

## 图像引导精准定位跟踪系统KylinRay-IGRT

吴宜灿, 贾婧, 曹瑞芬, 胡丽琴, 龙鹏程, 宋钢, 何桃, 宋婧, 王永亮, 金雏凤, FDS 团队  
中国科学院核能安全技术研究所中子输运理论与辐射安全重点实验室, 安徽 合肥 230031

**【摘要】**针对放疗过程的摆位误差以及动态肿瘤靶区定位跟踪难题, 图像引导精准定位跟踪系统KylinRay-IGRT基于双X射线成像和红外引导, 实现了治疗前对病人的摆位, 以及治疗过程中对肿瘤运动的跟踪与控制。系统主要包含X射线图像实时采集、多维多模式图像配准和快速实时的红外定位引导等功能。本研究开展基于双X射线成像系统的摆位误差纠正和基于红外信号的定位与呼吸跟踪实验, 对系统进行了功能性和正确性测试。结果表明KylinRay-IGRT的定位精度可满足临床需求, 为进一步开展自适应放疗关键技术和算法提供研究平台和技术基础。

**【关键词】**图像引导精准放疗; 摆位; X射线成像; 红外定位跟踪; 呼吸运动监测

**【中图分类号】**R318

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2017)03-0225-05

## Image-guided accurate positioning and tracking system KylinRay-IGRT

WU Yican, JIA Jing, CAO Ruifen, HU Liqin, LONG Pengcheng, SONG Gang, HE Tao, SONG Jing, WANG Yongliang, JIN Chufeng, FDS Team

Key Laboratory of Neutronics and Radiation Safety, Institute of Nuclear Energy Safety Technology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

**Abstract:** Targeting at the setup errors and difficulties in positioning and tracking tumor areas during radiotherapy, image-guided accurate positioning and tracking system KylinRay-IGRT which combined dual stereotactic X-ray imaging and infrared tracking techniques is developed to achieve an accurate setup before each fractioned treatment and to track and control the tumor movement during treatment. The main functions of the system include real-time X-ray image acquisition, multi-modality image registration and infrared-based tracking. Experiments and simulations, including the correction of setup errors based on dual X-ray imaging system as well as the infrared-based positioning and respiratory tracking experiments based on infrared signal, are carried out to verify the efficiency and accuracy of KylinRay-IGRT. The validation results show that the positioning accuracy of KylinRay-IGRT meets the clinical requirement, providing an efficient platform and technology base for the further study on adaptive radiotherapy key technologies and algorithms.

**Keywords:** image-guided accurate radiotherapy; setup; X-ray imaging; infrared-based positioning and tracking; respiratory motion monitoring

### 前言

为了解决治疗过程中的摆位误差以及动态肿瘤靶区定位跟踪问题, 图像引导放疗技术(Image-Guided Radiotherapy, IGRT)成为精准放射治疗研究的热点, 通过直线加速器与不同模式的成像设备进行组

合, 采集治疗前或治疗过程中的病人信息, 对靶区和周围组织器官的位置和结构进行确认, 引导当前及后续分次治疗, 从而为放疗计划的准确实施提供重要保证<sup>[1-3]</sup>。国外成熟商用IGRT系统主要分为两类<sup>[4-8]</sup>: 一类是采用千伏级锥形束CT设备进行引导; 另一类是基于双束立体定向技术进行引导, 但缺点是需要与加速器绑定, 难以独立使用, 无法在治疗实施过程中对靶区位置进行实时动态跟踪和调整。国内对IGRT的研究整体还处于起步阶段, 缺少整体性、系统性的研究成果, 亟需要有低成本、方便快捷的IGRT系统来辅助病人的放疗过程, 即对病人进行快速自动精确的定位摆位和实时靶区位置监测跟踪<sup>[9-13]</sup>。

**【收稿日期】**2016-11-27

**【基金项目】**国家自然科学基金(11605233, 11305205); 国家973计划项目(2006CB708307); 中科院战略性先导科技专项(XDA03040000); 安徽省自然科学基金(1508085QH180); 产业化基金

