

辐照仿真人体模型三维建模及装配原理与方法

岳玉亮,樊庆文,王德麾,李焕
四川大学制造科学与工程学院,四川 成都 610065

【摘要】辐照仿真人体模型是放射治疗和空间辐照研究的重要装备,实现其数字化建模,提高制造精度和仿真程度是仿真人研究的重点和难点之一。以“成都剂量体模”(CDP)的序列CT切片集为源数据,运用MATLAB软件,通过图像预处理、图像提取等数字图像处理技术获得人体器官的点云数据;在CATIA软件Digitized Shape Editor模块中处理点云数据得到肝脏、肺、肾和胃等主要器官和组织的三维实体模型;以人体骨骼为基础建立人体器官装配坐标系;根据器官的“局部坐标系原点”、“标志点”和“特征点”与人体骨骼的相对位置,确定器官在人体器官装配坐标系中的坐标;利用Pro/E软件完成人体主要器官(异形体零件)装配。实验证明利用该方法建立的三维辐照仿真人数字化模型与CDP具有较高的等效程度,为人体参数化设计奠定了理论基础,能够满足辐照仿真人数字化生产的要求。

【关键词】辐照仿真人体模型;三维建模;人体器官建模;异形体零件;MATLAB;CATIA;Pro/E

【中图分类号】R318

【文献标识码】A

【文章编号】1005-202X(2016)05-0463-05

Three-dimensional modeling of radiological anthropomorphic phantom

YUE Yu-liang, FAN Qing-wen, WANG De-hui, LI Huan

School of Manufacturing Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China

Abstract: Radiological anthropomorphic phantom is a vital equipment for radiotherapy and space radiation research. One of the most important and difficult points of the research on building digital model for anthropomorphic phantom is to , strengthen the accuracy of manufacturing and improve the simulation degree. Taking the CT sequence slice sets of Chengdu dosimetric phantom (CDP) as the basic data, MATLAB software was applied. The point cloud data of human organs were obtained by using the digital image processing techniques, including image preprocessing and image extraction; the obtained point cloud data were processed in the Digitized Shape Editor of CATIA software to establish the three-dimensional solid models of main organs and tissues, such as liver, lungs, kidney and stomach. An assembly coordinate system of human organs based on human skeletons was established in the paper. The local coordinate system origins, marker points and feature points of organs were relative to some positions in human skeletons, which were used to determine the organs' coordinates in the assembly coordinate system. And the Pro/E software was applied to finish the assembly of main human organs (out-of-shape components). The experiment proves the three-dimensional digital model of radiological anthropomorphic phantom established in this way has high equivalent degree with CDP, laying the theoretical foundation for the parametric design of human body and meeting the demand of the digital production of radiological anthropomorphic phantom.

Key words: Radiological Anthropomorphic Phantom; three-dimensional modeling; human organs model; out-of-shape component; MATLAB; CATIA; Pro/E

前言

【收稿日期】2016-03-08

【基金项目】航天医学基础与应用国家重点实验室研究基金(SMFA12B03);载人航天领域预先研究项目(040401)

【作者简介】岳玉亮(1922-),男,硕士研究生,研究方向:人机工程,机电工程,E-mail:471297331@qq.com;樊庆文(1966-),研究员(高教),工学博士,硕士生导师,研究方向:人机工程,机电工程,E-mail:843398293@qq.com。

【通信作者】王德麾,E-mail:wangdehui.scu@gmail.com。

辐照仿真人体模型(Radiological Anthropomorphic Phantom)是按人体参数设计,用与人体组织具有相同或相近散射和吸收系数的材料制成,具有骨骼、肌肉及脏器的人体模型,具有外部形态相似性、组织材料辐射等效性、内部结构仿真性、辐射剂量可测试性四大特点,在辐射防护、诊断、治疗、教学和辐射标准研究领域,辐照仿真人体模型作为“人体替身”得到了越来越广泛的应用^[1]。早在上世纪中期,欧美国家就开始研发辐照仿真体模,其中Rossi和

