

## 辐射等效假人数字化建模方法

赵志键,樊庆文,王德麾,李海博,裴宏亮  
四川大学制造科学与工程学院,四川 成都 610065

**【摘要】**辐射等效假人主要依靠手工制作,生产周期长、加工精度低,无法满足参数化设计的要求,而通过建立辐射等效假人数字化模型可以有效解决这些问题。以“成都剂量体模”CT扫描切片集为基础,建立辐射等效假人的扫描坐标系( $o_s-x_s, y_s, z_s$ ),利用Mimics软件重建人体主要器官和组织的三维模型;以器官的几何中心点为坐标系原点,根据器官的“特征点”建立器官局部坐标系( $o_j-x_j, y_j, z_j$ ),利用器官“特征点”在扫描坐标系和局部坐标系的坐标值,计算两个坐标系的变换矩阵;根据人体解剖学方位建立辐射等效假人的人体坐标系( $o_r-x_r, y_r, z_r$ ),利用“控制点”在扫描坐标系与人体坐标系中的坐标值计算扫描坐标系与人体坐标系的变换矩阵,进而推导出器官局部坐标系与人体坐标系的变换矩阵。至此可以得到不同器官在人体坐标系中的几何参数,包括器官几何中心点坐标值以及局部坐标系与人体坐标系的旋转角。根据不同器官和组织的三维模型及其几何参数在pro/E软件中建立辐射等效假人数字化模型。建立辐射等效假人数字化模型可以实现辐射等效假人的数字化设计和制造,提高加工精度,缩短生产周期,并为辐射仿真假人的参数化设计打下基础,具有重要的理论意义和实用价值。

**【关键词】**辐射等效假人;数字化建模;坐标系变换;三维模型;pro/E

**【中图分类号】**R32;TB1

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2018)03-0275-06

## Digital modeling method for establishing a radiation equivalent manikin

ZHAO Zhijian, FAN Qingwen, WANG Dehui, LI Haibo, PEI Hongliang

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

**Abstract:** As a result of manual mode, the manufacture of radiation equivalent manikin is time-consuming, precision-poor and unable to meet the requirements of parametric design. Therefore, we establish a digital model of radiation equivalent manikin to solve the above-mentioned problems. Firstly, the computed tomography sequence slice sets of Chengdu Dosimetric Phantom were taken as the basic data to establish a scanning coordinate system ( $o_s-x_s, y_s, z_s$ ) of radiation equivalent manikin, and Mimics software was adopted to reestablish the three-dimensional solid model of major organs and tissues. And then, based on the characteristic points of organs, we took the geometric center of organs as the origin of coordinate system to establish the local coordinate system ( $o_j-x_j, y_j, z_j$ ) of organs, and calculate the transition matrix between scanning coordinate system and local coordinate system. Subsequently, according to human coordinate system ( $o_r-x_r, y_r, z_r$ ) of radiation equivalent manikin established by anatomical position, we calculated the transition matrix between scanning coordinate system and human coordinate system, furthermore obtains the transition matrix between the local coordinate system of organs and human coordinate system. So far we have obtained some geometrical parameters of organs, including the coordinate value of geometric center point and the rotation angle between the local coordinate system of organs and human coordinate system. Finally, the digital model of radiation equivalent manikin was established in pro/E software according to the three-dimensional models of tissues and organs and their geometric parameters. In conclusion, the digital modeling method of radiation equivalent manikin has important theoretical significance and practical value for it can achieve the digital design and manufacture of radiation equivalent manikin, improving the processing accuracy, shortening the production cycle and laying solid theoretical foundation for the parametric design of radiation equivalent manikin.

