

一种医用直线加速器机械参数测量分析系统

方川¹, 葛云¹, 黄晓林¹, 陈颖¹, 金建华², 蔡晶², 储开岳²

1. 南京大学电子科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 2. 南通市肿瘤医院放疗科, 江苏 南通 226361

【摘要】目的:设计并实现一种医用直线加速器的机械参数测量系统,可对医用直线加速器等中心等各项机械参数进行测量并定量分析。**方法:**系统硬件采用双目光学测量套件,在加速器各部件上贴上定位小球,双目相机以20 Hz频率输出定位小球的空间坐标。软件上位机根据定位小球坐标实时更新加速器三维模型和各部件运动参数的拟合,实现对医用直线加速器的运动跟踪功能。完成测量后,软件可以输出测量分析报告,报告内容包括加速器各部件机械运动参数和反映性能的特征量,测量精度达0.5 mm。**结果:**实现本系统后,在两家医院对两台不同使用时长医用直线加速器分别进行多次测量和分析,得到等中心误差、机架机械运动参数和统计量、治疗床机械运动参数和统计量、机架和治疗床重复运动误差等。**结论:**本系统可帮助技术人员和物理师进行加速器维护工作,为医用直线加速器的日常检测和质量控制提供指导。

【关键词】医用直线加速器;机械参数;双目光学测量套件;分析报告

【中图分类号】R318

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2019)05-0585-05

Mechanical parameter measurement and analysis system for a medical linear accelerator

FANG Chuan¹, GE Yun¹, HUANG Xiaolin¹, CHEN Ying¹, JIN Jianhua², CAI Jing², CHU Kaiyue²

1. School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Department of Radiotherapy, Nantong Tumor Hospital, Nantong 226361, China

Abstract: Objective To design and implement a mechanical parameter measurement system that can measure and quantitatively analyze the isocenter and other mechanical parameters of medical linear accelerators. **Methods** The hardware of the system adopted binocular optical measurement kit. A positioning ball was attached to the components of the accelerator. The binocular camera output the spatial coordinates of the positioning ball at a frequency of 20 Hz. According to the coordinates, the fitting of three-dimensional model of the accelerator and the movement parameters of each component was updated with software, thereby realizing the motion tracking on medical linear accelerators. When the measurement was completed, the software output the measurement analysis report which included the mechanical motion parameters of various components of the accelerator and the characteristic variables which could reflect the performance. The measurement accuracy was up to 0.5 mm. **Results** After the system was established, multi-measurement and analysis were conducted on two medical linear accelerators that had been working for different hours in two hospitals. The accelerators were separately measured and analyzed to obtain the isocenter errors, mechanical motion parameters of gantry and treatment couch and their statistics, repeatability errors of gantry and treatment couch, etc. **Conclusion** The proposed system can effectively assist technicians and physicists in the maintenance of accelerators and provide guidance for daily inspection and quality control of medical linear accelerators.

Keywords: medical linear accelerator; mechanical parameter; binocular optical measurement kit; analysis report

【收稿日期】2018-11-10

【基金项目】江苏省重点研发计划-社会发展-临床前沿技术(SBE2016733; BE2017679),南京市校企合作后补助项目(201722002)

【作者简介】方川,硕士研究生,主要研究方向:医学软件开发、图像处理, E-mail: mfl623010@smail.nju.edu.cn

【通信作者】葛云,教授,研究方向:医学影像处理及精准放疗, E-mail: geyun@nju.edu.cn

前言

直线加速器作为放射治疗的主要医疗设备,其等中心精度的大小直接影响放射治疗质量,等中心的一点偏差,都有可能造成患者治疗靶区偏移并危害正常器官^[1-3]。等中心的精度是由加速器各组成部分的机械参数所决定的,虽然医用直线加速器在安装时已经达到临床使用要求,但随着日常使用磨损、器件老化、设备故障维修,难免使得加速器的等中心

和机械精度下降^[4-5]。因此,医用直线加速器的质量保证和质量控制方法显得尤为重要^[6-9]。

本研究设计一种简单、直观、实用的半自动化测量方法,能够有效针对医用直线加速器完成日常检测工作^[10]。

1 等中心及机械参数测量方法

在放射学设备中,各种运动的基准轴线围绕一个公共中心点运动,辐射轴从此点为中心的最小球体内通过,此点即为等中心。具体而言,一般把机架旋转轴线、准直器旋转轴线和治疗床旋转轴线的交点记为加速器的机械等中心。理论上,治疗床旋转轴与准直器旋转轴重合,如图1所示。

