

Edge加速器Calypso 4D电磁定位系统精确性评估

戴振晖¹, 张白霖¹, 朱琳¹, 朱远湖¹, 杨耕¹, 蔡春雅¹, 李飞¹, 张煜², 王学涛¹

1. 广东省中医院放射治疗区, 广东 广州 510006; 2. 南方医科大学生物医学工程学院, 广东 广州 510515

【摘要】目的:研究Calypso 4D电磁定位系统的几何精度和电磁阵列对加速器射线的衰减。**方法:**分别把植入式转发器和表面转发器安装在体模上,对比Calypso测量的体模等中心位移和实际位移,分析系统的定位精度;使用指型电离室测量有和没有电磁阵列时固体水内剂量,验证电磁阵列对射线的衰减;重复测量相同位置的体模等中心,评估系统稳定性。**结果:**植入式转发器的定位精度是 (0.02 ± 0.01) cm,表面转发器的定位精度是 (0.01 ± 0.01) cm;在机架角 325° 到 35° 范围内,6和10 MV能量电磁阵列对加速器射束的衰减低于2%,在 305° 和 55° 衰减低于3.4%;重复测量时出现偏移的标准差在0.012 cm以内。**结论:**Calypso系统定位精度能够稳定在亚毫米级,电磁阵列对射线的衰减在临床接受范围内,Calypso 4D电磁定位系统是精确、可靠的,能够大大提高放疗精度。

【关键词】Calypso;电磁定位;射线;体模

【中图分类号】R144.1;TL72

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2018)05-0497-06

Evaluation of the accuracy of Calypso 4D electromagnetic localization system in Edge accelerator

DAI Zhenhui¹, ZHANG Bailin¹, ZHU Lin¹, ZHU Yuanhu¹, YANG Geng¹, CAI Chunya¹, LI Fei¹, ZHANG Yu², WANG Xuetao¹

1. Department of Radiation Therapy, Guangdong Provincial Hospital of Traditional Chinese Medicine, Guangzhou 510006, China;

2. School of Biomedical Engineering, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China

Abstract: Objective To evaluate the geometric accuracy of Calypso 4D electromagnetic localization system and study the attenuation of ray caused by electromagnetic array. **Methods** Implantable transponders and superficial transponders were placed in the phantom, separately. The localization precision was analyzed by comparing the displacement of the phantom isocenter measured with Calypso and actual displacement, and the attenuation of ray caused by electromagnetic array was evaluated by measuring the dose of solid water with and without electromagnetic array. The phantom isocenter at the same position was measured repetitively for assessing the system stability. **Results** The accuracies of implantable and superficial transponders were (0.02 ± 0.01) cm and (0.01 ± 0.01) cm. The attenuation caused by electromagnetic array was below 2% for both 6 MV and 10 MV energies at gantry angles between 325° and 35° , and was lower than 3.4% at gantry angles of 305° and 55° . The standard deviation of displacement was within 0.012 cm in repeated measurements. **Conclusion** The accuracy of Calypso localization system is steadily at submillimeter level, meanwhile, the attenuation of ray caused by electromagnetic array is clinically insignificant. Calypso 4D electromagnetic localization system which is accurate and reliable can greatly improve the accuracy of radiotherapy.

Keywords: Calypso; electromagnetic localization; ray; phantom

前言

调强放疗、立体定向放疗等技术要求更精确的

体位固定和靶区定位,目前主要通过影像引导技术修正病人体位,在治疗前采集锥形束CT(Cone Beam CT, CBCT)图像可以根据靶区和周围器官位置调整摆位,但是采集CBCT图像并不能减小外扩边界,缩小照射范围^[1]。瓦里安公司Edge加速器配置的Calypso 4D电磁定位跟踪系统,可以在放射治疗过程中提供客观、连续的靶区定位信息。Calypso系统通过电磁阵列对Beacon转发器反馈的电磁信号进行检测,在三维空间内对治疗目标位置进行测量,实现对靶区的连续跟踪^[2],跟踪过程病人无需接受额外射

【收稿日期】2018-03-02

【基金项目】国家自然科学基金(61671230);广东省科技计划项目(2017ZC0153)

