

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2023.01.002

医学放射物理

锥形束CT图像引导乳腺癌放疗中不同配准方法研究

刘妹言^{1,2}, 高兴旺³, 刘懿梅¹, 周杨⁴, 邓小武¹, 陈仲本⁵, 彭应林¹

1. 中山大学肿瘤防治中心/华南肿瘤学国家实验室/肿瘤医学协同创新中心, 广东 广州 510060; 2. 中山大学附属第一医院, 广东 广州 510062; 3. 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深圳医院, 广东 深圳 518116; 4. 中南大学湘雅医学院附属株洲医院, 湖南 株洲 412000; 5. 中山大学新华学院, 广东 广州 510520

【摘要】目的:比较锥形束CT(CBCT)图像引导乳腺癌放疗中采用不同配准方法[3D配准(平移)和6D配准(平移+旋转)]对配准精度的影响,为选择合理的图像引导方法提供临床依据。**方法:**回顾性分析18例乳腺癌患者共101次治疗前摆位CBCT图像,将CBCT图像与计划CT图像分别采用3D灰度配准和6D灰度配准方法进行配准,比较和分析两种配准方法的3D平移方向的配准偏差差异并计算其平移差别,进一步统计分析旋转角度偏差与平移差别的相关性并做线性模拟。**结果:**3D和6D两种配准方法得到不同的平移配准结果,其中在头脚(Y)方向 $[-1.47\pm 3.00]$ mm vs $[-0.87\pm 3.27]$ mm和前后(Z)方向 $[-2.91\pm 4.49]$ mm vs $[-3.41\pm 5.38]$ mm的差异存在统计学意义($P<0.001$)。旋转角度偏差与平移差别存在相关性,其中 ΔX 和 ΔZ 均与 R_y 呈线性强相关性,其相关系数PCC分别为-0.883和0.795($P<0.001$); ΔY 与 R_x 呈线性强负相关性,PCC=-0.722($P<0.001$)。根据线性模拟公式计算,当 $R_x>1^\circ$ 且 $R_y>2^\circ$ 时,两种配准方法将在各平移方向上存在将近1 mm的平移差别。**结论:**3D和6D平移配准结果的差异具有统计学意义。6D配准的旋转角度大小影响平移差别的大小,其中 R_y 影响最大。建议使用6D配准方法时应使用六维床进行6D偏差修正,以减小平移差别的影响。

【关键词】乳腺癌;图像引导放射治疗;锥形束CT;摆位误差;图像配准;六维床

【中图分类号】R318;R811.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2023)01-0007-06

Comparison of different registration methods in cone beam CT image guided radiotherapy for breast cancer

LIU Shuyan^{1,2}, GAO Xingwang³, LIU Yimei¹, ZHOU Yang⁴, DENG Xiaowu¹, CHEN Zhongben⁵, PENG Yinglin¹

1. Department of Radiation Oncology, Sun Yat-sen University Cancer Center/State Key Laboratory of Oncology in Southern China/Collaborative Innovation Center for Cancer Medicine, Guangzhou 510060, China; 2. The First Affiliated Hospital, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510062, China; 3. Shenzhen Hospital, National Cancer Center/National Clinical Research Center for Cancer/Cancer Hospital of Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Shenzhen 518116, China; 4. Zhuzhou Hospital Affiliated to Xiangya School of Medicine, Central South University, Zhuzhou 412000, China; 5. Xinhua College of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510520, China

Abstract: Objective To compare the effects of three-dimensional (3D) registration (translation only) and six-dimensional (6D) registration (translation+rotation) on registration accuracy in cone beam CT (CBCT) image guided radiotherapy for breast cancer for providing clinical basis for selecting the optimal image guidance method. **Methods** The positioning CBCT images before 101 treatments in 18 patients with breast cancer were retrospectively analyzed. The CBCT images and planned CT images were registered by 3D grey-scale image registration and 6D grey-scale image registration, separately. The registration deviation

【收稿日期】2022-05-14

【基金项目】国家自然科学基金(12005316);中华国际医学交流基金会肿瘤精准放疗星火计划(2019-N-11-20);广州市科技计划项目(202206010154, 202206010180);广州新华学院大学生创新创业训练项目(202113902007)

