

# 基于红外定位系统放疗实时摆位预警系统的摆位数据误差统计

王语汇<sup>1</sup>, 王东燕<sup>2</sup>, 周俊东<sup>2</sup>, 吴传锋<sup>2</sup>, 葛云<sup>1</sup>, 陈颖<sup>1</sup>, 黄晓林<sup>1</sup>, 李伟峰<sup>1</sup>

1. 南京大学电子科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 2. 苏州市立医院东区放疗科, 江苏 苏州 215000

**【摘要】目的:**利用红外定位系统(OPS)放疗实时摆位预警系统,对放疗摆位累积产生的海量数据,进行与设备性能及体态体态相关的误差统计与监测,进而实时对摆位进行指导。**方法:**首先选取264例腹部癌症摆位数据、195例头颈部癌症摆位数据以及186例头颈部癌症摆位数据;然后搭建归一转换系统,量化标注不同摆位方法产生的不同摆位结果及差异,将现有的摆位结果数据统一转换到一个坐标系下;最后基于放疗摆位累积产生的海量数据,开发模型预警系统,实时监控等中心注册、相机移动、激光线偏移、体膜变形以及锥形束CT本身机械问题5种摆位误差。**结果:**OPS放疗实时摆位预警系统能够实时监控摆位数据,在腹部264例摆位数据中,5种误差分别为5、1、11、4、7例;在头颈部195例摆位数据中,5种误差分别为13、4、40、0、27例;在头部186例摆位数据中,5种误差分别为10、3、25、0、19例。**结论:**OPS放疗实时摆位预警系统能较为准确实时预警摆位质量和摆位精度,当摆位出现较大误差时,该系统能够迅速报警,及时指出摆位存在的问题,第一时间提醒、纠正存在的问题。

**【关键词】**红外定位系统;放疗摆位;误差统计;实时预警

**【中图分类号】**R318;R811.1

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2021)12-1477-05

## Statistical analysis of positioning errors based on OPS radiotherapy real-time positioning early warning system

WANG Yuhui<sup>1</sup>, WANG Dongyan<sup>2</sup>, ZHOU Jundong<sup>2</sup>, WU Chuanfeng<sup>2</sup>, GE Yun<sup>1</sup>, CHEN Ying<sup>1</sup>, HUANG Xiaolin<sup>1</sup>, LI Weifeng<sup>1</sup>

1. School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Department of Radiotherapy, Suzhou Municipal Hospital (East District), Suzhou 215000, China

**Abstract: Objective** To analyze and monitor the errors related to equipment performance and posture by OPS radiotherapy real-time positioning early warning system based on the massive data accumulated by radiotherapy positioning, thereby guiding the positioning in real time. **Methods** The positioning data in the study were selected from 264 cases of abdominal cancer, 195 cases of head and neck cancer and 186 cases of head cancer. A normalization conversion system was build to quantify and label different positioning results and differences produced by different positioning methods, and then to convert the existing positioning results to a coordinate system. Finally, based on the massive data generated by radiotherapy positioning, an early warning system was developed for the real-time monitoring of 5 kinds of positioning errors which were caused by isocenter registration, camera movement, laser line deviation, body membrane deformation or CBCT mechanical problems. **Results** The OPS radiotherapy real-time positioning early warning system could monitor the positioning data in real time. The numbers of cases with 5 kinds of positioning errors were 5, 1, 11, 4 and 7 among 264 cases of abdominal cases, 13, 4, 40, 0 and 27 among 195 cases of head and neck cancer, and 10, 3, 25, 0 and 19 among 186 cases of head cancer. **Conclusion** OPS radiotherapy real-time positioning early warning system can provide more accurate real-time early warning of the quality and accuracy of the positioning. When there is a large positioning error, the system can quickly alarm, point out the problems existing in the positioning in time, and remind and correct it immediately.