**Keywords:** radiation equivalent manikin; digitized modeling; coordinate transformation; three-dimensional model; pro/E

**【收稿日期】**2017-11-17

**【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】**赵志键,硕士研究生,研究方向:人机工程、机械工程,E-mail: 1179708599@qq.com;樊庆文,研究员(高教),博士,硕士生导师,研究方向:人机工程、机械电子工程,E-mail: 843398293@qq.com

**【通信作者】**王德麾,讲师,博士,研究方向:计算机图形学、机械电子工程,E-mail: wangdehui.scu@gmail.com

## 前言

辐射等效假人模型是在辐射环境下与真实人体等效并作为“人体替身”在辐射条件下进行危险实验的假人模型<sup>[1]</sup>,在放射治疗、辐射安全评价等领域具有广泛的应用。早在上世纪中期,欧美国家就开始研发辐射仿真体模,用于航天员辐射安全评价的研究<sup>[2-6]</sup>。1986年,四川大学林大全等<sup>[7]</sup>制作了符合中国人体特征的首具男性辐照仿真体模,被国际辐射单位与测量委员会命名为“成都剂量体模”。长期以来,“成都剂量体模”依然依靠手工制作,生产周期长、成本高、型号单一,无法满足不同年龄、性别、身高和体质量的参数化市场要求,要解决上述问题必须建立辐射假人数字化模型。上世纪90年代美国最早提出了“可视人计划”,开始了数字化人体的研究,我国在2001年也启动了“数字化虚拟中国人”构建项目<sup>[8]</sup>。目前对数字化人体的研究主要应用于解剖学与医学临床应用、飞行员训练模拟、服装工业以及人体工程学评估等领域,但辐射等效人体模型的数字化仍处于起步阶段<sup>[9-13]</sup>。

以“成都剂量体模”CT扫描切片集为源数据,重建人体器官和组织的三维模型,建立扫描坐标系和器官局部坐标系并确定器官几何中心点等“特征点”在两坐标系的相对位置关系。根据人体解剖学方位建立人体坐标系,确定器官在人体坐标系中的位置关系,包括器官几何中心点在人体坐标系中的坐标值以及器官局部坐标系与人体坐标系间的旋转角,最后在pro/E软件环境中装配辐射等效假人数字化模型。建立辐射等效假人数字化模型是实现辐射等效假人数字化设计和制造的基础,可以提高加工精度,缩短生产周期,并为辐射仿真假人的参数化设计打下基础,具有重要的理论意义和实用价值。

## 1 辐射等效假人器官和组织三维重建

## 1.1 定义扫描坐标系

利用德国西门子16螺旋CT扫描机对“成都剂量体模”进行全身扫描,得到502张CT扫描切片,每张切片的像素大小为 $512 \times 512$ ,切片之间的层距为2 mm,图1是一张包含肝脏切片的CT扫描切片。将“成都剂量体模”的CT切片集导入Mimics软件重建人体器官和组织三维模型,图2是利用Mimics软件重建的肝脏三维模型。重建的器官和组织的三维模型以ASCII格式的STL文件存储<sup>[14]</sup>,这种格式的STL文件包含每个三角面片的顶点坐标信息。由于“成都剂量体模”的CT扫描一次性完成,重建的所有器官和组织三维模型三角面片的顶点坐标信息均在同一个坐标系下,我们定义该坐标系为扫描坐标系( $o_s - x_s, y_s, z_s$ )。



