

六维床在头、胸、腹部肿瘤常规直线加速器放射治疗中的摆位误差回顾性分析

万宝 葛彦东 孙朔 赵宇 张彦新 张伟 郇福奎 梁斌 王宏凯

(国家癌症中心/国家肿瘤临床医学研究中心/中国医学科学院北京协和医学院肿瘤医院放疗科 北京 100021)

摘要 回顾性分析基于加速器六维床摆位的肿瘤患者的CBCT(Cone-Beam CT,CBCT)图像,比较患者的摆位误差数据,分析肿瘤患者六维床放射治疗中分次内摆位误差的数据,研究六维床对不同位置肿瘤产生的摆位效果差异。选取2020年3月至2023年9月于本中心接受放疗的肿瘤患者85例,分成脑瘤、肺癌、直肠癌和乳腺癌。统计4组患者在左右、头脚、腹背6个自由度(X 、 Y 、 Z 和 R_x 、 R_y 、 R_z)的首次和分次内摆位误差。采用双样本异方差 t 检验对比分析不同瘤种在各个方向上的分次内摆位误差。对于首次摆位与分次内摆位误差两种情况,经六维床校正后在平移方向的误差范围基本一致,均集中在 ± 1 cm范围内。分次内摆位误差中 R_x 方向的误差范围略微缩小。然而,在旋转自由度 R_y 和 R_z 方向上乳腺部位误差显著增大。从不同类型肿瘤组的分次内平移方向误差来看,脑瘤组在平移方向的误差最小。肺癌组的平移方向误差较小,但在 Z 方向(腹背方向)出现了一定的偏态。直肠癌组的平移方向误差相对较大,尤其在 Z 方向。此外,无论是首次摆位还是分次内摆位均显示脑部误差最小,肺部次之,乳腺和直肠相对较大。不同肿瘤类型之间的 R_x 方向没有显著性差异(p 值均大于0.01)。乳腺癌患者与脑瘤患者($p=0$)、肺癌患者($p=0$)之间有显著性差异。乳腺癌患者与直肠癌患者存在弱显著性差异($p=0.034$)。在 R_z 方向上,直肠癌病例与脑瘤($p=0.003$)、肺癌($p=0.002$)之间具有显著性差异,同时,直肠癌与乳腺癌病例之间也具有一定程度的弱显著性差异($p=0.033$),说明在 R_z 旋转方向上,直肠癌组的摆位误差显著不同于其他肿瘤类型。六维床的应用显著提升了摆位的平移方向精度,旋转误差也有所改善。然而,在旋转方向上的误差控制仍存在一定局限性,尤其是在肿瘤部位特异性较强或周边器官情况较为复杂(如乳腺和直肠)的情况。应当进一步结合患者个体化特征进行固定装置优化以及加强呼吸管理,以提升放疗精度和效果。

关键词 摆位误差, 六维床, 肿瘤放疗

中图分类号 R815.6, R73

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0104

CSTR: 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2024-0104

引用该文:

万宝, 葛彦东, 孙朔, 等. 六维床在头、胸、腹部肿瘤常规直线加速器放射治疗中的摆位误差回顾性分析[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2025, 43(2): 020301. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0104.

WAN Bao, GE Yandong, SUN Shuo, *et al.* Retrospective analysis of setup error with a six-degree-of-freedom couch in medical linear accelerator radiotherapy for head, thoracic, and abdominal tumors [J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2025, 43(2): 020301. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0104.



基金资助: 国家自然科学基金(12205374、12475314)和北京市自然科学基金(1232033)资助

第一作者: 万宝,男,1980年出生,2006年毕业于山东第一医科大学,研究方向图像引导及放射治疗技术,副主任技师

通信作者: 王宏凯,博士,高级工程师, E-mail: h.wang@cicams.ac.cn

收稿日期: 初稿 2024-11-05; 修回 2024-12-20

Supported by National Natural Science Foundation of China (12205374, 12475314) and Beijing Natural Science Foundation (1232033)

First author: WAN Bao (male) was born in 1980, graduated from Shandong First Medical University in 2006. His research focuses on image-guided and radiation therapy technologies, associate chief technician

Corresponding author: WANG Hongkai, doctoral degree, senior engineer, E-mail: h.wang@cicams.ac.cn

Received 05 November 2024; accepted 20 December 2024

Retrospective analysis of setup error with a six-degree-of-freedom couch in medical linear accelerator radiotherapy for head, thoracic, and abdominal tumors