【作者简介】戴振晖,工程师,主要从事肿瘤放射物理工作,E-mail: dzh_dzh@126.com

【通信作者】王学涛,主任技师,主要从事肿瘤放射物理工作,E-mail: wangxuetao0625@126.com

线,可根据实时的运动信息在治疗过程设置限值,当系统检测到靶区运动幅度超过设定的阈值,加速器自动暂停出束,使靶区始终位于照射野范围内,实现自适应放疗。Willoughby等^[3]提出把Calypso用于前列腺肿瘤实时定位跟踪,目前国内缺乏开展4D电磁定位跟踪技术的临床经验,在该技术应用于临床治疗前需要基于模体进行一系列测试^[4],确保Calypso系统是安全可靠的。本研究设计一系列验证程序,分别验证Calypso系统的定位精度、角度测量精度以及电磁阵列对射线的衰减和系统稳定性。

1 材料与方法

1.1 仪器设备

Edge加速器的Calypso系统分5个组成部分:Beacon转发器、控制台、电磁阵列、光学系统、跟踪站^[5],如图1所示。Beacon转发器是长8.00 mm、直径1.85 mm的圆柱体,分植入式和表面式转发器,转发器本身没有能量只反馈电磁阵列的信号;控制台包含电源、系统控制组件、系统软件、触摸屏,系统软件可以提供几何信息和量化数据;电磁阵列包括源线圈、传感器和红外靶点,源线圈生成激发转发器的电磁野,传感器接收每个转发器的共振信号,数列表面的红外靶点用来给光学系统提供位置变化信息;光学系统是安装在天花板的红外摄像机,监控阵列上方的光学靶点,确定阵列相对于等中心的位置;跟踪站位于控制室内,与光学系统和控制台连接,工作站显示靶区位置相对于等中心在三维方向的偏移,实现对肿瘤的实时监控^[6]。

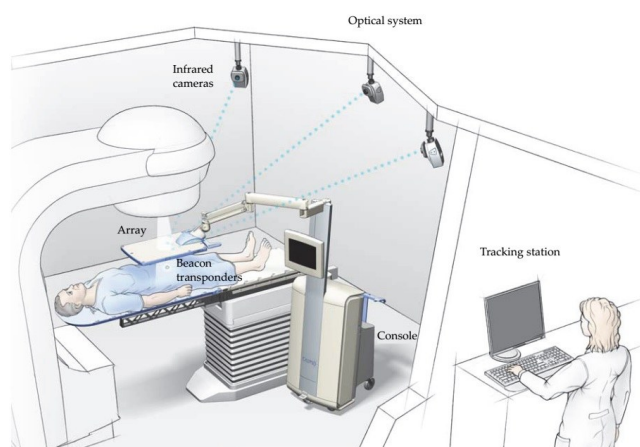


图1 Calypso系统组件

Fig.1 Components of Calypso system

1.2 几何精度验证

基于模体模拟临床定位跟踪过程:验证体模进

行CT扫描(层厚1 mm);把CT图像传到Eclipse计划系统,在计划系统上确定3个转发器坐标和计划等中心坐标;把3个转发器坐标(Apex、Left、Right)和计划等中心坐标(Isocenter)输入Calypso工作站,新建Calypso定位计划,设置跟踪阈值;在控制台打开Calypso计划,把体模摆在加速器治疗床上,表面摆位十字线与机房激光线对齐,电磁阵列置于体模上方监控体模运动^[7]。控制加速器六维床移动使体模产生相应位移或旋转,同时Calypso测量模体位移和旋转值,比较两者偏差,分析Calypso测量精度^[8],其中六维床的平移精度是0.1 mm,旋转精度是0.1°^[9]。

1.2.1 位移测量精度验证 植入式转发器检测:使用厂家提供的Calypso系统QA固件(Varian Medical System, Palo Alto, CA)作为体模验证植入式转发器的定位精度,大小10 cm×10 cm×13 cm,内部植入3个转发器,如图2所示,CT图像显示3个转发器中心构成等边三角形,固件表面有等中心摆位十字线,十字线与机房激光线对齐^[10]。体模摆位完成后,记录床在Vrt、Lat、Lng这3个方向的初始坐标,操作加速器控制台使床分别在三维方向上移动一定距离,Calypso检测体模位移,建立Calypso坐标系与床参考坐标系之间的联系^[11-12]。



图2 植入式转发器验证体模CT截面图

Fig.2 Section CT images of verification phantom for implantable transponder

表面转发器检测:在15 cm×13 cm×4 cm的固体水体模表面安装一组表面转发器,如图3所示,电磁阵列通过检测表面转发器获得体模位移信息^[13],带有黑色环的转发器与床Lng方向激光线对齐,体模表面有等中心摆位十字线,计划等中心与加速器等中心对齐,摆位完成后,记录床在Vrt、Lat、Lng这3个方向的初始坐标,使床分别在三维方向上移动一定距