图1 包含肝脏的体模CT切片

Fig.1 Phantom computed tomography section containing liver

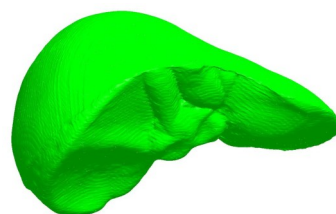


图2 肝脏三维模型

Fig.2 Three-dimensional model of liver

## 1.2 计算器官几何中心点等“特征点”的坐标值

人体器官模型是不规则的异形体结构,为了方便直观地描述器官在人体的空间位置,根据器官的结构特点在器官上定义3个“特征点”包括:器官的几何中心点O,器官上距离O点的最远点M,过O点并垂直于直线OM的平面 $\varepsilon$ 与肝脏相交外轮廓线上距离O点的最近点N。以肝脏模型(共由84 420个小三角面片组成)为例,说明器官模型“特征点”在扫描坐标系中坐标值的计算方法。首先将肝脏模型上所有三角片顶点在扫描坐标系中的坐标取平均得到的坐标点定义为肝脏几何中心点O,利用Python计算出肝脏模型几何中心点在扫描坐标系中的坐标值为(171.713, 258.479, -979.888)。通过循环计算,得到与O点距离最长的三角片顶点,即M点,M坐标为(278.3816, 298.6242, -989.5501)。作过点O并垂直于直线OM的平面 $\varepsilon$ ,在该平面与肝脏相交轮廓线上计算距离O点的最近点N,N点的坐标为(161.8189, 280.5258, -997.5163)。肝脏几何中心点等“特征点”的位置如图3所示。

## 2 建立器官模型局部坐标系

为了直观描述器官的结构特点及其在人体的空间姿态,需要建立器官局部坐标系。以肝脏为例,令器官中心点O为局部坐标系原点 $o_j$ ,连线OM为 $x_j$ 轴,连线ON为 $y_j$ 轴,并根据右手坐标系原理建立肝脏局部坐标系( $o_j - x_j, y_j, z_j$ ),如图3所示。在肝脏局

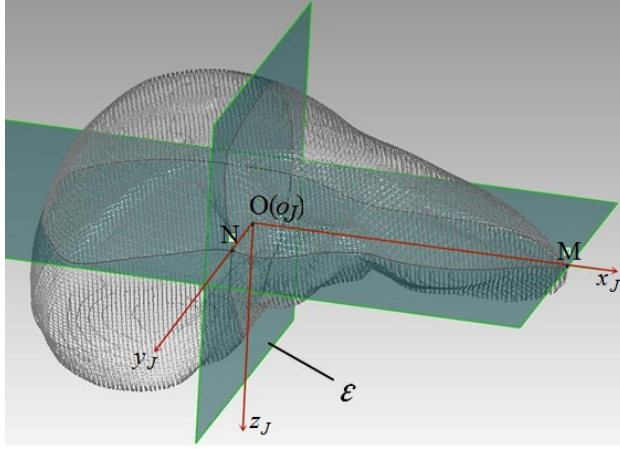


图3 肝脏局部坐标系

Fig.3 Local coordinate system of liver

部坐标系中“特征点”O、M、N坐标分别为(0, 0, 0)、(114.382, 0, 0)、(0, 29.9, 0)。

设肝脏上任意一点  $p$  在肝脏局部坐标系  $(o_j - x_j, y_j, z_j)$  中的坐标为  $p(x_j, y_j, z_j)$ , 在扫描坐标系  $(o_s - x_s, y_s, z_s)$  中的坐标为  $p(x_s, y_s, z_s)$ ,  $p$  点在两坐标系之间的转换关系可用式(1)表示:

$$\begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{js} & 0^T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E & T_{js} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $0^T$  为 0 矩阵,  $0^T = [0 \ 0 \ 0]^T$ ,  $E$  为  $3 \times 3$  的单位矩阵,  $R_{js}$  为旋转矩阵:

$$R_{js} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{js} & \sin \alpha_{js} \\ 0 & -\sin \alpha_{js} & \cos \alpha_{js} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta_{js} & 0 & -\sin \beta_{js} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta_{js} & 0 & \cos \beta_{js} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma_{js} & \sin \gamma_{js} & 0 \\ -\sin \gamma_{js} & \cos \gamma_{js} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

旋转矩阵  $R_{js}$  中,  $\alpha_{js}$ 、 $\beta_{js}$ 、 $\gamma_{js}$  分别为两坐标系间 3 个方向的旋转角度, 是 3 个独立参数; 旋转矩阵可以整理成一个  $3 \times 3$  的单位正交矩阵。

$T_{js}$  为位移向量, 表示两个坐标系原点的相对位置, 是一个  $3 \times 1$  的向量, 用式(3)表示:

$$T_{js} = [t_x \ t_y \ t_z]^T \quad (3)$$

肝脏几何中心点(局部坐标系原点)在扫描坐标系中的坐标值为 (171.713, 258.479, -979.888), 即  $T_{js} = [-171.713 \ -258.479 \ 979.888]^T$ 。

