后得出测量数据(最小直径 21.6 mm;平均直径 25.2 mm;最大直径 29.2 mm;周长 81.2 mm;面积 502.4 mm²;当量直径(周长)25.9 mm;当量直径(面积)25.3 mm);e)为模拟术中主动脉瓣环显示最佳角度;f)瓣环自动识别后人工校正工序;g)利用多平面技术寻找主动脉瓣左冠窦及无冠窦最低点;h)利用多平面技术寻找主动脉瓣右冠窦最低点。

表 1 图像质量客观参数比较

客观参数	35%-SSF1	35%-SSF2	t/Z	P	75%-SSF1	75%-SSF2	t/Z	P
主动脉瓣环								
CT 值	454.21±79.84	454.92±79.64	-0.048	0.962	451.44±82.24	447.68±82.80	0.245	0.807
SD 值	27.35 (6.80)	26.35 (6.81)	-1.789	0.074	28.78 (8.14)	26.55 (6.19)	-2.435	0.015
SNR	16.25±3.72	17.39±3.52	-1.71	0.09	15.50±3.60	16.69±3.70	-1.758	0.081
CNR	14.50 (4.94)	14.78 (4.99)	-1.027	0.304	13.85±3.33	14.56±3.49	-1.116	0.267
左冠开口								
CT 值	419.73±76.05	421.02±75.89	-0.092	0.927	420.23±78.33	421.07±75.94	-0.059	0.953
SD 值	25.1 (8.95)	22.55 (7.40)	-1.853	0.064	25.4 (10.83)	22.43 (7.55)	-0.781	0.435
SNR	17.01±4.72	18.96±5.29	-2.101	0.038	15.46 (5.68)	17.00 (5.63)	-1.088	0.277
CNR1	19.75 (4.80)	20.24 (4.38)	-1.524	0.128	17.52 (4.27)	18.34 (6.30)	-1.618	0.106
右冠开口								
CT 值	405.93±84.12	406.51±81.53	-0.037	0.97	402.10±91.18	408.77±83.65	-0.41	0.682
SD 值	24.40 (13.16)	24.65 (11.77)	-0.45	0.653	28.40 (13.5)	25.80 (10.74)	-1.449	0.147
SNR	17.16±6.29	17.40±6.15	-0.205	0.838	14.58±5.07	16.37±5.76	-1.774	0.079
CNR	24.71 (8.16)	24.22 (7.83)	-0.497	0.619	20.32 (8.40)	23.81 (9.85)	-1.761	0.078