**【作者简介】**吴宜灿, 研究员, 研究方向: 核能科学与工程、辐射医学物理及应用、计算机仿真与软件工程等多学科交叉研究, E-mail: yican.wu@fds.org.cn

中国科学院核能安全技术研究所FDS团队长期对精准放射治疗关键物理与技术进行研究,提出和发展了高精度5D自动建模、快速精准剂量计算、逆向计划多目标优化、精准智能定位与摆位、实时剂量反演与验证等一系列放射治疗关键核心方法,发展了自主知识产权的精准放射治疗系列产品麒麟刀KylinRay(原名为精准放射治疗计划与质量保证系统ARTS)<sup>[14-15]</sup>,包括KylinRay-IMRT/IGRT/DGRT等<sup>[16-19]</sup>,为临床提供系列产品解决方案。本文重点对图像引导精准定位跟踪系统KylinRay-IGRT进行介绍,KylinRay-IGRT基于双X射线成像和红外定位跟踪引导,能够快速精准地实现对摆位误差的校正和对呼吸运动的实时跟踪监测<sup>[20-21]</sup>。本文首先对KylinRay-IGRT的功能需求和系统设计进行简要介绍,然后对定位跟踪的核心即配准方法和呼吸运动预测方法进行介绍,最后对整个系统的精度、速度及可靠性进行验证,给出测试结果。

1 功能需求与系统设计

1.1 功能需求

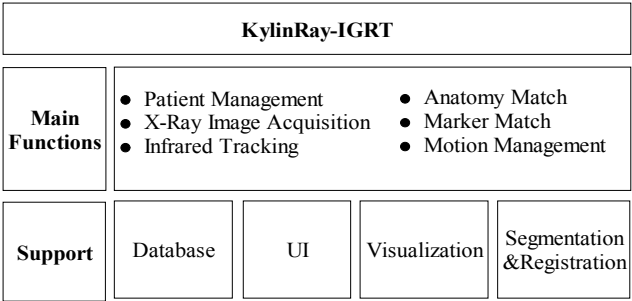
目前临床上实现精准放疗的首要条件是实现肿瘤患者的精准定位,主要体现在患者治疗前的摆位验证和治疗过程中的靶区运动控制。这就需要有对应的引导系统能够处理分次治疗中患者影像的采集、进行摆位误差的计算,同时能够对呼吸运动等影响进行实时定位跟踪,从而实现精准照射。针对以上临床需求,系统功能应覆盖病人计划信息导入、治疗分次建立、摆位影像的采集与处理、摆位误差计算与纠正的全过程,同时能够对病人进行呼吸信号采集和管理。此外,在治疗室和控制室内,可驱动红外及X射线机硬件系统的运行,从而完成病人定位跟踪的全部操作。

1.2 系统设计

针对IGRT中快速精准定位摆位和实时靶区跟踪的发展趋势,KylinRay-IGRT的目标是围绕病人的摆位引导和呼吸运动控制,设计并实现适于临床实际、可灵活扩展及维护的图像引导精准定位跟踪系统,同时开展精准放疗中摆位验证和定位跟踪中关键技术的探索与实验研究。为了满足以上功能需求,KylinRay-IGRT采用基于双X射线成像设备及红外跟踪设备完成治疗前和治疗过程中,对病人的摆位定位和呼吸运动的实时监控;其中双X射线成像系统可随时采集不同角度下的X射线图像,完成当前时刻病人内部解剖结构和靶区位置的正确性验证;红外定位跟踪系统通过采集病人体表的标记点位置信