【作者简介】刘妹言,研究方向:肿瘤放射治疗物理学,E-mail: liusy0826@163.com

【通信作者】彭应林,助理研究员,研究方向:肿瘤放射治疗物理学,E-mail: pengyl@sysucc.org.cn

前言

放射治疗(以下简称放疗)是肿瘤的主要治疗手段之一^[1-2]。然而在治疗过程中,肿瘤和受照射器官体积退缩、位移等解剖结构改变,会使放疗剂量分布偏离拟定的治疗计划,从而影响治疗效果或增加并发症发生几率^[3]。随着放疗技术的发展,使用各种在线成像手段(如X射线透视、CT、MRI等),在分次治疗前或治疗中获取患者影像,跟踪肿瘤靶区及周围

differences in the 3D translation directions of the two registration methods were compared and analyzed; and the translation difference (Δ) was calculated. Furthermore, the correlation between rotation angle deviation (R) and translation difference (Δ) was statistically analyzed, and a linear simulation was carried out. **Results** 3D and 6D registration methods had different translation registration results, in which there were statistical differences in superior-inferior (Y) direction and anterior-posterior (Z) directions $[(-1.47\pm 3.00) \text{ mm vs } (-0.87\pm 3.27) \text{ mm}, (-2.91\pm 4.49) \text{ mm vs } (-3.41\pm 5.38) \text{ mm}; P<0.001]$. The rotation angle deviation (R) was correlated with the translation difference (Δ). ΔX and ΔZ had strong linear correlations with R_y ($PCC=-0.883, 0.795; P<0.001$), and there was a strong linear negative correlation between ΔY and R_x ($PCC=-0.722, P<0.001$). According to the linear simulation formula, when R_x was greater than 1° and R_y was greater than 2° , there was nearly 1 mm translation difference between the two registration methods in each translation direction. **Conclusion** The 3D translation registration results significantly differ from 6D translation registration results. The rotation angle of 6D registration affects the translation difference, among which R_y has the greatest impact. It is suggested that when using 6D registration method, 6D couch should be used to correct 6D deviations in order to reduce the effects of translation difference.

Keywords: breast cancer; image-guided radiotherapy; cone beam CT; positioning error; image registration; six-dimensional couch

器官位置、形状和密度的改变,引导调整摆位的影像引导放疗(IGRT)技术^[4]或修改治疗计划的自适应放疗(ART)技术广泛进入临床应用^[5-7]。目前,锥形束CT(CBCT)图像引导放疗技术被广泛应用于放疗患者治疗前摆位校正。CBCT影像装置直接负载在直线加速器上,与治疗射线束方向垂直,相交于等中心,是监测患者在放疗过程中各种变化的有效工具^[8]。CBCT图像引导技术在分次治疗前采集患者的实时CBCT图像,通过与计划CT进行三维(3D)图像配准,确定患者摆位误差并予以纠正。实现这个过程的关键技术之一是图像配准,因此图像配准的精度将直接影响临床放疗剂量分布的准确性。CBCT图像引导系统中有三维(3D)和六维(6D)两种配准方法。3D配准方法是指在一定配准范围内,配准算法仅考虑摆位CBCT图像与计划CT图像之间的平移(Translation)的偏差[左右(X方向)、头脚(Y方向)和前后(Z方向)3个方向],通过计算综合考虑感兴趣区域内每一点位置的平移误差,获得3D方向的配准结果,并通过移床进行修正。6D配准方法是指在一定配准范围内,配准算法同时考虑摆位CBCT图像与计划CT图像之间的3D平移偏差和3D旋转(Rotation)的偏差[左右(R_z)、头脚(R_y)、前后(R_x)],通过计算综合考虑感兴趣区域内每一点位置的平移误差和旋转误差,获得6D方向的配准结果,并可通过6D治疗床进行修正。然而,目前临床常采用6D配准(平移+旋转)方法获得6D的修正结果,但很多肿瘤中心只配备了3D治疗床,仅能实现3D平移修正而无法对旋转误差进行修正,未修正的旋转误差带来配准差别以及配准残余误差尚未可知^[9-10]。

本课题回顾性研究乳腺癌患者CBCT图像引导放疗中不同配准方法(3D配准和6D配准)的配准差别,比较分析两种不同配准方法在平移方向配准结果的差异,

统计分析平移差别与摆位旋转偏差的相关性,并通过线性方程模拟旋转角度带来的平移差别,以明确其对临床治疗精度的影响,为临床摆位误差的修正即图像配准方法及其修正方法的选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 一般临床资料