表 2 SSF1 与 SSF2 图像上测量的主动脉瓣环参数比较

组别	环短轴	环长轴	平均直径	面积	周长	右冠高度	左冠高度	窦管交界高度	窦管交界直径
医师 1									
35%-SSF1	22.5 (3.73)	27.7 (4.32)	24.85 (3.63)	489.35 (146.70)	79.65 (11.58)	16.86±4.44	13.7 (3.60)	22.96±4.18	30.65 (5.38)
35%-SSF2	21.95 (3.63)	27.55 (3.78)	24.45 (4.02)	473.5 (158.75)	78.3 (13.25)	16.71±4.37	13.75 (4.05)	22.74±4.09	30.7 (5.63)
Z/t	-0.809	-0.144	-0.527	-0.538	-0.436	0.181	-0.472	0.281	-0.152
P	0.418	0.886	0.598	0.590	0.663	0.856	0.637	0.780	0.879
75%-SSF1	21.1 (4.22)	27.9 (4.45)	24.55 (3.95)	477.8 (149.48)	78.35 (12.53)	17.27±4.58	14.68±3.42	22.85 (4.58)	30.35 (4.18)
75%-SSF2	21.3 (3.57)	27.7 (4.02)	24.55 (3.95)	476.8 (155.57)	78.05 (12.83)	17.25±4.37	14.54±3.42	22.9 (5.2)	29.9 (5.13)
Z/t	-0.26	-0.229	-0.395	-0.425	-0.445	0.031	0.212	-0.188	-0.224
P	0.795	0.819	0.693	0.671	0.657	0.975	0.833	0.851	0.823
医师 2									
35%-SSF1	21.55 (4.05)	27.85 (3.93)	24.25 (3.68)	467.15 (145.25)	78.65 (11.40)	16.42±4.37	13.35 (3.35)	20.9 (4.65)	30.55 (5.67)
35%-SSF2	21.3 (3.85)	27.6 (3.97)	24.35 (3.52)	468.7 (139.07)	78.55 (11.68)	16.43±4.43	13.2 (3.50)	20.5 (4.03)	30.9 (5.00)
Z/t	-0.331	-0.210	-0.260	-0.298	-0.409	-0.021	-0.083	-0.044	-0.284
P	0.740	0.834	0.795	0.766	0.683	0.983	0.934	0.965	0.776
75%-SSF1	20.91±2.93	27.75 (4.50)	24.15 (3.70)	461.5 (142.67)	77.35 (13.18)	16.85±4.34	14.50 (3.75)	21.25 (3.98)	29.60 (4.85)
75%-SSF2	20.79±2.87	27.80 (4.05)	23.95 (3.55)	456.2 (137.95)	77.35 (12.58)	16.82±4.58	14.10 (3.73)	21.45 (4.43)	29.90 (5.45)
Z/t	0.214	-0.025	-0.202	-0.166	-0.088	0.033	-0.398	-0.075	-0.003
P	0.831	0.980	0.840	0.868	0.930	0.974	0.691	0.941	0.998

