

## 基于组织等效3D打印的多模椎骨体模设计

杨环,杨如飞,朱华昭,李玉娜,王志鹏,孙勇,王国柱,邱建峰  
泰山医学院放射学院,山东 泰安 271016

**【摘要】目的:**设计一种基于影像建模、组织等效和3D打印技术的多模态椎骨骨折影像学仿真体模。**方法:**采集1例健康人腰椎影像样本的腰椎段CT影像序列,将原始DICOM图像导入Mimics交互式的医学影像控制系统软件进行椎骨、肾脏和软组织的三维重建,在重建模型中构建“一”字缝、“Y”字缝的椎骨峡部骨折模型。使用3D打印和组织等效技术打印等X线吸收密度的椎骨骨折模型,经CT、数字X线摄影(DR)多模成像,对模型CT值进行评估,验证体模仿真程度。**结果:**所获得的椎骨骨折体模在CT、DR下成像清晰,组织X线吸收系数等效于真实人体组织。**结论:**基于3D打印技术的多模态椎骨骨折体模可在CT和DR影像下获得,并可应用于有限元生物力学分析。模体制做成本低廉且快速,组织等效参数符合正常人体参数范围,能够有效仿真3种不同类型的椎骨峡部裂骨折等人体腹部病变。

**【关键词】**椎骨骨折;三维重建;组织等效;3D打印;数字化成像技术;体模

**【中图分类号】**R814.42

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2016)09-0924-06

## Design of multi-modal vertebral phantom based on tissue equivalence and 3D printing technology

YANG Huan, YANG Ru-fei, ZHU Hua-zhao, LI Yu-na, WANG Zhi-peng, SUN Yong, WANG Guo-zhu, QIU Jian-feng

Department of Radiology, Taishan Medical College, Tai'an 271016, China

**Abstract: Objective** To design a multi-model vertebral fracture simulation phantom based on medical image modeling, tissue equivalence and three-dimensional (3D) printing technology. **Methods** The lumbar vertebral CT image sequence of the human lumbar vertebral image sample of a healthy person was obtained. The original DICOM image was imported into Mimics interactive medical image control system software to reconstruct the 3D models of vertebra, kidney and soft tissue. Vertebrae spondylolysis fracture models of "I" type slot and "Y" type slot were constructed in the reconstructed model. The vertebral fracture model of equivalent X-ray absorption density was printed by 3D printing and tissue equivalence technologies. The CT and digital radiography (DR) multi-modal imaging were applied to evaluate the CT values of model, and to verify the simulation degree of phantom. **Results** The images of vertebral fracture phantom were clear under CT and DR, and the X-ray absorption coefficient of the tissue was equivalent to that of the real human tissue. **Conclusion** The multi-modal vertebral fracture phantom based on 3D printing technology can be obtained in CT and DR, and can be used for finite element biomechanical analysis. The phantom can be constructed quickly with less cost. The tissue equivalence parameters of phantom are in the range of normal human parameters. The phantom can efficiently simulate three different types of vertebral spondylolysis fracture and other abdominal diseases.

**Key words:** vertebral fracture; three-dimensional reconstruction; tissue equivalent; three-dimensional printing; digital radiography; phantom

### 前言

医学体模作为人体仿真和等效工具,被广泛运

用于临床医学和科学研究,是医学仪器性能检测的重要设备<sup>[1-2]</sup>。目前,在CT成像、磁共振成像(MRI)和数字X线成像领域,存在多种医学测试体模,如美国体模实验室Magphan多功能体模、美国Victoreen多功能测试体模以及国内磁共振综合测试体模、仿真胸部体模等<sup>[3-4]</sup>。用于仿真人体骨折成像的体模,有日本PBU-50全身成像体模、四川大学林大全教授的腹部成像体模(成都方拓仿真技术有限责任公司)等,但尚未见详细模拟腰椎峡部裂的成像体模。目前大多数体模用于评价CT、MRI等医疗设备的性能