离, Calypso 测量体模位移, 分别对比体模在三维方向的实际位移与测量位移, 验证 Calypso 系统对靶区位移的测量精度。

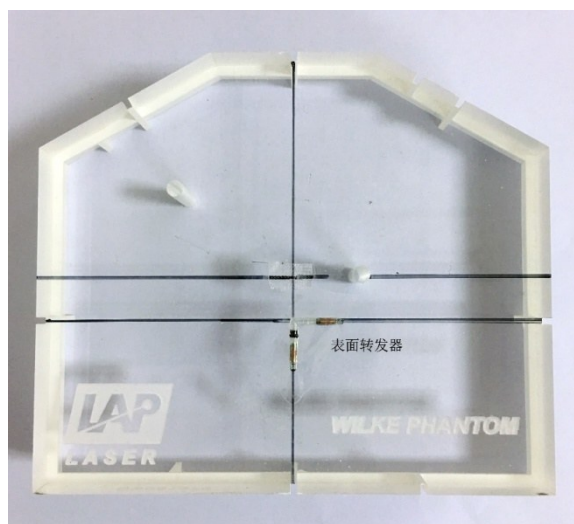


图3 表面转发器验证体模

Fig.3 Verification phantom for superficial transponder

1.2.2 角度测量精度验证 六维 Calypso 专用治疗床的 Pitch、Roll、Rtn 角度值归零, 用 QA 固件作为体模验证植入式转发器的角度测量精度, 体模摆位完成后, 打开 Calypso 计划, 对植入式转发器进行定位, 记录体模在 Pitch、Roll、Yaw 这 3 个方向的初始值, 如图 4 所示, 操作加速器控制台使床分别在 3 个方向从 -3° ~ 3° 内旋转, 记录 Calypso 检测的体模旋转角度^[14], 比较 Calypso 测量的角度和床旋转角度, 分析 Calypso 系统对靶区角度旋转的测量精度。

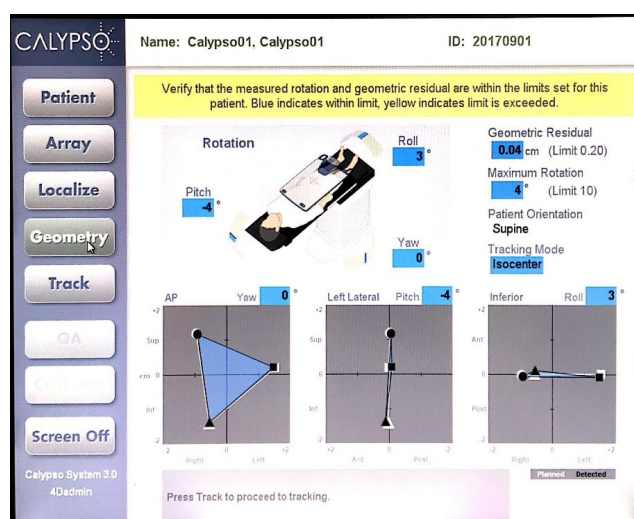


图4 Calypso 角度检测报告

Fig.4 Report of angle test with Calypso

1.3 电磁阵列对射线衰减

在治疗过程使用 Calypso, 但在定位和计划验证时没有放置 Calypso 阵列^[15], 需要量化阵列对射线的衰减, 按照控制台提示把阵列摆在检测位置, 用指型电离室测量有和没有电磁阵列固体水体模内的剂量, 通过式(1)计算电磁阵列对射线的衰减。测量条件: 等中心照射, 源到固体水体模表面距离: 96 cm, 源到阵列表面距离: 84 cm, 射野: $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$, 能量: 6 和 10 MV, 9 个不同机架角, 如图 5 所示, 测量仪器: IBA 公司 DOSE1 剂量仪, 电离室型号: FC65-G。