WAN Bao GE Yandong SUN Shuo ZHAO Yu ZHANG Yanxin ZHANG Wei

HUAN Fukui LIANG Bin WANG Hongkai

(Department of Radiation Oncology, National Cancer Center/ National Clinical Research Center for Cancer /Cancer Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences, Peking Union Medical College, Beijing 100021, China)

ABSTRACT Cone-beam computed tomography (CBCT) images of tumor patients were retrospectively analyzed based on a six-degree-of-freedom (6-DOF) couch for accelerators, whereby patient setup error data were compared, and intra-fractional setup errors during radiotherapy were investigated for tumor patients. This study aimed to evaluate the differences in setup performance for tumors in various anatomical locations. A total of 85 tumor patients who underwent radiotherapy at the radiotherapy center between March 2020 and September 2023 were selected and categorized into four groups: brain tumors, lung cancer, rectal cancer, and breast cancer. The initial and intra-fractional setup errors for the four groups were statistically analyzed across six degrees of freedom: left-right (X), head-foot (Y), anterior-posterior (Z), and rotations (R_x , R_y , R_z). A two-sample heteroscedastic t -test was used to compare the intra-fractional setup errors in different directions among the tumor types. After corrections using the 6-DOF couch, the translational error ranges for both initial and intra-fractional setup errors were generally consistent, primarily within ± 1 cm. In intra-fractional setup errors, the R_x direction exhibited a slightly reduced error range. However, the rotational errors in the R_y and R_z directions were significantly larger in breast cancer cases. Regarding intra-fractional translational errors across different tumor groups, patients with brain tumor exhibited the smallest errors along translational directions. Patients with lung cancer also showed relatively small translational errors but exhibited a skew in the Z direction (anterior-posterior). Patients with rectal cancer exhibited relatively large translational errors, particularly in the Z direction. Additionally, both the initial and intra-fractional setups demonstrated that brain tumor errors were the smallest, followed by lung cancer, whereas breast and rectal cancer errors were relatively larger. There were no significant differences in the R_x direction among different tumor types ($p > 0.01$). However, significant differences were observed between breast and brain tumor patients ($p=0$) and between breast and lung cancer patients ($p=0$). A weakly significant difference was also noted between patients with breast and rectal cancer ($p=0.034$). In the R_z direction, patients with rectal cancer exhibited significant differences compared to those with brain tumor ($p=0.003$) and lung cancer ($p=0.002$). A weakly significant difference was also found between rectal and breast cancer patients ($p=0.033$), indicating that rectal cancer cases had notably different setup errors in the R_z rotational direction compared to the other tumor types. The application of a 6-DOF couch significantly improved the translational setup precision and rotational errors. However, limitations remain in controlling rotational errors, particularly for tumor types with strong site specificity or complex surrounding organ structures, such as breast and rectal cancers. Further optimization of immobilization devices and enhanced respiratory management tailored to individual patient characteristics are recommended to improve the precision and effectiveness of radiotherapy.

KEYWORDS Positioning error, Six-dimensional couch, Radiotherapy

CLC R815.6, R73

在肿瘤患者的放疗过程中，锥形束计算机断层扫描(Cone-beam computed tomography, CBCT)图像引导技术已被广泛应用并认可为一种高精度的放射治疗辅助系统。该技术通过在每次治疗前采集患者的实时图像，与模拟(计划)CT进行三维图

像配准，能够确定患者在6个空间自由度中的摆位误差。通过与六维治疗床的结合使用，能够对患者在空间中的摆位误差进行精确修正，极大提升了放射治疗精度。六维治疗床引入了针对摆位的6个自由度误差的配准与修正方法，通过一定的配

准范围计算误差并获得相应的修正结果。然而，由于六维治疗床成本较高，许多医疗机构仅配备三维治疗床，无法修正旋转误差，导致配准误差和残余误差的具体影响尚未完全明确。根据国际辐射单位与测量委员会(ICRU)第24号报告，当靶区剂量偏离度达到3%~5%时，可能降低肿瘤原发灶的放疗有效率，同时增加周围正常组织发生放射性并发症的概率^[1]。