息,对病人呼吸运动进行实时监控。

依据“高内聚、低耦合”的模块化设计原则,KylinRay-IGRT系统软件分为4大模块,分别为:(1)病人信息管理模块,用于导入治疗计划系统的病人计划信息,同时管理病人的治疗分次信息;(2)硬件控制模块,用于控制X射线图像采集和红外定位跟踪;(3)摆位误差计算与纠正模块,通过调用配准计算核心,提供基于骨性标志和基于标记点配准计算方法;(4)呼吸运动管理模块,能够实时采集病人的呼吸信号,对呼吸进行连续监测和准确预测。此外系统还包含对应的可视化与辅助工具,如图像可视化和配准分析常用工具等,整体系统架构如图1所示。此外,在系统整体运行安全方面,构建了X射线图像采集系统与辐射防护门的门联锁安全系统,确保X射线源在防护门没有正确关闭的情况下无法进行启动,同时与整个控制室的联锁系统进行耦合,采用报警灯和急停控制按钮方便给操作人员提示和安全操控,从而保证系统运行的安全性和稳定性。



IGRT: Image-guided radiotherapy

图1 KylinRay-IGRT 系统架构图

Fig.1 System architecture of KylinRay-IGRT

2 关键方法与技术

为了保证对肿瘤患者摆位产生的位移偏差进行有效纠正,需要发展精度高、速度快和可靠性强的自动配准方法,使得放射治疗首先能够精准定位。同时,对于呼吸运动对放疗精度的影响,采用呼吸运动预测的方法实现精准跟踪。针对以上关键问题,KylinRay-IGRT系统发展了基于金字塔多分辨率的互信息配准和基于标记点的配准来实现对患者的定位摆位,同时发展了基于非参数回归的呼吸运动预测来完成治疗过程中的呼吸运动跟踪<sup>[22]</sup>。

2.1 基于金字塔多分辨率的互信息配准方法

本系统采用了基于外置式双X射线成像的装置,即需要配准的数据对象是二维的X射线图像和计划系统中的三维CT数据,针对配准存在的数据量大和

鲁棒性的问题,提出基于感兴趣区域的金字塔多分辨率互信息配准方法。首先提取和确定感兴趣区域,进而采用多分辨率分析,将两幅待配准图像进行金字塔分解,得到不同分辨率的图像,使单一的配准过程变成从粗到细多分辨率的配准过程,避免互信息测度在配准过程中陷入局部极值,很大程度上提高算法的收敛速度。此外,系统算法对影响配准精度和速度的参数做了进一步改进,分别在优化器参数、采样函数参数和金字塔级别上对不同的治疗部位进行自动化模板库预设,加快和提高配准算法的速度和精度。

2.2 基于标记点的配准方法

在 KylinRay-IGRT 系统中,通过红外定位引导,首先对病人体表外部标记点和靶区等中心点之间的关系进行匹配,即将不同空间坐标系统下的点进行统一。由 CT 扫描得到治疗前红外标记点和靶区中心的图像坐标,每次治疗前由红外系统检测得到治疗室下的红外标记点的坐标。普遍采用外部标记点的配准方法通常是需要靶区附近放置 3~8 个标记点,点的对数越多,配准就越准确,稳定性也较好。根据这组标记点在两个空间中不同的坐标值,使用最小二乘法求出两个空间的坐标变换矩阵。然而这种方法存在以下问题:(1)需要手动寻找标记点的坐标值,操作耗时繁琐;(2)很难精确找到标记点的中心坐标。针对以上问题,本系统提出了基于 K 均值聚类算法的标记点自动识别算法,对于 CT 图像中红外标记点的识别和提取能够做到精度高、速度快、可靠性好。同时结合了奇异值分解法和最临近点迭代法解决任意个数点集、任意对应关系间的配准问题。

2.3 基于非参数回归的呼吸运动预测方法

目前放疗过程中对呼吸运动的预测多数直接针对运动幅度最大的方向进行分析,即对一维呼吸运动数据的预测。本文发展了基于高斯核函数的非参数回归呼吸运动预测方法,采用没有固定参数和函数形式的三维非参数回归模型,对放疗中的呼吸运动在三维方向上进行预测,由历史的呼吸数据描述输入与输出之间的关系,通过对历史数据中的信息充分解析,对呼吸运动中 3 个方向上出现的运动变化情况进行准确预测。此方法误差累积小、预测效果好,并且能很好地与 KylinRay-IGRT 硬件系统相结合,从而实现呼吸运动的实时预测和监控。

