

食管癌患者CBCT图像剂量计算准确性的分析评估

巩汉顺¹, 徐寿平¹, 刘博², 蔡博宁¹, 丛小虎¹, 陈高翔¹, 崔泽平¹

1. 解放军总医院放疗科, 北京 100853; 2. 北京航空航天大学宇航学院, 北京 100083

【摘要】目的:分析探讨食管癌患者利用锥形束CT(CBCT)图像进行剂量计算应用的可行性。**方法:**选择8例经过旋转调强放疗的食管癌患者,利用自主研发ART软件实现患者扇形束CT(kVCT)和首次分次CBCT的准确形变配准及计划映射,同时采用直方图匹配方法对CBCT的HU值进行修正;将所得CBCT计划导入到原系统采用kVCT的HU-ED曲线及跳数重新完成剂量计算。**结果:**CBCT图像中各组织接受剂量及体积参数相对于kVCT偏差绝对值均小于1%。按照2 mm/2%/TH:10%标准,CBCT图像中各组织接受剂量相对于kVCT平均 γ 通过率均达99%以上。按照1 mm/1%/TH:10%标准,靶区平均 γ 通过率下降明显,最低为(82.59±16.16)%;各危及器官平均 γ 通过率仍可达98%以上。**结论:**本研究结果充分验证CBCT图像剂量计算精度,为自适应放疗中采用CBCT图像直接进行剂量计算奠定一定基础。

【关键词】食管癌;锥形束CT;HU值;剂量计算

【中图分类号】R815;R312

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2019)05-0497-04

Accuracy of dose calculation with CBCT images in patients with esophageal cancer

GONG Hanshun¹, XU Shouping¹, LIU Bo², CAI Boning¹, CONG Xiaohu¹, CHEN Gaoxiang¹, CUI Zeping¹

1. Department of Radiotherapy, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China; 2. College of Astronautics, Beihang University, Beijing 100083, China

Abstract: Objective To analyze the feasibility of using cone beam (CBCT) images for dose calculation in patients with esophageal cancer. **Methods** Eight patients receiving rotational intensity-modulated radiotherapy for esophageal cancer were enrolled in this study. Self-developed ART software was used to achieve accurate deformation registration and plan mapping of kVCT and the first fractional CBCT, and meanwhile histogram matching method was used to modify the HU values of CBCT. The obtained CBCT plans were imported into the original system. Finally, the HU-ED curve of kVCT was combined with monitor units for dose recalculation. **Results** The absolute deviations of dose and volume parameters of tissues in CBCT images from those in KCT images were less than 1%. According to the standard of 2 mm/2%/TH: 10%, the average gamma passing rate of each tissue received in the CBCT image relative to kVCT was over 99%. According to the standard of 1 mm/1%/TH: 10%, the mean gamma passing rates of target areas decreased significantly, with the lowest being 82.59±16.16%, and the gamma passing rates of organs-at-risk were still above 98%. **Conclusion** The results fully verified the accuracy of dose calculation with CBCT image, and laid a certain foundation for direct dose calculation with CBCT images in adaptive radiotherapy.

Keywords: esophageal cancer; cone beam CT; HU value; dose calculation

前言

食管癌是我国高发的消化道恶性肿瘤,每年新

发病例占全世界约50%^[1],放射治疗是目前食管癌主要、安全且有效的手段之一^[2],特别是对于局部复发患者采用放疗具有明显的生存获益^[3]。近年来随着适形及容积旋转调强等新技术的广泛应用,使得食管癌患者在危及器官得以充分保护的前提下保证肿瘤靶体积达到设定处方剂量^[4-5]。通过与分次锥形束CT(CBCT)位置配准降低摆位误差,提高治疗精度^[6],同时因CBCT获得了患者在分次放疗过程中解剖结构实时影像,为实施治疗计划的再优化奠定基础,进而实现食管癌患者的自适应放疗可能;但由于CBCT在图像质量及HU值方面与扇形束CT(kVCT)

【收稿日期】2018-12-30

【基金项目】国家重点研发计划(2017YFC0112100);国家自然科学基金(61601012);解放军总医院临床科研扶持基金(2016FC-TSYS-1007)