**Keywords:** optical positioning system; radiotherapy positioning; error statistics; real-time early warning

**【收稿日期】**2021-06-26

**【基金项目】**国家自然科学基金(81671777)

**【作者简介】**王语汇, 硕士, 研究方向: 医学影像物理, E-mail: wanyuhuiqd@163.com

## 前言

根据国家癌症中心发布的2019年最新数据, 2015年中国恶性肿瘤发病病例高达392.9万例, 死亡病例约为233.8万例。这意味着中国平均每天有1万

多人被诊断为恶性肿瘤,平均每天有6400多人死于癌症<sup>[1]</sup>。我国癌症的发病率和死亡率均呈上升趋势。近十年来,中国恶性肿瘤的发病率每年约增长3.9%,死亡率每年约增长2.5%<sup>[2]</sup>。放疗是肿瘤治疗的重要手段<sup>[3-4]</sup>。由于肿瘤的类型和分期存在差异,需要进行放射治疗的患者约占所有肿瘤患者的50%~65%<sup>[5]</sup>。若放射治疗时摆位不够准确,则有可能导致肿瘤部分欠照射或正常组织受损的情况,将直接影响肿瘤患者的治疗效果,影响肿瘤患者的临床生存率,也进一步影响肿瘤是否会根治与复发<sup>[6-7]</sup>。放射治疗摆位的过程为:医生在治疗计划系统的影像中对肿瘤进行勾画,由影像确定肿瘤中心,物理师和治疗师再根据这个肿瘤中心坐标,调整治疗床,使病人肿瘤中心的位置与放射治疗设备的机械等中心的位置重合<sup>[8]</sup>。

有些部位的肿瘤周边有很多重要器官,这对放疗摆位提出了很高的要求<sup>[9]</sup>。尤其是在分次间放射治疗的过程中,准确而可靠的摆位对射线剂量的输送就显得更为重要。但由于放射治疗的次数较多,周期较长,一个放射治疗疗程约为30~40 d,涉及的影响因素众多而又复杂,这就导致保证每次摆位都有较高准确性有很大的难度<sup>[10]</sup>。而且在中国,物理师和治疗师受到教育的程度以及临床经验都参差不齐,治疗时物理师一般都不在现场,再者中国病人众多,每位患者的摆位时间非常有限,一般不超过5 min,这使得摆位精度更加得不到保证<sup>[11]</sup>。

有了临床放疗摆位后产生的大量数据记录,就可以对摆位设备、摆位方法、摆位精度、摆位肿瘤区域、放疗设备相关机械性能等进行比较和研究,就可以及时发现各种问题,分析摆位误差产生的原因,及时或实时地预警、提醒和纠正摆位错误。这将在放疗摆位实施上形成“闭环思维”,更好地帮助医学物理师和治疗师及时发现摆位错误,控制摆位误差,最终保证摆位质量,有望大幅度改善中国的放疗疗效<sup>[12-14]</sup>。

## 1 资料与方法

### 1.1 患者资料

本研究纳入645例摆位数据,其中有264例腹部癌症摆位数据,195例头颈部癌症摆位数据以及186例头部癌症摆位数据。

### 1.2 复杂医学坐标系转换关系

不同摆位方法对应的摆位坐标系之间无法互相转换,这是导致此前摆位精度无法比较和研究的关键所在。红外定位系统(OPS)放疗实时摆位预警系统含有一个放疗摆位结果数据的收集装置,即在加速器机房建立一个收集监控装置,能够收集监控转

换坐标系。该系统能够将现有的摆位结果数据统一转换到一个坐标系下,进行比较和研究。下面将对CT坐标系与OPS坐标系的转换关系矩阵进行推导。

空间矢量 $(ijk)'$ 需要经过一个三维空间的映射变换,才能转换成另一个坐标系下的矢量 $\vec{x}$ ,该变换由线性变换矩阵 $M$ 和平移变换 $\vec{t}$ 组成:

$$\vec{x} = M(i \ j \ k)' + \vec{t} \quad (1)$$

其中,线性变换矩阵 $M$ 包含了空间方向以及轴缩放相关的所有信息,平移变换 $\vec{t}$ 包含了原空间矢量的几何位置信息。由于线性变换是矩阵相乘实现的,平移变换是矩阵相加,为了通过矩阵乘法来同时表示线性变换和平移变换,在此处我们引入增广矩阵 $N$ :