**【收稿日期】**2016-04-22

**【基金项目】**科技部重点专项(2016YFC0103400);泰山医学院磁共振成像与质量控制创新中心(ZD0101);泰山医学院高层次课题(GCC003)

**【作者简介】**杨环,本科,E-mail:yanghuan931029@163.com

**【通信作者】**邱建峰,博士,副教授,主要研究方向:医学物理与医学成像,E-mail:jfqi100@gmail.com

参数,也有一部分用来评价图像质量和辐射剂量,而对于仿真病灶和组织形态的体模相对较少<sup>[5]</sup>。

腰椎椎弓峡部裂是一种非常罕见的脊柱疾病,也称为椎弓崩裂,是在解剖及先天因素基础上反复应力作用而致的疲劳性骨折<sup>[6-8]</sup>。以往主要靠X线腰椎正-侧位片、左-右双斜位片和CT轴位平扫对腰椎峡部裂进行诊断,但是这些二维图像资料在反映腰椎病变严重程度、病变位置和畸形情况等方面不够全面准确<sup>[6,9]</sup>。如能设计实现一种仿真椎骨骨折体模,作为金标准用于影像教学、多模态成像技术比较,可以辅助解决常规检测中因腰椎处骨折复杂而出现的漏诊和误诊现象。从教学和病灶检测敏感性等研究角度对病变进行检测,提高检测敏感性、降低漏诊率和误诊率,排除以往检测中出现的人为干扰<sup>[10]</sup>。

基于上述现状,本文通过重建实际人体影像,基于3D打印和组织等效技术,制作了适用于CT和数字X线摄影(Digital Radiography, DR)多模态成像、仿真多种类型脊柱峡部骨折的多模态椎骨骨折体模,用于仿真成像以及进行影像学教学和研究,帮助医生更高效地诊断腰椎骨折患者<sup>[11]</sup>。

## 1 材料与方法

### 1.1 体模形态设计

**1.1.1 扫描条件** 使用GE Lightspeed Qxi 16排螺旋CT,在管电压120 kV、管电流25 mA、层厚2 mm、层间距2 mm的条件下对1例健康样本进行腰椎的薄层连续扫描(无脊柱畸形、病变),扫描后得到的CT图像以Dicom格式保存。

**1.1.2 重建方法** 将扫描图像导入图像工作站(计算机配置:联想 Thinkstation Xeon 33.2 GHz 32 G内存)选用Mimics(Materialise公司,比利时)三维重建软件。打开五节腰椎图像,在Change orientation中选择Current orientation,选择合适的方向,在工具栏选择Segmentation中的Thresholding,选择合适的阈值和Bone CT值,对图像进行操作,逐层分离出目标椎体<sup>[12]</sup>。在Masks下选择Calculate 3D from Masks,在窗口中选择Optimal,在腰椎板处分别做出“一”字缝01、“一”字缝02(长10.0 mm、宽1.5 mm、深3.0 mm)以及“Y”字缝01、“Y”字缝02(短轴5.0 mm、长轴10.0 mm、宽1.5 mm、深3.0 mm),再对细小空洞进行填补,并最低程度平滑骨性结构表面。通过Remesh检测自相交网格三角形,补充缺少的三角形网格,分析无错误,在工具栏中选择Smooth Shaded,然后保存为实体文件格式,导入3D打印机系统进行打印<sup>[13]</sup>(图1和图2)。