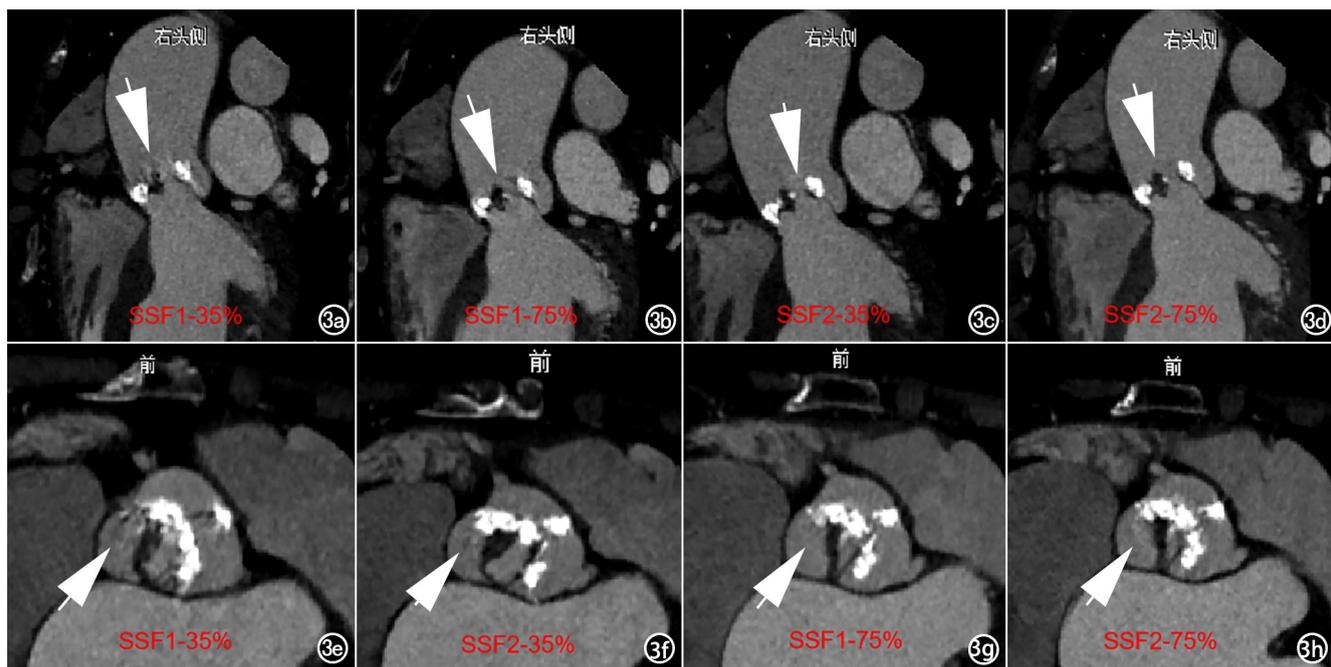


图 3 a)SSF1 重建 35%期相长轴图像,运动伪影较重评分 2 分;b)SSF 2 重建 35%期相长轴图像,运动伪影显著减少图像质量提高,评分 5 分;c)SSF1 重建 75%期相长轴图像,运动伪影较重评分 3 分;d)SSF 2 重建 75%期相长轴图像,运动伪影显著减少图像质量提高,评分 5 分;e)SSF1 重建 35%期相瓣叶层面图像,运动伪影较重评分 2 分;f)SSF 2 重建 35%期相瓣叶层面图像,运动伪影显著减少图像质量提高,评分 5 分;g)SSF1 重建 75%期相瓣叶层面图像,运动伪影较重评分 3 分;h)SSF 2 重建 75%期相瓣叶层面图像,运动伪影显著减少图像质量提高,评分 5 分(箭所示:主动脉瓣运动伪影)。

表 3 不同测量者在两种运动冻结算法图像上对主动脉瓣结构测量的 ICC 分析

测量参数	35%-SSF1	35%-SSF2	75%-SSF1	75%-SSF2
环短轴 ICC(95% CI)	0.954(0.923,0.972)	0.971(0.952,0.983)	0.961(0.934,0.977)	0.957(0.928,0.975)
环长轴 ICC(95% CI)	0.969(0.948,0.982)	0.975(0.958,0.985)	0.976(0.960,0.986)	0.964(0.940,0.979)
平均直径 ICC(95% CI)	0.978(0.962,0.987)	0.985(0.974,0.991)	0.978(0.962,0.987)	0.980(0.967,0.988)
面积 ICC(95% CI)	0.980(0.966,0.988)	0.983(0.972,0.99)	0.979(0.965,0.988)	0.978(0.963,0.987)
周长 ICC(95% CI)	0.979(0.965,0.988)	0.983(0.972,0.99)	0.979(0.965,0.988)	0.976(0.96,0.986)
右冠脉高度 ICC(95% CI)	0.975(0.958,0.985)	0.976(0.959,0.986)	0.970(0.95,0.982)	0.978(0.963,0.987)
左冠脉高度 ICC(95% CI)	0.970(0.949,0.982)	0.972(0.953,0.983)	0.892(0.824,0.935)	0.966(0.943,0.98)

ICC:组内相关系数

of agreement, LOA) 范围(-1.378, 1.487 mm)与(-1.266, 1.365 mm)。75%期相时 B-A 分析结果:环短轴[偏差:-0.8035 mm 与 -0.7105 mm, 范围(-2.297, 0.6901 mm)与(-2.204, 0.7829 mm)]、环长轴[偏差:-0.193 mm 与 -0.1088 mm, 范围(-1.511, 1.125 mm)与(-1.537, 1.319 mm)]面积[偏差:-19.01 mm² 与 -13.95 mm², 范围(-61.01, 22.99 mm²)与(-55.59, 27.7 mm²)]、平均直径[偏差:-0.5193 mm 与 -0.3789 mm, 范围(-1.636, 0.5971 mm)与(-1.388, 0.6298 mm)]及周长[偏差:-1.002 mm 与 -0.5561 mm, 范围(-4.393, 2.389 mm)与(-4.001, 2.889 mm)],其中平均直径与左、右冠高度(图 4)的测量在 SSF2 图像上具有更窄的 LOA。总的来说对于 SSF2 图像不同测量者之间对主动脉瓣环短轴、环长轴、面积、平均直径和周长的测量比 SSF1