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & t_1 \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & t_2 \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ j \\ k \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中的增广矩阵 $N$ 被称为转换矩阵,由此建立CT坐标系与OPS坐标系的转换关系。常见的CT扫描体位至少有8种,每一种扫描体位都对应不同的转换关系。我们以HFS头先进仰卧位为例,在CT坐标系中, $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴正方向分别为:从右到左、从腹到背、从脚到头,而在OPS坐标系中, $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴正方向分别为:从右到左、从背到腹、从头到脚,由此可知线性变换矩阵 $M$ 为:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

据此类推,8种扫描体位对应的转换关系就都能够得到,由此我们可以得到转换关系为:

$$N = \begin{bmatrix} M & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

在实际的工程应用中,我们采用6对点,用贪心算法对转换矩阵 $N$ 进行参数优化。通过每一步贪心选择,寻找问题的局部最优解。从6对点坐标开始,然后用5、4、3对点自顶向下遍历,得到局部最优解即停止遍历。转换矩阵 $N$ 进行参数优化后得到 $N'$ :

$$N' = \arg_N \min(O_{OPS} - N * O_{CT}) \quad (5)$$

$O_{CT}$ 是CT坐标系下某点的坐标, $O_{OPS}$ 是OPS坐标系下对应该点的坐标。通过使用贪心算法进行参数优化,最终建立了CT坐标系和OPS坐标系的转换关系矩阵。

### 1.3 摆位误差评估方法

**1.3.1 判断等中心偏差是否异常** 不同部位受到身体内部组织运动的影响不同,因此对摆位误差判定也有不同。由于腹部受呼吸运动、器官蠕动、器官充盈状态等因素的影响较大,容易引起较大的误差,因此

腹部 $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向任一方向上的偏差大于 5 mm 时,则判定为异常。头颈部肿瘤的位置受到呼吸运动或心脏跳动的影响较小,因此 $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向任一方向上的偏差大于 2 mm 时,则判定为异常。头部肿瘤的位置受到呼吸运动及其他内部组织运动的影响很小,因此头部 $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向任一方向上的偏差大于 2 mm 时,则判定为异常。进一步判断产生该偏差的原因。检查当日等中心与注册等中心的偏差,如果摆位偏差与注册偏差大体一致,则判断等中心注册偏差异常。

**1.3.2 判断相机移动偏差是否异常** 如果摆位数据没有异常,但是当日注册等中心与历史等中心有明显偏差,则判断相机移动偏差异常。

**1.3.3 判断激光线偏差** 摆位偏差值异常,但是当日注册等中心与历史等中心没有明显区别,则判断是激光线偏差。

**1.3.4 判断体膜是否变形** 膜发生形变会导致球的位置发生变化,若一个病人过半的膜球变形度这一治疗数据都产生了问题,则可能是因为膜发生了形变。每个病人的每次摆位数据都进行检测。

**1.3.5 锥形束CT(CBCT)本身机械问题** 将同一病人的所有数据进行比较,以折线图的方式展示出来,如果某个病人的某次数据有问题,则可能当天或者更久的所有病人的数据都有问题。某一器官成像时的图像分辨率问题,如肺影像不清楚会产生摆位误差,影响疗效。

## 2 结果

图 1 表示 264 例腹部癌症数据的等中心注册偏差、相机移动偏差、激光线偏移 3 种偏差的监控情况,图 2 表示 195 例头颈部癌症数据 3 种偏差的监控情况,图 3 表示 186 例头部癌症数据 3 种偏差的监控情况。

