

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2023.01.001

医学放射物理

AlignRT在乳腺癌术后放疗体表引导摆位中感兴趣区优选

李俊禹, 杨敬贤, 于松茂, 卢子红, 周舜, 陈吉祥, 王振飞, 丁大庆, 王美娇, 杜乙

北京大学肿瘤医院暨北京市肿瘤防治研究所放疗科/恶性肿瘤发病机制及转化研究教育部重点实验室, 北京 100142

【摘要】目的:光学体表追踪系统AlignRT引导乳腺癌术后放疗摆位中,通过对比3种典型感兴趣区(ROI)AlignRT与CBCT误差之间摆位一致性差异,确定临床最优ROI勾画范围。**方法:**回顾性分析33例利用AlignRT引导摆位的乳腺癌患者病例数据,摆位结束后记录197次CBCT同分次下全胸、患侧乳腺和胸部刚性3种ROI的AlignRT误差数据,CBCT与定位CT进行基于脊柱6维配准靶区微调后,获得6维CBCT误差,AlignRT与CBCT误差差值绝对化后用于量化摆位一致性,比较全胸、患侧乳腺和胸部刚性这3组ROI的AlignRT误差及摆位一致性差异。**结果:**AlignRT引导摆位CBCT误差线性方向/旋转方向在 $\pm 0.50\text{ cm}/\pm 2.0^\circ$ 之间的占比为99.92%。全胸、患侧乳腺、胸部刚性3组ROI的AlignRT误差在Pitch($P<0.001$)、Roll($P=0.002$)方向差异有统计学意义。全胸ROI在x、Rtn、Pitch和Roll方向摆位一致性均优于患侧乳腺和胸部刚性ROI, x($P=0.001$)、Rtn($P<0.001$)、Roll($P=0.001$)方向差异有统计学意义,Pitch($P=0.541$)方向差异无统计学意义。**结论:**本中心基于AlignRT引导乳腺癌术后放疗摆位流程使CBCT误差均满足临床要求。包括双侧乳腺/胸壁、胸骨、肋骨和锁骨的全胸ROI摆位一致性整体优于患侧乳腺和胸部刚性ROI,应作为乳腺癌术后放疗AlignRT引导摆位首选ROI勾画范围。

【关键词】乳腺肿瘤;光学体表追踪系统;感兴趣区;摆位误差

【中图分类号】R737.9;R811.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2023)01-0001-06

Determining the optimal region of interest for AlignRT-guided positioning in postoperative radiotherapy for breast cancer

LI Junyu, YANG Jingxian, YU Songmao, LU Zihong, ZHOU Shun, CHEN Jixiang, WANG Zhenfei, DING Daqing, WANG Meijiao, DU Yi

Key Laboratory of Carcinogenesis and Translational Research (Ministry of Education/Beijing)/Department of Radiation Oncology, Peking University Cancer Hospital & Institute, Beijing 100142, China

Abstract: Objective To determine the optimal breast region of interest (ROI) among 3 typical suggested ROI for AlignRT-guided positioning in postoperative radiotherapy for breast cancer by comparing the positioning consistency between AlignRT errors and CBCT errors. **Methods** The clinical data of 33 cases of breast cancer patients undergoing AlignRT-guided positioning were analyzed retrospectively. After positioning, the AlignRT errors of 3 ROI, namely the whole chest region, the ipsilateral breast region, and the chest rigid region, were recorded for 197 CBCT. The registration results of CBCT and the positioning CT were fine-tuned based on the spine's 6-dimensional registration target area, and the 6-dimensional CBCT errors were obtained. The absolute values of the differences between AlignRT errors and CBCT errors were used to quantify the positioning consistency. The AlignRT errors and positioning consistency in 3 different groups were compared. **Results** The proportion of deviations in linear directions (within 0.5 cm)/rotation directions (within 2.0°) of CBCT data in AlignRT-guided positioning was 99.92%. There were statistically significant differences in AlignRT errors in the Pitch ($P<0.001$) and Roll ($P=0.002$) directions among 3 ROI groups. The whole chest region as an optimal breast ROI in patient setup consistency shows a superiority than ipsilateral breast region and the chest rigid region in x ($P=0.001$), Rtn ($P<0.001$), Pitch ($P=0.541$) and Roll ($P=0.001$) directions. **Conclusion** The usage of AlignRT as a breast radiotherapy positioning guide tool to minimize the patient positioning errors in CBCT satisfied clinical requirements. The positioning consistency using the whole chest region (including bilateral breast/chest wall, sternum, ribs and clavicle) as the optimal ROI has proven its suitability than ipsilateral breast region and the chest rigid region. The whole