具有更窄的 LOA, SSF2 组中一致性相关系数一直较高,然而,由于可信区间(CI)重叠,这些结果在统计学上并不显著(表 3)。但是,对于左冠高度(SSF1-75% vs. SSF2-75%), ICC(0.892 与 0.966, 95% CI:(0.824, 0.935)与(0.943, 0.98))(图 6), 75%期相 SSF2 图像比 SSF1 具有更窄的一致性区间,并且可信区间(CI)不重叠,具有统计学意义。

讨论

全心运动追踪冻结技术(snapshot freeze 2.0, SSF 2)可以改善用于 TAVR 术前主动脉瓣环收缩期与舒张期评估的图像质量和主动脉瓣环测量的一致性,特别是在冠脉开口高度的测量上有明显提高。

SSF2 图像比 SSF1 图像具有更少的运动伪影和更高的主观图像评分。由于相当一部分心脏瓣膜病患

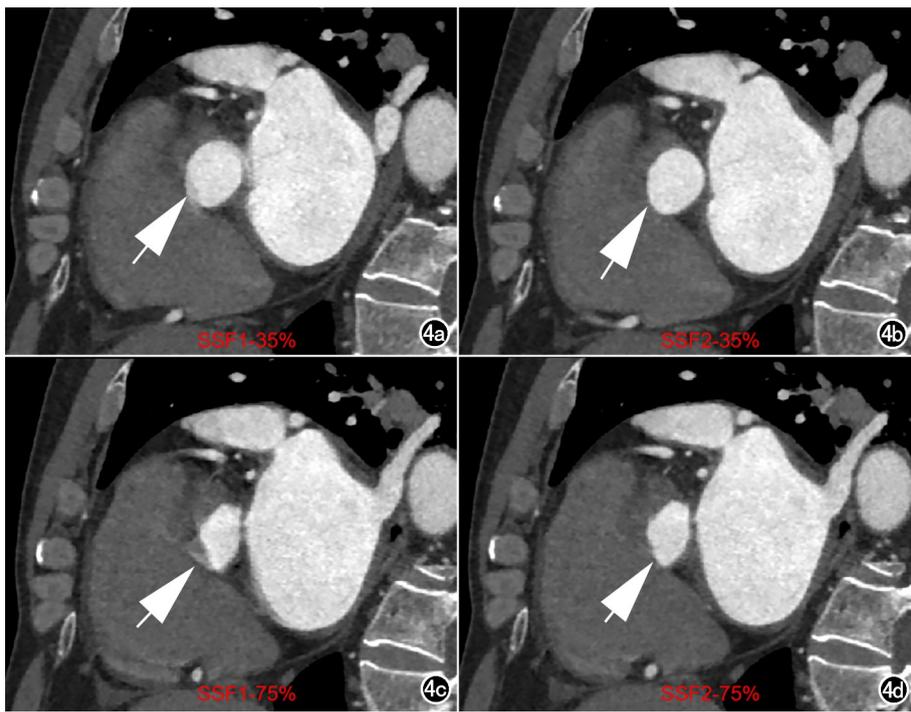


图 4 男, 56 岁(身高 170 cm, 体重 66.9 kg, 体重指数 23.15 kg/m²), 心率不齐, 心率范围: 51~105 bpm 扫描期间心率=81 bpm。临床诊断: 心脏瓣膜病, 主动脉瓣重度关闭不全, 二尖瓣狭窄, 三尖瓣关闭不全, 心房颤动。a) 使用 SSF1 后处理技术重建的主动脉瓣环 MPR 图像(R-R 间隔=35%), 主观评分为 3 分; b) 使用 SSF2 后处理技术重建的主动脉瓣环 MPR 图像(R-R 间隔=35%), 主观评分为 5 分; 运动伪影明显减少, 图像质量得到明显改善; c) 使用 SSF1 后处理技术重建的主动脉瓣环 MPR 图像(R-R 间隔=75%), 主观评分为 3 分; d) 使用 SSF2 后处理技术重建的主动脉瓣环 MPR 图像(R-R 间隔=75%), 主观评分为 5 分; 运动伪影明显减少, 图像质量得到明显改善(箭所示: 主动脉瓣环伪影。WW=800 窗口宽度; WL=200 窗位)。

者存在心律失常, 并且部分患者无法配合呼吸, 因此 CT 扫描常因时间分辨率不足出现严重运动或阶梯伪影^[10]。应用 16 cm 宽体探测器 CT 的单心跳采集结合冠脉运动追踪技术 SSF1 可以减少伪影干扰, 提高图像质量和/或诊断准确性^[10-11]。然而, 就算在时间分辨率最快的宽体探测器 CT 上使用 SSF1 时在冠脉以外的区域运动伪影依然难以消除^[3, 6], 本文研究结果也显示如此。