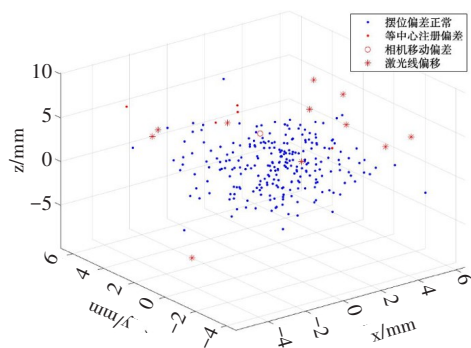


图 1 264 例腹部癌症数据 3 种误差的监控情况  
Fig.1 Monitoring results of 3 kinds of errors in 264 cases of abdominal cancer

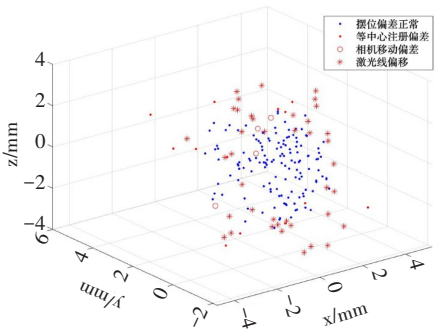


图 2 195 例头颈部癌症数据 3 种误差的监控情况  
Fig.2 Monitoring results of 3 kinds of errors in 195 cases of head and neck cancer

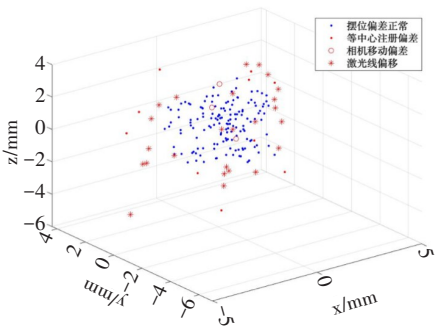


图 3 186 例头部癌症数据 3 种误差的监控情况  
Fig.3 Monitoring results of 3 kinds of errors in 186 cases of head cancer

腹部 $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向任一方向上的偏差大于 5 mm 时,则判定为异常。在 264 例腹部癌症数据中,有 5 例数据等中心注册偏差异常,1 例数据相机移动偏差异常,11 例数据激光线偏差异常。3 种偏差分别占有腹部癌症数据的 1.9%、0.4%、4.2%。

头颈部 $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向任一方向上的偏差大于 2 mm 时,则判定为异常。在 195 例头颈部癌症数据中,有 13 例数据等中心注册偏差异常,4 例数据相机移动偏差异常,40 例数据激光线偏差异常。3 种偏差分别占有头颈部癌症数据的 6.7%、2.0%、20.5%。

头部 $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向任一方向上的偏差大于 2 mm 时,则判定为异常。在 186 例头部癌症数据中,有 10 例数据等中心注册偏差异常,3 例数据相机移动偏差异常,25 例数据激光线偏差异常。3 种偏差分别占有头部癌症数据的 5.4%、1.6%、13.4%。

图 4 表示某例腹部摆位数据体膜变形过大的情况,其中横轴表示定位球编号,纵轴分别为在 $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向上的膜球变形度。腹部膜球变形度大于 2 mm 则认定为异常。现有的头颈部及头部摆位数据未发现体膜形变异常数据。腹部体膜变形导致的偏差占有腹部癌症数据的 1.5%。