【收稿日期】2022-07-10

【基金项目】北京市自然科学基金(1212011);国家自然科学基金(12005007);北京大学肿瘤医院科学研究基金(2021-14, KC2204);国家重点研发计划(2019YFF01014405)

【作者简介】李俊禹,主管技师,研究方向:放射治疗技术,E-mail: lijunyu5534@126.com

【通信作者】杜乙,高级工程师,研究方向:医学物理,E-mail: yi.du@hotmail.com

chest region as the benchmark for scanning region in AlignRT system is the optimal ROI in postoperative radiotherapy for breast cancer.

Keywords: breast cancer; optical surface monitoring system; region of interest; positioning error

前言

放疗加速器机载影像系统对患者体位校验和靶区精准定位至关重要^[1],特别是锥形束CT系统(Cone-Beam Computer Tomography, CBCT)已成为图像引导放疗摆位误差评估的金标准^[2-3]。然而CBCT存在辐射健康风险、无法实时成像等问题^[4-5],新兴的光学体表追踪系统AlignRT以无辐射、亚毫米精度、实时6维误差反馈的技术优势,开始广泛应用于放疗前辅助摆位、呼吸门控与治疗中的运动监测^[6-8]。

AlignRT系统将实时获取的光学体表与参考体表配准,得到6维位置偏差,配准范围为自主勾画的感兴趣区(Region of Interest, ROI),因此ROI勾画范围的选择至关重要。结合本中心临床经验,总结出ROI勾画“5项优选原则”,即:(1)勾画裸露皮肤区域,避免勾画衣物、体位固定装置等;(2)勾画较稳定的刚性区域,避免手臂等易活动部位或腋下等皮肤松弛区域;(3)勾画靶区附近区域,避免因距离等中心过远而引入额外误差;(4)勾画区域应具备丰富几何轮廓变化,避免勾画过于平坦区域;(5)勾画区域应具有一定面积,尽可能让多个摄像头同时捕捉。然而上述ROI勾画原则在乳腺癌术后放疗体表引导摆位中并不完全适用,这与乳腺癌术后放疗的特殊性密切相关,主要体现在:虽然乳腺/胸壁、内乳、锁骨及腋窝等典型放疗靶区均贴近体表,但这些区域的体表极易形变,同时呼吸运动、手臂位置、皮肤松弛等因素会进一步影响体表稳定性;仰卧位下术后患者的乳腺体表的几何轮廓变化较为匮乏,影响体表监测精度。

本研究针对AlignRT在乳腺癌术后光学体表引导放疗中的ROI勾画范围问题,通过对位置误差与摆位一致性等进行统计学分析,探讨全胸、患侧乳腺和胸部刚性区3种临床典型ROI的优选问题,为优化临床实践提供参考。

1 资料与方法

1.1 临床资料

回顾性分析33例2019年8月至2020年2月于北京大学肿瘤医院行乳腺癌放疗患者的临床资料,年龄33~72岁,中位年龄47岁,身体质量指数(Body Mass Index, BMI)为20.00~32.75 kg/m²,中位BMI为23.94 kg/m²。其中,真空垫固定18例,颈胸膜固定15

例;改良根治术18例,保乳术15例;肿瘤发生在左侧19例,右侧14例。

1.2 模拟定位和计划设计

所有患者均采用仰卧、平躺、双手上举抱头体位。体板、真空垫与治疗床相对位置固定。膜具或真空垫制作完成后于Siemens大孔径CT行定位CT扫描,扫描范围为下颌骨至肝下缘,扫描条件为120 kV、190 mAs,层厚0.5 cm,定位CT扫描之前拍摄患者体位照片。采用Varian Eclipse放射治疗计划系统进行计划设计,于配备VisionRT公司的AlignRT以及6维治疗床的Varian VitalBeam加速器上进行治疗。