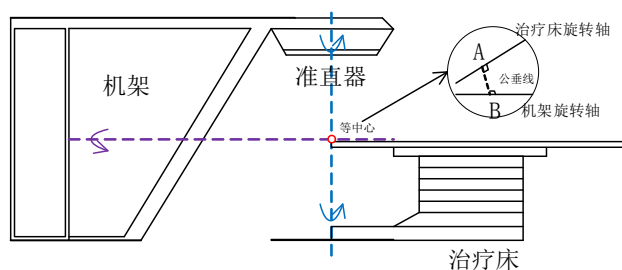


图1 等中心示意图

Fig.1 Diagram of isocenter

实际测量中,由于机械误差和计算误差,计算得到的两个旋转轴不能交于一点,作机架旋转轴和治疗床旋转轴之间的共垂线(图1),垂足分别记为 $D_A = (x_A, y_A, z_A)$ 和 $D_B = (x_B, y_B, z_B)$, 则医用直线加速器等中心三维坐标为:

$$O = D_A + \lambda(D_B - D_A), \lambda \in [0, 1] \quad (1)$$

参数 λ 的取值由操作者定义。 λ 默认取值为0.5,即以公垂线中点选取为加速器等中心坐标。

本设计采用在加速器各部件上贴放定位小球,双目相机跟踪定位小球空间位置的方法来追踪加速器运动,软件利用定位小球的坐标拟合加速器运动参数,从而得到加速器各部件机械参数^[11]。具体步骤如下:(1)使用水平注册仪注册水平面,完成相机坐标系到加速器坐标系转换。(2)治疗床上固定一个定位小球,运动治疗床。软件利用最小二乘法拟合治疗床的运动平面圆方程和XYZ 3个轴向位移。(3)机架上固定一个定位小球,运动机架。软件拟合机架运动平面圆方程。(4)注册笔记录当前激光等中心^[12]、光野等中心位置。(5)生成测量报告,得到机械等中心坐标,各等中心之间距离,机架和治疗床的平均运动速度、平均运动误差等。

上文只介绍了最简单的测量步骤,用户还可以测量准直器的运动、CBCT的运动及CBCT面板位置。

2 系统框架

本系统由硬件和软件两部分组成,每个部分又包含不同模块,对应完成不同的功能。下面详细阐述各模块功能及其实现方法。

2.1 硬件

硬件主要由双目相机和配套工具组成,包括水平注册仪、定位小球、注册笔。主要介绍双目相机、注册笔和水平注册仪。

2.1.1 双目相机 双目相机采用加拿大 Northern Digital Incorporated 公司的 Ploaris 系列光学测量相机(图2a)。Ploaris 相机内部发射 850 nm 的红外光,定制的小球会反射红外光在图像中形成很亮的圆斑,利用空间三角关系得到定位小球的空间坐标,从而达到跟踪定位的目的^[13]。

2.1.2 注册笔 注册笔(图2b)可用于记录笔尖点的空间位置,在本系统中笔者使用它来注册激光等中心、光野中心,并辅助判断CBCT面板位置。

2.1.3 水平注册仪 如图2c所示,水平注册仪是本系统的一个重要模块,本研究使用它来确定加速器的水平面。因为双目相机获取的定位小球坐标是在相机坐标系中的坐标,而机械等中心、激光等中心、光野中心都是在加速器坐标系中描述的。笔者在水平注册仪上安装3个定位小球,利用不共线的空间3点确定一个平面的原理,使用水平注册仪来确定加速器的水平面,从而确定相机坐标系到加速器坐标系的齐次变换矩阵。注意,双目相机和水平仪摆放好之后,变换矩阵被唯一确定,后续操作不得移动相机,否则需要重新注册水平面。

从相机坐标系转换到加速器坐标系是一个三维空间到三维空间的变换^[14],一个平移操作和一个旋转操作即可完成(图3)。可以用式(2)表示:

$$\tilde{X}_o = R(\tilde{X} - \tilde{C}) \quad (2)$$

其中, R 表示旋转矩阵, \tilde{X} 表示相机坐标系下空间中任一点坐标, \tilde{C} 表示加速器坐标系原点在相机坐标系中的位置, \tilde{X}_o 表示该点在加速器坐标系中的坐标。用矩阵表示为:

$$X_o = \begin{pmatrix} R & -R\tilde{C} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} X \quad (3)$$