将“特征点”O、M、N在扫描坐标系  $(o_s - x_s, y_s, z_s)$  与肝脏局部坐标系  $(o_j - x_j, y_j, z_j)$  中的坐标值代入式(1), 计算得到旋转矩阵  $R_{js}$ :

$$R_{js} = \begin{bmatrix} 0.9326 & 0.3510 & -0.0840 \\ -0.3310 & 0.7370 & -0.5894 \\ -0.1446 & 0.5776 & 0.8034 \end{bmatrix} \quad (4)$$

### 3 建立辐射等效假人数字化模型

#### 3.1 建立人体坐标系

为了方便准确地描述人体各个结构的位置关系和人体器官的形态, 以常规解剖学姿势为标准, 人为地规定了相互垂直的 3 种轴, 即垂直轴、冠状轴和矢状轴<sup>[15-16]</sup>。根据上述解剖学方位, 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系原点  $o_r$ ,  $x_r$  轴、 $y_r$  轴和  $z_r$  轴分别是冠状轴、矢状轴、垂直轴, 建立如图 4 所示的数字化辐射等效假人的人体坐标系  $(o_r - x_r, y_r, z_r)$ , 并在人体坐标系的体系中描述人体器官和组织的位置关系和形态。

#### 3.2 建立扫描坐标系与人体坐标系的关系

设任意一点  $q$  在扫描坐标系  $(o_s - x_s, y_s, z_s)$  中的坐标为  $q(x_s, y_s, z_s)$ , 在人体坐标系  $(o_r - x_r, y_r, z_r)$  中的坐标为  $q(x_r, y_r, z_r)$ ,  $q$  点在两坐标系之间的变换关系可用式(5)表示, 式中  $R_{rs}$ 、 $T_{rs}$  各包含 3 个独立未知量。

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{rs} & 0^T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E & T_{rs} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

在人体坐标系中定义 3 个“控制点”  $i_r$  (0, 0, 0)、 $j_r$  (65, 0, 0)、 $k_r$  (0, 66.5, 0), 并在 pro/E 软件中标记出“控制点”的位置, 并测得“控制点”在扫描坐标系中对应的坐标值分别为  $i_s$  (120.633, 500.357, -927.018)、 $j_s$  (180.700, 524.186, -934.032)、 $k_s$  (128.928, 498.869, -861.054)。

“控制点”  $i_r$  (人体坐标系原点)在扫描坐标系中的坐标值为 (120.633, 500.357, -927.018), 即扫描坐标系与人体坐标系间的位移向量  $T_{rs} = [-120.633 \ -500.357 \ 927.018]^T$ 。将“控制点”在扫描坐标系与人体坐标系中的坐标值代入式(5)中计算得到:

$$R_{rs} = \begin{bmatrix} 0.9241 & 0.3666 & -0.1079 \\ 0.1247 & -0.0224 & 0.9920 \\ 0.3612 & -0.930 & -0.0664 \end{bmatrix} \quad (6)$$

利用式(5)可以计算扫描坐标系与人体坐标系的变换关系。将肝脏几何中心O点在扫描坐标系中的坐标值 (171.713, 258.479, -979.888) 代入式(5)中求得肝脏几何中心O点在人体坐标系中的坐标值为 (-35.7617, -40.6590, 246.9365)。

#### 3.3 器官在人体空间位置

描述器官在人体的空间位置即可转化为描述器官局部坐标系与人体坐标系的关系, 器官局部坐标系由人体坐标系平移旋转变换得到。将式(5)代入式(1)中, 可以推出人体坐标系  $(o_r - x_r, y_r, z_r)$  与器官局部坐标系  $(o_j - x_j, y_j, z_j)$  的变换关系为:



$$\begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{js} & 0^T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E & T_{js} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} R_{rs} & 0^T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E & T_{rs} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{jr} & 0^T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E & T_{jr} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