1.3 AlignRT系统与ROI勾画范围

本中心AlignRT系统由计算机工作站和3个摄像单元组成,每个摄像单元由1个投影仪和2个摄像机构成。投影仪将伪随机的红外散斑图案投射到患者表面生成用于重建的原始纹理数据,在校准中确定位置和方向的2个摄像机将体表对应点的二维信息通过“三角测量法”转换成三维坐标,并可可视化患者的实时体表图像。3个摄像单元生成的实时体表经由计算机合并后与参考体表进行刚性配准,匹配结果以AlignRT的6维误差形式实时显示。

本研究中3种ROI勾画范围分别为:(1)全胸ROI,上界锁骨,下界肋骨,侧面腋中线;(2)患侧乳腺ROI,上界锁骨,下界肋骨,侧面腋中线和体中线;(3)胸部刚性ROI,整个胸部中的骨性结构。全胸、患侧乳腺和胸部刚性3种ROI分别侧重勾画整个胸部、患侧区域和胸部骨性结构(图1)。3种ROI勾画范围的主要区别在于:全胸较患侧乳腺ROI增加健侧结构,全胸较胸部刚性ROI增加双侧乳腺,胸部刚性较患侧乳腺ROI增加健侧结构,但不包括乳腺等软组织。

本研究中3种临床典型ROI勾画范围均包含锁骨、胸骨和肋骨等骨性区域,原因为:(1)部分乳腺患者靶区包括锁骨上下区;(2)乳腺为软组织,易发生形变,锁骨、胸骨和肋骨相对于乳腺更加稳定;(3)乳腺形状大致为半球形,如果ROI仅由乳腺表面组成,则由于半球形的对称性,旋转方向误差较难探测,ROI增大到锁骨、胸骨和肋骨,增加了ROI表面几何特征,更有利于探测线性误差及旋转误差。

1.4 摆位流程和误差获取

首次治疗根据CT图像指示患者体位进行姿势摆位后使用体表标记线调整体位,加速器复位后行

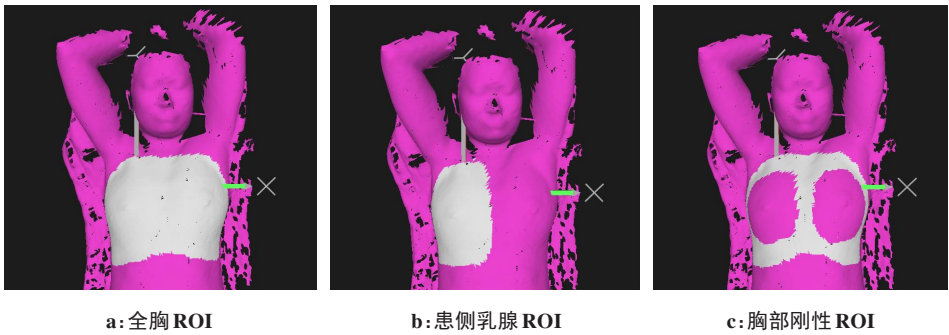


图1 乳腺癌3种ROI勾画范围

Figure 1 Three kinds of regions of interest (ROI) for breast cancer

CBCT扫描。CBCT图像与定位CT图像分别进行两步配准:首先体板异形结构配准获取参考床值;然后靶区附近脊柱基于骨性自动配准后,经由医生和治

疗师根据靶区对配准结果进行微调,获取左右(x轴向)、升降(y轴向)、进出(z轴向)、床旋转(Rtn)、进出倾斜(Pitch)和左右转动(Roll)6个维度的CBCT误差。根据CBCT的6维误差移床,治疗结束后,真空垫固定患者由AlignRT直接获取参考体表,颈胸膜固定患者取下膜具后获取参考体表。在参考体表上分别勾画全胸、患侧乳腺和胸部刚性这3种ROI。