图 5 表示 OPS 放疗实时摆位预警系统记录的同





- [5] ACKERLY T, LANCASTER C, GESO M, et al. Clinical accuracy of ExacTrac intracranial frameless stereotactic system[J]. Med Phys, 2011, 38(9): 5040-5048.
- [6] GOPAN O, WU Q. Evaluation of the accuracy of a 3D surface imaging system for patient setup in head and neck cancer radiotherapy[J]. Int J Radiat Oncol, 2012, 84(2): 547-552.
- [7] POLAT B, WILBERT J, BAIER K, et al. Nonrigid patient setup errors in the head-and-neck region[J]. Strahlenther Onkol, 2007, 183(9): 506-511.
- [8] EPPENHOF K A, MASPERO M, SAVENIJE M H, et al. Fast contour propagation for MR-guided prostate radiotherapy using convolutional neural networks[J]. Med Phys, 2020, 47(3): 1238-1248.
- [9] LEE N, XIA P, QUIVEY J M, et al. Intensity-modulated radiotherapy in the treatment of nasopharyngeal carcinoma: an update of the UCSF experience[J]. Int J Radiat Oncol, 2001, 53(1): 12-22.
- [10] ZHONG H, WEN N, GORDON J, et al. An adaptive MR-CT registration method for MRI-guided prostate cancer radiotherapy[J]. Phys Med Biol, 2015, 60(7): 2837-2851.
- [11] ZHANG X, LI X, QUAN E, et al. A methodology for automatic intensity-modulated radiation treatment planning for lung cancer[J]. Phys Med Biol, 2011, 56(13): 3873-3893.
- [12] ZHANG J, GE Y, CHEN X, et al. Positioning errors of the conventional method in nasopharyngeal carcinoma radiotherapy: a clinical study of an optical patient position guidance system[J]. J Med Imaging Health Inform, 2015, 5(3): 622-629.
- [13] CHAI L, CHEN D, TANG XB, et al. Comparison of conventional and optical positioning system for non-coplanar beam radiotherapy of nasopharyngeal carcinoma[J]. J Med Imaging Health Inform, 2015, 5(4): 789-794.
- [14] CHAI L, CHEN D, TANG XB, et al. Radiotherapy treatment based on binocular location: real-time monitoring system of patient setup errors[J]. J Med Imaging Health Inform, 2017, 7(4): 897-902.
- [15] GAI X, WEI Y, TAO H, et al. Clinical study of the time of repeated computed tomography and replanning for patients with nasopharyngeal carcinoma[J]. Oncotarget, 2017, 8(16): 27529-27540.
- [16] 许海富, 邓乒翻. 分析体质量指数对鼻咽癌患者放疗摆位误差产生的影响[J]. 中国实用医药, 2019, 14(30): 19-21.
- XU H H, DENG P F. Analysis of the influence of body mass index on the positioning error of nasopharyngeal carcinoma patients during radiotherapy[J]. China Practical Medicine, 2019, 14(30): 19-21.
- [17] 孙雨云. 摆位系统误差对鼻咽癌放疗剂量分布的影响[J]. 临床医药文献电子杂志, 2018, 5(62): 9-11.
- SUN Y Y. Influence of positioning system error on radiation dose distribution of nasopharyngeal carcinoma[J]. Journal of Clinical Medical Literature, 2018, 5(62): 9-11.
- [18] KAM M K, TEO P M, CHAU R M, et al. Treatment of nasopharyngeal carcinoma with intensity-modulated radiotherapy: the Hong Kong experience[J]. Int J Radiat Oncol, 2004, 60(5): 1440-1450.
- [19] 申静, 程江苏, 杨延灵, 等. 头颈肩与体部热塑成型网罩固定在食管癌放疗中摆位误差的比较[J]. 肿瘤研究与临床, 2016, 28(2): 100-102.
- SHEN J, CHENG J S, YANG Y L, et al. Comparison of the positioning error of the head, neck, shoulder and body thermoforming net cover fixed in radiotherapy of esophageal cancer[J]. Cancer Research and Clinic, 2016, 28(2): 100-102.
- [20] 房吉旺, 马宝荣, 宋志国, 等. 放射治疗激光灯安装校验模具[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2004, 13(3): 244.
- FANG J W, MA B R, SONG Z G, et al. Radiation therapy laser lamp installation and verification mold[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2004, 13(3): 244.

(编辑:陈丽霞)