摆位的重复性和准确性对放疗效果至关重要，是影响治疗效果的关键因素之一^[2]。自六维治疗床被引入临床以来，在头颈部、胸部、乳腺、盆腔及四肢等部位的肿瘤放射治疗中得到了广泛应用。然而，关于六维治疗床对不同部位肿瘤、不同空间自由度上的摆位误差修正效果，以及如何结合固定装置进一步提升位置重复性的问题，现有文献报道较少。本研究通过分析六维治疗床在治疗4种不同肿瘤类型中的摆位误差数据，研究其在摆位精度、计划靶区体积(Planning target

volume,PTV)外放边界方面的差异，从而为优化临床治疗效果，推动患者个体化治疗提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 临床基本资料及患者入选标准

本研究选取了2020年3月至2023年9月间共计85例接受放射治疗且具有病理证实的肿瘤患者。其中脑瘤23例、肺癌30例、直肠癌10例、乳腺癌患者22例，分别采集了237次、287次、76次和208次CBCT图像。中位年龄57岁(29~88岁)。中位体重指数(Body mass index,BMI)为24.01 kg/m²(17.10~33.32 kg/m²)。患者纳入分析的条件为：(1)放射治疗经六维床验证；(2)放疗分割方式为常规分割；(3)患者放疗期间执行5次/周CBCT扫描；(4)卡氏功能量表(Karnofsky performance scale,KPS)≥80。具体见表1。

表1 一般资料对比
Table 1 General information of inclusive patients

项目 Items	脑瘤 Brain tumor	肺癌 Lung cancer	直肠 Rectal cancer	乳腺 Breast cancer
平均年龄 / a Average age	53 (29~78)	63 (48~88)	52 (29~74)	48 (30~63)
平均身高 / m Average height	1.69 (1.56~1.84)	167 (153~182)	1.66 (1.56~1.84)	1.62 (1.50~1.83)
平均体重 / kg Average weight	67 (50~90)	68 (45~90)	69 (65~83)	65 (50~91)
BMI>24 kg/m ²	10	16	6	12
BMI≤24 kg/m ²	13	14	4	10
男 Male	14	18	7	2
女 Female	9	12	3	20
KPS	90 (50~90)	80 (60~100)	80 (80~100)	90 (80~100)
CBCT总次数 Total CBCT	237	287	76	208

1.2 体位固定及CT模拟定位

直肠癌患者采用俯卧位，其余3组患者均采用仰卧位。按照表2中的4种不同的体位固定方式和相应体膜进行固定。

对胸腹平架、腹盆架、乳腺癌仰卧手臂上举

的患者进行CT模拟定位(Philips brilliance big bore或者Siemens SOMATOM definition AS 40)扫描，扫描条件120 kV、200 mAs，层厚和层距均为5 mm，脑部肿瘤为3 mm。计划系统采用Pinnacle (Version 9.10, 荷兰皇家飞利浦)。病例均采用6 MV X线VMAT技术，处方剂量50.0~60.5 Gy。

表2 不同类型肿瘤患者采用的体位及固定方式
Table 2 Position and fixation mode of patients with different tumor locations

肿瘤部位 Tumor location	固定方式 Fixation mode	热塑膜类型 Thermoplastic mode type
脑 Brain	双臂放松置于体侧Both arms are relaxed on the side of the body	热塑体膜 Thermoplastic mold
肺 Lung	双臂交叉置于额前The arms were crossed before the forehead	热塑体膜 Thermoplastic mold
直肠 Rectal	俯卧置于腹盆架上Bone position on the abdominal pelvic frame	热塑网膜 Thermoplastic mesh film
乳腺 Breast	手臂上举仰卧于乳腺托架上Raise your arm on your back on a breast tray	无网膜固定 No mesh fixation

1.3 图像引导和数据采集

放疗期间,技师在加速器治疗室内通过激光灯、患者体表标记线以及体膜上的摆位线进行精确定位后,执行CBCT扫描以进行在线校准。根据《放射治疗质量控制基本指南》^[3],CBCT图像获取频率通常为每周5次。配准框范围以PTV为基础,在3个方向各外放2 cm。当靶区与周围骨性结构的位置较为固定时,配准框范围应包含骨性结构^[4]。

在主管医师的指导下,首次摆位误差值通过软组织窗进行CBCT图像配准获得,并以靶区为参考进行手动微调,同时记录摆位误差的6个自由度,包括 X (左右方向)、 Y (头脚方向)、 Z (腹背方向)及 R_x (矢状面)、 R_y (横断面)、 R_z (冠状面)。若患者连续两次摆位误差超过5 mm或旋转误差超过 2° ,应重新调整患者体位直至误差在阈值范围内,并记录校正后的CBCT数据,作为后续治疗中的摆位参考。在治疗过程中,若患者6个自由度的摆位误差均小于阈值,则视为摆位合格。配准完成后,再次进行CBCT扫描,获得分次内摆位误差值,记录两次误差数据。最后,移床修正误差后开始治疗,以确保治疗的精确性和安全性。