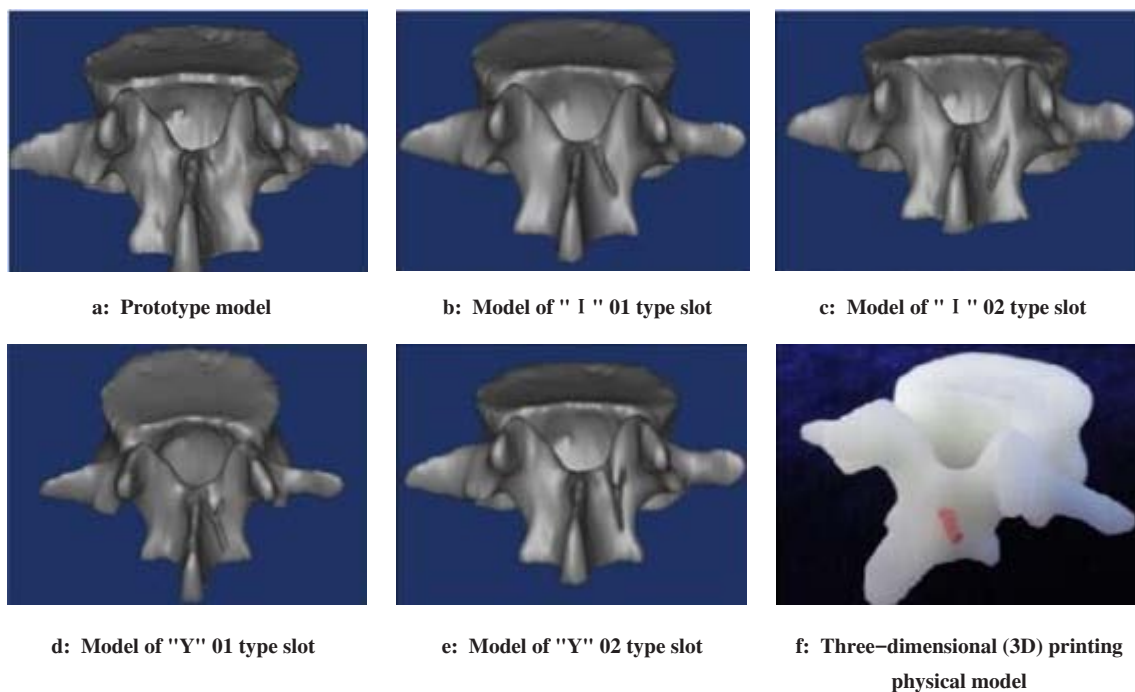


图1 由原始图形三维重建的椎骨峡部裂计算机模型海外实物模型

Fig.1 3D reconstruction of computer model of overseas physical model of vertebral spondylolysis based on original image