后续治疗患者姿势摆位,治疗床自动走位后,将首次治疗AlignRT获取的体表作为参考体表,使用全胸ROI实时调整体位,使AlignRT的6维误差尽可能低(线性方向/旋转方向阈值为 $\pm 0.50\text{ cm}/\pm 2.0^\circ$),摆位结束后通过切换ROI的方式分别获得全胸、患侧乳腺和胸部刚性ROI的6维AlignRT误差,行CBCT扫描获取CBCT的6维误差。首次治疗与后续治疗根据CBCT误差6维移床后,AlignRT均获取实时监测体表,实现门控治疗功能。门控治疗阈值线性方向/旋转方向为 $\pm 0.30\text{ cm}/\pm 2.0^\circ$ 。本研究摆位流程注意事项有:手臂和下颌位置的不确定性直接影响乳腺癌靶区的形状和位置,进而对AlignRT引导摆位的精度产生影响^[9],并且由于手臂位置的差异会引起肩关节位置的变化,易引起与放射相关的肩关节病变的发生^[10],本研究通过CT图像进行摆位有利于提高手臂和下颌位置重复性;治疗床位于参考床值处后使用AlignRT引导摆位减少由于固定装置的相对偏差对摆位误差和治疗剂量准确性的影响^[11]。针对放疗过程中胸部需要添加Bolus的患者,首次治疗获取参考体表时需取下Bolus,并且后续治疗中Bolus于AlignRT引导摆位结束后再行添加,避免Bolus位置差异和Bolus对红外散斑图案的反射作用对AlignRT摆位精度产生影响。

全部患者前3次进行CBCT验证,随后每周进行一次CBCT验证,取33例患者从第二次放疗至治疗

结束使用AlignRT引导摆位的197次CBCT同分次下3种ROI AlignRT与CBCT误差数据进行统计学分析。

1.5 统计学方法

通过分析33例乳腺癌术后放疗患者在AlignRT引导摆位下197次CBCT6维误差分布,判断CBCT误差是否满足临床要求。通过对3种ROI的6维方向AlignRT误差数据进行正态性检验后,行多个相关样本Friedman M检验,探究不同ROI的AlignRT误差差异。AlignRT与CBCT误差差值绝对化后用于量化摆位一致性,通过对3种ROI的6维方向摆位一致性数据进行正态性检验后,行多个独立样本的Kruskal-Wallis H检验,探究不同ROI摆位一致性差异,筛选出临床摆位最优ROI。AlignRT误差、摆位一致性均以中位数(下四分位数~上四分位数)表示, $P<0.05$ 表示差异有统计学意义。

2 结果

2.1 AlignRT引导乳腺术后放疗CBCT误差分布

33例乳腺癌术后放疗患者AlignRT全胸ROI引导摆位下197分次CBCT误差分布见图2。CBCT误差线性方向/旋转方向在 $\pm 0.30\text{ cm}/\pm 1.5^\circ$ 内的占比为96.62%,在 $\pm 0.50\text{ cm}/\pm 2.0^\circ$ 内的占比为99.92%。

2.2 3种ROI之间AlignRT误差比较

在参与配准的实时体表与参考体表均相同的情况下,全胸、患侧乳腺、胸部刚性3种ROI的AlignRT误差在Pitch($P<0.001$)、Roll($P=0.002$)方向差异有统计学意义,见表1。对Pitch、Roll方向进行成对比较:Pitch方向,全胸与患侧乳腺ROI($P<0.001$)、患侧乳腺与胸部刚性ROI($P<0.001$)比较,差异有统计学意义;Roll方向,全胸与患侧乳腺ROI($P=0.002$)、全胸与胸部刚性ROI($P=0.041$)比较,差异有统计学意义。

