

胸部肿瘤螺旋断层放疗系统setup功能位置矫正与误差来源分析



徐士飞^{1,2}, 冯欢¹, 刘海洋², 胡杰², 马露¹

1. 武汉大学公共卫生学院 (武汉 430071)

2. 武汉大学中南医院肿瘤化疗科 (武汉 430071)

【摘要】目的 探讨螺旋断层放疗 (helical tomotherapy, HT) 系统 setup 功能矫正位置误差的作用并分析误差的来源。**方法** 分析 36 例胸部肿瘤患者兆伏级计算机断层扫描图像信息, 收集首次放疗常规复位和第二次放疗 setup 功能复位扫描的图像, 并分别记录与千伏级计算机断层扫描图像配准的位置误差。比较 2 次复位误差间差异, 构建重复测量混合线性回归模型分析可能的误差来源。**结果** 除左右方向平移误差外, setup 功能复位后误差均值总体上均小于首次复位, 尤其在前后方向上, setup 功能复位后误差显著小于首次复位 (0.17 ± 1.14 vs. 5.04 ± 2.43 , $P < 0.001$)。多因素分析发现, 体质量指数 (BMI) 对胸部肿瘤前后方向平移误差和 Roll 旋转误差存在影响, 回归系数 β 分别为 0.191 ($P=0.001$) 和 0.034 ($P=0.040$)。此外, 前后方向平移误差还受到分次剂量和治疗次数的影响。未发现性别、年龄和疾病类型对位置误差有明确影响。**结论** setup 功能能够矫正位置误差, 尤其前后方向平移误差。BMI、分次剂量和治疗次数影响胸部肿瘤放疗前后方向位置精准性。

【关键词】 螺旋断层放疗系统; 位置误差; setup 功能; BMI

Localization correction of setup function for thoracic tumors using the helical tomotherapy system and analysis of error sources

Shi-Fei XU^{1,2}, Huan FENG¹, Hai-Yang LIU², Jie HU², Lu MA¹

1. School of Public Health, Wuhan University, Wuhan 430071, China

2. Department of Radiation and Medical Oncology, Zhongnan Hospital of Wuhan University, Wuhan 430071, China

Corresponding author: Lu MA, Email: malu@whu.edu.cn

【Abstract】Objective To discuss the role of the helical tomotherapy(HT) system setup function to correct positional errors and analyze error sources. **Methods** The megavoltage computed tomography (MVCT) image information of 36 patients with thoracic tumors were investigated. The scanned images obtained from the initial resetting and the second setup resetting were aligned using kilo-voltage computed tomography (KVCT), and localization errors were recorded. The localization errors between the initial and the second fractionated resetting were evaluated, and a model of repeated measurement mixed linear regression was developed to analyze error sources. **Results** Except for the translation error in the lateral directions, the

DOI: 10.12173/j.issn.1004-5511.202012002

通信作者: 马露, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, Email: malu@whu.edu.cn

<http://www.jnewmed.com>

average error of the setup function after reset was generally smaller than that of the initial reset. Especially in the vertical direction, the error of the setup function after reset was significantly smaller than that of the first reset (0.17 ± 1.14 vs. 5.04 ± 2.43 , $P < 0.001$). Multi-factor statistical analysis showed that BMI might induce translation and rotation in the vertical direction and Roll angle, the regression coefficient β were 0.191 ($P=0.001$) and 0.034 ($P=0.040$), respectively. Moreover, translational errors in the vertical direction might be influenced by fractionated dose and resetting approaches. Gender, age and clinical diagnosis were not found to result in obvious effects in localization errors in this study ($P > 0.05$). **Conclusion** Setup function can correct localization errors, especially translational errors in the vertical direction. The localization accuracy in the vertical direction may be influenced by BMI, fractionated dose and resetting approaches for patients with thoracic tumors having radiotherapy.

【Keywords】 Helical tomotherapy system; Localization error; Setup function; Body mass index

螺旋断层放疗 (helical tomotherapy, HT) 系统采用二进制多叶准直器、机架以及治疗床持续移动的独特设计, 能够输出适形的剂量分布, 因而被用于全脑全脊髓与单中心多靶区脑部转移瘤等复杂疾病的治疗。该治疗系统的一个显著特点是参照红色激光系统在虚拟等中心摆位, 在机架孔内的治疗等中心放射治疗。两中心相距 700 mm, 随着床进, 患者、治疗床、固定系统等重量超过床板支撑, 引起治疗床沉降, 导致位置的不确定性增加^[1-4]。目前矫正位置的不确定性主要通过图像引导放射治疗 (image-guided radiation therapy, IGRT) 技术移动治疗床矫正位置误差^[5-6]。但实际上, 环形机架上控制面板 setup 功能键, 能够矫正位置误差, 在此本文对 setup 功能在放疗过程中矫正位置误差的作用进行评估, 并对位置误差来源进行分析。