1.4 摆位误差统计

统计所有病例CBCT六维床摆位误差,根据获取时间的不同分为首次摆位误差和分次内误差两

种^[5-6],并进行统计分析。对所有不同自由度下首次和分次内的摆位误差数据进行Shapiro-Wilk正态性分布检验,基本符合正态性分布,随后对6个自由度下每个自由度中4种不同肿瘤类型的分次内摆位误差进行了双样本异方差 t 检验,为了控制多重比较可能会造成的假阳性率,对统计结果进行了Bonferroni校正,调整后的显著水平为:当 $p < 0.01$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 分组患者摆位误差

从图1中首次和分次内的摆位误差统计结果能够得出,经过六维床修正之后,平移方向分次内摆位误差较首次摆位明显缩小,集中于 ± 0.5 cm的范围内。表明六维床校准有效地减少了平移方向误差,提升了患者首次摆位后的位置精确度。旋转误差的范围也有所减小,尤其是在 R_x 和 R_y 上,表现出明显的校准效果。然而,乳腺部位在经过六维床校准后, R_y 和 R_z 上的误差降低并不显著,这可能表明在旋转方向的误差控制上存在患者特异性问题(如乳腺组织的运动复杂性)。在不同瘤种方面,脑瘤组的摆位误差无论在首次或在分次内均为最低,肺癌次之,直肠组最大。

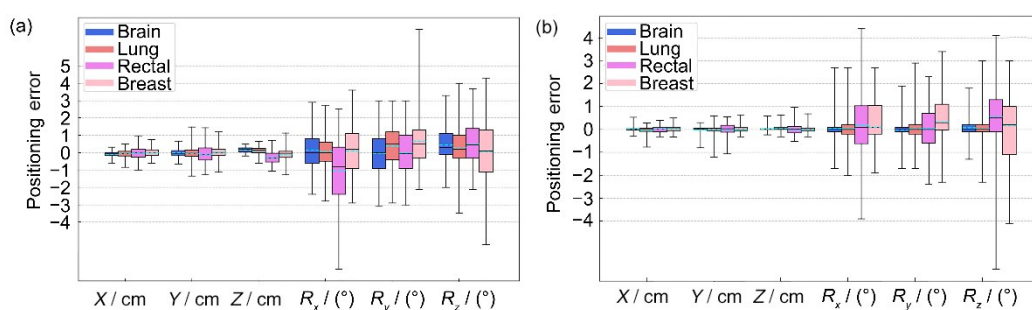


图1 4种不同位置肿瘤首次摆位误差统计与分次内摆位误差分布情况

Fig.1 Statistics of first-time and intra-fraction setup errors for 4 different types of tumors

图2展示了4种不同肿瘤类型分次内摆位误差的统计分析结果,从结果中能够看出,在平移方向的3个自由度上, X 方向脑瘤与肺癌之间的摆位误差存在显著性($p=0$),肺癌与乳腺癌病例之间存在显著性($p=0$); Y 方向上,未观测到显著性; Z 方

向上,肺癌和乳腺癌摆位误差存在显著性差异($p=0.001$)。进一步分析旋转方向的分次内自由度,在 R_x 方向,不同肿瘤分次内摆位误差之间没有显著性差异(p 值均大于0.01);在 R_y 方向,乳腺癌患者与脑瘤($p=0$)、肺癌病例具有显著性差异($p=0$),

与直肠癌病例存在弱显著性($p=0.034$)；在 R_z 方向上，直肠癌病例与脑瘤($p=0.003$)、肺癌($p=0.002$)