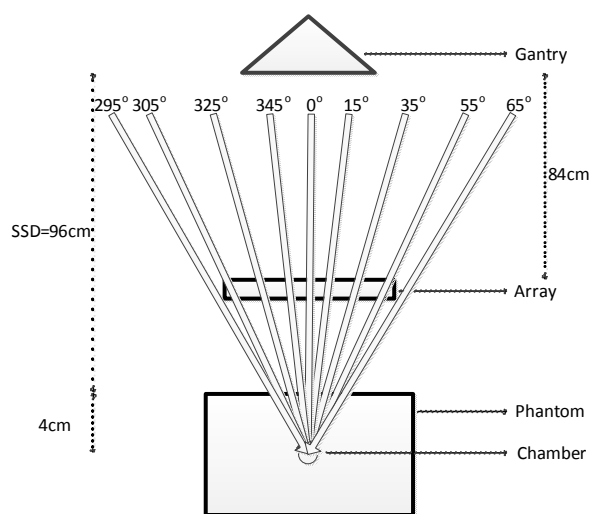


图5 不同机架角度衰减测量示意图

Fig.5 Schematic of attenuation measurement at different gantry angles

阵列对射线衰减的计算公式:

$$\text{Attenuation}(\%) = \left(1 - \frac{\text{Measurement with array}}{\text{Measurement without array}}\right) \times 100 \quad (1)$$

1.4 系统稳定性验证

(1) 静态体模稳定性测试: 体模和 4D 运动平台摆在治疗床上, 摆位十字线与机房激光线对齐, 体模位置不变, 每天用 Calypso 测量一次植入式转发器体模和表面转发器体模等中心位置, 每次都重新摆位电磁阵列, 使阵列位于系统允许的 $\pm 0.2\text{ cm}$ 和 $\pm 0.2^{\circ}$ 位置, 持续测量 30 d, 记录每次体模等中心坐标, 计算当前位置与首次摆位的偏移量和标准差, 验证静态模式下系统稳定性。(2) 动态体模稳定性测试: 4D 运动平台 (Breathing Phantom Gating Assy, Varian) 搭载体模按照重复的正弦模式运动 (平台振幅 1.75 cm, 频率 8.6 次/min, 到位精度 0.01 cm), 用 Calypso 跟踪体模运动^[16], 记录 30 个循环中体模等中心在初始位置和

最大偏移位置的坐标,计算平均位移和标准差,验证动态模式下系统稳定性。

2 结 果

2.1 位移测量精度验证

使用植入式转发器时体模实际位移和 Calypso 检测到的位移值最大偏差 0.03 cm、定位精度 (0.02 ± 0.01) cm,使用表面转发器时体模实际位移与 Calypso 测量位移最大偏差 0.02 cm、定位精度 (0.01 ± 0.01) cm,如表 1 所示。

表 1 床位移与 Calypso 测量位移对比(cm)
Tab.1 Displacement comparison between couch coordinate system and Calypso coordinate system (cm)

Direction	Actual displacement	Displacement measured by implantable transponder	Displacement measured by superficial transponder
Vert	0.32	0.35	0.30
	0.52	0.50	0.50
	0.84	0.85	0.85
Long	0.23	0.25	0.25
	0.53	0.55	0.55
	0.96	0.95	0.95
Lat	0.26	0.25	0.25
	0.54	0.55	0.55
	0.86	0.85	0.85

2.2 角度测量精度验证

对比体模实际旋转角度和 Calypso 测量的角度,发现 Calypso 系统对旋转角度的测量精度为 1°,靶区角度旋转非整数度时 Calypso 系统无法准确测量,如表 2 所示。

2.3 电磁阵列对射线衰减

电磁阵列对 6 和 10 MV 射线在不同机架角度的衰减如图 6 所示,在机架角度-35°~35°内阵列对剂量衰减低于 2.0%,对于 6 MV 射线当机架角度在 305°和 55°时剂量衰减低于 3.4%,对于 10 MV 射线当机架角度在 305°和 55°时剂量衰减低于 2.5%,射线能量 10 MV 时电磁阵列对射线的衰减变小,在 65°~295°内,电磁阵列对射线衰减近乎为零。

2.4 系统稳定性验证结果

静态模式下,Calypso 测量植入式转发器体模和表面转发器体模等中心最大跟踪偏移均是 0.05 cm,植入式转发器体模平均偏移 0.002 cm、标准差 0.009 cm,表面转发器体模平均偏移 0.003 cm、标准差 0.012 cm。在动态模式下,植入式转发器体模平均位移 0.852 cm、标准差 0.001 cm,表面转发器体模平均位移 0.675 cm、标准差 0.008 cm,表明 Calypso 系统有很好的稳定性。

3 讨 论

体模摆位过程需要使体模表面十字线对齐加速

表 2 床旋转角度与 Calypso 测量角度对比(°)
Tab.2 Angel comparison between couch rotation and Calypso measurement (°)

