

鼻咽癌放疗中红外定位系统与锥形束CT的摆位精度比较

张羽祺¹, 葛云¹, 蔡晶², 储开岳², 金建华², 葛斌斌², 陈颖¹, 黄晓林¹, 李伟峰¹

1. 南京大学电子科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 2. 南通市肿瘤医院放射科, 江苏 南通 226300

【摘要】目的:量化研究鼻咽癌放疗过程中红外定位系统OPS与锥形束CT(CBCT)摆位精度的差异。**方法:**随机选取南通市肿瘤医院2018年4月~11月收治的鼻咽癌患者21例,使用头颈肩热塑膜固定体位,CT扫描前,在热塑膜上粘贴OPS专用定位球6个。首次治疗时使用千伏级CBCT进行位置验证,并移床校正,记录CBCT移床值和移床后的OPS监测偏差值。选择CBCT肿瘤中心摆位值作为理想放疗摆位参考,对室内激光定位系统的肿瘤中心摆位值和OPS肿瘤中心摆位值进行比较和分析。当摆位误差在2.0 mm内,则被认定与CBCT摆位临床一致。**结果:**与室内激光定位系统摆位相比,OPS大大提高了鼻咽癌放疗摆位的精度。OPS与CBCT在鼻咽癌放疗摆位一致性结果为:患者左右方向(用x轴表示)95.2%、腹背方向(用y轴表示)71.4%、头脚方向(用z轴表示)100.0%。腹背偏差较大主要是因为放射治疗计划系统选择颈椎骨作为参考点,此时选择CBCT摆位将无法消除颈椎骨弯曲产生的偏差。**结论:**OPS实现了在鼻咽癌放疗中实时、准确和快速的患者摆位,代替室内激光定位系统大大提高了鼻咽癌放疗摆位精度。在鼻咽癌放疗摆位精度方面,OPS和CBCT表现出较高的一致性,而且在每次放疗中均可使用。

【关键词】鼻咽癌;红外定位系统;锥形束CT;摆位精度;放疗摆位

【中图分类号】R811.1;R730.55

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2021)02-0162-06

Comparison of optical positioning system and cone-beam computed tomography on positioning accuracy in radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma

ZHANG Yuqi¹, GE Yun¹, CAI Jing², CHU Kaiyue², JIN Jianhua², GE Binbin², CHEN Ying¹, HUANG Xiaolin¹, LI Weifeng¹

1. School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Department of Radiation Oncology, Nantong Tumor Hospital, Nantong 226300, China

Abstract: Objective To quantitatively study the differences in positioning accuracy between optical positioning system (OPS) and cone-beam computed tomography (CBCT) in the radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma. **Methods** Twenty-one patients with nasopharyngeal carcinoma who were admitted to Nantong Cancer Hospital were enrolled in the study. All the patients were immobilized with thermoplastic head-and-shoulder mask. Before CT scan, 6 OPS infrared positioning balls were affixed to the mask. kV-CBCT scan was performed to validate the positioning errors before the first treatment, and the couch was then shifted according to the CBCT validation results. The couch shift when using CBCT and the deviations detected by OPS after couch shift were recorded. The positioning results of the room laser system and those of OPS were recorded, and then compared with those of CBCT which were taken as the reference. When the positioning errors were no more than 2.0 mm, OPS was considered consistent with CBCT in positioning. **Results** Compared with the room laser system, OPS remarkably improved the positioning accuracy of nasopharyngeal carcinoma radiotherapy. The consistencies between OPS and CBCT were 95.2%, 71.4% and 100.0% in left-right, anterior-posterior and superior-inferior directions, respectively. The error caused by the bending of the cervical vertebrae when the cervical vertebrae was taken as the reference point in treatment planning system couldn't be avoided in positioning using CBCT, which led to a large deviation between CBCT and OPS in anterior-posterior direction. **Conclusion** OPS which achieves real-time, accurate and rapid patient positioning can replace the room laser system to greatly improve the positioning accuracy in nasopharyngeal carcinoma radiotherapy. OPS also has a high consistency with CBCT in positioning in nasopharyngeal carcinoma radiotherapy. Moreover, OPS can be used in all fractions.