3 系统实现与验证

3.1 系统实现

基于 X 射线成像和红外引导, KylinRay-IGRT 采用可以灵活组装的外置式安装方式,可以脱离加速器独立运行。其中,双 X 射线成像系统能够实现治疗过程中多角度 X 射线图像的采集;基于红外引导的定位跟踪可以对病人体表的红外标记点进行自动实时检测追踪, X 射线系统和红外系统的结合能够为病人摆位和呼吸运动提供精准的参考,实现对肿瘤靶区的实时监测。 KylinRay-IGRT 系统主要功能模块包括病人管理、X 射线图像采集、多维多模式图像配准和红外定位跟踪以及通用图像处理和分析工具。其中 X 射线图像采集控制工作区用户界面截图如图 2a 所示,系统平台硬件实现如图 2b 所示。 KylinRay-IGRT 系统可安装加速器治疗室中,无须对加速器进行改造,因此可以灵活应用于不同型号的加速器或质子、重离子等不同的治疗方式中。

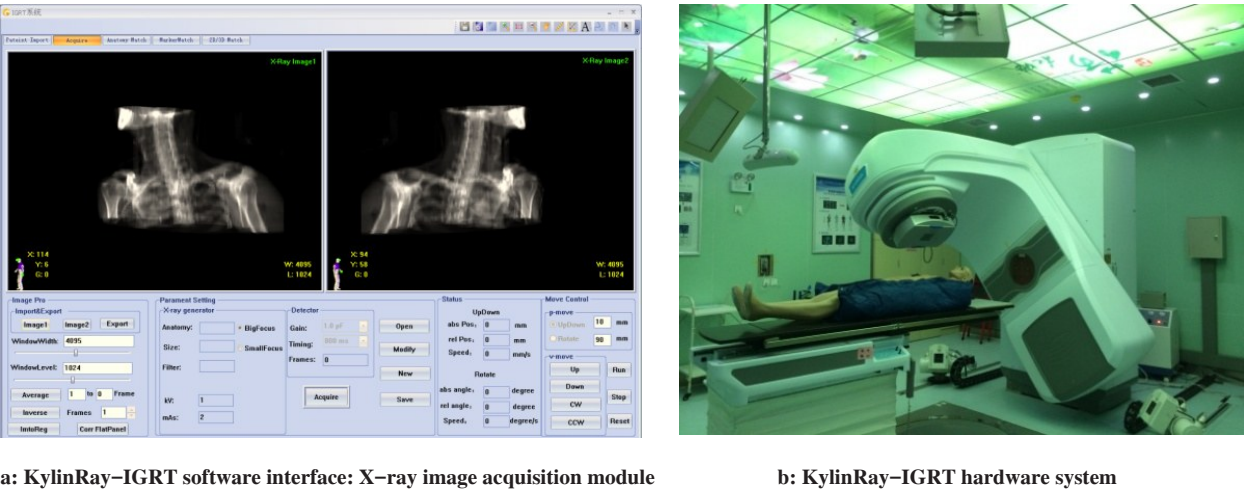


图2 KylinRay-IGRT 软件界面和硬件系统

Fig.2 Software interface and hardware system of KylinRay-IGRT



3.2 双 X 射线图像采集与配准验证

系统功能验证采用密度、体积和形状与真实人体头部相似的辐射仿真模体,基于 KylinRay-IGRT 双 X 射线成像系统,采集仿真头模在无摆位偏移时,正负 45° 角度方向下的两幅 X 射线图像进行配准;其次基于临床病例的模拟数据变换实际照射时病人体位信息,设置 x、y、z 3 个方向上不同的偏移量,进而采用基于金字塔多分辨率的互信息配准算法进行配准,并对影响配准精度和速度的参数进行分析选择。测试结果得到配准绝对误差最大为 0.33 mm,表明基于金字塔多分辨率的互信息算法能够达到亚毫米级的