以肝脏为例,计算得到人体坐标系 ( $o_r-x_r, y_r, z_r$ ) 与肝脏局部坐标系 ( $o_j-x_j, y_j, z_j$ ) 间的变换矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} 0.9996 & 0.0247 & 0.0160 & 32.7930 \\ 0.0281 & -0.6424 & -0.7658 & 164.0013 \\ -0.0086 & 0.7660 & -0.6428 & 189.5729 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由肝脏几何中心O点(局部坐标系原点)在人体坐标系中的坐标值得到两坐标系之间的位移向量,即  $T_{jr} = [35.7617 \quad 40.6590 \quad -246.9365]^T$ 。将  $T_{jr}$  带入式(7),可以计算得到旋转矩阵  $R_{jr}$  :

$$R_{jr} = \begin{bmatrix} 0.9996 & 0.0247 & 0.0160 \\ 0.0281 & -0.6424 & -0.7658 \\ -0.0086 & 0.7660 & -0.6428 \end{bmatrix} \quad (9)$$

进而计算出肝脏局部坐标系与人体坐标系3个方向的旋转角度:  $\alpha_{jr} = -130^\circ$ 、 $\beta_{jr} = -0.918^\circ$ 、 $\gamma_{jr} = 1.415^\circ$ 。利用求得的肝脏几何中心点在人体坐标系中的坐标以及各坐标轴的旋转角度得到肝脏在人体中的空间位置如图4所示。

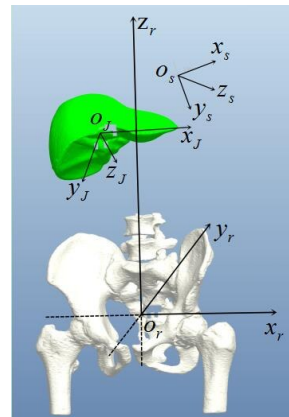


图4 肝脏局部坐标系在人体中的位置

Fig.4 Local coordinate system of liver in the human body

同理,利用Mimics软件提取胃、胰脏、心脏、肺以及肾脏等主要器官的三维模型并建立局部坐标系(图5),计算出各个器官的几何中心点在人体坐标系中的坐标值以及各个器官局部坐标系与人体坐标系的旋转关系如表1所示。

### 3.4 辐射等效假人数字化模型的装配

利用各个器官的几何中心点在人体坐标系中的坐标以及局部坐标系与人体坐标系的旋转关系,将器官和组织的三维模型在pro/E环境下装配出完整的数字化人体模型如图6所示,图7是“成都剂量体模”实物模型。