而最新开发的 SSF2 将冻结技术扩展到单个扫描体积内的整个心脏, 不仅可以进一步减少冠状动脉运动伪影, 而且还可以消除其他心脏结构如心脏瓣膜的运动伪影^[6]。SSF2 算法通过表征心脏沿 3 个轴向的运动特征并在规定的心脏相位中自适应地补偿运动, 从而将运动校正扩展到整个心脏, 有效地校正冠脉及以外的心脏结构运动(包括极端运动和 z 轴运动)伪影, 提供更高的校正强度^[3, 12]。具体来说它是在每个体素中自动获取的局部运动路径(与测量数据子

集中通过该体素的路径一致), 一旦确定了血管的运动路径, 数据就会根据相应的 X 射线投影时间被分解成一系列数据集。通过运动场对系列中每个体素进行空间变形, 可以将运动状态从对应的时刻映射到由确定的期相给定的中心期相, 从而实现全心运动校正^[12]。本文研究结果表明应用该算法后, 作为经导管主动脉瓣置换术前 CT 评估, 收缩末期及舒张中期时相 CT 数据的图像质量有了显著改善。

而在主动脉瓣环测量方面, 两位医师应用 SSF2-35% 和 SSF2-75% 图像对主动脉瓣环短轴、环长轴、面积、平均直径和周长的测量一致性区间较 SSF1-35% 和 SSF1-75% 图像更小, 而且在 75% 期相时两种图像对于左冠高度的测量一致性差异具有统计学意义。一般来说在心脏收缩舒张过程中主动脉根部最大尺寸大部分会在收缩期出现^[4-5], 而人工瓣膜尺寸大小的选择也多基于收缩期, 因此收缩期的扫描数据是最具有价值的^[4-5]。但是, 研究显示也有一部分患者在室间隔增厚并反向运动时, 主动脉瓣环的最大尺寸也有可能出现在舒张期, 所以有时舒张期的评估也具有意义, 也常用于术前指导 THV 大小和选择的决策^[4]。

左冠高度测量上 SSF2 能显著提高一致性。随着技术的发展新的《TAVR 术前 CT 成像专家共识》中加入了冠脉高度(冠脉开口到主动脉瓣环的距离)作为 TAVR 术前 CT 评估的新参数^[9], 冠脉闭塞作为严重的 TAVR 并发症, 其发生概率为 0.66%, 且预后差, 死亡率高达 40.9%^[13], 其与人工瓣膜支架的尺寸选择密切相关, 瓣环离冠脉开口较近可能导致冠状动脉闭塞风险增加。因此准确测量冠脉高度对于选择合适尺寸的人工瓣膜支架从而减少 TAVR 并发的冠脉闭塞有重要意义^[12]。此外, 本文研究并未控制患者心率, 在 57 例患者中心率大于 75 bpm 者 17 人, 心律不齐者 22 人, 房颤者 14 人。在心律不齐伴高心率的患者中, SSF2 在 35% 和 75% 期相仍然获得了更好的图像质量(图 4)。在复杂人群中主动脉瓣环测量一致性也得到