本系统中,将水平注册仪上的3个定位小球坐标

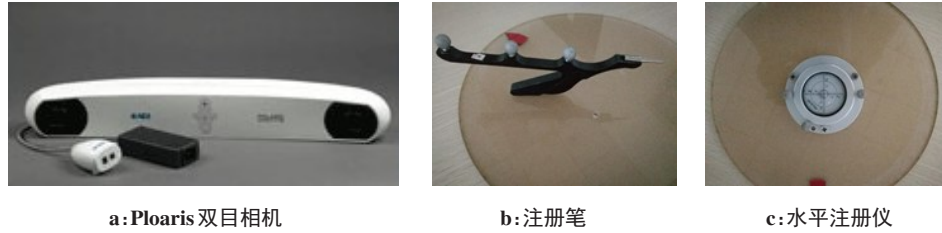


图2 双目系统光学测量套件

Fig.2 Binocular system optical measurement kit

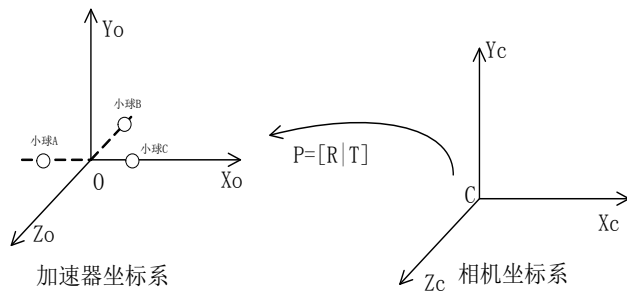


图3 相机坐标系与加速器坐标系转换图

Fig.3 Diagram of conversion from camera coordinate to accelerator coordinate

分别定为 $X_A=(-d_A, 0, 0)$ 、 $X_B=(0, 0, -d_B)$ 、 $X_C=(d_C, 0, 0)$, 点B到直线AC的垂足设为坐标原点,

d_A 、 d_B 、 d_C 为每个点到原点的距离。

2.2 软件

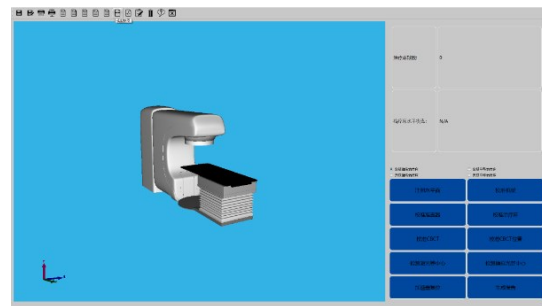
软件设计采用模块化结构化设计思想。该软件可分为相机驱动模块、界面显示模块、用户交互模块、算法逻辑模块。

2.2.1 相机驱动模块 相机作为本系统的视觉传感器,是系统正常工作的基础。本设计将相机SDK进行良好封装,独立于软件逻辑层应用。启动时会检测相机连接(图4a)。如果相机未连接,不可以进行任何测量操作,必须重新连接相机。

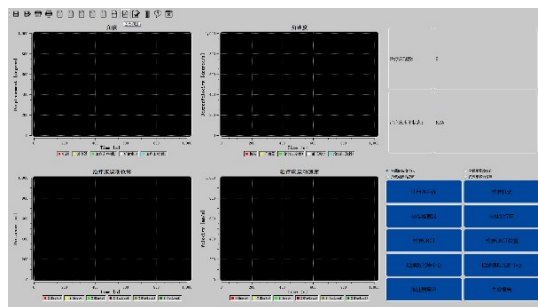
2.2.2 界面显示模块 该软件的显示面板有4个:3D显示面板(图4b)、图表显示面板(图4c)、报告显示面板(图4d)、文字显示面板。



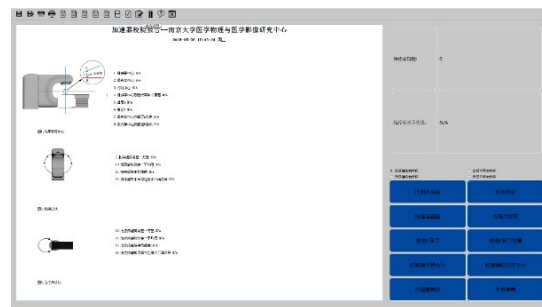
a:启动界面



b:3D显示界面



c:图表显示界面



d:报告显示界面

图4 系统软件界面

Fig.4 Software interfaces

3D显示面板负责加速器三维模型的渲染和显示^[15], 3D模型实时更新加速器的角度、位移信息,图表面板主要用来记录和显示加速器各部件的历史运动参

数,包括角度、角速度、3个轴向位移和速度。同时,用户可以将图表导出以提供分析依据。

报告显示面板=在用户点击“生成报告”按钮后,

会计算报告中的各个指标条目,并显示在报告上,用户可以导出报告。

2.2.3 用户交互模块 交互模块实则为控制面板,用户按步骤对加速器各部件进行测量,最后点击生成报告,在报告显示面板即可看到报告内容。加速器复位可以清空各模块的历史数据,重新测量各部件。

