

## 呼吸时相和模体位置对4D-CT图像均匀性的影响

时飞跃<sup>1,2</sup>, 秦伟<sup>1</sup>, 陈飞<sup>1</sup>, 赵环宇<sup>1</sup>, 金洵<sup>3</sup>

1. 南京医科大学附属南京医院(南京市第一医院)肿瘤放疗中心, 江苏 南京 210006; 2. 南京医科大学医学物理研究中心, 江苏 南京 210029; 3. 南京中医药大学第二临床医学院, 江苏 南京 210023

**【摘要】目的:**通过分析Catphan模体CTP486模块的四维CT(4D-CT)图像,研究呼吸时相和模体位置对4D-CT图像均匀性的影响。**方法:**使用西门子Sensation Open CT模拟机和瓦里安RPM系统,获取Catphan 504模体CTP486模块的4D-CT图像。对3种模体位置情形进行研究。情形A:模体悬空放置;情形T:模体下有一个碳纤维CT平板床;情形B+T:模体下有一个碳纤维固定底板和一个CT平板床。每种情形重复3次测量。使用DoseLab放疗验证软件分析4D-CT图像,得到图像均匀性值( $U$ )。对每一套4D-CT重建10个呼吸时相(0%, 10%, ..., 90%)的CT图像序列。对 $U$ 值进行统计分析和比较研究。**结果:**4D-CT所有CT序列的 $U$ 值均小于5 HU。每种情形得到30个 $U$ 值数据,情形A、情形T和情形B+T 3种情形 $U$ 值分别为 $(1.44\pm 0.79)$ 、 $(1.91\pm 0.91)$ 和 $(1.99\pm 0.77)$  HU。统计 $U$ 值对应的4个边缘感兴趣区(ROI)出现的次数和比例,情形T中ROI 22(9点钟方向)出现13次(占比43.33%),情形B+T中ROI 23(12点钟方向)出现13次(占比43.33%)。**结论:**本研究中4D-CT的图像均匀性满足使用要求,不同呼吸时相4D-CT的图像均匀性值不同,模体摆放位置对4D-CT的图像均匀性有一定影响,碳纤维CT平板床和固定底板的存在使4D-CT的图像均匀性变差。

**【关键词】**四维CT;图像均匀性;呼吸时相;模体位置

**【中图分类号】**R811.1;R318

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2020)01-0065-04

## Effects of respiratory phase and phantom position on uniformity of 4D-CT image

SHI Feiyue<sup>1,2</sup>, QIN Wei<sup>1</sup>, CHEN Fei<sup>1</sup>, ZHAO Huanyu<sup>1</sup>, JIN Xun<sup>3</sup>

1. Radiation Therapy Center, Nanjing First Hospital, Nanjing Medical University, Nanjing 210006, China; 2. Center of Medical Physics, Nanjing Medical University, Nanjing 210029, China; 3. the Second Clinical Medical College, Nanjing University of Chinese Medicine, Nanjing 210023, China

**Abstract: Objective** To investigate the effects of respiratory phase and phantom position on the uniformity of four-dimensional computed tomography (4D-CT) images by analyzing the 4D-CT image of the CTP486 module in Catphan phantom. **Methods** Siemens Sensation Open CT simulator and Varian RPM system were used to obtain the 4D-CT images of CTP486 module in Catphan 504 phantom. The following 3 cases in which the phantom position was different were utilized to carry out this study. In Case A, the Catphan phantom was hung in the air; in Case T, a carbon fiber CT flat table was placed under the phantom; and in Case B+T, a carbon fiber immobilization baseplate and the CT flat table were placed under the phantom. Three measurements were implemented for each case. DoseLab radiotherapy verification software was used to analyze the 4D-CT images, and the image uniformity ( $U$  values) were obtained. Ten series of CT were reconstructed for 10 respiratory phases (0%, 10%, ..., 90%) for each 4D-CT measurement. Statistical analysis and comparative study were conducted on  $U$  values. **Results** All the  $U$  values of 4D-CT were smaller than 5 HU. For each case, 30  $U$  values were obtained. The  $U$  values in Case A, Case T and Case B+T were  $(1.44\pm 0.79)$ ,  $(1.91\pm 0.91)$  and  $(1.99\pm 0.77)$  HU, respectively. The numbers of times and proportions of the occurrence of 4 peripheral regions of interest which were corresponding to  $U$  values were analyzed. There were 13 ROI 22 (9 o'clock position) in case T, with a proportion of 43.33%, and 13 ROI 23 (12 o'clock position) in Case B+T, with a proportion of 43.33%. **Conclusion** The uniformity of 4D-CT images meets the requirements. The uniformity values of 4D-CT images for different respiratory phases are different. The phantom position has certain effects on the uniformity of 4D-CT images, and the existence of carbon fiber CT flat table and immobilization baseplate reduces the uniformity of 4D-CT images.