1 资料与方法

1.1 研究对象

回顾性收集 2019 年 1 月至 2019 年 5 月武汉大学中南医院肿瘤放化疗科收治的胸部肿瘤患者的图像配准信息与相关病历资料。纳入标准: ①患者年龄 ≤ 90 岁; ②采用一体化固定架、胸腹热塑膜和船型定位头枕固定的患者; ③均采用 HT 系统实施调强放射治疗的患者; ④非同步放化疗的患者; ⑤无多个靶区联合放疗患者; ⑥采用 CT 定位的患者。排除标准: ①立体定向放疗患者; ②首次放疗后修改放疗计划的患者; ③在线放疗复位患者。本研究均获患者知情同意。

1.2 放疗定位和图像配准

放射治疗定位阶段, 患者体位固定后参照定位室内三维激光系统, 画出热塑膜和身体表面“+”字线, 作为放疗复位参考标记。采用模拟定位 CT 机 (Sensation Open, 西门子, 德国) 扫描千伏级计算机断层扫描 (kilo-voltage computed tomography, KVCT) 图像, 并传输至 HT 系统计划工作站。根据患者诊断影像 (CT、MRI、PET-CT 等), 亚专科肿瘤医生在 KVCT 图像上勾画靶区和危机器官, 医学物理师设计和优化放疗计划, 制定 IGRT 放射治疗程序。

首次放疗前, 根据治疗室内三维激光系统和热塑膜表面“+”字标记线, 准确复位患者体位。扫描兆伏级计算机断层扫描 (mega-voltage computed tomography, MVCT) 图像与 KVCT 图像配准并记录位置误差, 为首次复位误差。第二次放疗前, 采用环形机架上控制面板 setup 功能复位患者体位, 再次扫描 MVCT 图像, 与计划图像配准并记录位置误差, 为 setup 复位误差。两次患者靶区位置验证均采用 3.5 MV 束源拍摄 MVCT 图像, 靶区配准方法均采用先自动再手动配准。

1.3 研究指标

位置误差研究指标包括左右、上下、前后方向平移误差和 Roll 旋转误差。根据国际电工委员会 (The International Electrotechnical Commission, IEC) 规定: 左右、上下、前后方向平移误差是指沿着 X、Y、Z 轴移动的线性误差值, Roll 旋转误差是指沿着 Y 轴旋转的角度误差值 (图 1)。误差的可能来源指标包括年龄、性别、体质量指数

(BMI)、分次剂量、治疗次数和肿瘤诊断类型。其中，治疗次数仅代表首次复位和 setup 功能复位两次分次放疗，不代表后续的分次放疗。

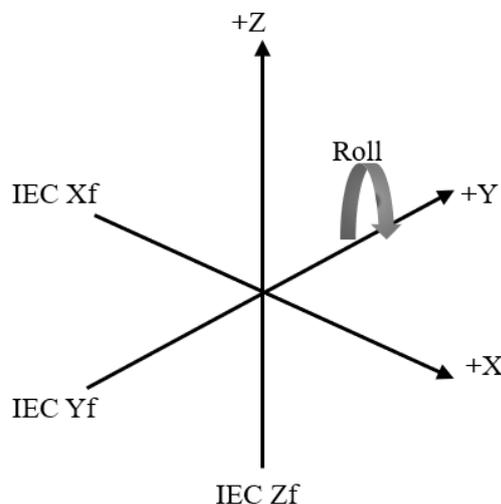


图1 位置误差坐标系统示意图

Figure 1. The chart for the coordinate system of setup errors

1.4 统计学分析

采用 IBM SPSS 20.0 进行统计分析，计量资料经正态性检验，符合正态分布的采用均数和标准差表示 ($\bar{x} \pm SD$)，计数资料采用例数和百分数表示。采用配对样本 *t* 检验分析两次复位配准后位置误差间差异。根据误差可能的来源指标，构建重复测量混合线性回归模型，分析胸部肿瘤放疗位置误差的来源。检验水准取 $\alpha = 0.05$ ，以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 一般情况

共纳入 36 例胸部肿瘤患者，其中男性 26 例 (72.22%)、女性 10 例 (27.78%)，平均年龄 (60.17 ± 10.10) 岁，肺癌患者 21 例 (58.33%)、其他肿瘤患者 15 例 (41.67%)，患者放疗处方剂量为 24 ~ 60 Gy/10~27 F，详见表 1。