Failla 研制的聚乙烯仿真辐照体模和 Alderson 实验室研制的 RANDO 仿真辐照体模较为著名^[2-6]。1986 年,四川大学林大全教授成功制作了符合中国人体特征的中国首具男性辐照仿真体模,被国际辐射单位与测量委员会(International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU)命名为成都剂量体模(Chengdu Dosimetric Phantom, CDP)^[7],但其加工制作等流程全由手工完成,生产效率低,生产周期长,成本高,难以满足市场需求。本研究以成都剂量体模的序列 CT 切片集为源数据,利用图像预处理、图像提取等数字图像技术获得人体器官的三维实体模型,利用解剖学原理以左右髋骨中心的连接线和耻骨联合与尾椎的连线的相交点作为坐标原点,建立人体器官装配坐标系^[8],在 Pro/E 环境下完成辐照仿真人体模型的三维重建和装配工作。提出的辐照仿真人体模型三维建模及装配原理与方法为实现辐照仿真人体模型的计算机辅助设计和制造(CAD/CAM)、提高生产效率、降低生产成本以及实现辐射仿真人体模型的参数化设计打下了理论基础,具有重要的理论意义和实践价值。

1 人体器官和组织的三维重建

CDP 是按照中国成年男子 50 百分位参数制作的,分为头、胸、腹三部分,包括左右大脑半球、心、肺、肝、脾、胰、胃等 20 余种器官和组织,在医用辐射能量范围(60 keV~20 MeV),等效性误差小于 3%^[9]。将 CDP(如图 1 所示)在德国西门子(SOMATOM EMOTION)16 螺旋 CT 扫描机进行 360°全身扫描,设定扫描厚度为 0.7 mm,共得到 3235 张切片。图 2 为包含肝脏的切片(像素 3072×2048,位数 48 位)。

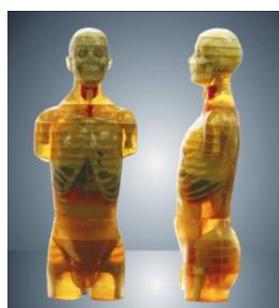


图1 成都剂量体模
Fig.1 Chengdu dose phantom

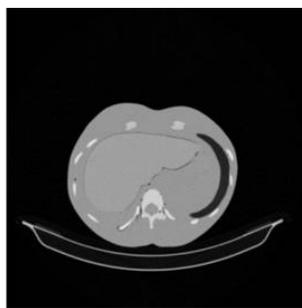


图2 包含肝脏的 CT 图片
Fig.2 CT image containing liver

图 2 是包含肝脏区域的切片,是灰度图像。首先利用 MATALAB 软件中“imadjust()”、“stretchlim()”等函数对图像进行图像拉伸和调整对比度等预处理,确定肝脏区域的灰度阈值,利用“medfilt2()”、

“rgb2gray()”函数提取肝脏的目标图像(二值图像),如图 3 所示。用同样的方法可以得到所有肝脏切片的目标图像。利用“cat()”函数将所有肝脏的切片数据构造为一个三维矩阵 D , $D = [x \times y \times m]$ 。为减少计算量,可以对三维矩阵 D 进行优化处理。利用“isosurface()”和“patch()”函数可以得到肝脏的点云数据^[10-11],如图 4 所示。将肝脏的点云数据导入 CA-TIA 软件的“Digitized Shape Editor”模块,进行去除噪音、数据插补、数据平滑、网格化、曲面拟合处理,得到肝脏的三维实体模型,如图 5 所示。用同样的方法可以得到胃、肺(左)、肺(右)、胰腺、胃、心脏、肠、胸骨、趾骨联合等器官和组织的三维实体模型,如图 6~13 所示。得到人体器官的三维实体模型后,可以确定其质心位置(坐标值)、质量、体积等几何和物理参数。