**Keywords:** four-dimensional computed tomography; image uniformity; respiratory phase; phantom position

**【收稿日期】**2019-07-19

**【基金项目】**国家自然科学基金青年科学基金(81603674);江苏省自然科学基金青年基金(BK20161049)

**【作者简介】**时飞跃,研究方向:肿瘤放射物理,E-mail: shifeiyue2013@126.com

**【通信作者】**赵环宇,副主任医师,研究方向:肿瘤放射治疗,E-mail: oncodoc@sina.com

## 前言

四维CT(4D-CT)技术能够记录患者的呼吸运动并将时间信息整合到CT图像中,得到与呼吸运动相伴的空间运动特征及呼吸周期各个时相的三维CT影像<sup>[1]</sup>。目前,4D-CT技术已应用于胸腹部肿瘤患者(肺癌、乳腺癌、食管癌等)治疗中<sup>[2-7]</sup>。图像均匀性是评价CT设备成像质量的重要指标之一,是CT设备日常质量控制中的一项重要工作<sup>[8-9]</sup>。放疗定位CT图像的优劣程度直接关系到放疗医师勾画肿瘤靶区的准确性,放疗4D-CT的图像质量关系到胸腹部肿瘤靶区勾画及放疗剂量计算的准确性。在前期工作中,我们已经研究了碳纤维平板对6种放疗扫描协议下三维CT图像均匀性的影响<sup>[10]</sup>,以及西门子CT模拟机图像均匀性的长期稳定性<sup>[11]</sup>。本文通过分析3种情形下使用Catphan模体检测得到4D-CT图像均匀性数据,研究呼吸时相和模体位置对4D-CT图像均匀性的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 设备和模体

西门子SOMATOM Sensation Open CT模拟机,机架孔径82 cm,配备一台主机工作站、一台辅机工作站和一台Vsim工作站。瓦里安实时位置管理(RPM)系统,包括红外线摄像机、含有两个荧光标记点的轻质塑料块,呼吸运动模拟装置,以及RPM Respiratory Gating System (version 1.7.5)软件等<sup>[12]</sup>。西门子CT模拟机配备的CT平板床为CIVCO碳纤维平板床,厚度3.2 cm,宽度53 cm,长度244.7 cm,夹层结构,夹层中心为泡沫。ORFIT AIO碳纤维固定底板,厚度3.0 cm,宽度54 cm,长度134.5 cm,夹层结构,夹层中心为泡沫。Catphan504图像质量检测模体,其中的CTP486模块直径20 cm,由均匀材料做成,主要用于测量CT图像均匀性和噪声。

### 1.2 检测方法

将含有荧光标记点的轻质塑料块置在瓦里安呼吸运动模拟装置上,然后把它们放置在Catphan504模体旁边。开启呼吸运动模拟装置,对Catphan504模体进行4D-CT扫描。扫描重建参数如下:球管电压120 kVp,有效球管电流时间值400 mAs,层厚3 mm,层间距3 mm,重建卷积核为B30f medium smooth。对每一套4D-CT扫描以间隔10%重建10个呼吸时相的CT序列:0%, 10%, 20%, ..., 90%。

对3种Catphan模体位置情形进行研究。情形A:模体通过端部挂在配套木盒上,木盒放置在CT平板床前端,保持模体悬空,模体上下均没有碳纤维CT

平板床和固定底板;情形T:模体通过端部挂在配套木盒上,木盒放置在CT平板床中部,模体下有碳纤维CT平板床;情形B+T:模体端部挂在配套木盒上,木盒放置在ORFIT AIO碳纤维固定底板上,固定底板放置在CT平板床上,即模体下方有碳纤维固定底板和CT平板床(图1)。对每种情形,重复3次4D-CT测量,每次4D-CT测量后重建10个呼吸时相的CT序列,这样共计得到90个CT序列。