配准精度,可有效用于放疗过程中基于骨性标志的配准摆位验证。

3.3 红外定位跟踪功能验证

红外定位跟踪系统由红外定位传感器、定位跟踪软件、红外被动标记点、跟踪工具组成,系统验证模体包含静态校准模体和动态校准模体(图 3),主要验证功能包括红外系统的定位跟踪稳定性、红外定位跟踪的静态与动态空间精度,以及对人体呼吸数据的实时采集监测,参考美国医学物理学家协会(简称 AAPM)中关于第 147 号报告中给出的例题<sup>[23]</sup>对系统的性能指标进行验证。

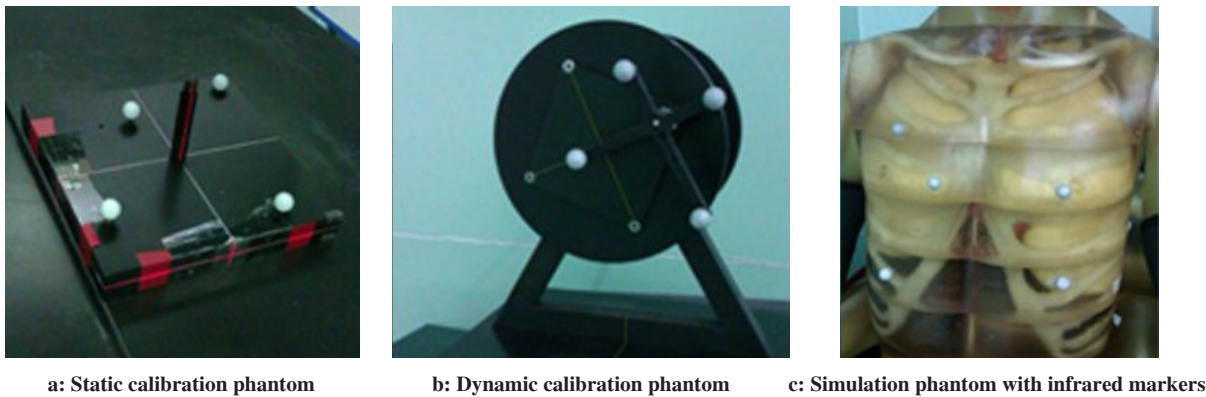


图 3 系统验证模体

Fig.3 System verification phantoms

(1)对红外定位跟踪稳定性进行验证,通过热漂移测试确定系统需要的预热时间,进而提高病人定位摆位的效率和精度,实验测得的最大偏差为 0.03 mm; (2)对红外定位跟踪静态空间精度进行验证,将静态校准模体通过激光灯放置在加速器等中心点处,由 KylinRay-IGRT 系统采集并记录静态校准模体上 4 个标记点的位置作为参考位置,设置固定步长,移动治疗床进行上下、左右、前后 6 个方向的位置变化。每移动 1 次,红外系统记录采集得到的当前位置等中心点的坐标,并与参考位置进行比较,求得位置偏差;采用同样的步骤在带标记点的仿真体部模体上进行测试。对测试结果分析得到, x、y、z 3 个方向上的平均标准差为  $\sigma_x=0.15\text{ mm}$ 、 $\sigma_y=0.17\text{ mm}$ 、 $\sigma_z=0.24\text{ mm}$ ; (3)对红外定位跟踪动态空间精度验证,参考点选择动态校准模体的中心点,从两角度转动和四角度转动的方式对动态校准模体进行测试,沿顺时针方向控制模体依次匀速转动 90°、180°、275°和 360°,每个角度下停留 5 s,由红外系统记录检测到的标记点位置,并与参考位置进行比对,重复进行 10 组得到平均位置偏差为 0.57 mm; (4)对呼吸运动跟踪功能进行测试,采集 50 组来自 5 个志愿者体表的红外反射标记物的呼吸运动数据,针对每组呼吸数据,采用基于