2.3 3种ROI摆位一致性比较

全胸ROI组在x、Rtn、Pitch和Roll方向摆位一致性优于患侧乳腺和胸部刚性ROI组,但仅x($P=0.001$)、Rtn

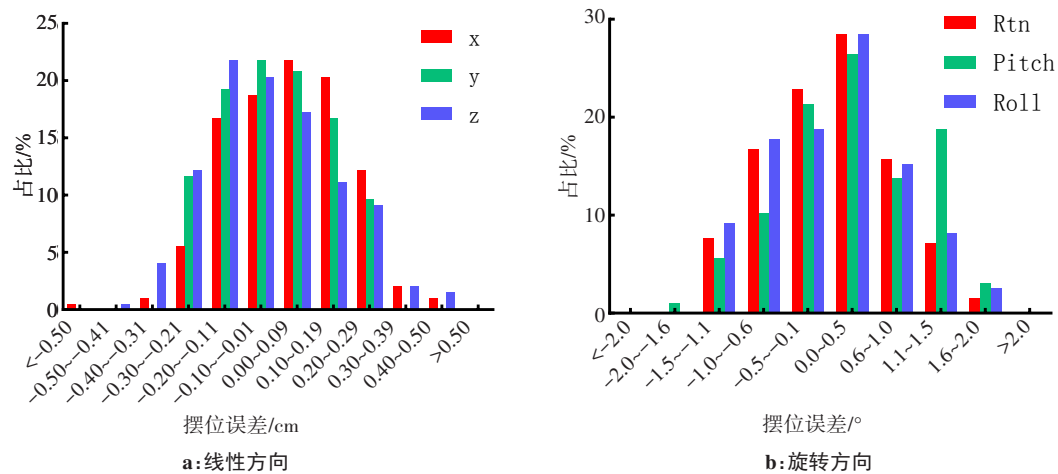


图 2 乳腺癌术后放疗 6 维方向 CBCT 误差分布图

Figure 2 Six-dimensional CBCT errors distributions in postoperative radiotherapy for breast cancer

表 1 乳腺癌术后放疗 3 种 ROI 勾画范围 AlignRT 误差比较

Table 1 Comparison of AlignRT error among 3 kinds of ROI in postoperative radiotherapy for breast cancer

ROI	中位数(下四分位数~上四分位数)					
	x/cm	y/cm	z/cm	Rtn/°	Pitch/°	Roll/°
全胸	0.00(-0.07~0.08)	0.13(0.00~0.30)	0.04(-0.07~0.11)	0.00(-0.55~0.70)	0.20(-0.70~1.10)	0.10(-0.60~0.70)
患侧乳腺	0.03(-0.11~0.15)	0.13(-0.01~0.31)	0.03(-0.10~0.15)	0.00(-0.70~0.70)	0.60(-0.15~1.40)*	0.20(-0.50~1.00)*
胸部刚性	0.00(-0.09~0.10)	0.10(-0.05~0.31)	0.04(-0.13~0.15)	0.00(-0.50~0.60)	0.40(-0.45~1.30)#	0.10(-0.40~0.60)*
P 值	0.882	0.183	0.973	0.725	0.000	0.002

与全胸 ROI 比较, * $P<0.05$; 与患侧乳腺 ROI 比较, # $P<0.05$

($P<0.001$)、Roll($P=0.001$)方向差异有统计学意义,见表 2。对 x、Rtn、Roll 方向进行成对比较;x、Rtn、Roll 方向,全胸与患侧乳腺 ROI($P=0.000\sim0.003$)、患侧乳腺与

胸部刚性 ROI($P=0.003\sim0.044$)比较,差异均有统计学意义,全胸与胸部刚性 ROI($P=0.597\sim1.000$)比较,差异均无统计学意义,见图 3。

表 2 乳腺癌术后放疗 3 种 ROI 勾画范围摆位一致性比较

Table 2 Comparison of positioning consistency among 3 kinds of ROI in postoperative radiotherapy for breast cancer