随机选取2021年11月至2022年3月期间于中山大学附属肿瘤医院放射治疗中心接受IMRT放疗的乳腺癌患者18例及其101套治疗前摆位CBCT图像。所有病例均经过临床病理确诊,年龄32~59岁,中位年龄46岁。临床分期I期6例、II期4例、III期8例。病变靶区位于左侧8例,右侧10例。所有患者卡氏评分(KPS) ≥ 90 。

1.2 计划CT图像扫描

乳腺癌患者采用发泡胶+碳纤维固定底板固定(图1),仰卧位进行扫描。扫描机器为大口径CT模拟机(Brilliance, Philip),扫描参数:电流为250 mAs、电压为140 kV,扫描及重建层厚5 mm,层距3 mm。扫描后将CT-sim图像传输至Monaco系统,并由乳腺癌放疗专家进行感兴趣区解剖结构的勾画和确认。



图1 乳腺癌患者采用发泡胶+碳纤维固定底板固定
Figure 1 Immobilization of polyurethane foam+carbon fiber baseplate for breast cancer patients

1.3 放疗计划设计

在计划CT上完成勾画后,由物理师或剂量师在计划CT图像进行放疗计划设计。由于本研究是评估不同配准方法对乳腺癌图像引导摆位精度的影响,故治疗计划所含有的射野角度、剂量、数量等对配准结果不产生影响。因此试验只将含有射野等中心和勾画的靶区、计划靶区以及危及器官(OAR)轮廓连同计划CT图像传输至XVI工作站,作为患者在线CBCT图像配准参考图像。

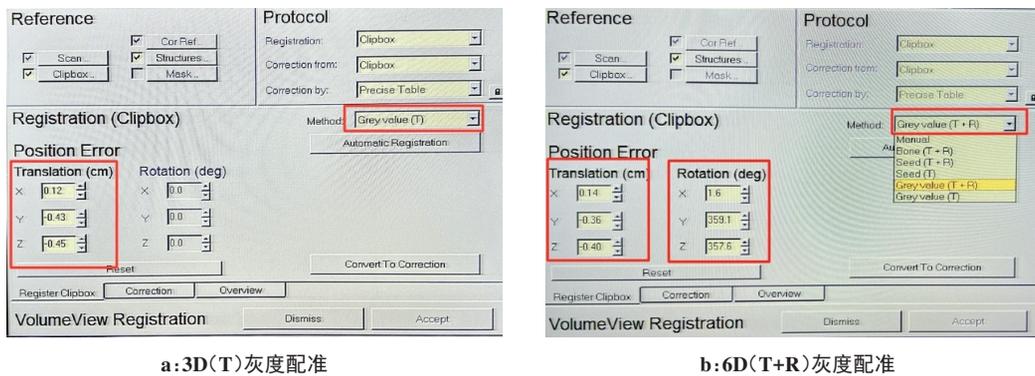
1.4 CBCT图像获取

在线CBCT图像采集系统为Elekta公司的Infinity™直线加速器上的机载kV-CBCT成像设备。患者治疗前根据激光标志摆位后,采用XVI(Version: Release 5.0.4 b44, Elekta AB)进行CBCT扫描。扫描电压120 kV,电流176 mAs,行全弧或部分弧扫描,选

用FOV为42.6 cm的M20准直器,采用中等分辨率进行5 mm层厚的图像重建,重建完成后传送至XVI图像配准工作站,作为图像配准的浮动图像。

1.5 不同配准方法配准

在XVI系统图像配准工作站上,选择每例患者计划CT图像与上述治疗前摆位CBCT图像,采用灰度配准算法,以计划靶区体积范围为感兴趣区域,分别选用Grey value (T)和Grey value (T+R)两种不同配准方法进行图像配准(图2)。(1)3D配准方法:选择Grey(T)的自动配准方式,对计划CT和CBCT图像进行配准,并获得3D平移方向(X, Y, Z)的配准结果。(2)6D配准方法:选择Grey(T+R)的自动配准方式,对计划CT和CBCT图像进行配准,并获得6D(T: X, Y, Z; R: Rx, Ry, Rz)的配准结果。记录并比较不同配准方法得到的101组配准结果。