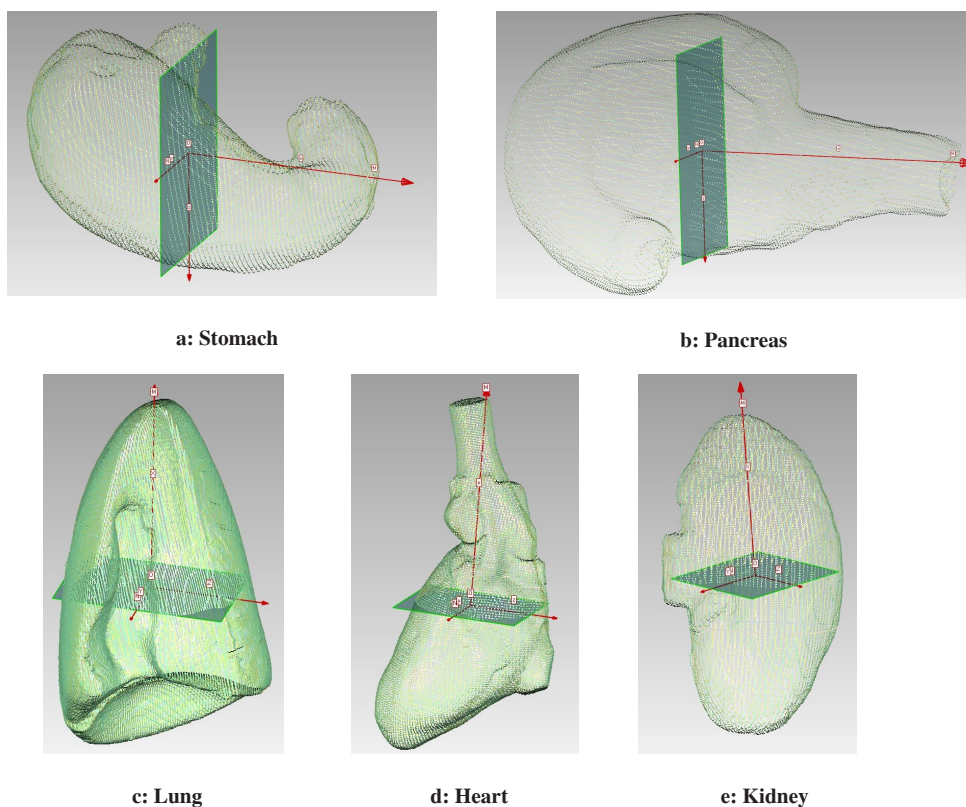


图5 其他主要器官局部坐标系

Fig.5 Local coordinate systems of other major organs

表1 各器官几何中心点坐标及旋转角  
Tab.1 Geometric central point coordinates and rotation angles of organs

Organs	Geometric central point coordinates/mm			Rotation angles/°		
	x	y	z	$\alpha_{jr}$	$\beta_{jr}$	$\gamma_{jr}$
Liver	-35.761 7	-40.659 0	246.936 5	-130.000	-0.918	1.415
Stomach	73.947 6	-37.944 0	224.920 0	115.700	-72.215	36.610
Pancreas	1.741 8	-25.273 1	189.088 0	153.400	19.600	-2.250
Left lung	68.416 0	0.973 4	362.235 0	-97.380	-72.160	177.500
Right lung	-65.590 0	1.590 0	360.325 0	-78.840	-71.263	-6.680
Heart	1.882 4	-42.117 6	364.998 0	-151.320	-73.520	97.000
Left kidney	53.951 7	-0.017 9	180.710 0	-130.250	83.100	-157.780
Right kidney	-53.679 7	-0.035 3	168.320 0	-138.160	-75.500	66.770

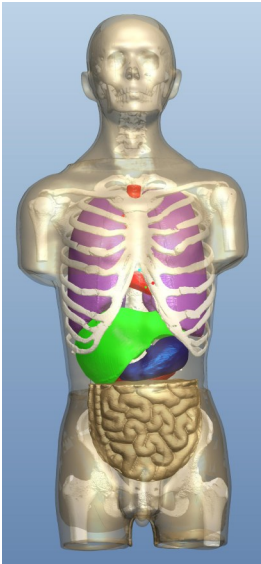


图6 辐射等效假人数字化模型  
Fig.6 Digital model of radiation equivalent manikin

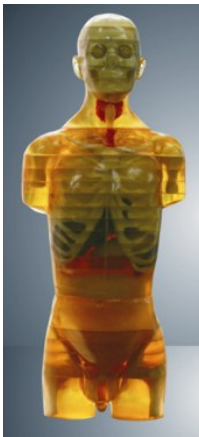


图7 “成都剂量体模”实物模型  
Fig.7 Chengdu Dosimetric Phantom

4 结 论

以“成都剂量体模”的CT扫描切片集为源数据,在 Mimics 软件中对人体器官和组织进行三维重建,利用 python 计算器官“特征点”在扫描坐标系中坐标,根据“特征点”建立器官局部坐标系,计算扫描坐标系与器官局部坐标系的变换矩阵;根据人体解剖学方位建立人体坐标系,计算扫描坐标系与人体坐标系的变换矩阵;计算各个器官的几何中心点在人体坐标系中的坐标值以及各个器官局部坐标系与人体坐标系的旋转角;最后根据各个器官的几何特征量及其三维模型在 pro/E 软件中完成辐射等效假人数字化模型的装配。建立辐射等效假人数字化模型可以提高加工精度,缩短生产周期,同时为辐射等效假人的辐射安全评价的仿真以及辐射等效假人的参数化设计提供了基础,具有重要的理论意义和实用价值。