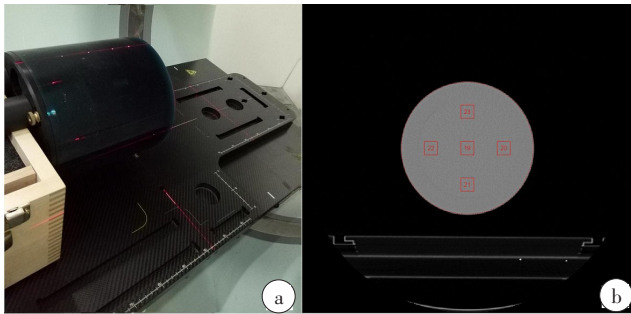


图1 情形B+T中Catphan模体位置照片(a)和5个感兴趣区(ROI)的位置示意图(b)

Fig.1 Photo of Catphan phantom position (a) and schematic diagram of positions of 5 regions of interest (b) in Case B+T

将每个CT图像序列导入DoseLab (Version 6.8)放疗验证软件中,使用“CT/CBCT”模块对CT图像质量进行分析,软件自动选取CTP486模块的某一层CT图像,在其上自动勾画ROI 19~23共5个方形感兴趣区(ROI),每个方形ROI边长2 cm,面积4 cm<sup>2</sup>,并给出每个ROI的平均CT值<sup>[13]</sup>。根据JJG 961-2017《医用诊断螺旋计算机断层摄影装置(CT)X射线辐射源》上关于CT图像均匀性的定义,用 $U$ 表示均匀性(单位HU),即中心ROI平均值 $CT_c$ 与边缘ROI的 $CT_p$ 值之间的最大差别,计算公式为 $U=|CT_c-CT_p|_{\max}$ 。根据公式计算得到90个 $U$ 值。

### 1.3 统学方法

使用WPS表格,对90个 $U$ 值进行统计分析和比较,并对每种情形 $U$ 值对应ROI出现的次数进行分析比较。

## 2 结果

情形A、情形T和情形B+T 3种情形的 $U$ 值见图2,每种情形有30个 $U$ 值,对应3次4D-CT测量,横坐标序号1~10、11~20和21~30分别对应3次测量的0%~90%的呼吸时相。表1列出3种情形图像均匀性的统计数据。根据均匀性计算公式,每个 $U$ 值都对应边缘4个ROI(ROI 20, ROI 21, ROI 22和ROI 23)中的一个。每种情形共计有30个 $U$ 值,3种情形 $U$ 值对应的4个边缘ROI出现的次数(比例)结果见表2。

由图2中3条数据曲线的变化可见,不同呼吸时相

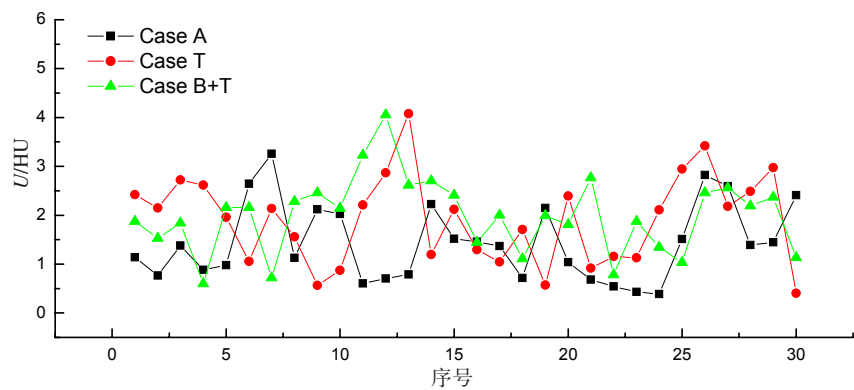


图2 3种情形图像均匀性(U值)比较  
Fig.2 Comparison of image uniformity (U value) among 3 cases

表1 图像均匀性统计数据(HU)  
Tab.1 Statistical data of image uniformity (HU)

参数	情形 A	情形 T	情形 B+T
最大值	3.26	4.08	4.05
最小值	0.39	0.40	0.60
均数	1.44	1.91	1.99
标准差	0.79	0.91	0.77
极差	2.87	3.68	3.45

表2 U值对应每个感兴趣区(ROI)出现的次数(比例)  
Tab.2 Number of times (proportions) of the occurrence of each region of interest corresponding to the U value

ROI	情形 A	情形 T	情形 B+T
ROI 20	6(20.00%)	8(26.67%)	5(16.67%)
ROI 21	8(26.67%)	6(20.00%)	3(10.00%)
ROI 22	9(30.00%)	13(43.33%)	9(30.00%)
ROI 23	7(23.33%)	3(10.00%)	13(43.33%)