2.2.4 算法逻辑模块 为了便于扩展和修改,本软件为每个部件创建一个Handler类,负责该部件的逻辑业务处理。如校准机架的GantryHandler类,计算机架旋转的空间圆参数,将得到的参数传递给中心逻辑处理模块,中心逻辑处理模块负责将这些信息传递给显示模块。

这些逻辑模块只做对应的逻辑业务处理,独立于图形界面,符合软件模块设计高内聚、低耦合的原则。

3 实验结果

经医院放射科要求,本研究将两个医院分别定义为A医院和B医院。A医院和B医院的直线加速器测试参数表见表1和表2。其中平均误差指软件得到的角度、位移值与加速器系统值之间的误差;垂直度和水平度指的是机架或治疗床旋转平面与注册水平面之间的夹角;重复测量误差指软件在多次旋转或平移到同一位置时的解算值之间的误差。

表1 A医院加速器测试参数表
Tab.1 Measurement parameters of the accelerator in hospital A

参数	测量次数	坐标/mm	平均误差	垂直度或水平度/°	重复误差
机械等中心	10	(-104.66,88.81,-652.25)	-	-	0.70 mm
激光等中心	10	(-104.08,86.05,-652.54)	-	-	2.40 mm
机械等中心与激光等中心距离	10	-	2.83 mm	-	1.63 mm
机架旋转角度	20	-	0.80°	92.81	0.34°
治疗床旋转角度	20	-	0.18°	1.29	0.17°
治疗床Y轴位移	20	-	0.54 mm	-	0.28 mm
治疗床Z轴位移	20	-	0.93 mm	-	0.50 mm
治疗床X轴位移	20	-	0.89 mm	-	0.27 mm

表2 B医院加速器测试参数表
Tab.2 Measurement parameters of the accelerator in hospital B

参数	测量次数	坐标/mm	平均误差	垂直度或水平度/°	重复误差
机械等中心	10	(-4.25,-28.78,-552.74)	-	-	0.35 mm
激光等中心	10	(-4.67,-27.67,-551.89)	-	-	0.42 mm
机械等中心与激光等中心距离	10	-	1.42 mm	-	0.23 mm
机架旋转角度	20	-	0.33°	88.92	0.17°
治疗床旋转角度	20	-	0.27°	1.17	0.09°
治疗床Y轴位移	20	-	0.45 mm	-	0.24 mm
治疗床Z轴位移	20	-	0.63 mm	-	0.27 mm
治疗床X轴位移	20	-	0.39 mm	-	0.12 mm

3.1 A医院实验结果

对A医院服役15年的ELEKTA加速器进行测量,机架在-60°~60°范围内运动,治疗床在-90°~90°范围内旋转,治疗床3个轴向在满量程范围

平移。软件得到数据如表1所示。

3.2 B医院实验结果

对服役5年的Varian RapidArc加速器进行测量,测量了机架和治疗床在-90°~90°范围内的运动,以及治

疗床在3个轴向的满量程平移,将软件解算的数据整理得到等中心坐标及机械运动误差如表2所示。

3.3 实验结果讨论

分别对两台不同使用时长的医用直线加速器进行测量分析实验,实验发现使用时长较长的A医院加速器机械运动误差较大^[16]。具体体现在机架和治疗床的运动误差的均值和重复测量误差较大。服役年限较短的B医院加速器有较低的误差均值和较好的测量重复性。

4 结 语

本研究完成了医用直线加速器机械参数测量分析系统的设计,实现了加速器机架、准直器、治疗床和CBCT的机械性能检测^[17],包括旋转角度、旋转角速度、平移距离和速度,并计算了加速器的机械等中心及其与激光等中心、光野等中心之间的误差。本系统提供详细的检测报告,方便对每天的检查工作归档。