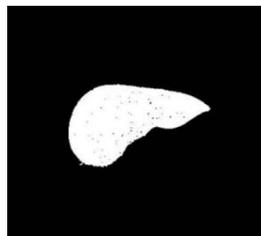


图3 肝脏目标区域
Fig.3 Target image of liver

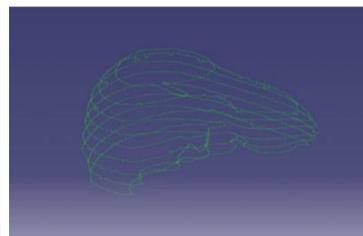


图4 肝脏点云模型
Fig.4 Point cloud data of liver

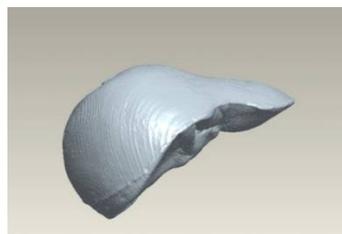


图5 肝脏的实体模型
Fig.5 Solid model of liver

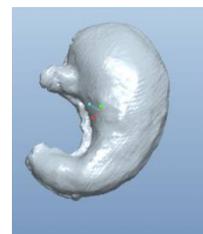


图6 胃
Fig.6 Stomach

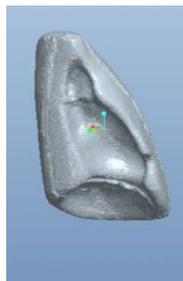


图7 左肺
Fig.7 Left lung

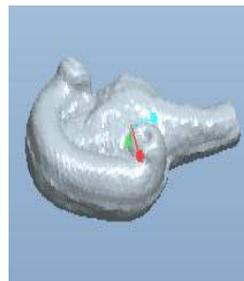


图8 胰
Fig.8 Pancreas

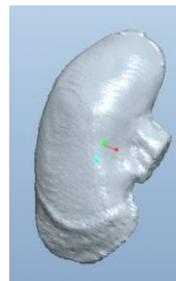


图9 左肾
Fig.9 Left kidney

2 人体器官和组织的三维装配原理

通过解剖学知识可知,人体器官的位置关系是



图10 心脏
Fig.10 Heart



图11 肠
Fig.11 Intestines

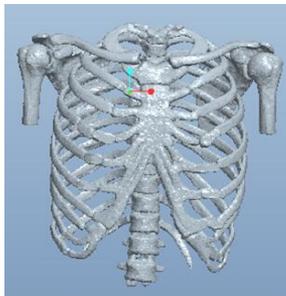


图12 胸骨
Fig.12 Sternum

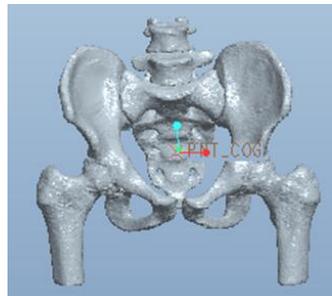


图13 耻骨联合
Fig.13 Symphysis

相对准确的,而且绝大多数器官的相对位置都与人体骨架具有相关性,因此选择骨骼作为人体三维重建坐标系的基础。医学上人体有3个相互垂直的坐标轴,分别是垂直轴、冠状轴和矢状轴。通过这3个垂直轴,又能产生3个相互垂直的平面,分别是矢状面、水平面和冠状面^[12]。为了确定人体器官在人体骨架的相对位置,定义人体左右髋骨中心的连接线和耻骨联合与尾椎连线的相交点作为坐标原点,x轴、y轴和z轴分别是冠状轴、矢状轴、垂直轴,建立如图14所示的人体三维重建坐标系。

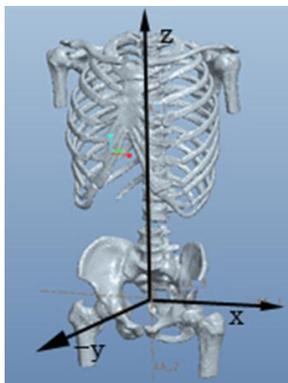


图14 人体三维重建坐标系
Fig.14 Three-dimensional reconstructed coordinate system of human body