【参考文献】

[1] 林大全,王远萍,张春德. 仿真辐射人体模型的研究与医学应用[J]. 医疗装备, 2003, 16(9): 38-43.  
LIN D Q, WANG Y P, ZHANG C D. Research and medical applications of radiological anthropomorphic phantom [J]. Medical Equipment, 2003, 16(9): 38-43.

[2] FRAME P W. A history of radiation detection instrumentation[J]. Health Phys, 2004, 87(2): 111-135.

[3] JONES D E, 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(6): 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 (404): 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]. 中国医学物理学杂志, 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]. Chinese Journal of Medical Physics, 1985, 2(3): 23-26.
- [8] 钟世镇. 数字化虚拟人体的科学意义及应用前景[J]. 南方医科大学学报, 2003, 23(3): 193-195.
- ZHONG S Z. Scientific significance and prospective application of digitized virtual human[J]. Journal of Southern Medical University, 2003, 23(3): 193-195.
- [9] 何海勇, 李文胜, 王辉, 等. 个体化三维数字模型在内镜经鼻颞骨岩部解剖中的应用[J]. 中国临床解剖学杂志, 2012, 30(5): 498-502.
- HE H Y, LI W S, WANG H, et al. The application of individual three-dimensional digital manikin on transnasal endoscopic approach of petrous bone[J]. Chinese Journal of Clinical Anatomy, 2012, 30(5): 498-502.
- [10] 汤鸿, 李郝林, 朱国民. 飞行员数字化三维人体模型研究[J]. 计算机应用与软件, 2009, 26(1): 169-170.
- TANG H, LI H L, ZHU G M. On three-dimension digital manikin for pilot [J]. Computer Applications and Software, 2009, 26(1): 169-170.
- [11] 李燕, 程孝荣, 黄凯. 基于Virtools的数字化人体模型仿真运动研究[J]. 机电产品开发与创新, 2008, 21(4): 113-115.
- LI Y, CHENG X R, HUANG K. Locomotion emulating study of individualized manikin based on Virtools [J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2008, 21(4): 113-115.
- [12] NÉROT A, SKALLI W, BEURIER G. A preliminary study on the realism of digital human manikins used for ergonomics simulation[J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2014, 17(Sup 1): 164-165.
- [13] 孙千月, 梁倩, 李倩倩, 等. 利用全程数字化设计技术复制牙冠形态制作修复体1例报告及文献复习[J]. 吉林大学学报(医学版), 2017, 43(6): 1253-1255.
- SUN Q Y, LIANG Q, LI Q Q, et al. Application of completely digital design technology in fabricating ceramic crowns to copy preoperative tooth: a case report and literature review[J]. Journal of Jilin University (Medicine Edition), 2017, 43(6): 1253-1255.
- [14] 唐宗军, 王新雷, 王宇宁, 等. STL格式文件的拓扑重建方法研究[J]. 机械, 2009, 36(4): 53-55.
- TANG Z J, WANG X L, WANG Y N, et al. Research of slice algorithm metal compound rapid prototyping[J]. Machinery, 2009, 36 (4): 53-55.
- [15] 柏树令. 系统解剖学(修订本)[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2010: 4-5.
- BAI S L. Systematic anatomy (revised)[M]. Beijing: People's Health Publishing House, 2010: 4-5.
- [16] 岳玉亮, 樊庆文, 王德庵, 等. 辐照仿真人体模型三维建模及装配原理与方法[J]. 中国医学物理学杂志, 2016, 33(5): 463-467.
- YUE Y L, FAN Q W, WANG D H, et al. Three-dimensional modeling of radiological anthropomorphic phantom [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2016, 33(5): 463-467.

(编辑:陈丽霞)