表1 36例患者基本特征

Table 1. Basic characteristics of 36 patients

特征	参数值
性别	
男	26 (72.22%)
女	10 (27.78%)
年龄 (岁)	60.17 ± 10.10
身高 (cm)	168.11 ± 7.38
体重 (kg)	65.53 ± 12.62
BMI (kg/m ²)	23.11 ± 3.75
分次剂量 (Gy)	3.79 ± 2.99
束流时间 (s)	509.44 ± 208.94
疾病类型	
肺癌	21 (58.33%)
其他肿瘤 [#]	15 (41.67%)

注：[#]其他肿瘤包括乳腺癌、胸腺癌、食管癌、胸壁尤文肉瘤

2.2 两次复位位置误差比较

首次复位和 setup 功能复位患者图像配准后，左右、上下、前后方向平移误差详见表 2，Roll 旋转误差分别为 (0.05° ± 0.93°) 和 (-0.01° ± 0.65°)。除左右位置外，setup 功能复位后误差均值总体上均小于首次复位，尤其在前后方向上，setup 功能复位后误差显著小于首次复位 ($P < 0.001$)，差异具有统计学意义。

2.3 位置误差来源分析

多因素分析发现，BMI 对胸部肿瘤患者前后方向平移误差和 Roll 旋转误差有影响，回归系数 β 分别为 0.191 ($P = 0.001$) 和 0.034 ($P = 0.040$)，表示 BMI 每增加 1 kg/m²，前后方向平移误差增大 0.191 mm，而 Roll 旋转误差增大 0.034°。治疗次数和分次剂量对前后方向平移误差存在影响，回归系数 β 分别为 -4.158 ($P < 0.001$) 和 0.189 ($P = 0.024$)，表示放疗次数每增多一次，前后方向平移误差减少 4.158 mm，即 setup 复位能够减少靶区前后方向位置变异，而分次剂量每增加 1 Gy，前后方向平移误差增加 0.189 mm (表 3)。

表2 36例患者两次复位位置误差比较

Table 2. Comparison of localization errors for 36 patients

位置	首次复位	setup复位	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
左右 (mm)	0.26 ± 2.67	0.62 ± 2.92	-0.52	0.60
上下 (mm)	-0.33 ± 4.21	-0.29 ± 3.47	-0.04	0.97
前后 (mm)	5.04 ± 2.43	0.17 ± 1.14	10.55	<0.001
Roll (°)	0.05 ± 0.93	-0.01 ± 0.65	0.44	0.66

表3 36例患者位置误差来源分析
Table 3. Analysis of localization error sources for 36 patients

特征	左右 (mm)		上下 (mm)		前后 (mm)		Roll (°)	
	β (95%CI)	P值	β (95%CI)	P值	β (95%CI)	P值	β (95%CI)	P值
性别	-	-	-	-	-	-	-	-
男								
女	0.893 (-0.814, 2.601)	0.300	0.142 (-1.918, 2.201)	0.891	1.305 (-0.171, 2.781)	0.082	-0.149 (-0.571, 0.274)	0.484
年龄	-0.001 (-0.055, 0.053)	0.970	0.024 (-0.041, 0.089)	0.464	-0.024 (-0.070, 0.023)	0.313	0.008 (-0.005, 0.022)	0.211
BMI	0.009 (-0.122, 0.139)	0.894	0.152 (-0.005, 0.310)	0.058	0.191 (0.078, 0.304)	0.001	0.034 (0.002, 0.066)	0.040
治疗次数	0.297 (-0.599, 1.194)	0.510	-0.636 (-1.718, 0.445)	0.244	-4.158 (-4.933, -3.383)	<0.001	-0.200 (-0.422, 0.022)	0.076
分次剂量	0.049 (-0.140, 0.238)	0.604	0.022 (-0.206, 0.250)	0.848	0.189 (0.026, 0.353)	0.024	0.021 (-0.025, 0.068)	0.362
疾病类型								
肺癌	-	-	-	-	-	-	-	-
其他肿瘤 [#]	-0.110 (-1.585, 1.364)	0.882	0.734 (-1.044, 2.513)	0.413	-1.224 (-2.498, 0.051)	0.060	0.140 (-0.224, 0.505)	0.445