病例具有分次内摆位误差的显著性差异，同乳腺癌病例也具有一定程度上的弱显著性($p=0.033$)。

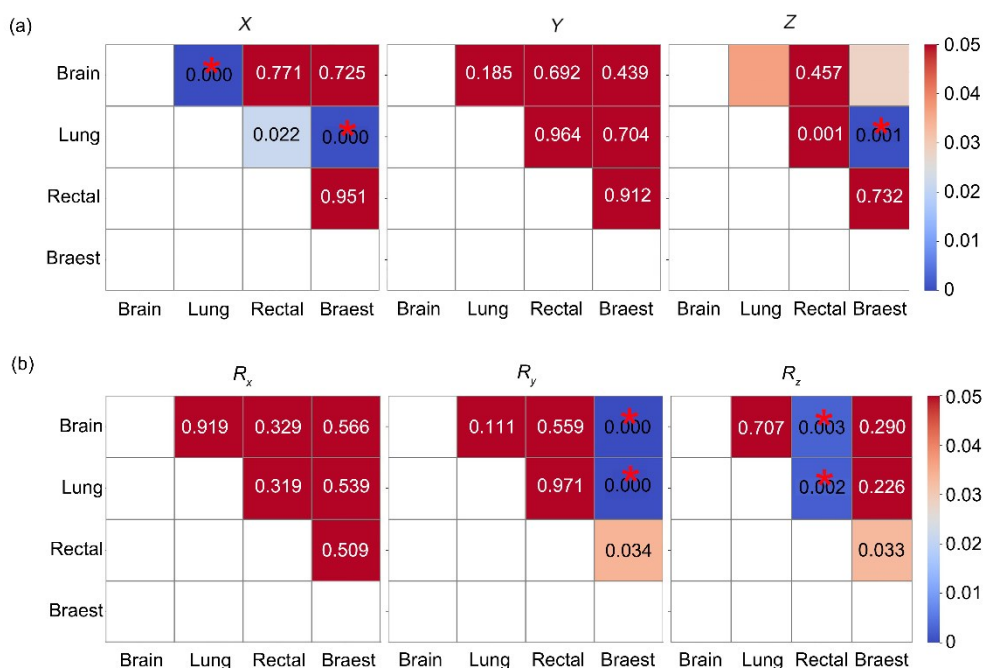


图2 每个自由度中4种不同肿瘤类型的分次内摆位误差双样本异方差 t 检验结果,其中显著的组合采用“*”标注
Fig.2 Results of a two-sample heteroscedastic t -test for inter-fractional setup errors across four different tumor types in each degree of freedom, with significant pairs marked by “*”

2.2 分次内摆位误差分布情况

从图3中脑瘤组分次内摆位误差中能够得出，在 X 方向大多数病例数据集中在0 mm误差附近，占比约50%，-1 mm和1 mm附近也有一定分布，比例较低。对于 Y 方向而言则更为集中，在0 mm附近的比例接近55%。 Z 方向与 X 方向类似。在旋转误差方面， R_x 和 R_y 方向的摆位误差大部分集中在 $\pm 1^\circ$ 以内，占比接近50%或更高； R_z 方向误差的分布较宽广，且比例在 $\pm 2^\circ$ 范围内显著高于 R_x 和 R_y 。

对于肺癌组患者，经六维床修正后的分次内平移方向内摆位误差 X 方向的分布相对集中于0附近，呈现出类似正态分布的特点，但在极端误差范围(± 7 mm)处的频率较低，表明大部分患者在左右方向的摆位误差较小。 Y 方向和 Z 方向的分布中也以0附近为主，但在该方向上出现了一定的偏态，右侧的数据稍多，可能反映了在腹背方向校正时存在偏向性或系统性误差。旋转误差的分布整体接近对称，未观察到显著的偏态。这表明在

治疗过程中旋转调整的校准精确性较高，各方向偏移的正负误差分布均匀，没有明显的系统性偏离。

同脑瘤与肺癌组相比，直肠癌分次内摆位误差在 X 、 Y 和 Z 方向的分布主要集中在 ± 3 mm范围，分布更为分散。与此同时， Y 方向表现出轻微的正向偏态，显示出摆位系统或流程可能需要进一步优化。旋转误差展现出相同的趋势，与 R_y 和 R_z 相比， R_x 的误差分布更加集中在 0° 附近。

对于乳腺癌组，不同方向上的平移误差数据分布呈现明显的对称分布，误差范围主要集中在 $-2 \sim 2$ mm，尤其是在头脚方向(Y)和腹背方向(Z)，误差大多集中在 ± 1 mm范围内。乳腺癌患者摆位的旋转误差(R_x 、 R_y 、 R_z)在接近零的位置范围($-0.5^\circ \sim 0.5^\circ$)内具有最高的百分比分布，表明大多数摆位误差较小，能够保持在相对精确的范围内。然而，仍有少量数据分布在远离零的位置，显示出较大的旋转误差。