的4D-CT图像均匀性(U值)不同;并且从3个周期(序号1~10、11~20和21~30)内U值的变化曲线可见,随着呼吸时相从0%变化至90%,U值的变化没有规律性。

由表1可见,与模体悬空放置相比,碳纤维CT平板床和固定底板的存在,使CT图像均匀性变差,U值的平均值增大约0.5 HU,极差值变大约0.7 HU。由表2可见,在模体悬空放置的情形(情形A),U值对应的4个边缘ROI出现的次数(比例)相对比较均匀(6~9次,20.00%~30.00%);情形T中,ROI 22(9点钟方向)出现了13次(比例43.33%);情形B+T中,ROI 23(12点钟方向)出现的次数为13次(比例43.33%)。结合图1b可知,碳纤维CT平板床和固定底板的存在,使U值对应的ROI的位置,有从模体图像中的下部向上部迁移的趋势。

3 小 结

近年来,放疗4D-CT技术在胸腹部肿瘤(肺癌、乳腺癌、食管癌等)中的应用研究工作越来越广泛<sup>[2-7,14]</sup>。相关研究主要集中在分析胸腹部肿瘤靶区的体积和位置等方面,对放疗4D-CT图像质量方面的研究较少。周丁屹等<sup>[15]</sup>研究4D-CT扫描参数和扫描模式对CT值的影响;杨昕等<sup>[16]</sup>分析呼吸运动对4D-CBCT图像质量的影响。近几年,国外一些学者对改善4D-CT图像质量方面做了一些研究工作<sup>[17-19]</sup>。本工作研究呼吸时相和模体位置对放疗4D-CT图像均匀性的影响,结果表明4D-CT的图像均匀性(U<5 HU)满足使用要求,不同呼吸时相4D-CT的图像均匀性值不同,模体摆放位置对4D-CT的图像均匀性有一定影响,碳纤维CT平板床和固定底板的存在导致4D-CT的图像均匀性变差。

致谢:感谢生原医疗王辉、曹鹰在DoseLab软件使用中提供的帮助和支持,感谢西门子郭强在CT模拟机使用中提供的帮助和支持。

【参考文献】

[1] 龚敏, 胡伟刚, 陆惠忠, 等. 基于四维CT的肝脏各部分和膈肌的呼吸移动度的分析[J]. 中国临床医学, 2012, 19(4): 374-376.  
GONG M, HU W G, LU H Z, et al. Analysis of the mothion of diaphragm and different parts of liver during respiration by four-dimensional CT[J]. Chinese Journal of Clinical Medicine, 2012, 19 (4): 374-376.

[2] 李毅, 唐丰文, 张晓智. 基于四维CT和锥形束CT确定非小细胞肺癌放疗靶区外放边界[J]. 中国医学物理学杂志, 2016, 33(9): 892-897.  
LI Y, TANG F W, ZHANG X Z. Margin determination based on four dimensional CT and cone beam CT for non-small cell lung cancer[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2016, 33(9): 892-897.

[3] 舒留洋, 陆合明, 陈华生, 等. 四维CT联合呼吸门控技术在非小细胞肺癌放疗中的剂量学研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2014, 23(2): 97-98.  
SHU L Y, LU H M, CHEN H S, et al. Dosimetry study on radiotherapy of non-small cell lung cancer by 4D-CT in combination with