Keywords: nasopharyngeal carcinoma; optical positioning system; cone-beam computed tomography; positioning accuracy; radiotherapy positioning

【收稿日期】2020-07-12

【基金项目】江苏省基础研究计划自然科学基金(BK20190309)

【作者简介】张羽祺,在读硕士,研究方向:医学物理,E-mail: 2992282906@qq.com

【通信作者】葛云,博士,教授,研究方向:医学物理,E-mail: geyun@nju.edu.cn

前言

放射治疗的主要目的是利用射线照射杀死肿瘤细胞,同时尽可能保护周边的健康组织和器官免受或者少受射线的照射^[1-3]。对于鼻咽癌患者,调强放射治疗具有很大的优势,然而肿瘤周边重要器官居多,这对放射治疗的位置和精度提出了极高的要求。尤其在分次治疗过程中,准确且可靠的患者摆位对于放射治疗中射线剂量的输送至关重要^[4-5]。锥形束CT(CBCT)是安装在直线加速器上用于图像引导治疗的三维成像设备,相比于其他类别的CT,CBCT对于骨骼、关节等硬组织结构的成像效果好,对比明显,所以CBCT也被认为是全身各部位放射治疗摆位的可靠衡量标准。但是,考虑到成像的辐射剂量较大,患者通常每周进行一次CBCT,但是人体各局部可能发生相对运动或者移动,所以分次间存在不确定度。此外,基于CBCT的摆位验证需要经过CT模拟定位、勾画靶区、设计治疗计划、首次摆位、CBCT扫描和纠正摆位误差等步骤,过程较为繁琐^[6]。另一方面,在过去几十年中,癌症患者的数量逐步增多,对放射治疗的需求不断增加,这对治疗设备的工作效率和可靠性提出了极高的要求。因此,对于放射治疗过程中摆位精度的研究具有非常重要的意义^[7-8]。国内外的研究者们尝试了基于光学的摆位验证系统,该方法相较于传统的CT定位具有高效、无辐射和易操作等特点^[9-11]。Sentinel™监控与摆位验证系统,Catalyst™和AlignRT采用3D光学表面定位及追踪技术^[12],结合计算机系统对患者的三维轮廓进行扫描并且重建,并与CT扫描得到的轮廓对比来进行配准摆位。其中Sentinel系统获取参考影像的时间与治疗时间间隔较长,其等中心与实际治疗等中心会存在偏差,且Sentinel影像分辨率相较于Catalyst系统低,计划系统生成影像不能直接显示患者体表轮廓,而且由于扫描层厚、重建精度等影响,可能会导致系统偏差^[13]。Sentinel™、Catalyst™、AlignRT系统主要监测体表轮廓相对位置,患者在治疗床上躺下后,受呼吸运动、胃容量大小、膀胱充盈度等影响,患者腹背方向上的数据会存在误差^[14-15]。结合先前的研究工作,南京大学自主研发的放疗红外定位系统(Optical Positioning System, OPS)是一种在放射治疗中使用且以医用直线加速器为辐射源的超高精度定位系统。OPS利用虚拟现实技术及实施跟踪技术可以将患者肿瘤中心精准摆位到加速器等中心上,达到精确摆位和精准放疗的目的。本文基于南京大学自主研发的OPS系统,研究其与CBCT及室内激光定位系统摆位精度的差异性。

1 材料与方法

1.1 病例选择

随机选取南通市肿瘤医院2018年4月~11月收治的鼻咽癌调强放射治疗患者21例,其中,男13例,女8例,年龄25~78岁,中位年龄58岁。患者对治疗方案均知情同意,且得到医院伦理委员会批准。

1.2 材料设备

采用Elekta Synergy™IGRT加速器机载千伏级CBCT和图像采集系统与图像处理系统(XVI); Philips Bigbore CT模拟定位机; Philips Pinnacle³ 9.0放射治疗计划系统; 西门子MRI; IBA COMPASS3D验证系统; OPS-08A型放疗红外定位系统。