### 1.2 体模的组织等效材料

为使体模能够有效仿真人体组织的X线吸收特性,

本文选用掺有特定密度硫酸钡的聚乙烯醇树脂,分子式: $[C_2H_4O]_n$ ,作为骨骼的组织等效材料;选用己二酸

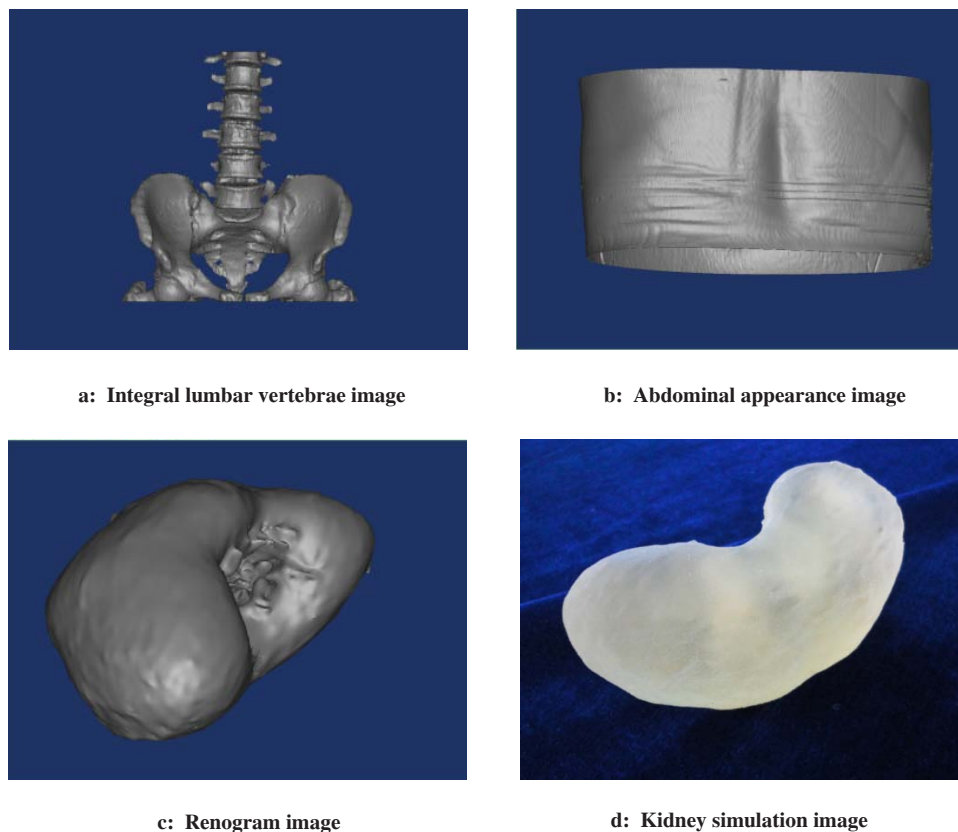


图2 椎骨、肾脏、软组织三维重建和肾脏3D打印图

Fig.2 3D reconstruction images of vertebra, kidney and soft tissue, and 3D printing image of kidney

为改性剂的湿气固化反应型聚氨酯胶(Poly Urethane Reactive, PUR)作为软组织仿真等效材料;低密度的光固化树脂作为肾脏组织等效材料;Stratasys Tango 材料作为皮肤组织等效材料。

### 1.3 体模的制作

所有组织等效材料通过3D打印机(Stratasys Up-rint SE plus 桌面型,美国),1:1打印1.1.2环节中重建的数字模型,获得物理实体。椎体模型通过前期软件处理,打印出的实体带有脊柱峡部裂仿真病变。检测模型仿真度合格后,依次在DR腰椎平片、CT下扫描,将所得CT值与正常人的值进行比较,检验X线下密度、CT值和对比度等组织等效系数。

### 1.4 力学模型仿真

对于1.1.2环节重建的数字椎体模型,模型优化后导入COMSOL5.2版(上海康模数尔软件技术有限公司)软件中进行力学仿真。具体步骤如下:(1)在组件中右键选择几何中的虚拟操作,选择形成组合面,在激活状态下选择要组合的面,把面上的小三角形都选择完成后单击全部构建。(2)打开组件,增加物理场,选择结构力学中的固体力学,在线弹性材料中输入密骨质参数(杨氏模量 $E=1.4 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ,泊松比 $\nu=0.3$ ,密度 $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ ),在边界载荷中输入力参

数( $Z=-100 \text{ MPa}$ )。(3)在组件中选择增加网格,右键选择自由剖分四面体网格,在几何实体层次中选择整个几何,单击全部构建,构建完成的结果没有错误方可进行下一步。(4)选择固体力学中的固定约束,选择一个面作为固定面,在所施加力的面上施加力。(5)在菜单栏选择研究中的增加研究,添加稳态,选择计算,得出施加应力后的图形(图3)<sup>[14-16]</sup>。

## 2 结果

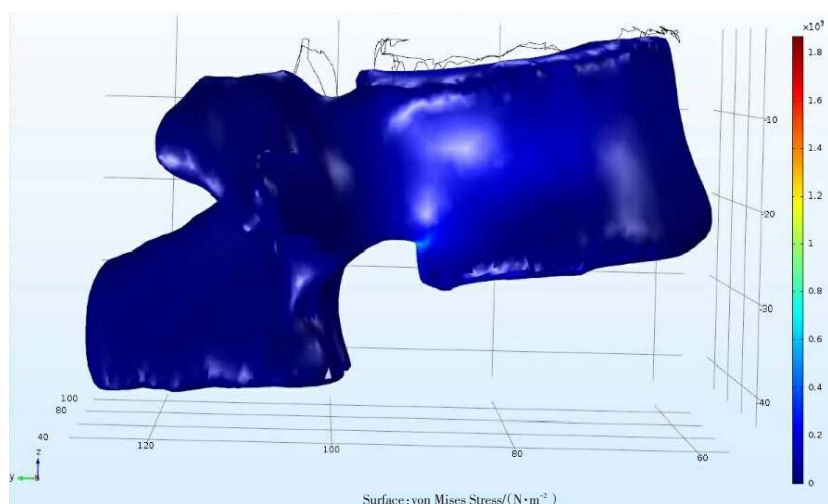
将制作得到的体模依次在DR、CT下进行扫描(图4和图5)。由图像可知,椎体、仿真软组织和裂缝密度、CT值接近真实值。