a: 3D(T)灰度配准

b: 6D(T+R)灰度配准

图2 两种不同配准方法

Figure 2 Two different registration methods

1.6 试验数据分析

1.6.1 比较分析3D和6D配准方法的三维平移数据的差别 分别比较3D和6D不同配准方法的平移(T)偏差的差异,即在左右(X)、头脚(Y)和前后(Z)方向的差别,以及三维矢量上的偏差数值(Δd)。

$$\Delta d = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (1)$$

其中,进一步计算其各方向的差别(ΔX 、 ΔY 、 ΔZ)以及三维矢量方向的差别(ΔD):

$$\Delta X = X_{3D} - X_{6D} \quad (2)$$

$$\Delta Y = Y_{3D} - Y_{6D} \quad (3)$$

$$\Delta Z = Z_{3D} - Z_{6D} \quad (4)$$

$$\Delta D = \Delta d_{3D} - \Delta d_{6D} \quad (5)$$

其中, X_{3D} 和 X_{6D} 分别为3D和6D配准得到的左右方向(X)的配准结果; Y_{3D} 和 Y_{6D} 分别为3D和6D配准得到的头脚方向(Y)的配准结果; Z_{3D} 和 Z_{6D} 分别为3D和6D配准得到的前后方向(Z)的配准结果; Δd_{3D} 和 Δd_{6D} 分别为3D和6D配准得到的三维矢量(Δd)值。

1.6.2 分析6D配准旋转角度偏差与平移差别的相关性

运用SPSS将6D配准得到3个旋转角度偏差与平移差别进行相关性统计分析,相关性统计分析方法为皮尔逊相关性分析,并用皮尔逊相关性系数(Pearson Correlation Coefficient, PCC)衡量旋转角度偏差与平移差别的相关性强度。PCC越接近1代表正相关性越高,越接近0代表相关性越低,越接近-1代表负相关性越高。相关强度的判断标准为PCC的绝对值 r , $0.8 \leq r < 1$,为极强相关; $0.6 \leq r < 0.8$,为强相关; $0.4 \leq r < 0.6$,为中等程度相关; $0.2 \leq r < 0.4$,为弱相关; $0.0 \leq r < 0.2$,为极弱相关或不相关。

1.6.3 旋转角度偏差与平移差别的线性拟合 在OriginLab(Version 2021)中将6D配准得到3个旋转角度与平移差别对应的相关性中具有强相关性关系的组进行线性拟合,运用拟合函数判断旋转角度偏差与平移差别的对应关系。

1.7 统计学方法

采用统计学软件SPSS26.0进行配对t检验, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义, 并利用OriginLab 2021对数据进行线性拟合以及趋势分析。

2 结果

2.1 3D和6D配准方法的3D平移数据差别

3D和6D不同配准方法得到的3D平移数据是不同的, 其中在头脚方向(Y)和前后方向(Z)的差异具有统计学意义($P < 0.001$, 表1)。3D和6D不同配准方法在平移方向存在一定差别, 其中Y方向的差别最大, 见表2。

表1 两种配准方法的平移误差比较($n=101, \bar{x} \pm s, \text{mm}$)

Table 1 Comparison of translation errors between two registration methods ($n=101, \text{Mean} \pm \text{SD}, \text{mm}$)

平移参数	3D配准方法	6D配准方法	均差(95% CI)	t值	P值
X	-0.19±2.46	-0.27±2.69	0.07(-0.21~0.37)	0.533	0.595
Y	-1.47±3.00	-0.87±3.27	-0.60(-0.85~-0.36)	-4.923	<0.001
Z	-2.91±4.49	-3.41±5.38	0.50(0.27~0.73)	4.290	<0.001
Δd	5.58±3.81	6.12±4.65	-0.53(-0.81~-0.26)	-3.854	<0.001

表2 两种配准方法的平移差别($n=101, \bar{x} \pm s, \text{mm}$)

Table 2 Translation differences between two registration methods ($n=101, \text{Mean} \pm \text{SD}, \text{mm}$)

参考	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔD	F值	P值
平移差别	0.08±1.47	-0.60±1.23	0.50±1.17	-0.53±1.39	15.935	<0.001
95% CI	-0.21~0.37	-0.85~-0.36	0.27~0.73	-0.81~-0.26		