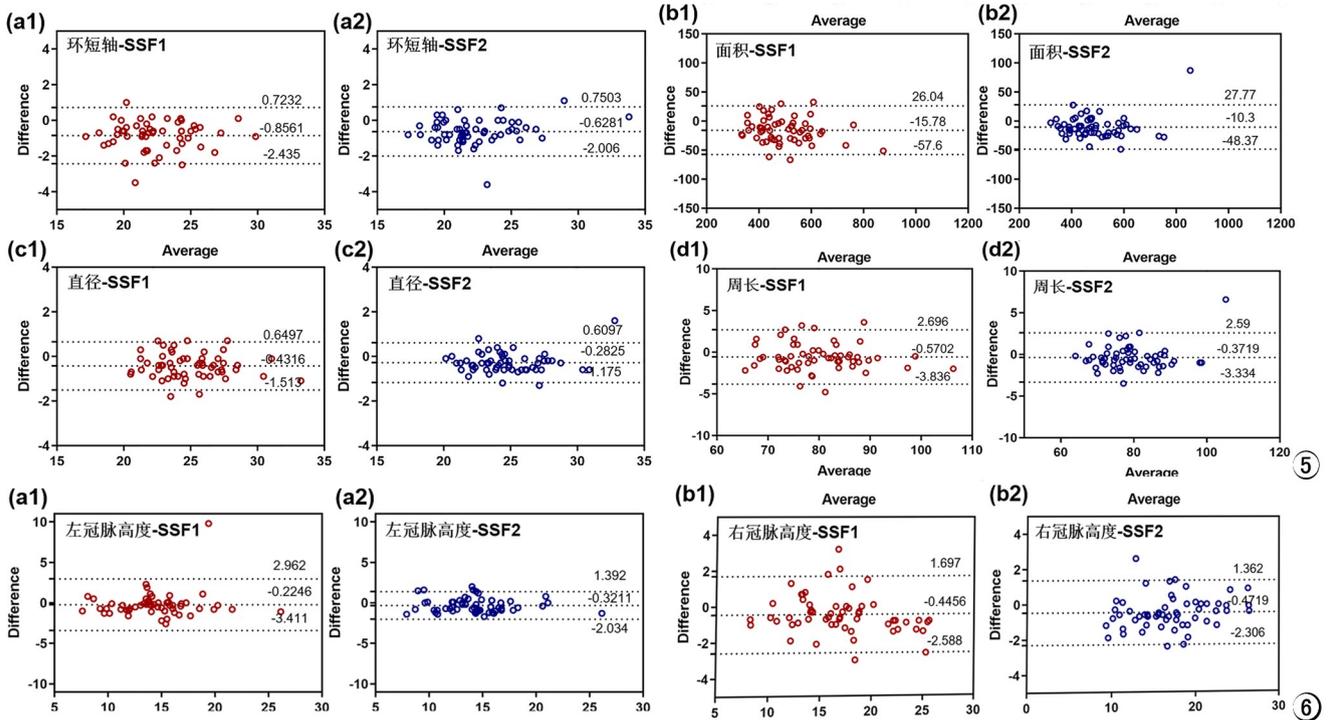


图 5 Bland-Altman 分析散点图,在 35%期相时分别用 SSF1 与 SSF2 重建的图像上测量主动脉瓣结构一致性数据对比;SSF1 图像上测量的环短轴(a1)、面积(b1)、平均直径(c1)及周长(d1);SSF2 图像测量的环短轴(a2)、面积(b2)、平均直径(c2)及周长(d2)。SSF2 图像上环短轴(a2)、面积(b2)、平均直径(c2)及周长(d2)一致性极限(limit of agreement, LOA)较 SSF1 图像上环短轴(a1)、面积(b1)、平均直径(c1)及周长(d1)更窄,表明 SSF2 具有较高的一致性。图 6 Bland-Altman 分析散点图,在 75%期相时分别用 SSF1 与 SSF2 重建的图像上测量左、右冠脉开口高度一致性数据对比;SSF1 图像上测量的左冠脉高度(a1)和右冠脉高度(b1);SSF2 图像上测量的左冠脉高度(a2)和右冠脉高度(b2)。SSF2 图像上左冠脉高度(a1)和右冠脉高度(b1)的一致性极限(limit of agreement, LOA)较 SSF1 图像上左冠脉高度(a2)和右冠脉高度(b2)更窄,表明 SSF2 具有较高的一致性。

提高。综上所述,SSF2 在对 TAVR 术前 CT 评估主动脉瓣中具有很高的临床和研究意义。

但是我们的研究有 4 个局限性。首先,这是一项来自单一机构的回顾性研究样本量相对较少。此外,虽然纳入了高心率、房颤、心律不齐的患者,但并未进行分层,针对性研究 SSF2 对复杂心跳情况的 CT 图像影响。另外,未深入研究对需置换的人工瓣膜的选择的影响。而且,只针对单一供应商的运动校正算法,其他供应商的运动校正算法是否同样适用本研究结果还需要进一步讨论。

与冠脉运动追踪冻结技术(SSF1)相比,全心运动追踪冻结技术(SSF2)可以显著减少心脏运动伪影,提高 TAVR 术前患者心脏 CT 数据的图像质量,并且对于主动脉瓣环结构测量具有更高的一致性。

参考文献:

[1] 国家心血管病专家委员会微创心血管外科专业委员会.中国经导管主动脉瓣置入术(TAVI)多学科专家共识[J].中华胸心血管外科杂志,2018,34(12):705-712. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1001.

4497.2018.12.001.