1.3 OPS

OPS根据定位球定位肿瘤中心的位置,摆位误差为肿瘤中心实时坐标和已注册的加速器等中心坐标之间的偏差值。

1.3.1 等中心注册 等中心依据标准为机架与治疗床旋转轴的交点。使用固定在机架或治疗床上的定位球记录旋转轨迹,然后根据旋转轨迹计算旋转轴,两条旋转轴的交点即为等中心点。

1.3.2 肿瘤中心定位 OPS坐标系和CT坐标系之间的变换矩阵 T 是根据红外监控系统建立的,它将OPS坐标系中的点映射到CT坐标系中,如下所示:

$$f(x) = \arg \min_T (P_{CT} - T * P_{OPS}) \quad (1)$$

$$T = \begin{bmatrix} A & D \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, P_{CT} 是在CT图像中定义的定位球的坐标, P_{OPS} 是在OPS坐标系中红外相机捕捉的定位球的位置。 A 是由旋转角度定义的矩阵, D 是一个三维向量,它的3个维度分别表示左右、头脚和腹背3个方向上的位移。实际应用中,我们采用6对点(CT坐标系下的6个点坐标和OPS坐标系下的6个点坐标)对转换矩阵进行参数优化,优化过程采用的是贪心算法,参数优化后得到的矩阵为 T 。利用变换矩阵 T 将OPS系统下等中心的坐标 C_{OPS} 转换到CT坐标系下,求得等中心坐标 C_{CT} 。 C_{Tumor} 是放疗师根据CT模拟图像勾画靶区确定的肿瘤中心的位置,摆位误差 E 表示等中心坐标 C_{CT} 和肿瘤中心坐标 C_{Tumor} 之间的差值,这是一个三维向量,分别表示两者在左右、头脚和腹背3个方向上的摆位误差。由于变换矩阵 T 构建两个坐标系之间的实时转换,从而快速有效地计算了实时摆位误差,指导放疗高效准确进行。

$$C_{CT} = T * C_{OPS} \quad (3)$$

$$E = C_{CT} - C_{Tumor} \quad (4)$$

1.4 患者摆位

本文研究OPS在放疗摆位中的应用,与CBCT的摆位验证进行对比。图1显示了鼻咽癌患者放疗摆位的总体工作流程,具体步骤如下:放疗患者仰卧在治疗床上,采用制作好的头颈肩热塑膜固定,利用室内激光定位系统在热塑膜上画十字线,然后在热塑膜上固定6个定位球,为了更好地定位肿瘤中心,定位球在左右、头脚和腹背3个方向上呈不对称分布。治疗时再次对放疗患者进行固定,使头颈、鼻尖、下颌骨和肩部等身体部位与先前定位时的头颈肩热塑膜相吻合,患者摆位与模拟定位时一致。首次摆位时,将室内激光定位系统对准热塑膜上的十字线标

记进行初次摆位,然后执行CBCT扫描验证摆位误差,根据CBCT验证结果移动治疗床,接着OPS系统会实时跟踪热塑膜上的定位球,根据先前记录的定位球和肿瘤中心之间的相对位置计算实时的摆位误差。在本文的研究中,将CBCT配准结果作为评估OPS系统摆位精度的标准,公式如下:

$$E_{laser} = R_{CBCT}$$

(5)

$$E_{OPS} = R_{OPS}$$

(6)

其中, E_{laser} 是室内激光定位系统的摆位误差, E_{OPS} 是本文提出的OPS摆位误差, R_{CBCT} 表示初次摆位后通过CBCT检测到的摆位误差, R_{OPS} 表示经过CBCT验证并微调后OPS检测到的实时摆位误差。