【作者简介】巩汉顺,硕士研究生,物理师,研究方向:肿瘤精确放疗, E-mail: gonghanshun123@163.com

【通信作者】徐寿平,高级工程师,研究方向:肿瘤精确放疗, E-mail: shouping_xu@yahoo.com

存在一定差异,直接用于剂量计算势必会产生一定偏差,本研究对食管癌患者CBCT图像剂量计算的准确性进行分析研究。

1 材料与方法

1.1 病例筛选及kVCT计划设计

随机选取在解放军总医院放疗科经 Varian 加速器(Clinical iX)治疗的食管癌患者8例。kVCT图像采用西门子CT(SOMATOM Definition AS)扫描获得,患者均采用仰卧位,双臂上举至头部,采用热塑体模进行体位固定,所得图像采用DICOM格式传输至 Varian Eclipse(Ver 10.0)计划系统,由经治医师勾画靶区及危及器官。上级医师给定靶区处方剂量为原发病灶 pGTV: 62 Gy/30 F,亚临床病灶 PTV: 54 Gy/30 F。责任物理师设计 kVCT 计划:采用 RapidArc 技术,设计两个全弧射野(CW:180.1°~179.9°; CCW:179.9°~180.1°)。

1.2 患者CBCT图像扫描

采用 OBI 系统对患者采用预设的 LDT(Low-Dose Thorax)临床扫描条件进行扫描,图像采用3 mm层厚重建获得。为减小由于患者解剖结构变化而造成的剂量计算偏差,各CBCT计划设计均采用第一次治疗时所获得的CBCT图像。

1.3 直方图匹配算法

为减小由于图像HU值差异而产生的剂量偏差,进一步提高CBCT图像剂量计算准确性,实现CBCT与kVCT图像HU值的归一具有一定的必要性。直方图匹配算法^[7]是实现HU值归一的常用方法之一,基于kVCT图像HU值的积分直方图调整相应CBCT图像的HU值以生成新的CBCT重建图像^[8]。

1.4 CBCT图像计划创建

OBI 系统预设的 LDT 模式一般采用 Half-fan 扫描条件,图像重建范围为最大直径45 cm,轴向长度15 cm,对于CBCT图像由于FOV太小而造成的组织缺损部分,利用自主研发的ART软件将kVCT图像与CBCT图像形变配准完成组织填充以形成新的CBCT图像序列,保证CBCT计划在剂量计算时具有足够的组织信息散射,进而确保CBCT图像剂量计算的准确性。

在 ART 软件中利用CBCT图像到kVCT图像的形变场,以kVCT图像CT值为基准,采用直方图匹配算法对形变后的CBCT图像的CT值实施修正;同时将kVCT计划的射野参数、靶区和危及器官信息映射到形变配准后的CBCT图像序列上以生成相应的CBCT计划及组织结构。

1.5 CBCT剂量计算

将新生成的CBCT计划的图像序列、射野参数及组织结构重新导入到Eclipse计划系统中,调用kVCT图像的CT值-电子密度校准(HU-ED)曲线,采用与kVCT计划相同的机器跳数(MU)及剂量体积算法(Dose Volume Optimizer)重新完成剂量计算。

1.6 数据分析评估

所得CBCT图像中各组织剂量与相应kVCT进行分析比较,靶区参数: D_{mean} 、 $D_{2\%}$ 、 $D_{98\%}$ 、 $V_{95\%}$ 及 $V_{100\%}$,其中 $D_{2\%}$ 为2%靶区体积接受的最高剂量; $D_{98\%}$ 为98%的靶区体积接受的最低剂量; $V_{95\%}$ 、 $V_{100\%}$ 分别为处方剂量95%及100%包绕的靶区体积百分比。危及器官参数: D_{mean} 、 $D_{2\%}$ 、 V_5 、 V_{20} 及 V_{30} 等。

1.7 γ 分析

将kVCT计划的CT图像序列、组织结构、计划剂量以及CBCT计划的剂量分别导入到CERR(Computational Environment for Radiotherapy Research, Ver5.1)软件中,以kVCT计划的剂量场为基准对CBCT计划的剂量场进行分析比较,采用一定的 γ 分析标准(2 mm/2%/TH:10%; 1 mm/1%/TH:10%)定量评估CBCT计划剂量计算精度。