ROI	中位数(下四分位数~上四分位数)					
	x/cm	y/cm	z/cm	Rtn/°	Pitch/°	Roll/°
全胸	0.11(0.05~0.19)	0.21(0.09~0.33)	0.15(0.07~0.26)	0.50(0.30~0.90)	0.60(0.30~1.20)	0.50(0.20~1.00)
患侧乳腺	0.15(0.07~0.28)*	0.22(0.11~0.33)	0.17(0.08~0.29)	0.80(0.40~1.25)*	0.70(0.35~1.30)	0.80(0.40~1.40)*
胸部刚性	0.12(0.04~0.21)#	0.19(0.09~0.32)	0.14(0.06~0.26)	0.60(0.30~1.00)#	0.70(0.30~1.40)	0.60(0.30~1.10)#
P 值	0.001	0.383	0.311	0.000	0.541	0.001

与全胸 ROI 比较, * $P<0.05$; 与患侧乳腺 ROI 比较, # $P<0.05$

3 讨论

据 2020 年全球癌症统计数据显示,女性乳腺癌已经超越肺癌成为全球癌症发病率(11.7%)最高的癌种^[12],2021 年第四版 NCCN 指南推荐乳腺癌患者行术后放疗可明显降低复发率,改善患者预后^[13],近年来光学体表追踪系统 AlignRT 的辅助摆位和实时

监测功能广泛应用于与体表位置关系紧密的乳腺肿瘤中^[14-15],其摆位精度普遍优于传统体表标记线摆位^[9],应用 AlignRT 引导摆位不仅可以减少 PTV 外扩边界^[16],同时可以减少正常组织的放射损伤^[17]。Laaksomaa 等^[18-20]指出每天治疗使用相同 y 方向床值和保证手臂位置重复性有助于提高 AlignRT 引导摆

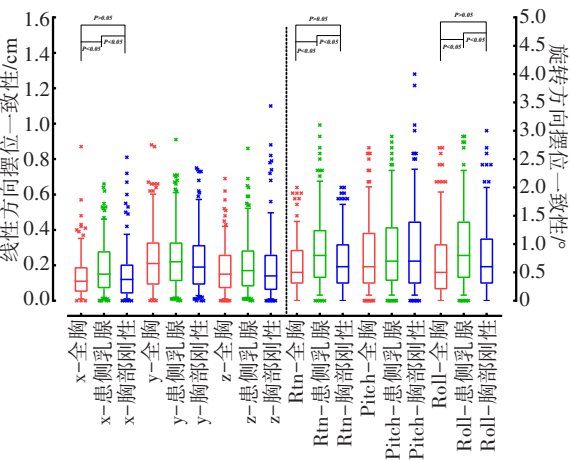


图3 乳腺癌术后放疗3种ROI勾画范围摆位一致性比较箱式图

Figure 3 Box plot of positioning consistency comparison among 3 kinds of ROI in postoperative radiotherapy for breast cancer

×代表超过97.5%或低于2.5%

位精度。本研究摆位流程治疗床值均位于参考床值处,可减少固定装置偏差对摆位误差的影响。Sauer等^[21]和Alderliesten等^[22]研究发现ROI勾画范围包括手臂、腋窝等易活动部位使AlignRT误差与CBCT误差一致性下降,本研究3种ROI均未包括腋窝和手臂,通过CT图像进行体位姿势摆位确保了手臂位置重复性。

乳腺癌术后放疗患者AlignRT引导摆位下CBCT误差线性方向/旋转方向在 $\pm 0.50\text{ cm}/\pm 2.0^\circ$ 内的占比为99.92%,满足临床要求。如表1所示,在参与配准的实时体表与参考体表均相同的情况下,不同ROI勾画范围AlignRT误差不同,Pitch、Roll方向有统计学差异,不同ROI勾画范围对AlignRT误差产生影响,进而影响摆位误差^[22]。如表2所示,对3种临床典型ROI摆位一致性进行分析得出全胸与胸部刚性ROI的6维方向摆位一致性均优于患侧乳腺ROI,x、Rtn、Roll方向有统计学差异。全胸和胸部刚性ROI较患侧乳腺ROI在患者左右方向延伸至健侧乳腺腋中线处,ROI的增大进一步增加了表面稳定性和几何特征;(2)侧面延伸到健侧腋中线处的ROI使体表探测到x、Rtn和Roll方向误差更加准确;(3)3个摄像单元均能观察到足够大小的乳腺表面和周围皮肤用于重建和配准;(4)全胸和胸部刚性ROI更能反映脊柱的体位重复性,特别是旋转方向重复性,脊柱位置不确定性使作为乳腺放疗危及器官的心脏和肺的实际剂量与计划剂量产生差异^[23]。胸部刚性ROI摆位一致性在y、z方向优于全胸ROI,与乳腺水肿、松弛和形变有关^[24-25],全胸ROI摆位一致性整体优于胸部刚性ROI原因在于全胸ROI综合考虑了软组织(乳腺)