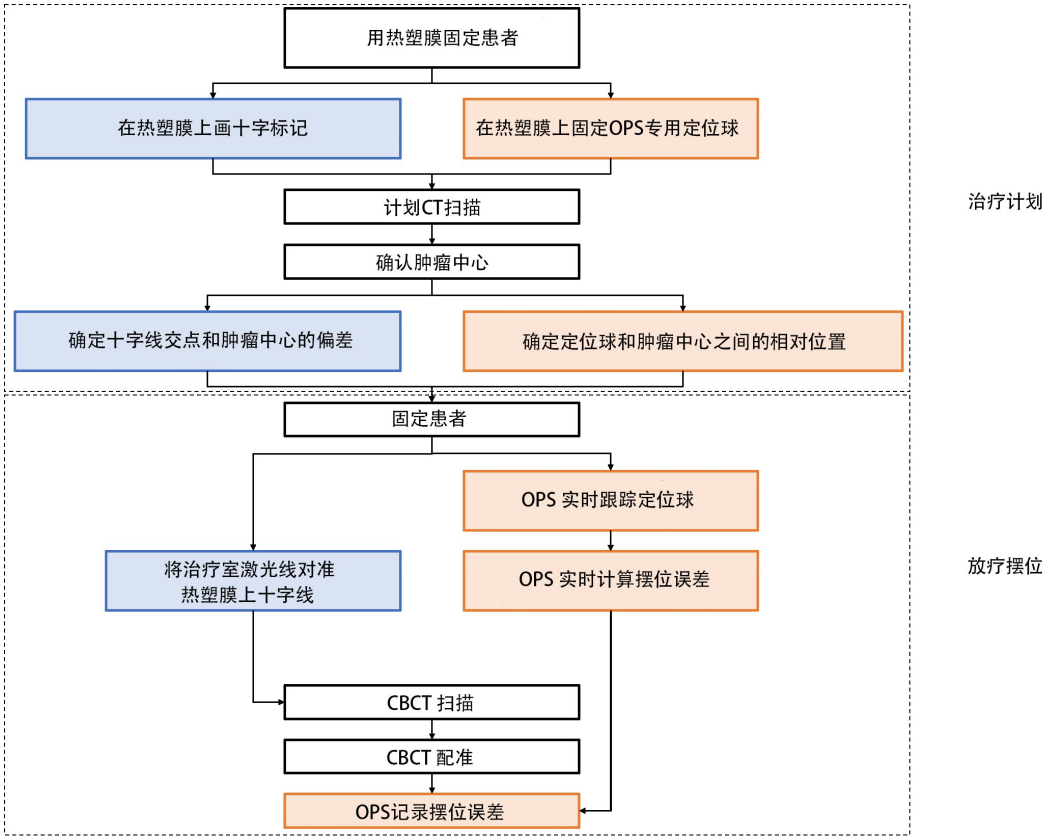


图1 鼻咽癌患者放疗摆位的总体工作流程

Fig.1 Overall workflow of the positioning in nasopharyngeal carcinoma radiotherapy

1.5 评估方法

在临床摆位研究中,当与头颈部的CBCT检测到的摆位误差小于2.0 mm时,可以进行放射治疗,否则患者位置需要调整,直到满足要求为止。关于两种方法之间的一致性比较,当特定方法与CBCT在头颈部的摆位误差相差不超过2.0 mm时,则认为该方法的摆位结果与CBCT一致。在本研究中定义“91%~100%”为几乎完全一致,“81%~90%”为高度一致,“71%~80%”为中等一致,“61%~70%”为一般一

致,低于60%被定义为较低一致。

2 结果

OPS和室内激光定位系统在鼻咽癌放疗摆位中与CBCT的一致性(一致性标准为±2.0 mm)表现如下:OPS系统在左右方向(用x轴表示)与CBCT的摆位一致性为95.2%,即几乎完全一致;OPS系统在腹背方向(用y轴表示)与CBCT的摆位一致性为71.4%,表现为中等一致;OPS系统在头脚方向(用z

轴表示)与CBCT的摆位一致性为100.0%,即几乎完全一致。室内激光定位系统在左右方向(用x轴表示)与CBCT的摆位一致性为66.7%,即一般一致;室内激光定位系统在腹背方向(用y轴表示)与CBCT的摆位一致性为71.4%,表现为中等一致;室内激光定位系统在头脚方向(用z轴表示)与CBCT的摆位一致性为33.3%,即较低一致。