2.2 旋转角度偏差与平移差别的相关性

将平移差别与对应的6D配准得到的旋转角度偏差进行相关性分析并进行线性拟合, 结果显示旋转角度偏差与平移差别存在一定的相关性, 其中X方向的平移差别(ΔX)受Y轴旋转角度偏差(Ry)和Z轴旋转角度偏差(Rz)共同影响, 与Ry方向呈线性强负相关性($\text{PCC} = -0.8830, P < 0.001$), 与Rz方向呈线性弱负相关性($\text{PCC} = -0.2953, P = 0.003$)。Y轴方向差别(ΔY)受X轴旋转角度偏差(Rx)和Y轴旋转角度偏差(Ry)共同影响, 与Rx方向呈线性强负相关性($\text{PCC} = -0.7223, P < 0.001$), 与Ry方向呈线性弱正相关性($\text{PCC} = 0.2683, P = 0.007$)。Z轴方向的差别(ΔZ)受Y轴旋转角度偏差(Ry)影响, 与Ry方向呈线性强正相关性($\text{PCC} = 0.7953, P < 0.001$)。ΔD与Ry呈线性中等正相关性($\text{PCC} = 0.5803, P < 0.001$)。

2.3 旋转角度偏差与平移差别的线性拟合

分别对强相关的旋转角度偏差与平移参数进行线性拟合, X方向的差别(ΔX)与Y方向旋转角度偏差(Ry)的拟合公式为 $\Delta X = -0.5686Ry + 0.3682, R^2 = 0.7794$, 见图3a。Y方向的差别(ΔY)与X方向旋转角度偏差(Rx)的拟合公式为 $\Delta Y = -0.8132Rx + 0.2537, R^2 = 0.5215$, 见图3b。Z方向的差别(ΔZ)与Y方向旋转角度偏差(Ry)的拟合公式为 $\Delta Z = 0.4066Ry + 0.2927, R^2 = 0.6313$, 见图3c。3D矢量方向的差别(ΔD)与Y方向旋转角

度偏差(Ry)的拟合公式为 $\Delta D = 0.3707Ry + 1.6854, R^2 = 0.3358$, 见图3d。

2.4 平移差别的估算

根据公式可知, 当Y轴方向旋转角度偏差等于 2° , 在X轴和Z轴分别可发生-0.77 mm和1.11 mm的偏差; 当Y轴方向旋转角度偏差等于 3° , 在X轴和Z轴分别可发生-1.34 mm和1.51 mm的偏差; 当Y轴方向旋转角度偏差等于 4° , 在X轴和Z轴分别可发生-1.91 mm和1.92 mm的偏差; 当Y轴方向旋转角度偏差等于 5° , 在X轴和Z轴分别可发生-2.47 mm和2.33 mm的偏差。当 $Rx > 1^\circ$ 且 $Ry > 2^\circ$ 时, 两种配准方法将在各平移方向上存在将近1 mm的平移差异, 见表3。本研究统计了在各方向 $> 2^\circ$ 旋转偏差的频次和概率, 分别为: 绕X轴方向旋转角度偏差 $> 2^\circ$ 的概率为5.94%(6/101); 绕Y轴方向旋转角度偏差 $> 2^\circ$ 的概率为17.82%(18/101); 绕Z轴方向旋转角度偏差 $> 2^\circ$ 的概率为10.89%(11/101)。

3 讨论与小结

国际辐射单位与测量委员会(ICRU)24号报告显示, 靶区剂量偏离度达到3%~5%就有可能引起肿瘤原发灶放疗的有效率下降及周围正常组织放射性并发症概率的增加^[11]。因此, 采用CBCT图像引导乳腺放疗至关重要。然而影响CBCT图像引导放疗精度的因素