在人体三维重建坐标系中,确定人体器官和组织的具体位置需要限制其6个自由度。以肝脏为例,

肝的大部分位于右季肋区,小部分位于左季肋区,左右肋弓间的区域与腹前壁贴合。肝隔面借隔与右肋隔隐窝、右肺底和心隔面相邻,后缘近左纵沟处与食管相接触。肝在正中面(XOZ平面)的投影可用三个点作为标志(标志点):第1个标志点B11为右锁骨中线与第5肋相交处,第2个标志点B12位于右腋中线与第10肋下1.5 cm的相交处,第3个标志点B13为左第6肋软骨距前正中线左侧5 cm处^[13]。肝脏右后叶下段顶点(图15中T11)为肝脏在垂直轴方向的最低点,通过B12和T11作冠状轴的平行线,通过B11和B13作垂直轴的平行线,得到肝脏的上、下、左、右边界。在此基础上,根据肝脏的最大厚度(y方向最大尺寸)可以绘制肝脏的包络六面体,如图15所示。包络六面体的中心O1定义为肝脏的局部坐标系原点。根据标志点与人体骨架的位置关系可以确定局部坐标系原点O1在人体三维重建坐标系中的坐标值(-45,-40,248),局部坐标系原点O1约束了肝脏的3个平移自由度。肝脏右后叶下段顶点在右锁骨左端点与第10肋相交处的标志点T11,定义为特征点1,在人体三维重建坐标系中的坐标值为(-95,-31,220)。同样,肝脏左外叶上段顶点(图15中的T12)在左锁骨第一个四分点与第7肋相交处,将T12定义为特征点2,坐标值为(85,-40,248)。特征点T11、T12约束了肝脏的另外三个转动自由度,从而确定肝脏在人体三维重建坐标系中的具体位置。根据同样的原理,可以得到其他器官的局部坐标系原点和特征点在人体三维重建坐标系中的坐标值,如表1所示。

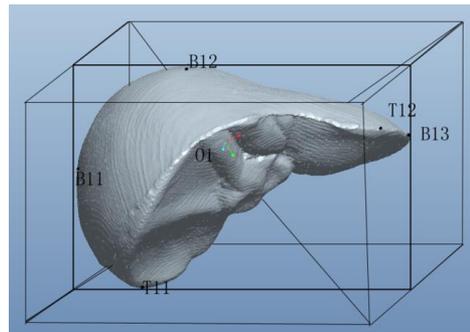


图15 肝脏的包络六面体
Fig.15 Envelope hexahedron of liver

3 辐照仿真体模的三维重建

在Pro/E Wildfire 5.0完成辐照仿真体模各器官和组织的装配工作。先添加耻骨联合到新建组件中,找出左右髋骨中心的连接线和耻骨联合与尾椎连线的相交点,作为人体三维重建坐标系的原点,建立人体三维