高斯核函数三维回归模型进行预测,其中对 1 名志愿者的呼吸运动预测结果如图 4 所示。实验表明在肺部同一位置,不同人的呼吸运动轨迹和运动幅度均有很大差异,呼吸状态通常不稳定,可以在很短时间内发生较大变化。本文采用归一化均方根误差<sup>[24]</sup>作为评价标准验证预测结果的精度,通过采集体外红外标记点的位置信息对人体呼吸运动进行预测,结果表明 KylinRay-IGRT 系统能够准确预测呼吸过程中存在的各种复杂情况,预测精度在 1 mm 以内。

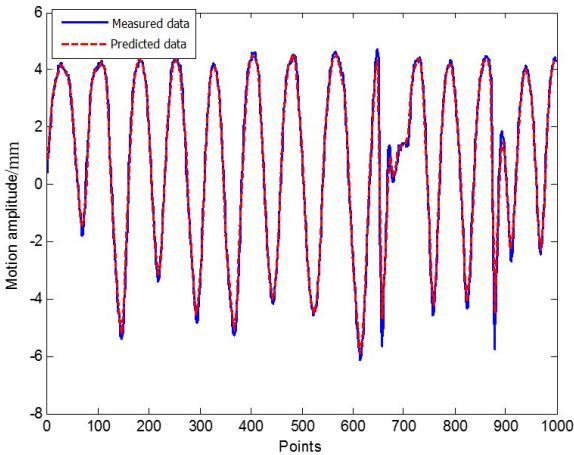


图 4 基于高斯核函数回归模型进行预测结果

Fig.4 Predicted results based on Gaussian kernel function regression model

## 4 总结

图像引导精准定位跟踪系统 KylinRay-IGRT 能够实现X射线图像采集、医学图像配准和精准红外定位跟踪功能。系统采用模块化和面向对象的设计模式,具有良好的可扩展性和可维护性,对于不同类型的加速器能够进行灵活适配,也为未来实现质子/重离子治疗装置所需的图像引导功能提供基础。测试结果显示 KylinRay-IGRT 配准和定位跟踪功能的有效性和可靠性,能够为医生和物理师提供有效参考,从而进一步为精准放疗计划的准确实施提供重要保障。