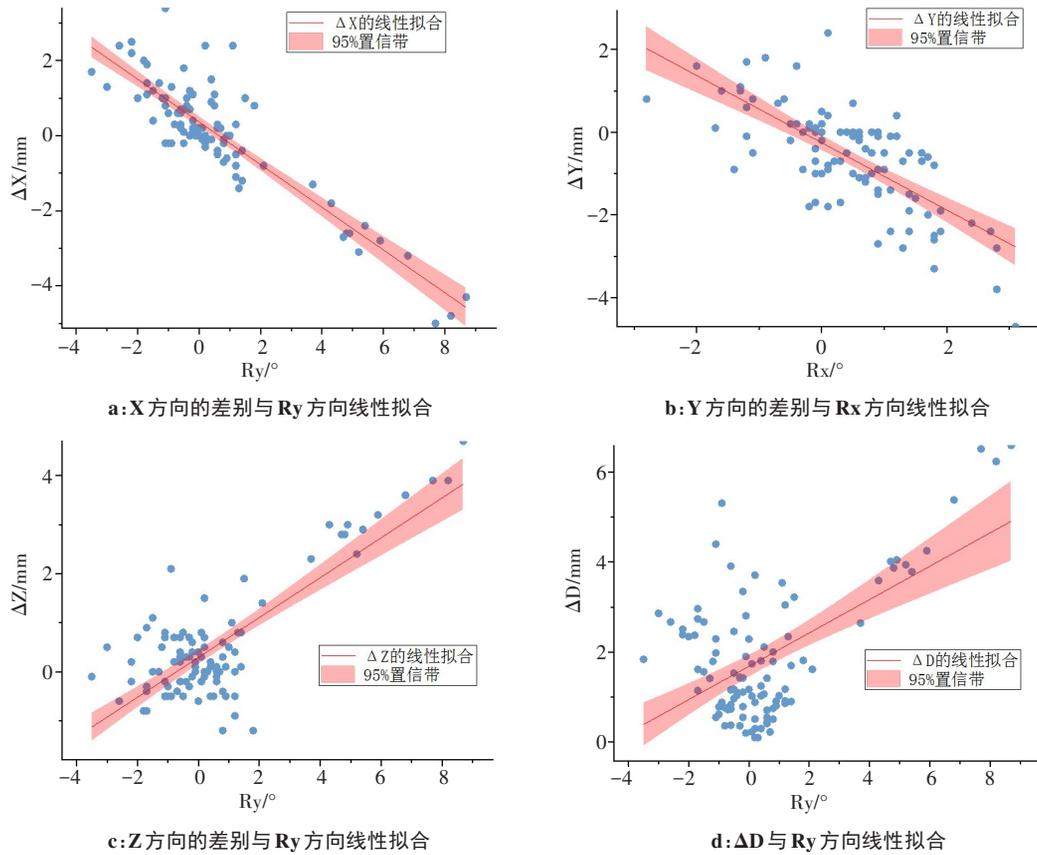


图3 各方向差别与旋转偏差的线性模拟示意图

Figure 3 Linear simulation diagrams of differences in each direction and rotation deviations

表3 平移差别的估算值

Table 3 Estimated translation residuals

Ry/°	ΔX/mm	ΔZ/mm	Rx/°	ΔY/mm
-5	3.21	-1.74	-5	3.81
-4	2.64	-1.33	-4	3.00
-3	2.07	-0.93	-3	2.19
-2	1.51	-0.52	-2	1.37
-1	0.94	-0.11	-1	0.56
0	0.37	0.29	0	-0.25
1	-0.20	0.70	1	-1.07
2	-0.77	1.11	2	-1.88
3	-1.34	1.51	3	-2.69
4	-1.91	1.92	4	-3.51
5	-2.47	2.33	5	-4.32

有很多,包括配准算法、配准范围大小和配准方法等。对于配准算法和配准范围的研究较多,如黄伯天等^[12]用仿真人胸腹体模进行试验,结果显示灰度配准优于骨性配准。彭应林等^[13-16]对肺癌病人的不同配准范围做了进一步研究,结果指出肺癌放疗的CBCT引导摆位应选择灰度配准方式,配准范围会影响配准精度。因此本试验选用灰度配准,并以乳腺癌计划靶区范围作