体模椎体模块所仿真的4种脊柱峡部裂类型,裂缝在图像中显示清晰。在使用PUR作为软组织等效材料情况下,骨骼和软组织对比度良好,接近真实人体组织情况。在CT轴位图像中,仿真峡部裂缝隙清晰。不同仿真峡部裂的CT值见表1。

## 3 结论

影像学体模是进行医学成像研究、断层解剖教学的重要工具。目前,大型全身仿真成像体模,以及胸、颅脑、腰段等独立仿真成像体模,已经广泛应用

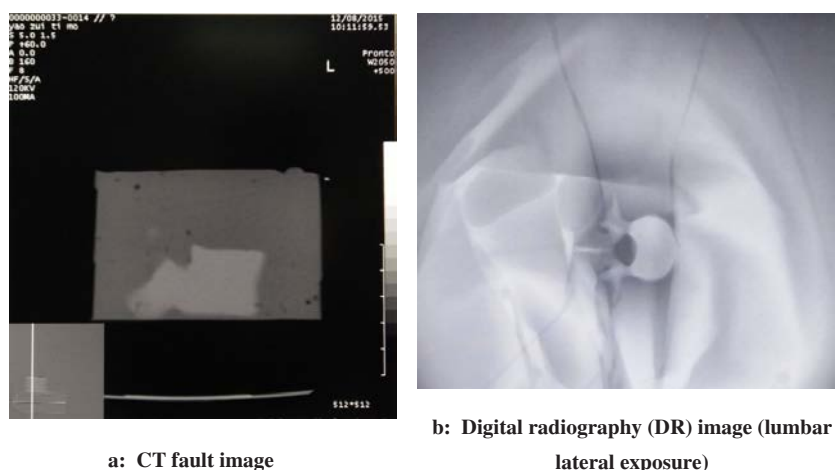




The broken line section was the lumbar spine, and the blue was the strain model.

图3 独立腰椎峡部裂模型的有限元应变云图

Fig.3 Finite element strain nephogram of independent lumbar spondylolysis model



a: CT fault image

b: Digital radiography (DR) image (lumbar lateral exposure)

图4 椎体体模图像

Fig.4 Phantom image of vertebral body

于国内外医疗卫生工作<sup>[17]</sup>。然而,关注于腰椎成像并能够仿真脊柱峡部裂的成像体模尚未见报道。

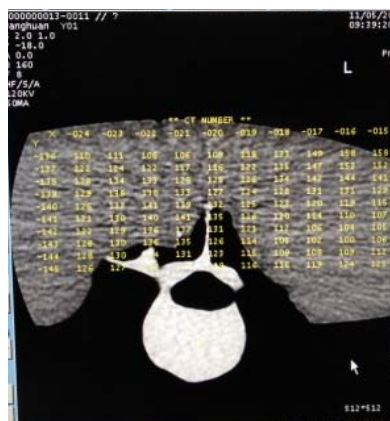
本研究针对健康样本,通过图像建模和3D打印,完整地重建出真实的人体腰骶段模型,通过组织等效仿真技术,使模型具有DR和CT成像的组织等效效果,并仿真出多种脊柱峡部裂病变。体模可以用于脊柱骨折的DR、CT影像学检查比较研究,以及断层解剖教学。体模同时配有骨骼数字实体模型,用户通过网络连接可以获得stl格式的三维腰椎模型,并进行个性化的有限元力学分析,实现该体模的应用增值。