## 【参考文献】

- [1] VERELLEN D, RIDDER M, STORME G. A (short) history of image-guided radiotherapy[J]. *Radiat Oncol*, 2008, 86(1): 4-13.
- [2] 戴建荣, 胡逸民. 图像引导放疗的实现方式[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2006, 15(2): 132-135.  
DAI J R, HU Y M. Realizations of image-guided radiotherapy[J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2006, 15(2): 132-135.
- [3] SANTOS J D, POPPLE R, AGAZARYAN N, et al. Image guided radiation therapy (IGRT) technologies for radiation therapy localization and delivery[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2013, 87(1): 33-45.
- [4] SHIRATO H, SHIMIZU S, KITAMURA K, et al. Four-dimensional treatment planning and fluoroscopic real-time tumor tracking radiotherapy for moving tumor[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2000, 48(12): 435-442.
- [5] SHIRATO H, SHIMIZU S, KUNIEDA T, et al. Physical aspects of a real-time tumor-tracking system for gated radiotherapy[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2000, 48(4): 1187-1195.
- [6] MURPHY M J, MARTIN D, WHYTE R, et al. The effectiveness of breath-holding to stabilize lung and pancreas tumors during radio-surgery[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2002, 53(2): 475-482.
- [7] VERELLEN D, TOURNEL K, LINTHOUT N, et al. Importing measured field fluences into the treatment planning system to validate a breathing synchronized DMLC-IMRT irradiation technique[J]. *Radiother Oncol*, 2006, 78(3): 332-338.
- [8] PAUL K, MAGERAS G S, BALTER J M, et al. The management of respiratory motion in radiation oncology report of AAPM Task Group 76[J]. *Med Phys*, 2006, 33(10): 3874-3900.
- [9] 邹炼. IGRT 涉及的一些图像配准算法和剂量重建算法的研究[D]. 成都: 四川大学, 2007.  
ZOU L. Image registration algorithms and dose reconstruction algorithms in IGRT[D]. Chengdu: Sichuan University, 2007.
- [10] 闫凌. 医学图像配准理论与软件实现研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.  
YAN L. Medical image registration theory and software implementation research[D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [11] 成尚利, 何俊民. 医学图像融合配准技术[J]. *上海生物医学工程*, 2007, 28(3): 171-175.  
CHENG S L, HE J M. Medical image registration technology[J]. *Shanghai Journal of Biomedical Engineering*, 2007, 28(3): 171-175.
- [12] CHEN X, VARLEY M, SHARK L K, et al. A computationally efficient method for automatic registration of orthogonal X-ray images with volumetric CT data[J]. *Phys Med Biol*, 2008, 53(4): 967-983.
- [13] 张密, 吴效明, 周凌宏. 基于 ITK 的 Mattes 互信息医学图像配准研究[J]. *微计算机信息*, 2010, 26(8): 189-191.  
ZHANG M, WU X M, ZHOU L H. Research of mattes mutual information medical image registration based on ITK [J]. *Microcomputer Information*, 2010, 26(8): 189-191.
- [14] 张磊, 程品晶, 单国平, 等. 螺旋断层放射治疗的研究进展[J]. *实用医学杂志*, 2015, 31(12): 2056-2058.  
ZHANG L, CHEN P J, SHAN G P, et al. Progress in the study of spiral CT [J]. *The Journal of Practical Medicine*, 2015, 31(12): 2056-2058.
- [15] WU Y C, SONG G, CAO R F, et al. Development of accurate/advanced radiotherapy treatment planning and quality assurance system (ARTS) [J]. *Chinese Physics C (HEP & NP)*, 2008, 32 (Suppl II): 177-182.
- [16] WU Y C, SONG J, ZHENG H Q, et al. CAD-based Monte Carlo program for integrated simulation of nuclear system SuperMC [J]. *Ann Nucl Energy*, 2015, 82: 161-168.
- [17] CAO R F, WU Y C, PEI X, et al. Multi-objective optimization of inverse planning for accurate radiotherapy [J]. *Chinese Physics C*, 2011, 35(3): 313-317.
- [18] 黄善清, 龙鹏程, 李佳, 等. 基于 ITK 与 VTK 的配准融合方法的研究与应用[J]. *计算机应用*, 2010, 30(1): 140-142.  
HUANG S Q, LONG P C, LI J, et al. Research and application of image registration based on ITK and VTK [J]. *Journal of Computer Applications*, 2010, 30(1): 140-142.
- [19] ZHENG H, SUN G, LI G, et al. Photon dose calculation method based on Monte Carlo finite-size pencil beam model in accurate radiotherapy [J]. *Commun Comput Phys*, 2013, 14(5): 1415-1422.
- [20] WU Y, FDS Team. CAD-based interface programs for fusion neutron transport simulation [J]. *Fusion Eng Des*, 2009, 84(7-11): 1987-1992.
- [21] 曹瑞芬, 裴曦, 郑华庆, 等. 基于共轭梯度法的调强放疗射束强度分布优化[J]. *原子核物理评论*, 2010, 27(2): 212-217.  
CAO R F, PEI X, ZHENG H Q, et al. Optimization of beam intensity distribution of intensity modulated radiotherapy based on conjugate gradient method [J]. *Nuclear Physics Review*, 2010, 27(2): 212-217.
- [22] 贾婧. 基于红外和X射线的图像引导精准放射治疗系统关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.  
JIA J. Key technologies of developing image-guided radiotherapy based on infrared guiding and X-ray imaging [J]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
- [23] WILLOUGHBY T, LEHMANN J, BENCOMO J A, et al. Quality assurance for nonradiographic radiotherapy localization and positioning systems: Report of Task Group 147 [J]. *Med Phys*, 2012, 39(4): 1728-1747.
- [24] MURPHY M J, DIETERICH S. Comparative performance of linear and nonlinear neural networks to predict irregular breathing [J]. *Phys Med Biol*, 2006, 51(22): 5903-5914.

(编辑: 陈丽霞)