[2] Achenbach S, Delgado V, Hausleiter J, et al. SCCT expert consensus document on computed tomography imaging before transcatheter aortic valve implantation (TAVI)/transcatheter aortic valve replacement (TAVR) [J]. J Cardiovascular Computed Tomography, 2012, 6(6):366-380. DOI: 10.1016/j.jcct.2012.11.002.

[3] Liang J, Wang H, Xu L, et al. Impact of SSF on diagnostic performance of coronary computed tomography angiography within 1 heart beat in patients with high heart rate using a 256-row detector computed tomography [J]. J Comput Assist Tomogr, 2018, 42(1):54-61.

[4] Sucha, Dominika, Tuncay, et al. Does the aortic annulus undergo conformational change throughout the cardiac cycle? A systematic review [J]. Eur Heart J Cardiovascular Imaging, 2015, 16(12):1307-1317. DOI: 10.1093/ehjci/jev210.

[5] Blanke P, Russe M, Leipsic J, et al. Conformational pulsatile changes of the aortic annulus [J]. JACC Cardiovascular Interventions, 2012, 5(9):984-994. DOI: 10.1016/j.jcin.2012.05.014.

[6] Soon, Jeanette, Sulaiman, et al. The effect of a whole heart motion-correction algorithm on CT image quality and measurement reproducibility in Pre-TAVR aortic annulus evaluation [J]. J Cardiovas-