图2表示鼻咽癌患者在x轴(左右)、y轴(腹背)和z轴(头脚)的摆位误差。红色虚线表示OPS检测到的摆位误差的平均值,蓝色虚线表示室内激光定位系统的摆位误差的平均值,黑色虚线表示两种方法的误差范围为2.0 mm。对于鼻咽癌,OPS在左右方向和头脚方向与CBCT的摆位偏差很小,几乎完全一致;在腹背方向上表现出中等的一致性。

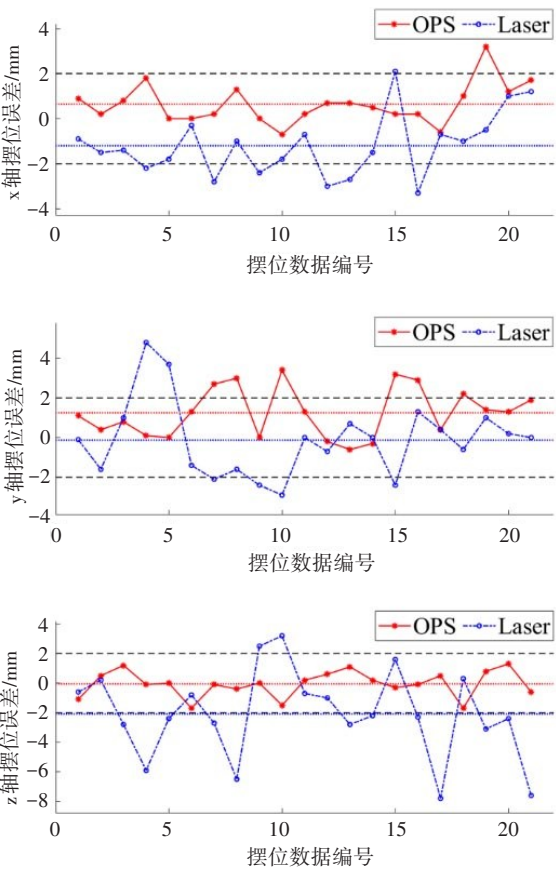


图2 21例鼻咽患者在x轴(左右)、y轴(腹背)和z轴(头脚)的摆位误差
Fig.2 Positioning errors of 21 patients with nasopharyngeal carcinoma
in x (left-right), y(superior-inferior) and z(anterior-posterior)
directions

为了研究腹背方向呈现的差异性,随机抽取一例差异表现较大的病人,图3显示了该患者CT图像的正视图和侧视图,图中的红球为计划肿瘤中心,图4显示了该患者CBCT图像的正视图和侧视图,图中红球为CBCT配准找到的计划肿瘤中心。CBCT使

用的是刚性配准,它将颈椎上的参考点对准计划CT图像来定位肿瘤位置,保证其摆位准确性的前提是计划肿瘤中心应该和实际肿瘤组织之间呈刚性或准刚性结构,但是鼻咽癌肿瘤位于鼻咽区域,相对颈椎明显可以发生运动,计划肿瘤中心和肿瘤组织之间呈现出非刚性结构。而由OPS进行的配准和颈椎骨的弯曲无关,它可以准确地定位鼻咽癌肿瘤位置,即使对于细微的颈椎骨弯曲变化,OPS仍然可以实现快速、实时和精准的摆位。综上所述,CBCT和OPS在腹背方向的中等一致性基本是由颈椎骨的弯曲引起的,OPS在鼻咽癌摆位精度方面比CBCT更具优势。值得注意的是,在摆位耗时方面,OPS大概需要30 s,而CBCT摆位大约需要10~15 min,而且OPS是智能化摆位,和摆位专家的水平无关。