和骨性(锁骨、肋骨、胸骨和脊柱)位置的重复性。

本研究均使用AlignRT全胸ROI引导摆位,未使用全部3种ROI分别引导摆位,并且所有颈胸膜固定患者选用双手上举抱头体位,未使用诸如乳腺臂托等手臂支撑装置,不同ROI引导摆位对乳腺、骨性摆位误差的影响和手臂支撑装置对本研究结论影响尚不明确,有待后续做进一步研究。有研究指出针对乳腺体积较大、松弛和下垂严重患者使用以骨性结构为主的刚性ROI引导摆位,摆位一致性更佳^[21],本研究同时也得出全胸ROI摆位一致性虽整体优于胸部刚性ROI但6维方向均无统计学差异的结论,针对乳腺癌特殊生理特征患者ROI选择有待扩充样本量后进行进一步研究。本研究采用颈胸膜或真空垫固定体位,其他体位固定方式,诸如乳腺托架、多功能板等全胸ROI摆位精度需要进行进一步研究。本研究首次治疗AlignRT获取参考体表以及后续治疗取得AlignRT误差时患者均采用自由呼吸模式,参考体表与实时体表呼吸时相差异对CBCT误差和摆位一致性的影响并未考虑,后期针对使用AlignRT的“gated capture”功能选取呼吸中间幅度的表面作为参考体表或AlignRT结合4DCT作为呼吸门控的监控工具进行门控治疗以进行进一步研究。

4 结 论

本中心基于AlignRT引导乳腺癌术后放疗的摆位流程使CBCT误差均满足临床要求。包括双侧乳腺/胸壁、胸骨、肋骨和锁骨的全胸ROI摆位一致性较患侧乳腺和胸部刚性ROI均有所提高,应作为乳腺癌术后放疗AlignRT引导摆位首选ROI勾画范围。

【参考文献】

[1] Topolnjak R, Sonke JJ, Nijkamp J, et al. Breast patient setup error assessment: comparison of electronic portal image devices and cone-beam computed tomography matching results[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2010, 78(4): 1235-1243.

[2] Nabavizadeh N, Elliott DA, Chen Y, et al. Image guided radiation therapy (IGRT) practice patterns and IGRT's impact on workflow and treatment planning: results from a national survey of American Society for Radiation Oncology members[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2016, 94(4): 850-857.

[3] Jiang P, Liu ZY, Jiang WJ, et al. Detection of setup errors with a body-surface laser-scanning system for whole-breast irradiation after breast-conserving surgery[J]. J Appl Clin Med Phys, 2022, 23(5): e13578.

[4] Schneider U, Halg R, Besserer J. Concept for quantifying the dose from image guided radiotherapy[J]. Radiat Oncol, 2015, 10: 188.

[5] Wang W, Yu T, Xu M, et al. Setup error assessment and correction in Planar kV image- versus cone beam CT image-guided radiation therapy: a clinical study of early breast cancer treated with external beam partial breast irradiation[J]. Technol Cancer Res Treat, 2019, 18: 1-6.

[6] Hoisak JD, Pawlicki T. The role of optical surface imaging systems in radiation therapy[J]. Semin Radiat Oncol, 2018, 28(3): 185-193.