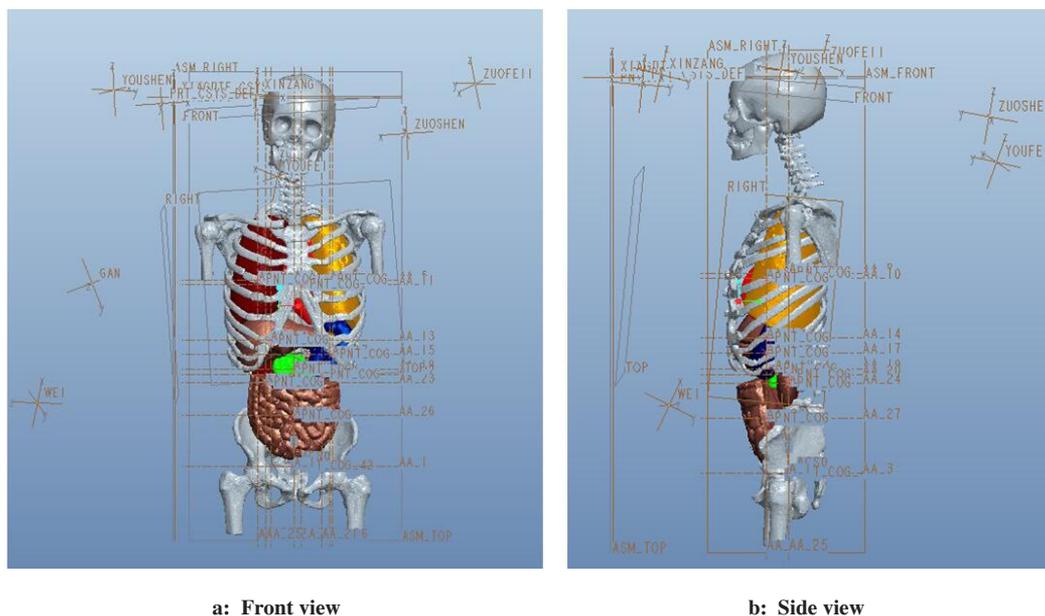
表1 各器官的几何参数及其局部坐标系原点、特征点坐标

Tab.1 Geometrical parameters of organs and coordinates of their local coordinate system origins and feature points

Organs	Width (mm)	Thickness (mm)	Length (mm)	Local coordinate system origin O_i			Feature point T_{i1}			Feature point T_{i2}		
				x	y	z	x	y	z	x	y	z
				(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Stomach	92	51	135	75	-40	220	89	-41	219	65	-40	281
Liver	93	138	127	-45	-40	248	85	-40	248	-95	-31	220
Pancreas	51	22	263	0	-25	190	55	-26	171	0	-13	190
Left lung	104	146	181	70	0	367	70	0	457	18	0	364
Right lung	101	151	182	-70	0	367	-70	0	457	-18	0	365
Heart	67	66	103	20	-40	357	54	-40	357	20	-40	306
Left kidney	62	42	109	55	0	180	55	0	130	86	0	180
Right kidney	61	41	109	-55	0	165	-55	0	116	-86	0	165

重建坐标系;将胸骨添加到组件中,使脊椎与尾椎对齐,构建人体的基本骨架。仍以肝脏为例,将肝脏的三维实体模型添加到组件中,利用其局部坐标系原点 O_1 、特

征点 T_{11} 、 T_{12} 的坐标值,确定肝脏的位置。依次添加左肺、右肺、心脏、胰腺、胃、左肾、右肾、肠,如图16所示。图17为辐照仿真体模的爆炸图。



a: Front view

b: Side view

图16 装配结果(左为正视图,右为侧视图)

Fig.16 Assembly results

对装配后的辐照仿真人体模型进行全局干涉检测,无任何干涉零件,与CDP实体比较,具有较高的等效性。

4 结论

以CDP的CT切片数据为基础,利用数字图像技术重建人体器官的三维实体模型。建立以左右髋骨中心的连接线和耻骨联合与尾椎连线的相交点为坐标原点,以冠状轴往右、矢状轴往后、垂直轴往上分

别为x轴、y轴和z轴正方向的人体三维重建坐标系。根据人体解剖学知识,“局部坐标系原点”、“标志点”和“特征点”的位置,确定器官在人体三维重建坐标系中的位置。运用Pro/E Wildfire 5.0软件实现辐照仿真人体模型各器官的装配。装配效果与CDP具有高度的等效性。辐照仿真体模三维重建得到的器官模型可以直接传输到数控铣床、快速原型制造机等CAM设备进行计算机辅助制造,从根本上解决了生产效率低下问题。提出的辐照仿真人体模型三