注：[#]其他肿瘤包括乳腺癌、胸腺癌、食管癌、胸壁尤文肉瘤

3 讨论

放疗位置误差常引起肿瘤放射治疗剂量的改变，导致肿瘤控制概率下降和放疗副反应增加，因此矫正位置误差是保证精准放疗的关键。位置误差可能受到设备品牌、常规维护、使用频率以及受试者年龄、性别、BMI、分次剂量、治疗次数和肿瘤位置等因素影响。目前，HT 系统放疗的位置误差主要通过每日 IGRT 技术进行矫正，有研究报道尽管每日 IGRT 可提高位置精准性、降低靶区边界和减少放疗副反应^[7-9]，但频繁地扫描位置验证图像不仅增加临床工作负荷、延长工作时间，而且增加患者医疗费用，违背价值医疗的宗旨。而 HT 系统的 setup 功能原理简单，即将分次放疗治疗床的位置自动移动到目标计划位置或配准后治疗床位置。根据实际使用情况，该功能可简化放射治疗师复位程序，减少操作时间，提高工作效率。因此明确误差来源，正确应用 setup 功能矫正位置误差将成为肿瘤治疗过程中日常操作的重要组成部分。

本研究通过比较两次复位图像配准后发现，setup 功能能够有效降低因治疗床自然沉降引起的前后方向平移误差。多因素研究发现 BMI 对前后方向平移误差和 Roll 旋转误差存在影响，可能与分次放疗皮下脂肪受压程度不同和体重增加导致治疗床沉降有关^[10]。Lee 等的研究也发现，BMI 与前后方向、Roll 位置误差有相关性^[11]。李兴德等开展的一项关于瓦里安加速器位置误差来源的研究，指出 BMI 可影响胸部肿瘤左右、上下和前后方向位置误差^[12]。这些研究结果均提示了以治疗床的移动来实现精准定位治疗时，BMI 可能是导致位置误差来源的影响因素。因此，胸部肿瘤放射治疗时，应重视较高 BMI 肿瘤患者的靶区位置精准性，达到精准放疗的目的。另外，通过分析 BMI 和 Roll 旋转误差的回归系数，BMI 实际对放射治疗靶区旋转变异的影响有限，且 Roll 旋转误差可以通过 HT 系统环形机架的旋转自行矫正，所以 BMI 对靶区 Roll 旋转变异临床意义有限。

本研究还发现，前后方向平移误差更易受到分次剂量的影响。分次处方剂量是依据靶区面积、肿瘤深度、照射技术等制定的，以达到肿瘤的生物效应，从而控制或治愈肿瘤，防止肿瘤复

发。分次剂量影响靶区前后方向位置变化的可能原因是分次处方剂量越大, 靶区的面积也越大, 容易发生靶区的几何变异。另外, 性别和临床诊断对胸部肿瘤前后方向平移误差的影响接近统计学意义, 可能与样本量较少有关。本研究建议, 将 setup 功能应用到临床放射治疗工作中时, 应矫正位置误差和减少放射治疗时间, 以提高放射治疗位置精准性和工作效率, 同时减少放疗前拍摄验证图像频率, 降低其辐射剂量对人体的辐射反应。另外, 建议在临床放射治疗过程中, 不仅要密切关注 BMI、分次剂量和不同复位方法, 还要考虑患者性别和临床诊断对胸部肿瘤位置误差的影响。

本研究存在一定的局限性。不同配准方法、配准范围大小(独立靶区配准和整体配准), 均可影响系统的摆位精度^[13]。本研究中未纳入这两种因素进行探讨, 影响 HT 放疗摆位误差的因素分析不全面。此外, 鉴于当前肿瘤医生根据诊断影像和临床经验手动勾画靶区被视为金标准, 因此本研究仍由肿瘤医生在 KVCT 图像上手动勾画靶区并与患者 MVCT 图像配准, 这可能导致结果存在一定误差, 未来仍需进一步研究以提高手动勾画方法的精准性。