为配准范围,以保证配准精度。

许峰等^[17]研究指出旋转误差引起的平移误差与旋转误差高度相关。李明等^[18]进一步研究胸部肿瘤旋转误差与平移差别之间的数学模型,结果显示X轴方向的平移误差变化受绕Y轴(Ry)和Z轴(Rz)产生的旋转误差的影响;Y轴方向的平移误差变化受绕X轴(Rx)和Z轴(Rz)产生的旋转误差的影响;Z轴方向的平移误差变化受绕X轴(Rx)和Y轴(Ry)产生的旋转误差的影响。本研究得到相似结论,结果显示X方向的平移差别受Y轴旋转角度偏差(Ry)和Z轴旋转角度偏差(Rz)共同影响,其中与Ry方向呈线性强负相关性,与Rz方向呈线性弱负相关性。Y轴方向的差别受X轴旋转角度偏差(Rx)和Y轴旋转误差(Ry)共同影响,与Rx呈线性强负相关性,与Ry方向呈线性弱正相关性。Z轴方向的差别仅受Y轴旋转角度偏差(Ry)影响,与Ry呈线性强正相关性。ΔD与Ry呈线性中等正相关性。另外,本研究根据临床结果分析了其相关性强度,可为临床应用提供更好的指导。

为进一步研究旋转角度偏差对平移差别的影响大小,分别对具有强相关的旋转角度偏差与平移参数进行线性拟合,结果显示除了Y方向的差别(ΔY)与Y方向旋转角度偏差(Ry)不相关,拟合结果较差,X方向的差别(ΔX)与Z方向的差别(ΔZ)均与Y方向

旋转角度偏差(Ry)强相关,且拟合较好。这说明在Y轴方向的旋转角度严重影响了平移的差别大小。Guckenberger等^[19]使用CBCT图像与计划图像配准进行摆位误差测量,发现对于胸部肿瘤患者,有超过1/4的病例在摆位时发生了 $>2^\circ$ 的旋转偏差,并通过模拟计算认为这种旋转误差可致计划靶区剂量分布发生5%左右的误差。本研究也发现在各方向 $>2^\circ$ 偏差的概率分别为:绕X轴方向旋转角度偏差 $>2^\circ$ 的概率为5.94%;绕Y轴方向旋转角度偏差 $>2^\circ$ 的概率为17.82%;绕Z轴方向旋转角度偏差 $>2^\circ$ 的概率为10.89%。根据研究报道, 2° 的旋转误差会使靶区剂量发生3%~5%的变化,即 2° 的旋转误差是需要校正的^[20-22]。因此在临床应用中要特别注意Y轴旋转角度偏差的大小,当其偏差角度 $>2^\circ$ 时,需要采用合适的修正方法。

综上所述,采用3D和6D两种不同配准方法的平移配准结果的差异具有统计学意义,其中在X方向差别最大。6D配准的旋转角度大小影响平移差别的大小,其中Y轴的旋转角度大小影响最大。建议使用6D配准方法时应使用六维床进行6D偏差修正,以减小平移差别的影响。