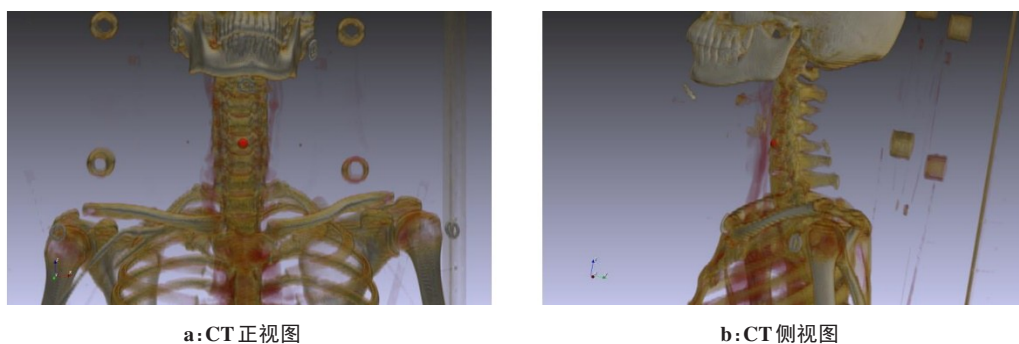
3 讨论

放射治疗已经进入精准放疗时代,肿瘤中心的定位和患者摆位的精确度是提高放射治疗质量的重要前提,也是杀死肿瘤细胞提高治疗效率的关键环节。本文对OPS系统在鼻咽癌放射治疗方面进行摆位精度的研究,将其和室内激光定位系统及CBCT进行比较,结果显示OPS在摆位精度方面与CBCT在总体上表现出很高的一致性。

对于常规的放疗患者,需要在首次摆位之后使用CBCT进行内部解剖结构的验证以计算摆位误差,对于误差超过一定范围的情况则需要手动配准。由于成像剂量的影响,患者一般一周使用一次CBCT以实现精准摆位,并且患者在治疗过程中无法使用CBCT^[16-17]。而本文提出的OPS系统可以进行实时摆位验证,并且几乎不占用额外时间,分次间治疗时不需要频繁使用CBCT进行精准摆位,避免患者受到不必要的辐射剂量,在一定程度上提高了患者治疗的摆位精度和治疗安全性。

室内激光定位系统采用3个方向的激光十字线进行定位,任何一个十字投影激光线的偏差都有可能较大的摆位误差。相比之下,OPS采用自由式配准技术,具有较高的抗干扰能力^[18]。另一方面,CBCT在使用过程中比较依赖使用人员的技术水平,由于人员的使用经验、身体疲劳程度、判断力和工作时间等因素都有可能对结果造成影响,而OPS主要依赖计算机进行智能化摆位,由人员操作带来的误差几乎忽略不计。