2 结果

2.1 数据分析结果

对于CBCT图像中靶区和危及器官的剂量、体积参数相对于kVCT偏差绝对值均小于1%,具体数据如表1所示。对于靶区 D_{mean} 及 $D_{2\%}$ 结果CBCT均高于kVCT,而 $V_{100\%}$ 值却与之相反。各危及器官剂量参数 D_{mean} 和 $D_{2\%}$:CBCT图像中肺组接受剂量略高于kVCT,而心脏及脊髓却低于kVCT。全肺及心脏的低剂量体积参数 V_5 :CBCT相对于kVCT均有所增大,而高剂量体积参数 V_{20} 、 V_{30} 则有一定程度的缩小。

2.2 γ 分析结果

按照 2 mm/2%/TH:10%分析标准,各组织结构CBCT计划剂量分布相对于kVCT的平均 γ 通过率均达99%以上;按照 1 mm/1%/TH:10%分析标准,靶区平均 γ 通过率下降明显,最低为(82.59±16.16)%,各危及器官平均 γ 通过率略有下降,仍可达98%以上。全局平均 γ 通过率无论采用上述何种分析标准均可达到99%以上,结果如表2所示。

3 讨论

食管解剖结构及位置比较特殊,上起于相当于第6颈椎下缘的环状软骨,下止于相当于第11胸椎水平的胃贲门,其长度成人一般为25~30 cm,在放疗过

表1 8例食管癌患者CBCT计划剂量计算数据相对于kVCT的分析结果($\bar{x} \pm s$)Tab.1 Deviation of cone beam CT dose calculation relative to kVCT in 8 patients with esophageal cancer (Mean \pm SD)

结构	D _{mean} /cGy	D _{2%} /cGy	D _{98%} /cGy	V ₅ /%	V ₂₀ /%	V ₃₀ /%	V _{95%} /%	V _{100%} /%
左肺	0.26 \pm 0.81	0.07 \pm 0.52	-	-0.08 \pm 0.75	0.15 \pm 1.57	-0.53 \pm 2.31	-	-
右肺	0.30 \pm 0.75	0.05 \pm 0.83	-	0.30 \pm 0.81	-0.24 \pm 1.69	-0.73 \pm 1.63	-	-
全肺	0.27 \pm 0.77	0.07 \pm 0.67	-	0.14 \pm 0.75	-0.07 \pm 1.61	-0.07 \pm 1.74	-	-
心脏	-0.22 \pm 0.54	-0.11 \pm 0.52	-	0.03 \pm 0.19	-0.24 \pm 0.45	-0.59 \pm 1.18	-	-
脊髓	-0.22 \pm 0.48	-0.24 \pm 0.55	-	-	-	-	-	-
pGTV	0.09 \pm 0.57	0.27 \pm 0.65	-0.06 \pm 0.44	-	-	-	-0.02 \pm 0.03	-0.05 \pm 0.64
PTV	0.04 \pm 0.43	0.23 \pm 0.60	0.12 \pm 0.38	-	-	-	0.04 \pm 0.10	-0.07 \pm 0.63

表2 8例食管癌患者CBCT计划剂量分布相对于kVCT的 γ 通过率分析结果($\bar{x} \pm s$)Tab.2 Comparison of gamma passing rate of CBCT plan dose distribution relative to kVCT in 8 patients with esophageal cancer (% , Mean \pm SD)

结构	2 mm/2%/ TH:10%	1 mm/1%/ TH:10%
左肺	99.96 \pm 0.06	99.25 \pm 0.36
右肺	99.91 \pm 0.10	98.48 \pm 0.86
全肺	99.93 \pm 0.07	98.83 \pm 0.48
心脏	99.98 \pm 0.05	98.99 \pm 1.44
脊髓	100.00 \pm 0.00	99.94 \pm 0.18
pGTV	99.46 \pm 0.90	82.59 \pm 16.16
PTV	99.23 \pm 0.97	85.35 \pm 9.25
皮肤	99.98 \pm 0.02	99.47 \pm 0.32

程中解剖位置受多种因素影响(心血管搏动、呼吸运动等^[9]),存在一定的不确定性;不同部位的病灶运动幅度也有所变化^[10],胸下段食管癌内靶区头脚方向边界外放距离大于胸上、中段^[11];各患者分次内靶区运动位置也存在较大差异^[12]。分次放疗中摆位误差、呼吸及器官运动和肿瘤组织退缩等因素均会引起所受剂量出现偏差^[13],需对重新生成的CBCT计划及剂量进行评估,进而选择合适的“每日计划”^[14]。