- cular Computed Tomography, 2016, 10 (5): 386-390. DOI: 10.1016/j.jcct.2016.08.001.
- [7] 李昊岩,孙记航,田宏伟,等.第二代全心运动校正算法改善高心率儿童心脏 CTA 瓣膜图像质量[J].中国医学影像技术,2021,37(12):37.
- [8] Harris BS, De Cecco CN, Schoepf UJ, et al. Dual-source CT imaging to plan transcatheter aortic valve replacement: accuracy for diagnosis of obstructive coronary artery disease [J]. Radiology, 2015, 275(1): 80-88. DOI: 10.1148/radiol.14140763.
- [9] 国晶晶,李东.解读“国际心血管 CT 协会 TAVI/TAVR 相关 CT 成像的专家共识”[J].国际医学放射学杂志,2019,42(3):7. DOI: 10.19300/j.2019.B7155.
- [10] 王彪,陈兴灿,应小丰,等.冠状动脉追踪冻结技术在回顾性心电图门控下改善冠脉 CTA 图像质量的应用价值[J].放射学实践,2017,32(4):427-430.
- [11] 罗开选,查云飞,张亮,等.新型 256 层螺旋 CT 自由心率 CCTA 评价高心率冠状动脉狭窄患者诊断准确性[J].放射学实践,2018,33(6):555-560. DOI: 10.13609/j.cnki.1000-0313.2018.06.002.
- [12] Liang, Junfu, Sun, et al. Second-generation motion correction algorithm improves diagnostic accuracy of single-beat coronary CT angiography in patients with increased heart rate [J]. Eur Radiology, 2019, 29(8): 4215-4227. DOI: 10.1007/s00330-018-5929-6.
- [13] Ribeiro HB, Webb JG, Makkar RR, et al. Predictive factors, management, and clinical outcomes of coronary obstruction following transcatheter aortic valve implantation: insights from a large multicenter registry [J]. J Am College of Cardiology, 2013, 62(17): 1552-1562. DOI: 10.1016/j.jacc.2013.07.040.

(收稿日期:2023-05-22 修回日期:2023-10-27)

本刊网站及远程稿件处理系统投入使用

本刊网站与远程稿件处理系统已开发测试完毕,已于 2008 年 3 月 1 号正式开通投入使用。

作者进行网上投稿及查稿具体步骤如下:请登录《放射学实践》网站(<http://www.fsxsj.net>)点击进入首页 → 点击“作者投稿” → 按提示注册(请务必按系统提示正确填写个人信息,同时记住用户名和密码,以便查询稿件处理进度) → 用新注册的用户名和密码登录 → 点击“作者投稿”进入稿件管理页面 → 点击“我要投稿” → 浏览文件 → 上传文件(浏览文件后请点击后面的“上传”按钮,只有系统提示“稿件上传成功”方可进行下一步录入操作,文章须以 WORD 格式上传,图表粘贴在文章中) → 录入稿件标题、关键词等 → 最后点击“确定”即可完成投稿。投稿后请速寄审稿费(100 元/篇)以使稿件迅速进入审稿处理。

作者自投稿之日起可不定期登录本刊网站查看稿件处理进度,不必打电话或发邮件查询,具体步骤如下:用注册过的用户名和密码登录 → 点击“作者查稿”进入稿件管理页面 → 点击左侧导航栏“我的稿件库” → “稿件状态”显示稿件处理进度 → 点击“查看” → 选择“当前信息”或“全部信息”查看稿件处理过程中的具体信息。稿件退修和催审稿费(版面费)的信息作者亦可在注册时填写的邮箱中看到,作者在邮箱看到相关信息后须进入本系统进行相应处理。

作者如从邮箱和邮局投稿(或网上投稿成功后又从邮箱或邮局再次投稿),本刊须花费大量精力将稿件录入系统中,部分稿件重复多次处理,这给我们的稿件统计及处理工作带来巨大困难。本刊作者需登录本刊网站投稿,如果通过邮箱或邮局投稿,本刊会通知您通过网上投稿。

由于准备时间仓促及经验不足,网站及远程稿件处理系统必然会存在一些缺点和不足之处,希望各位影像同仁不吝赐教,多提宝贵意见,予以指正。

如果您在投稿中遇到什么问题,或者对本系统及网站有好的意见和建议,请及时联系我们。

联系人:石鹤 明桥 联系电话:027-69378385 15926283035