综上所述, setup 功能能够矫正胸部肿瘤位置误差, 尤其是前后方向平移误差。BMI、分次剂量和不同复位方法影响胸部肿瘤放疗前后方向位置精准性。

参考文献

- 1 Sterzing F, Uhl M, Hauswald H, et al. Dynamic jaws and dynamic couch in helical tomotherapy[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2010, 76(4): 1266–1273. DOI: [10.1016/j.ijrobp.2009.07.1686](https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2009.07.1686).
- 2 Sterpin E, Janssens G, Orban DX, et al. Helical tomotherapy for SIB and hypo-fractionated treatments in lung carcinomas: a 4D Monte Carlo treatment planning study[J]. *Radiother Oncol*, 2012, 104(2): 173–180. DOI: [10.1016/j.radonc.2012.06.005](https://doi.org/10.1016/j.radonc.2012.06.005).
- 3 Schubert LK, Westerly DC, Tomé WA, et al. A comprehensive assessment by tumor site of patient setup using daily MVCT imaging from more than 3,800 helical tomotherapy treatments[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2009, 73(4): 1260–1269. DOI: [10.1016/j.ijrobp.2008.11.054](https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2008.11.054).
- 4 Contesini M, Guberti M, Saccani R, et al. Setup errors in patients with head-neck cancer (HNC), treated using the intensity modulated radiation therapy (IMRT) technique: how it influences the customised immobilisation systems, patient's pain and anxiety[J]. *Radiat Oncol*, 2017, 12(1): 72. DOI: [10.1186/s13014-017-0807-y](https://doi.org/10.1186/s13014-017-0807-y).
- 5 尚凯, 迟子峰, 王军, 等. 胸段食管癌 IGRT 中摆位误差分析[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2015, 24(1): 70–73. [Shang K, Chi ZF, Wang J, et al. The analysis of setup error in imaging-guided radiotherapy with thoracic esophageal carcinoma[J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2015, 24(1): 70–73.] DOI: [10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2015.01.019](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2015.01.019).
- 6 Bol GH, Lagendijk JJ, Raaymakers BW. Virtual couch shift (VCS): accounting for patient translation and rotation by online IMRT re-optimization[J]. *Phys Med Biol*, 2013, 58(9): 2989–3000. DOI: [10.1088/0031-9155/58/9/2989](https://doi.org/10.1088/0031-9155/58/9/2989).
- 7 Murray J, Griffin C, Gulliford S, et al. A randomised assessment of image guided radiotherapy within a phase 3 trial of conventional or hypofractionated high dose intensity modulated radiotherapy for prostate cancer[J]. *Radiother Oncol*, 2020, 142: 62–71. DOI: [10.1016/j.radonc.2019.10.017](https://doi.org/10.1016/j.radonc.2019.10.017).
- 8 Shah A, Aird E, Shekhdar J. Contribution to normal tissue dose from concomitant radiation for two common kV-CBCT systems and one MVCT system used in radiotherapy[J]. *Radiother Oncol*, 2012, 105(1): 139–144. DOI: [10.1016/j.radonc.2012.04.017](https://doi.org/10.1016/j.radonc.2012.04.017).
- 9 Trivedi G, Dixit CK, Oinam AS, et al. Kilovoltage cone-beam computed tomography imaging dose estimation and optimization: need of daily cone-beam computed tomography[J]. *J Cancer Res Ther*, 2019, 15(3): 470–474. DOI: [10.4103/jert.JCRT-949-17](https://doi.org/10.4103/jert.JCRT-949-17).
- 10 Hirata K, Yoshimura M, Mukumoto N, et al. Three-dimensional intrafractional internal target motions in accelerated partial breast irradiation using three-dimensional conformal external beam radiotherapy[J]. *Radiother Oncol*, 2017, 124(1): 118–123. DOI: [10.1016/j.radonc.2017.04.023](https://doi.org/10.1016/j.radonc.2017.04.023).
- 11 Lee J, Liu SH, Lin JB, et al. Image-guided study of inter-fraction and intra-fraction set-up variability and margins in reverse semi-decubitus breast radiotherapy[J]. *Radiat Oncol*, 2018, 13(1): 254. DOI: [10.1186/s13014-018-1200-1](https://doi.org/10.1186/s13014-018-1200-1).
- 12 李兴德, 翟福山, 张明云, 等. 胸部肿瘤患者体重指数对摆位误差的影响[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2015, 24(1): 40–41. [Li XD, Zhai FS, Zhang MY, et al. Effect

of BMI on setup error in patients with thoracic tumor[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2015, 24(1): 40–41.] DOI: 10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2015.01.011.

- 13 刘慧 . 螺旋断层放射治疗中 MVCT 图像配准方法和摆位误差的研究 [D]. 广州 : 南方医科学 , 2021. [Li H. Study on MVCT image registration method and setup

errors in Helical Tomotherapy[D]. Guangzhou: Southern Medical University, 2021]

收稿日期: 2021 年 01 月 02 日 修回日期: 2021 年 02 月 08 日
本文编辑: 李 阳 黄 笛

引用本文: 徐士飞, 冯欢, 刘海洋, 等 . 胸部肿瘤螺旋断层放疗系统 setup 功能位置矫正与误差来源分析 [J]. 医学新知, 2022, 32(1): 47–52. DOI: 10.12173/j.issn.1004-5511.202012002
Xu SF, Feng H, Liu HY, et al. Localization correction of setup function for thoracic tumors using the helical tomotherapy system and analysis of error sources[J]. Yixue Xinzhi Zazhi, 2022, 32(1): 47–52. DOI: 10.12173/j.issn.1004-5511.202012002