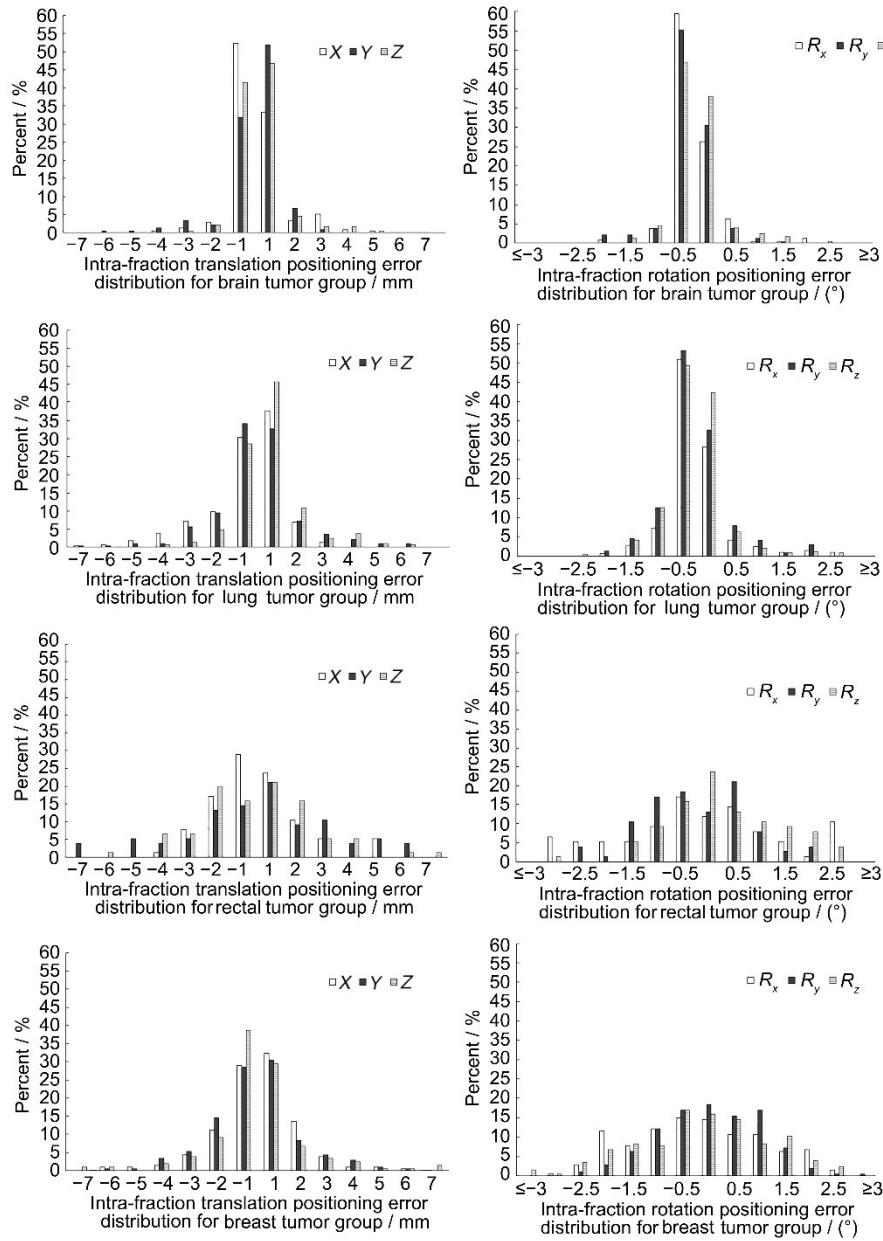


图3 4组不同肿瘤患者组的分次内6个自由度摆位误差分布
Fig.3 Distribution of intra-fraction positioning error in 6 DoFs of the four different tumor groups

3 讨论与结论

对于首次摆位与分次内摆位误差两种情况，经六维床校正后在平移方向的误差范围基本一致，均集中在 ± 1 cm范围内，这表明六维床能够有效减少左右(X)、头脚(Y)及腹背(Z)方向的摆位误差，显著提升患者治疗位置的精确度。分次内摆位误差中 R_x 方向的误差范围略微缩小，显示旋转方向的校准可能有所优化。然而在旋转自由度 R_y 和 R_z 方向上乳腺部位误差显著增大，这可能反映出乳腺部位的旋转校准在某些情况下面临更大的挑战。