椎骨骨折因其位置的特殊性,导致在检查中容易出现漏诊。影像医师也因忽略病变而无法制定有效的治疗方案。本文的椎骨骨折体模既可以在平片下扫描成像观察,也可以在CT下观察,且CT检查的敏感性高于平片,这一结果符合临床脊柱峡部裂检

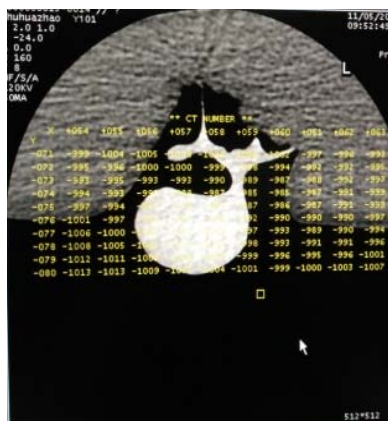
查的临床结论<sup>[18]</sup>。

本研究所用体模通过快速成型技术(3D打印)实现,可以快速准确地将虚拟计算机模型转化为实物原型,然后进行后续评价、试验工作。3D打印技术的灵活性使其在医学领域得以充分利用<sup>[19-21]</sup>。通过将材料组织等效技术结合3D打印技术,还可以实现组织仿真和等效,使获得的打印模型在DR、CT等成像后准确仿真真实人体,使模体制作可以摆脱开模加工等流程,快速、高效地获得影像学仿真模体和辐照模体。帮助医生更加直观、准确地评估病灶,制定治疗和手术方案<sup>[22]</sup>。

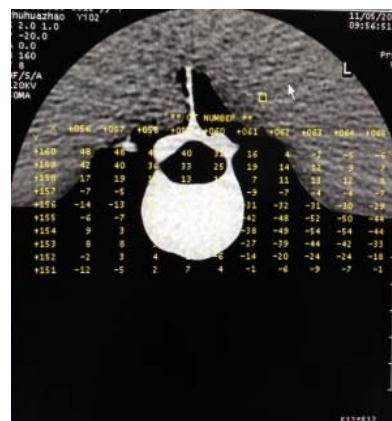
由于轮廓只能采用多块拼装方式,降低了体模的仿真度,这有待未来选用开放性大尺寸快速成型机加工体模。由于光敏成型技术的设备特点,材料的可选择范围比较小,尚无法成型密度更接近真实