总的来说,OPS在鼻咽癌放射治疗摆位方面非常有效,实现了准确、快速的患者摆位,其摆位结果与CBCT有较高的一致性。对于放疗的患者而言,OPS

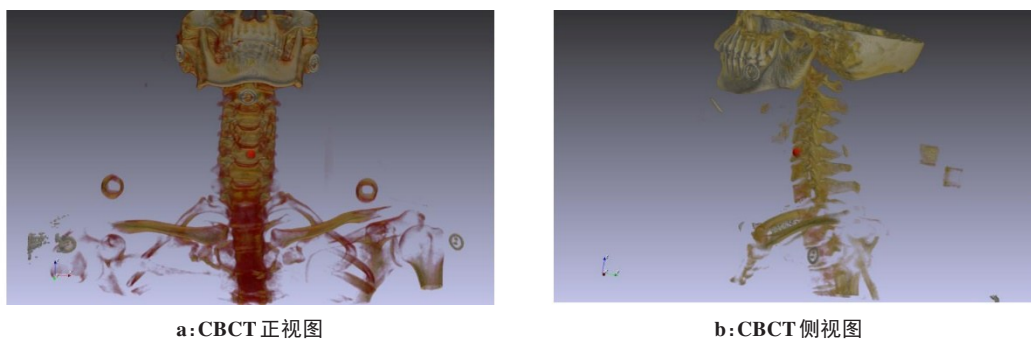


a:CT 正视图

b:CT 侧视图

图3 某患者的CT正视图和侧视图

Fig.3 CT front view and side view of a patient



a:CBCT 正视图

b:CBCT 侧视图

图4 同一例患者的CBCT正视图和侧视图

Fig.4 CBCT front view and side view of the same patient

在满足放射治疗精度的情况下,还能具有如下特点:减少辐射剂量,实时监控患者的摆位误差,降低放疗摆位时间成本,提高治疗效率,增强治疗安全性。

【参考文献】

- [1] 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 Biol Phys, 2012, 84(2): 547-552.
- [2] CHAI L, CHEN D, TANG X B, 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.
- [3] 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.
- [4] STIELER F, WENZ F, SHI M, et al. A novel surface imaging system for patient positioning and surveillance during radiotherapy [J]. Strahlenther Onkol, 2013, 189(11): 938-944.
- [5] STIELER F, WENZ F, SCHERRER D, et al. Clinical evaluation of a commercial surface-imaging system for patient positioning in radiotherapy[J]. Strahlenther Onkol, 2012, 188(12): 1080-1084.
- [6] 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.
- [7] WEISS E, VORWERK H, RICHTER S, et al. Interfractional and intrafractional accuracy during radiotherapy of gynecologic carcinomas: a comprehensive evaluation using the ExacTrac system [J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2003, 56(1): 69-79.
- [8] KEELING V, HOSSAIN S, JIN H, et al. Quantitative evaluation of patient setup uncertainty of stereotactic radiotherapy with the frameless 6D ExacTrac system using statistical modeling[J]. J Appl Clin Med Phys, 2016, 17(3): 111-127.
- [9] CHAI L, CHEN D, TANG X, 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.
- [10] ACKERLY T, LANCASTER C, GESO M, et al. Clinical accuracy of ExacTrac intracranial frameless stereotactic system[J]. Med Phys, 2011, 38(9): 5040-5048.
- [11] 莫小咪, 肖爱农, 伍海彪, 等. 千伏级锥形束kV-CBCT在鼻咽癌调强放疗摆位误差的研究[J]. 中国辐射卫生, 2016, 25(2): 206-208.
- [12] 李庆, 尹龙斌, 谢慧轻, 等. 鼻咽癌调强放疗中摆位误差的变化趋势: 基于千伏级锥形束CT的前瞻性研究[J]. 放射学实践, 2017, 32(8): 870-875.
- [13] 钟仁明, 叶程伟, 李丽琴, 等. 光学表面成像系统在ABC放疗患者作用探讨[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2018, 27(1): 89-93.
- [14] 钱金栋, 段小娟, 周一兵. 鼻咽癌放疗中系统摆位误差对剂量分布

影响的研究[J]. 医疗卫生装备, 2016, 37(1): 76-78.

QIAN J D, DUAN X J, ZHOU Y B. Impact of systematic setup error on dose distribution in radiotherapy of nasopharyngeal carcinoma[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2016, 37(1): 76-78.

[15] 吴伟, 吴伟伟. 锥形束CT对鼻咽癌调强放疗的摆位误差的影响[J]. 实用癌症杂志, 2016, 31(8): 1260-1263.

WU W, WU W W. Influence of CBCT on setup errors of nasopharyngeal carcinoma patients treated with intensity modulated radiation therapy (IMRT)[J]. The Practical Journal of Cancer, 2016, 31(8):1260-1263.

[16] 李媛媛, 郑峰, 金凤, 等. 鼻咽癌适形调强放疗相关体积变化对靶区剂量影响分析[J]. 中华肿瘤防治杂志, 2014, 21(17): 1358-1367.

LI Y Y, ZHENG F, JIN F, et al. Target volume dose and its corresponding factors during intensity modulated radiation therapy for nasopharyngeal carcinoma[J]. Chinese Journal of Cancer Prevention and Treatment, 2014, 21(17): 1358-1367.

[17] 李玉成, 陈维军, 单国平, 等. 摆位误差对立体定向放射治疗计划剂量学验证的影响[J]. 中国医学物理学杂志, 2018, 35(8): 869-873.

LI Y C, CHEN W J, SHAN G P, et al. Effects of setup errors on dosimetric verification of stereotactic body radiotherapy plan [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2018, 35(8): 869-873.

[18] 张白霖, 戴振晖, 朱琳, 等. 基于光学表面监测系统行头部肿瘤放疗实时定位准确性的初步研究[J]. 中国医学物理学杂志, 2019, 36(4): 389-393.

ZHANG B L, DAI Z H, ZHU L, et al. Preliminary study on accuracy of real-time positioning with optical surface monitoring system during radiotherapy for head tumor[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2019, 36(4): 389-393.

(编辑:陈丽霞)