从不同类型肿瘤组的分次内平移误差来看，脑瘤组在平移方向的误差最小，无论是首次摆位还是分次摆位均显示良好的精确度。这可能与头骨较为坚硬以及患者头部固定装置的紧固效果密切相关。肺癌组的平移误差较小，但在腹背方向(Z)出现了一定的偏态(图3)，可能与呼吸运动引起的体位变化相关^[7]。直肠癌组的平移误差相对较大，尤其在Z方向。这可能反映出盆腔区域的体位固定相对困难，因此对精度产生了一定影响。此外，无论是首次摆位还是分次内摆位均显示脑部误差最小，肺部次之，乳腺和直肠相对较大。

数据的统计结果显示:不同肿瘤类型之间的 R_z 方向没有显著性差异(p 值均大于0.01),说明4种肿瘤在 R_z 方向的摆位误差分布较为相似。乳腺癌患者与脑瘤患者($p=0$)、肺癌患者($p=0$)之间有显著性差异。乳腺癌患者与直肠癌患者存在弱显著性差异($p=0.034$),说明乳腺癌组在 R_z 方向上的旋转误差与其他组有明显不同,可能由于乳腺组织富含脂肪所具有的运动特性导致。在 R_z 方向上,直肠癌病例与脑瘤($p=0.003$)、肺癌($p=0.002$)之间具有显著性差异,同时,直肠癌与乳腺癌病例之间也具有一定程度的弱显著性差异($p=0.033$),说明在 R_z 旋转方向上,直肠癌组的摆位误差显著不同于其他肿瘤类型。

由于摆位误差的存在,在临床上放射治疗肿瘤的过程中,实际剂量分布与计划剂量分布并非完全吻合^[8]。因此,摆位误差是图像引导技术治疗肿瘤过程中的重要影响因素之一。对于乳腺癌治疗与身体其他部位不同,因为缺乏有效和统一的固定装置,以及一致认可的患者固定体位,可能会导致定位和治疗环节的患者摆位不够准确,无法做到患者治疗体位的完全复位。乳腺本身脂肪层厚且质地柔软,身体的轻微旋转对外形影响较大,乳腺癌调强放疗的体位固定,一般使用乳腺托架、负压真空垫/发泡胶、翼板等,对头颈部和胸部的体位没有限制,使乳腺癌的放疗定位和复位具有一定的挑战性。治疗中心之间甚至同一治疗中心不同医生之间很难采用统一的体位固定方法,例如:通过上肢上举和叉腰外展,下肢高抬和屈膝外展等。而这些特殊的治疗体位,如果不能做到体位信息的完整传达,也可能导致放疗体位复位变化。

盆腔结构复杂,包含有子宫、直肠、膀胱、前列腺等器官,它们之间的相对位置与放射治疗靶区的剂量分布有直接关系^[9-11]。患者随治疗进程出现各种变化,如体型变化、肿瘤缩小、进展或变形,器官的生理运动与呼吸运动导致位置变化,或者由于患者身体的轻微旋转,此外,膀胱和直肠充盈程度不同,均可能引起靶区相对位置和体积的变化。研究表明,膀胱充盈每减少10 cm³,会导致子宫颈管、底部位置分别偏移0.8 cm、1.8 cm,从而致使宫颈偏移约0.3 cm^[12]。直肠充盈可使宫颈腹背平均偏移4.1 mm,但对子宫两侧几乎没有影响^[13]。这些因素可能是导致本研究中直肠组分次内摆位误差显著区别于其他类型肿瘤的原因。

原因。

本研究也具有一定局限性:首先,这是一项回顾性的单中心研究,在纳排过程中存在一定的选择偏倚;第二,对于六维床的治疗未进行前瞻性随机对照;第三,摆位误差所引起的剂量学效应、疗效、副反应差异不明;第四,病例数据有待丰富,如在实验中加入胸椎和腰椎的转移瘤和腹膜后的原发肿瘤会更有说服力。因此,有必要进一步开展相关研究,在未来进行更加深入的探索。

六维床的应用显著提升了摆位的平移精度,旋转误差也有所改善。然而,在旋转方向上的误差控制仍存在一定局限性,尤其是在肿瘤部位特异性较强或周边器官情况较为复杂(如乳腺和直肠)的情况。未来,结合患者个体化特征进行固定装置优化以及加强呼吸管理,可以进一步提高校正效果,减少分次内摆位误差,提升放疗精度和效果。