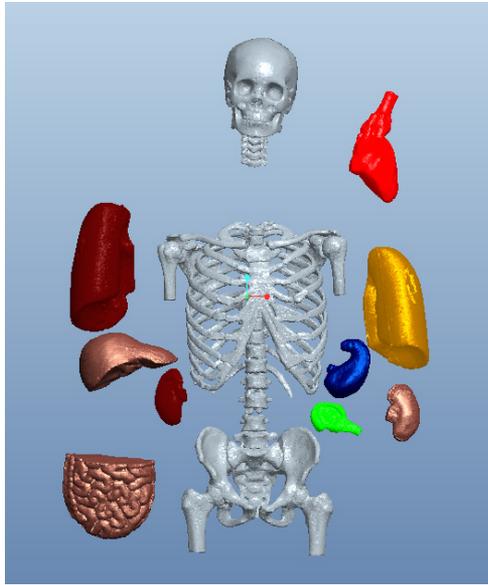


图17 爆炸图

Fig.17 Exploded view

维建模及装配原理与方法为实现辐射仿真人体模型参数化设计工作奠定基础,在航天医学实验、解剖教学、手术仿真以及运动医学等领域具有重要的理论意义和实践价值。

【参考文献】

- [1] 林大全,王远萍,张春德. 仿真辐照人体模型的研究与医学应用[J]. 医疗设备, 2003, 16(9): 38-43.
LIN D Q, WANG Y P, ZHANG C D. Research and medical applications of radiological anthropomorphic phantom [J]. China Medical Device, 2003, 16 (9): 38-43.
- [2] FRAME P W. A history of radiation detection instrumentation [J]. Health Phys, 2005, 88(6): 613-637.
- [3] JONES D E A, RAINE H C. Letter to the editor [J]. Br J Radiol, 1949, 22: 549-550.
- [4] WHITE D R. Tissue substitutes in experimental radiation physics [J]. Med Phys, 1978, 5: 467-479.
- [5] STACEY A J, BEVAN A R, DICKENS C W. A new phantom material employing depolymerised natural rubber [J]. Br J Radiol, 1961, 34: 510-515.
- [6] ALDERSON S, LANZL L H, RELLINS M. An instrumented phantom system for analog computation of treatment plans [J]. Am J Roentgenol Radium Ther Nucl Med, 1962, 87: 185-195.
- [7] 林大全,张纪淮,王星泉,等. 中国模拟人——非均匀组织等效辐照体模研制[J]. 医学物理, 1985, 2(3): 23-26.
LIN D Q, ZHANG J H, WANG X Q, et al. Chinese Sims-non-uniform irradiation tissue equivalent phantom development [J]. Medical Physics, 1985, 2(3): 23-26.
- [8] 钟世镇. 解剖学与临床相结合科教新动向[J]. 解剖与临床, 2002, 7(1): 3-4.
ZHONG S Z. Combining new trends of anatomy and clinical science [J]. Journal of Anatomy and Clinics, 2002, 7(1): 3-4.
- [9] 蔡敏芹,林大全,郭祚达,等. 中国人辐照仿真人体模型及人体器官数学模型[J]. 中国医学影像技术, 2005, 21(9): 1464-1466.
CAI M Q, LIN D Q, GUO Z D, et al. China radiation anthropomorphic phantom and mathematical models of human body organs [J]. Chinese Journal of Medical Imaging Technology, 2005, 21(9): 1464-1466.
- [10] (美)冈萨雷斯. 数字图像处理(MATLAB版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 132-146.
Gonzalez R C. Digital image processing using MATLAB [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 132-146.
- [11] 贺兴华. MATLAB7. X图像处理[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006, 11: 96-110.
HE X H. MATLAB7. X image processing [M]. Beijing: Post & Telecom Press, 2006, 11: 96-110.
- [12] 柏树令. 系统解剖学-[M]. 修订本. 北京: 人民卫生出版社, 2010: 4-5.
BAI S L. Systematic Anatomy [M]. revised Beijing: People's Health Publishing House, 2010: 4-5.
- [13] 王经,张绍祥. 局部解剖学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2010: 156-163.
WANG J, ZHANG S X. Local anatomy [M]. Beijing: People's Health Publishing House, 2010: 156-163.

(编辑: 薛泽玲)