Axis	Rotation angle	Measurement angle
Pitch	2.4	3
	2.0	2
	1.6	2
	-1.6	-1
	-2.4	-2
Roll	2.4	2
	1.6	1
	1.0	1
	-1.6	2
	-2.4	-3
Yaw	2.3	2
	1.7	1
	-1.7	-2
	-2.0	-2
	-2.3	-3

器机房的摆位激光线,体模等中心定位精度取决于加速器等中心和激光线的精度,因此执行电磁定位

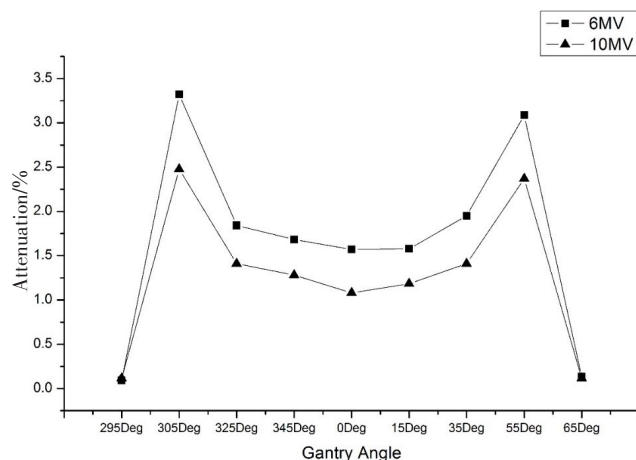


图6 不同机架角电磁阵列对射线的衰减

Fig.6 Attenuation of ray caused by electromagnetic array at different gantry angles

前需先完成加速器机械参数的质量保证,消除系统误差^[17]。Calypso的光学系统不能直接获得转发器位置,而是通过电磁阵列表面的光学靶点间接获得转发器在三维空间内的位置,因此还需要对光学系统进行校准,消除系统误差对电磁定位精度的影响^[18]。使用Calypso系统对植入式转发器和表面转发器进行定位测试发现系统的定位精度在亚毫米级,位移测试分别在床Vrt、Lat、Lng 3个方向进行,后续的研究还需要测试在三维空间内的位移测量精度。Calypso测量的转发器角度与床旋转的角度不一致,并且不一致的幅度也不是恒定的,无法获得1°量级以下的微小角度变化,表明当靶区出现非整数度的旋转时,系统是不能准确测量的。Calypso系统对植入式转发器定位不仅能精确获得靶区的位移信息,而且可以获得靶区的旋转信息,适合用于体部如前列腺肿瘤定位,但这种方式属于有创操作并且对医生植入技术有一定要求;表面转发器是针对体表附近的肿瘤定位,这种方式操作简单,只需把表面转发器固定在体表某一位置,属于无创操作,病人更易接受,但是一组表面转发器是由两个转发器组成,不能报告靶区的角度旋转,并且只能反映体表附近肿瘤运动,应用范围有局限性^[19]。

电磁阵列对经过的射线产生衰减,并且阵列到病人距离的不同衰减也在变化,Silva等^[20]研究部分机架角度时电磁阵列对射线的衰减,没有全面量化机架360°范围内电磁阵列对射线的衰减,本研究通过测量10 cm×10 cm方野照射时有电磁阵列和没有电磁阵列固体水内点剂量,量化360°范围内不同机架角时阵列对射线的衰减,当机架角在正负35°范围内时阵列对射线的衰减较小,在305°和55°时衰减较

大,65°~295°内无射线衰减,在设计放疗计划时需尽量避开衰减较大的机架角度,减小电磁阵列对射线衰减产生的影响。在衰减测试过程执行点剂量验证,后续还需要用Delta4三维模体验证电磁阵列对调强计划剂量分布的影响。在稳定性测试中Calypso系统表现出能够稳定到以亚毫米级精度完成靶区定位,虽然检测到一定幅度的偏移,但偏移的幅度很小,重复测量出现偏移表明摆位误差是对系统精度的一个影响因素,低于0.012 cm的标准差说明在有摆位误差的情况下系统还能够满足临床测量需要的分辨率,另外电磁阵列臂不能锁定位置,电磁阵列向下的重力作用也会导致出现偏移,需要经常维护阵列臂。本研究成功模拟Calypso对人体靶区的定位跟踪过程,验证了Calypso系统的定位精度,结果显示Calypso系统能够精确、稳定地报告转发器定义的等中心,电磁阵列对射线的衰减是可以接受的,表明Calypso 4D电磁定位系统是精确、可靠的,可以在临床放疗时用于靶区实时跟踪。