- respiratory gating technique [J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2014, 23(2): 97-98.
- [4] 王伟, 李建彬, 邢军, 等. 保乳术后放疗四维CT呼气末术腔勾画影响因素分析[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2013, 22(5): 357-360.  
WANG W, LI J B, XING J, et al. Analysis of influential factors for variability in delineation of lumpectomy cavity based on 4DCT in end-exhalation phase[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2013, 22(5): 357-360.
- [5] 国兵, 李建彬, 王伟, 等. 自由呼吸状态下三维CT和四维CT极限时相部分乳腺外照射放疗计划的比较[J]. 中华肿瘤杂志, 2017, 39(4): 303-307.  
GUO B, LI J B, WANG W, et al. A comparison of dosimetric variance for external-beam partial breast irradiation using three-dimensional and four-dimensional computed tomography[J]. Chinese Journal of Oncology, 2017, 39(4): 303-307.
- [6] 柏晗, 夏耀雄, 李政良, 等. 基于四维CT下胸部肿瘤调强计划中心脏和食道的剂量评估[J]. 中国医学物理学杂志, 2016, 33(3): 293-296.  
BAI H, XIA Y X, LI Z L, et al. Dose assessment of heart and esophageal in intensity modulated radiotherapy plan based on four-dimensional computed tomography for thoracic neoplasms [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2016, 33(3): 293-296.
- [7] 胡超月, 李建彬, 王金之, 等. 基于增强三维CT、四维CT及锥形束CT确定食管癌原发肿瘤大体肿瘤体积的比较[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2017, 37(6): 430-436.  
HU C Y, LI J B, WANG J Z, et al. A comparison of gross tumor volume among three-dimensional, four-dimensional and cone beam computed tomography in primary esophageal cancer [J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2017, 37(6): 430-436.
- [8] MUTIC S, PALTA J R, BUTKER E K, et al. Quality assurance for computed-tomography simulators and the computed-tomography-simulation process: report of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 66[J]. Med Phys, 2003, 30(10): 2762-2792.
- [9] 邓小武, 黄邵敏, 祁振宇. CT模拟机的质量控制和质量保证检验[J]. 中国肿瘤, 2004, 13(9): 546-550.  
DENG X W, HUANG S M, QI Z Y. Quality control and quality assuring requirements of CT-simulator[J]. China Cancer, 2004, 13(9): 546-550.
- [10] 沈恩龙, 柏正璐, 时飞跃. 碳纤维平板对CT图像均匀性影响的研究[J]. 中国医疗设备, 2018, 33(8): 80-82.  
SHEN E L, BAI Z L, SHI F Y. Study on influence of carbon fibre flat plates on CT image uniformity[J]. China Medical Devices, 2018, 33(8): 80-82.
- [11] 时飞跃, 柏正璐, 秦航, 等. 西门子CT模拟机图像均匀性的长期稳定性分析[J]. 中国医学物理学杂志, 2018, 35(9): 1035-1038.  
SHI F Y, BAI Z L, QIN H, et al. Long-term stability of image uniformity for a SIEMENS CT simulator[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2018, 35(9): 1035-1038.
- [12] 时飞跃, 陈飞, 林强, 等. 四维CT技术在放疗中的应用[J]. 医疗卫生装备, 2014, 35(7): 114-115.  
SHI F Y, CHEN F, LIN Q, et al. Application of 4D-CT technique in radiotherapy[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2014, 35(7): 114-115.
- [13] 柏正璐, 时飞跃, 蒋红兵. 使用DoseLab检测CT图像均匀性的程序改进[J]. 中国数字医学, 2017, 12(12): 57-59.  
BAI Z L, SHI F Y, JIANG H B. Program improvement in DoseLab for testing CT image uniformity[J]. Chinese Digital Medicine, 2017, 12(12): 57-59.
- [14] LAMBRECHT M, SONKE J J, NESTLE U, et al. Quality assurance of four-dimensional computed tomography in a multicentre trial of stereotactic body radiotherapy of centrally located lung tumours [J]. Phys Imaging Radiat Oncol, 2018, 8: 57-62.
- [15] 周丁屹, 蒋大振, 全红, 等. 四维CT扫描参数和扫描模式对CT值的影响[J]. 中国医学物理学杂志, 2016, 33(9): 919-923.  
ZHOU D Y, JIANG D Z, QUAN H, et al. Influence of four-dimensional CT scanning parameters and modes on CT values [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2016, 33(9): 919-923.
- [16] 杨昕, 张可, 任信信, 等. 呼吸运动对4D锥形束CT图像质量影响分析[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2018, 27(8): 763-768.  
YANG X, ZHANG K, REN X X, et al. Influence of respiratory motion on image quality of 4D-CBCT [J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2018, 27(8): 763-768.
- [17] LI M, CASTILLO S J, CASTILLO R, et al. Automated identification and reduction of artifacts in cine four-dimensional computed tomography (4DCT) images using respiratory motion model[J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2017, 12(9): 1521-1532.
- [18] NOID G, TAI A, CHEN G P, et al. Reducing radiation dose and enhancing imaging quality of 4DCT for radiation therapy using iterative reconstruction algorithms [J]. Adv Radiat Oncol, 2017, 2(3): 515-521.
- [19] FREISLEDERER P, HEINZ C, VON ZIMMERMANN H, et al. Clinical workflow optimization to improve 4D-CT reconstruction for Toshiba Aquilion CT scanners [J]. Zeitschrift für Medizinische Physik, 2018, 28(2): 88-95.

(编辑: 黄开颜)