作者贡献声明 万宝对数据进行收集和分析,并撰写论文初稿;葛彦东、孙朔、赵宇、张彦新、张伟、郇福奎、梁斌提出了论文修改意见,并对论文部分内容进行了修改;王宏凯指导了论文结构、进行了数据分析,参与了论文撰写等工作。所有作者均已阅读并同意最终文本。

参考文献

- 1 International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). Determination of absorbed dose in a patient irradiated by beams of X or gamma rays in radiotherapy procedures. ICRU report 24[R]. Washington DC: ICRU Publications, 1976.
- 2 成媛,李政欢,陈宥霖,等.发泡胶固定的乳腺癌放疗摆位误差和计划靶区体积范围[J].辐射研究与辐射工艺学报, 2022, 40(5): 32-40. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0027.
CHENG Yuan, LI Zhenghuan, CHEN Youlin, *et al.* Setup error and planning target volume boundary in foam-immobilized radiotherapy for breast cancer[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2022, 40(5): 32-40. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0027.
- 3 赫捷,王绿化,李晔雄,等.放射治疗质量控制基本指南[J].中华放射肿瘤学杂志, 2018, 27(4): 335-342. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2018.04.001.
HE Jie, WANG Lyuhua, LI Yexiong, *et al.* Basic

- guidelines of quality control for radiotherapy[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2018, **27**(4): 335-342. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2018.04.001.
- 4 Zhang S Y, Wang Z X, Yang H B, *et al.* Hformer: highly efficient vision transformer for low-dose CT denoising [J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34**(4): 61. DOI: 10.1007/s41365-023-01208-0.
- 5 Wan B, Liu Y S, Ge Y D, *et al.* Enhancing positioning accuracy in adjuvant radiotherapy for left breast cancer using cervical-thoracic integrated bracket combined with deep inspiration breath holding[J]. Thoracic Cancer, 2024, **15**(36): 2540-2550. DOI: 10.1111/1759-7714.15484.
- 6 Wan B, Luo S H, Feng X, *et al.* Superiority of integrated cervicothoracic immobilization in the setup of lung cancer patients treated with supraclavicular station irradiation[J]. Frontiers in Oncology, 2023, **13**: 1135879. DOI: 10.3389/fonc.2023.1135879.
- 7 葛彦东, 刘帆, 赵瑞敖, 等. BMI对乳腺癌放疗计划靶区外放边界的预判研究[J]. 现代肿瘤医学, 2024, **32**(11): 2046-2050. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4992.2024.11.016.
GE Yandong, LIU Fan, ZHAO Ruiao, *et al.* A study of BMI in prediction of PTV external radiation boundaries for breast cancer radiotherapy[J]. Journal of Modern Oncology, 2024, **32**(11): 2046-2050. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4992.2024.11.016.
- 8 Ito K, Ogawa H. Stereotactic body radiation therapy for patients with sacral chordoma who previously received carbon ion therapy[J]. International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics, 2021, **110**(5): 1263-1264. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2018.11.029.
- 9 Fu C F, Ma C S, Shang D P, *et al.* Geometric accuracy evaluation of a six-degree-of-freedom (6-DoF) couch with cone beam computed tomography (CBCT) using a phantom and correlation study of the position errors in pelvic tumor radiotherapy[J]. Translational Cancer Research, 2020, **9**(10): 6005-6012. DOI: 10.21037/tcr-20-1528.
- 10 Casares-Magaz O, Moiseenko V, Hopper A, *et al.* Associations between volume changes and spatial dose metrics for the urinary bladder during local versus pelvic irradiation for prostate cancer[J]. Acta Oncologica, 2017, **56**(6): 884-890. DOI: 10.1080/0284186X.2017.1312014.
- 11 Chen V E, Gillespie E F, Manger R P, *et al.* The impact of daily bladder filling on small bowel dose for intensity modulated radiation therapy for cervical cancer[J]. Medical Dosimetry, 2019, **44**(2): 102-106. DOI: 10.1016/j.meddos.2018.02.010.
- 12 Chan P, Dinniwell R, Haider M A, *et al.* Inter- and intrafractional tumor and organ movement in patients with cervical cancer undergoing radiotherapy: a cinematic-MRI point-of-interest study[J]. International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics, 2008, **70**(5): 1507-1515. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2007.08.055.
- 13 Taylor A, Powell M E B. An assessment of interfractional uterine and cervical motion: Implications for radiotherapy target volume definition in gynaecological cancer[J]. Radiotherapy and Oncology, 2008, **88**(2): 250-257. DOI: 10.1016/j.radonc.2008.04.016.