CBCT在图像质量及HU值与kVCT有所区别,利用此图像开展自适应放疗时产生一定的剂量偏差。同时由于食管位于两肺之间,而肺为空腔组织与周围实体组织相比存在较大电子密度差异,导致该部位CBCT图像HU值与kVCT图像差异较大,为保证剂量计算的准确,对CBCT图像的HU值进行适当校正就显得尤其重要^[15]。Dunlop等^[16]对于获取的肺部CBCT图像使用RS_{auto}中关于CBCT密度分配的方法及设定为水或肺密度覆盖方法进行CT值校正,

所得剂量分布与kVCT较为相似,平均绝对剂量差异分别为1.3%和1.4%。Poludniowski等^[17]通过对CBCT投影数据采用散射校正以提高图像重建质量并以此为基础进行剂量计算,与kVCT剂量偏差小于2.5%。本研究中利用直方图匹配方法对食管癌患者CBCT图像的HU值进行修正所得CBCT的组织结构剂量与kVCT偏差绝对值均小于1%,其精度可较好满足临床的应用要求。

利用治疗过程中的CBCT图像反馈信息,对放疗过程作出相应调整,以制定个体性自适应放疗方案^[18]。Hawkins等^[19]对食管癌患者采用首周的CBCT图像来修正肿瘤靶区及设计自适应计划,结果显示靶区回缩明显,肺和心脏的平均剂量也降低明显。Sriram等^[20]对于食管癌患者利用第一周CBCT图像数据设计自适应容积调强计划的策略,可以有效降低危及器官剂量及正常组织并发症发生概率。剂量学因素是食管癌患者发生放射性肺炎的独立预后因子^[21],其中肺D_{mean}是放疗过程中肺损伤的关键因素^[22]。

4 结 论

本研究对食管癌放疗患者采用CBCT图像进行剂量计算的精度进行分析,验证其剂量计算的可行性,为自适应放疗中采用CBCT图像直接进行剂量计算奠定了一定的基础。

【参考文献】

- [1] 陶新路,丁伯应.食管癌治疗前分期方法的应用现状[J].医学信息,2014,27(2):511-512.
TAO X L, DING B Y. Application status of staging method for esophageal cancer[J]. Medical Information, 2014, 27(2): 511-512.
- [2] 谷铎之.肿瘤放射治疗学[M].北京:中国协和医科大学出版社,2007:546-577.
GU X Z. Radiation oncology[M]. Beijing: China Union Medical University Press, 2007: 546-577.