[7] Hattel SH, Andersen PA, Wahlstedt IH, et al. Evaluation of setup and intrafraction motion for surface guided whole-breast cancer

- radiotherapy[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2019, 20(6): 39-44.
- [8] 李谭谭, 卮福奎, 戴建荣. 光学体表引导放疗技术的临床应用[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2021, 30(6): 648-652.
- Li TT, Huan FK, Dai JR. Clinical application of surface guided radiotherapy[J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2021, 30(6): 648-652.
- [9] Kügele M, Mannerberg A, Nørring Bekke S, et al. Surface guided radiotherapy (SGRT) improves breast cancer patient setup accuracy[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2019, 20(9): 61-68.
- [10] Johansen S, Fosså K, Nesvold IL, et al. Arm and shoulder morbidity following surgery and radiotherapy for breast cancer[J]. *Acta Oncol*, 2014, 53(4): 521-529.
- [11] Agostinelli S, Garelli S, Bellini A, et al. Helical tomotherapy of the breast: can thermoplastic immobilization improve the reproducibility of the treatment setup and the accuracy of the delivered dose?[J]. *Phys Med*, 2015, 31(1): 49-53.
- [12] Sung H, Ferlay J, Siegel RL, et al. Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries[J]. *CA Cancer J Clin*, 2021, 71(3): 209-249.
- [13] Gradishar WJ, Moran MS, Abraham J, et al. NCCN guidelines® insights: breast cancer, version 4.2021[J]. *J Natl Compr Canc Netw*, 2021, 19(5): 484-493.
- [14] Freisleder P, Kügele M, Öllers M, et al. Recent advanced in surface guided radiation therapy[J]. *Radiat Oncol*, 2020, 15(1): 187.
- [15] Crop F, Pasquier D, Baczkiwicz A, et al. Surface imaging, laser positioning or volumetric imaging for breast cancer with nodal involvement treated by helical TomoTherapy[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2016, 17(5): 200-211.
- [16] 李俊禹, 于松茂, 周舜, 等. 光学体表监测系统在乳腺癌术后放疗颈胸膜固定中的应用[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2020, 40(7): 524-528.
- Li JY, Yu SM, Zhou S, et al. Application of optical surface monitoring system (OSMS) during postoperative radiotherapy for breast cancer patients immobilized with neck and thorax thermoplastic mask[J]. *Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection*, 2020, 40(7): 524-528.
- [17] Krengli M, Loi G, Pisani C, et al. Three-dimensional surface and ultrasound imaging for daily IGRT of prostate cancer[J]. *Radiat Oncol*, 2016, 11(1): 159.
- [18] Laaksomaa M, Moser T, Kritz J, et al. Comparison of three differently shaped ROIs in free breathing breast radiotherapy setup using surface guidance with AlignRT®[J]. *Rep Pract Oncol Radiother*, 2021, 26(4): 545-552.
- [19] Laaksomaa M, Sarudis S, Rossi M, et al. AlignRT® and Catalyst™ in whole-breast radiotherapy with DIBH: is IGRT still needed?[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2019, 20(3): 97-104.
- [20] Laaksomaa M, Kapanen M, Skyttä T, et al. Estimation of optimal matching position for orthogonal kV setup images and minimal setup margins in radiotherapy of whole breast and lymph node areas[J]. *Rep Pract Oncol Radiother*, 2014, 19(6): 369-375.
- [21] Sauer TO, Ott OJ, Lahmer G, et al. Region of interest optimization for radiation therapy of breast cancer[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2021, 22(10): 152-160.
- [22] Alderliesten T, Sonke JJ, Betgen A, et al. Accuracy evaluation of a 3-dimensional surface imaging system for guidance in deep-inspiration breath-hold radiation therapy[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2013, 85(2): 536-542.
- [23] Skyttä T, Kapanen M, Laaksomaa M, et al. Improving the reproducibility of voluntary deep inspiration breath hold technique during adjuvant left-sided breast cancer radiotherapy[J]. *Acta Oncol*, 2016, 55(8): 970-975.
- [24] Seppälä J, Vuolukka K, Virén T, et al. Breast deformation during the course of radiotherapy: the need for an additional outer margin[J]. *Phys Med*, 2019, 65: 1-5.
- [25] Padilla L, Kang H, Washington M, et al. Assessment of interfractional variation of the breast surface following conventional patient positioning for whole-breast radiotherapy[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2014, 15(5): 4921.

(编辑:谭斯允)