【参考文献】

- [1] Datta NR, Samiei M, Bodis S. Radiation therapy infrastructure and human resources in low- and middle-income countries: present status and projections for 2020[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2014, 89(3): 448-457.
- [2] Datta NR, Samiei M, Bodis S. Radiotherapy infrastructure and human resources in Europe: present status and its implications for 2020[J]. *Eur J Cancer*, 2014, 50(15): 2735-2743.
- [3] De Bondt RB, Nelemans PJ, Hofman PA, et al. Detection of lymph node 5 metastases in head and neck cancer: a meta-analysis comparing US, USgFNAC, CT and MR imaging[J]. *Eur J Radiol*, 2007, 64(2): 266-272.
- [4] Kanakavelu N, Samuel EJ. Accuracy in automatic image registration between MV cone beam computed tomography and planning kV computed tomography in image guided radiotherapy[J]. *Rep Pract Oncol Radiother*, 2016, 21(5): 487-494.
- [5] Brown E, Owen R, Harden F, et al. Head and neck adaptive radiotherapy: predicting the time to replan[J]. *Asia Pac J Clin Oncol*, 2016, 12(4): 460-467.
- [6] Li X, Zhang YY, Shi YH, et al. Evaluation of deformable image registration for contour propagation between CT and cone-beam CT images in adaptive head and neck radiotherapy[J]. *Technol Health Care*, 2016, 24(Suppl 2): S747-S755.
- [7] Sterzing F, Engenhart-Cabillic R, Flentje M, et al. Image-guided radiotherapy: a new dimension in radiation oncology[J]. *Deutsch Aerztebl Int*, 2011, 108(16): 274.
- [8] 方亚玲,汪志,唐虹,等.腹部肿瘤调强放射治疗摆位中基于锥形束CT的误差[J]. *医疗装备*, 2019, 32(19): 3-5.
Fang YL, Wang Z, Tang H, et al. Error in the position of abdominal tumors intensity modulated radiotherapy by cone-beam CT [J]. *Medical Equipment*, 2019, 32(19): 3-5.
- [9] 谢志原,王捷忠,瞿宜艳,等.食管癌图形引导的放射治疗(IGRT)6个自由度摆位误差研究[J]. *中国癌症防治杂志*, 2009, 1(2): 127-129.
Xie ZY, Wang JZ, Qu YY, et al. Study of 6-D setup error in IGRT on esophageal carcinoma[J]. *Chinese Journal of Oncology Prevention and Treatment*, 2009, 1(2): 127-129.
- [10] Hamming-Vrieze O, Van Kranen SR, Heemsbergen WD, et al. Analysis of GTV reduction during radiotherapy for oropharyngeal cancer: Implications for adaptive radiotherapy [J]. *Radiother Oncol*, 2017, 122(2): 224-228.
- [11] Zumsteg Z, Demarco J, Lee SP, et al. Image guidance during head-and-neck cancer radiation therapy: analysis of alignment trends with in-room cone-beam computed tomography scans[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2012, 83(2): 712-719.
- [12] 黄伯天,邓小武,罗广文,等.图像引导放疗锥束CT与计划CT不同配准方法精度研究[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2014, 23(2): 156-160.
Huang BT, Deng XW, Luo GW, et al. Accuracy study of different registration methods for cone beam CT and planning CT in image-guided radiation therapy[J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2014, 23(2): 156-160.
- [13] 彭应林,刘松然,黄伯天,等.图像配准方法对肺癌放疗图像引导摆位精度的影响[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2015, 24(2): 184-188.
Peng YL, Liu SR, Huang BT, et al. The accuracy of image registration methods for image-guided positioning in lung cancer radiotherapy[J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2015, 24(2): 184-188.
- [14] 陆建锋,孙鸿飞,高留刚,等.CT和锥形束CT配准范围与精度关系研究[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2017, 37(4): 306-310.
Sui JF, Sun HF, Gao LG, et al. Relationship between the registration range and accuracy of CT images and CBCT images[J]. *Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection*, 2017, 37(4): 306-310.
- [15] Meyer J, Wilbert J, Baier K, et al. Positioning accuracy of cone-beam computed tomography in combination with a HexaPOD robot treatment table[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2007, 67(4): 1220-1228.
- [16] Zhang L, Garden AS, Lo J, et al. Multiple regions-of-interest analysis of setup uncertainties for head-and-neck cancer radiotherapy[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2006, 64(5): 1559-1569.
- [17] 许峰,柏森,王瑾,等.用锥形束CT图像测量放疗摆位误差[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2007, 16(6): 461-464.
Xu F, Bai S, Wang J, et al. Setup errors with image guided radiotherapy technique[J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2007, 16(6): 461-464.
- [18] 李明,金淑平,蔡晶,等.放射治疗摆位旋转误差数学模型的建立与可控性分析[J]. *生物医学工程与临床*, 2019, 23(6): 657-660.
Li M, Jin SP, Cai J, et al. Establishment of radiotherapy positioning rotation error mathematical model and controllability analysis[J]. *Biomedical Engineering and Clinical Medicine*, 2019, 23(6): 657-660.
- [19] Guckenberger M, Meyer J, Vordermark D, et al. Magnitude and clinical relevance of translational and rotational patient setup errors: A cone-beam CT study[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2006, 65(3): 934-942.
- [20] Gutfeld O, Kretzler AE, Kashani R, et al. Influence of rotations on dose distributions in spinal stereotactic body radiotherapy (SBRT)[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2009, 73(5): 1596-1601.
- [21] Wang H, Shui A, Wang C, et al. Dosimetric effect of translational and rotational errors for patients undergoing image-guided stereotactic body radiotherapy for spinal metastases[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2008, 71(4): 1261-1271.
- [22] 王艳阳,傅小龙,夏冰,等.胸部肿瘤患者放疗旋转摆位误差分析[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2010, 19(1): 44-46.
Wang YY, Fu XL, Xia B, et al. Evaluation of rotational set-up errors in patients with thoracic neoplasms[J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2010, 19(1): 44-46.

(编辑:黄开颜)