- [3] 倪文婕, 杨劲松, 于舒飞, 等. 218例食管癌根治术后复发再治疗的疗效分析[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2017, 26(7): 744-748.
NI W J, YANG J S, YU S F, et al. Efficacy evaluation of rescue treatment for 218 patients with recurrent esophageal cancer after radical resection[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2017, 26(7): 744-748.
- [4] 苏善宁, 曾自力. 中下段食管癌三维适形放疗不同照射方法对剂量分布的影响[J]. 中国医学物理学杂志, 2014, 31(6): 5249-5252.
SU S N, ZENG Z L. The effect of dose distribution coming from different irradiation methods in three dimension conformal radiation therapy for middle and lower sections of esophageal carcinoma[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2014, 31(6): 5249-5252.
- [5] 刘丽虹, 王澜, 韩春, 等. 食管癌 VMAT 与 IMRT 的剂量学比较[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2015, 24(3): 318-322.
LIU L H, WANG L, HAN C, et al. The application of volumetric modulated arc therapy in esophageal carcinoma[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2015, 24(3): 318-322.
- [6] 葛琴, 蔡晶, 赵季忠, 等. CBCT 验证食管癌放射治疗中两种体位固定方式摆位误差的比较分析[J]. 现代肿瘤医学, 2017, 25(17): 2807-2809.
GE Q, CAI J, ZHAO J Z, et al. Comparison of the two kinds of immobilization of radiotherapy of esophageal carcinoma by CBCT[J]. Journal of Modern Oncology, 2017, 25(17): 2807-2809.
- [7] MARCHANT T E, MOORE C J, ROWBOTTOM C G, et al. Shading correction algorithm for improvement of cone-beam CT images in radiotherapy[J]. Phys Med Biol, 2008, 53(20): 5719-5733.
- [8] ONOZATO Y, KADOYA N, FUJITA Y, et al. Evaluation of on-board kV cone beam computed tomography-based dose calculation with deformable image registration using Hounsfield unit modifications[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2014, 89(2): 416-423.
- [9] YAREMKO B P, GUERRERO T M, MC ALEER M F, et al. Determination of respiratory motion for distal esophagus cancer using four dimensional computed tomography[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2008, 70(1): 145-153.
- [10] 杨燕, 李建成, 陈健铃, 等. 基于4DCT的食管癌靶区运动的初步研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2018, 27(1): 53-57.
YANG Y, LI J C, CHEN J L, et al. A preliminary study on target motion in esophageal cancer during normal breathing with four-dimensional computed tomography[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2018, 27(1): 53-57.
- [11] YAMASHITA H, KIDA S, SAKUMI A, et al. Four-dimensional measurement of the displacement of internal fiducial markers during 320-multislice computed tomography scanning of thoracic esophageal cancer[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2011, 79(2): 588-595.
- [12] LEVER F M, LIPS I M, CRIJNS S P, et al. Quantification of esophageal tumor motion on cine-magnetic resonance imaging[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2014, 88(2): 419-424.
- [13] BARKER J L, GARDEN A S, ANG K K, et al. Quantification of volumetric and geometric changes occurring during fractionated radiotherapy for head and neck cancer using an integrated CT/linear accelerator system[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2004, 59(4): 960-970.
- [14] CHAI X, VAN HERK M V, BETGEN A, et al. Automatic bladder segmentation on CBCT for multiple plan ART of bladder cancer using a patient-specific bladder model[J]. Phys Med Biol, 2012, 57(24): N525-N541.
- [15] RONG Y, SMILOWITZ J, TEWATIA D, et al. Dose calculation on kV cone beam CT images: an investigation of the HU-density conversion stability and dose accuracy using the site-specific calibration[J]. Med Dosim, 2010, 35(3): 195-207.
- [16] DUNLOP A, MCQUAID D, NILL S, et al. Comparison of CT number calibration techniques for CBCT-based dose calculation [J]. Strahlenther Onkol, 2015, 191(12): 1-9.
- [17] POLUDNIOWSKI G, EVANS P M, HANSEN V N, et al. An efficient monte carlo-based algorithm for scatter correction in keV cone-beam CT[J]. Phys Med Biol, 2009, 54(12): 3847-3864.
- [18] 付庆国, 王磊黎, 梁世雄, 等. 食管癌结合锥形束CT图像引导自适应放射治疗的可行性研究[J]. 中国癌症防治杂志, 2012, 4(3): 229-232.
FU Q G, WANG L L, LIANG S X, et al. Feasibility of cone beam CT image-guided adaptive radiotherapy to esophageal carcinoma[J]. Chinese Journal of Oncology Prevention and Treatment, 2012, 4(3): 229-232.
- [19] HAWKINS M A, BROOKS C, HANSEN V N, et al. Cone beam computed tomography derived adaptive radiotherapy for radical treatment of esophageal cancer[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2010, 77(2): 378-383.
- [20] SRIRAM P, SYAMKUMAR S A, KUMAR J S, et al. Adaptive volumetric modulated arc treatment planning for esophageal cancer using cone beam computed tomography[J]. Phys Med, 2012, 28(4): 327-332.
- [21] SHAIKH T, CHURILLA T M, MONPARA P, et al. Risk of radiation pneumonitis in patients receiving taxane-based trimodality therapy for locally advanced esophageal cancer[J]. Pract Radiat Oncol, 2016, 6(6): 388-394.
- [22] 张晶, 刘天博, 延玲. 食管癌调强放疗中肺损伤的剂量学因素分析[J]. 中国医药指南, 2013, 11(26): 395-396.
ZHANG J, LIU T B, YAN L. Analysis of dosimetric factors of lung injury in intensity-modulated radiotherapy for esophageal carcinoma[J]. Guide of China Medicine, 2013, 11(26): 395-396.

(编辑:陈丽霞)