【参考文献】

- [1] MANN P, SAITO N, LANG C, et al. Validation of 4D dose calculation using an independent motion monitoring by the Calypso tracking system and 3D polymer gel dosimetry[J]. J Phys Conf Ser, 2017, 847(1): 012040.
- [2] SHAH A P, KUPELIAN P A, WILLOUGHBY T R, et al. Expanding the use of real-time electromagnetic tracking in radiation oncology[J]. J Appl Clin Med Phys, 2011, 12(4): 34-49.
- [3] WILLOUGHBY T R, KUPELIAN P A, POULIOT J, et al. Target localization and real-time tracking using the Calypso 4D localization system in patients with localized prostate cancer[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2006, 65(2): 528-534.
- [4] MURALIDHAR K R, KRISHNA K, ROUT B K, et al. Commissioning and quality assurance of Calypso four-dimensional target localization system in linear accelerator facility[J]. Med Phys, 2013, 38(3): 143-147.
- [5] Varian Medical Systems. Calypso system operator's manual[R]. Palo Alto: Varian Medical Systems, 2013.
- [6] BALTER J M, WRIGHT J N, NEWELL L J, et al. Accuracy of a wireless localization system for radiotherapy[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2005, 61(3): 933-937.
- [7] FRANZ A M, SCHMITT D, SEITEL A, et al. Standardized accuracy assessment of the Calypso wireless transponder tracking system[J]. Phys Med Biol, 2014, 59(22): 797-810.
- [8] SHARP G C, JIANG S B, SHIMIZU S, et al. Tracking errors in a prototype real-time tumor tracking system[J]. Phys Med Biol, 2004, 49(23): 5347-5356.
- [9] SCHMIDHALTER D, FIX M K, WYSS M, et al. Evaluation of a new six degrees of freedom couch for radiation therapy[J]. Med Phys, 2013, 40(11): 111710.
- [10] OGUNLEYE T, ROSSI P J, JANI A B, et al. Performance evaluation of Calypso 4D localization and kilovoltage image guidance systems for interfraction motion management of prostate patients[J]. J Sci World, 2009, 9: 449-458.

- [11] WEN N, SNYDER K C, SCHEIB S G, et al. Evaluation of the systematic accuracy of a frameless, multiple image modality guided, linear accelerator based stereotactic radiosurgery system[J]. *Med Phys*, 2016, 43(5): 2527-2537.
- [12] MURPHY M J, EIDENS R, VERTATSCHITSCH E, et al. The effect of transponder motion on the accuracy of the Calypso electromagnetic localization system[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2008, 72(1): 295-299.
- [13] BELANGER M, SALEH Z, VOLPE T, et al. Validation of the Calypso surface beacon transponder[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2016, 17(4): 223-234.
- [14] XU Q, LI J, SHAN G, et al. Comparison of prostate rotation and Calypso beam rotation for prostate margin evaluation[J]. *Med Phys*, 2009, 36(6): 2704-2707.
- [15] ZOU W, BETANCOURT R, YIN L, et al. Effects on the photon beam from an electromagnetic array used for patient localization and tumor tracking[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2013, 14(3): 72-80.
- [16] RAU A W, NILL S, EIDENS R S, et al. Synchronized tumor tracking with electromagnetic transponders and kV X-ray imaging: evaluation based on a thorax phantom[J]. *Phys Med Biol*, 2008, 53(14): 3789-3805.
- [17] SILVA C, MATEUS D, EIRAS M, et al. Calypso 4D localization system: a review[J]. *J Radiother Prac*, 2014, 13(4): 473-483.
- [18] SANTANAM L, MALINOWSKI K, HUBENSHMIDT J, et al. Fiducial-based translational location accuracy of electromagnetic tracking system and on-board kilovoltage imaging system[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2008, 70(3): 898-899.
- [19] ZUCCA A, MANCOSU P, COMITO T, et al. On line tracking of abdominal compression efficacy for pancreas SBRT by Calypso surface transponders[J]. *Radiother Oncol*, 2015, 115(1): S609-S610.
- [20] SILVA C, MATEUS D, VIEIRA S, et al. Calypso's array attenuation[J]. *J Radiother Prac*, 2015, 14(2): 202-207.

(编辑:陈丽霞)