本系统极大地方便了对直线加速器的日常晨检工作,将复杂的加速器质控工作数字化、自动化,为技术员和物理师维护加速器提供指导意义^[18-20]。

【参考文献】

- [1] 胡杰,陶建民,孙光荣.医用直线加速器等中心的质量控制和质量保证[J].中国医疗器械杂志,2007,31(3): 213-215.
HU J, TAO J M, SUN G R. Quality control and quality assurance for the isocentre of the medical linear accelerator[J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2007, 31(3): 213-215.
- [2] 林艳萍,张文强,王成焱.手术导航系统中器械的可视化与实时跟踪[J].生物医学工程学杂志,2006,23(5): 995-998.
LIN Y P, ZHANG W Q, WANG C T. Visualization and real-time tracking of the instruments in surgical navigation system[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2006, 23(5): 995-998.
- [3] 高枫.医用电子直线加速器的性能检测与质量保证[J].现代医药卫生,2006,22(6): 797-798.
GAO F. Examining the performance and quality assurance of linear accelerator[J]. Modern Medicine & Health, 2006, 22(6): 797-798.
- [4] 许峰,陈薇薇.医用直线加速器技术简述[J].中国医疗设备,2011,26(4): 85-86.
XU F, CHEN W W. The brief description of medical linear accelerator technology[J]. China Medical Devices, 2011, 26(4): 85-86.
- [5] JUNKER G. Pro OGRE 3D Programming[M]. Berkeley: Apress, 2006.
- [6] Kitware, Inc. The VTK usersguide-11th edition[M]. Kitware, Inc., 2010.
- [7] WILES A D, THOMPSON D G, FRANTZ D D. Accuracy assessment and interpretation for optical tracking systems[C]//Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering Visualization. SPIE, 2004, 5367: 421-432.
- [8] REINSTEIN L E, WELSH K. Quality assurance system for a medical linear accelerator: US6626569B2[P]. 2003-09-30.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.医用电子加速器性能和试验方法:GB15213-2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Medical electron accelerators-functional performance characteristics and test methods: GB15213-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.医用电子加速器验收试验和周期检验规程:GB/T 19046-2013[S].北京:中国标准出版社,2014.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Medical electron accelerators-acceptance and periodic tests: GB/T 19046-2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [11] 刘鹏,于维海,肖开敏.医用直线加速器的质量保证和质量控制[J].中国医疗设备,2010,25(9): 97-98.
LIU P, YU W H, XIAO K M. Quality assurance and quality control of medical linear accelerator[J]. China Medical Devices, 2010, 25(9): 97-98.
- [12] 魏绪国,王贵富,李修磊,等.新型放疗用激光灯安装校准工具介绍[J].中国医疗设备,2011,26(6): 101.
WEI X G, WANG G F, LI X L, et al. Introduction of an installation and calibration device for radiotherapy laser lamp [J]. China Medical Devices, 2011, 26(6): 101.
- [13] 王杰,张玉海,王康,等.医用直线加速器的设备维护及治疗安全[J].中国医疗设备,2012,26(6): 20-22.
WANG J, ZHANG Y H, WANG K, et al. Maintenance and treatment safety of medical linear accelerator[J]. China Medical Devices, 2012, 26(6): 20-22.
- [14] 王振军,王燕,刘志成.应用根本原因分析法控制直线加速器医疗质量的尝试[J].中国医疗设备,2011,26(10): 100-103.
WANG Z J, WANG Y, LIU Z C. Tentative research on quality control of medical linear accelerator using root cause analysis [J]. China Medical Devices, 2011, 26(10): 100-103.
- [15] 郑富强,王捷.医用直线加速器概况与进展[J].医疗设备信息,2005,20(4): 30-31.
ZHENG F Q, WANG J. Summary of medical linear accelerator and its progress[J]. Information of Medical Equipment, 2005, 20(4): 30-31.
- [16] HANSON W F, ANDERSON L L, LING C C, et al. Physical aspects of quality assurance in radiation therapy: AAPM report[R]. New York: American Institute of Physics, 1994.
- [17] 张晓军,吴文魁.放射治疗中的质量保证与质量控制[J].中国医疗设备,2009,24(11): 83-85.
ZHANG X J, WU W K. Quality assurance and quality control in radiotherapy[J]. China Medical Devices, 2009, 24(11): 83-85.
- [18] 周怀恒,陈雄,杨康基.医用直线加速器的基本结构和日常保养[J].医疗装备,2016,29(3): 80-81.
ZHOU H H, CHEN X, YANG K J. Basic structure and daily maintenance of medical linear accelerator [J]. Chinese Journal of Medical Device, 2016, 29(3): 80-81.
- [19] 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.
- [20] International Organization for Standardization. Quality management and quality assurance standards: part I, guidelines for selection and use [S]. Geneva: ISO, 1994.

(编辑:薛泽玲)