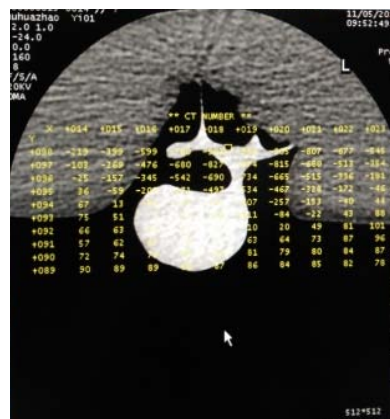
a: CT value of bone



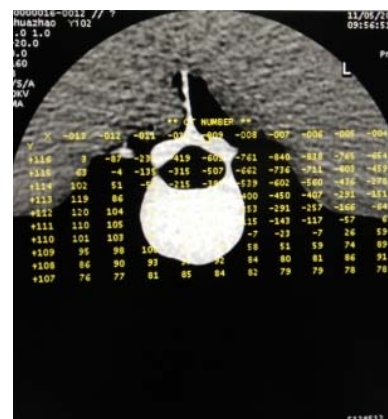
b: CT value of air



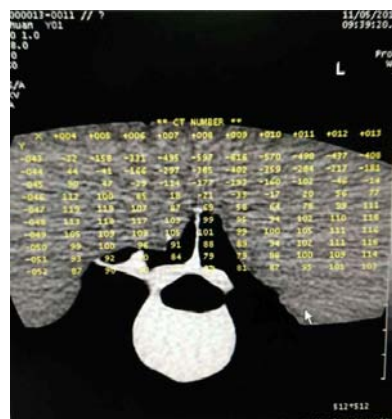
c: CT value of soft tissue



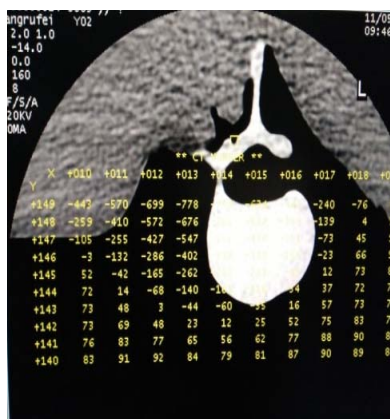
d: CT value of "I" 01 type slot



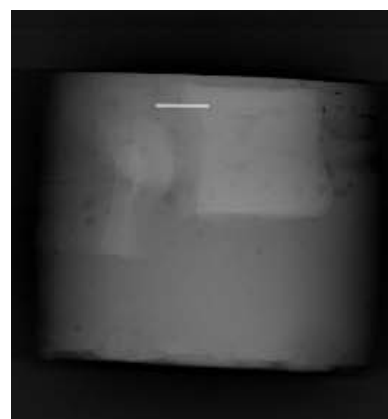
e: CT value of "I" 02 type slot



f: CT value of "Y" 01 type slot



g: CT value of "Y" 02 type slot



h: DR image

图5 不同裂缝CT值和DR图像  
Fig.5 CT value of different types of  
spondylolysis and DR image

表1 体模组织学仿真

Tab.1 Phantom tissue simulation

	Vertebral body simulation	Soft tissue simulation	Types of slot			
			"I" 01	"I" 02	"Y" 01	"Y" 02
X-ray density	4 176	5 011	4 649	4 834	4 465	4 594
CT value/HU	122	2	-459	-484	24	35

人体的消化系统模型,导致体模对腹部消化系统仿真存在一定失真。

## 【参考文献】

[1] 杨冬,孙志辉,徐桓,等.基于水底材料的CT性能测试体模的研

- 制[J]. 医疗卫生装备, 2014, 35(2): 23-25.
- YANG D, SUN Z H, XU H, et al. Development of phantom filled in water for CT performance test[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2014, 35(2): 23-25.
- [2] YOSHIHISA M, YUKIHIRO T, YOSHIMASA N, et al. The development and use of a chest phantom for optimizing scanning techniques on a variety of low-dose helical computed tomography devices[J]. J Comput Assist Tomogr, 2003, 27(3): 364-374.
- [3] 邱建峰, 王鹏程, 王国柱, 等. 磁共振综合测试体模的设计[J]. 中国医学影像技术, 2012, 28(5): 997-1000.
- QIU J F, WANG P C, WANG G Z, et al. Design of multi-function MR test phantom [J]. Chinese Journal of Medical Imaging Technology, 2012, 28(5): 997-1000.
- [4] 张丽媛, 康立丽, 贺杰禹. MRI性能测试体模设计与实验验证[J]. 中国测试, 2015, 41(1): 124-128.
- ZHANG L Y, KANG L L, HE J Y. Design and experimental verification of MRI performance testing phantom [J]. China Measurement & Testing Technology, 2015, 41(1): 124-128.
- [5] 彭刚, 曾勇明, 赵峰, 等. 中国人仿真胸部体模组织等效性的影像学研究[J]. 重庆医科大学学报, 2010, 35(7): 1060-1063.
- PENG G, ZENG Y M, ZHAO F, et al. Imaging study of tissue equivalence on Chinese anthropomorphic chest [J]. Journal of Chongqing Medical University, 2010, 35(7): 1060-1063.
- [6] 戎帅, 滕勇, 张春浩, 等. 基于3D打印技术的腰椎多节段峡部裂个性化手术治疗[J]. 中国矫形外科杂志, 2013, 21(21): 2222-2226.
- RONG S, TENG Y, ZHANG C H, et al. The individualized surgical treatment of multi-section lumbar spondylolysis based on 3D printing technology [J]. Orthopaedic Journal of China, 2013, 21(21): 2222-2226.
- [7] 罗小平, 陈伟建, 殷薇薇, 等. 多层螺旋CT重组技术对腰椎峡部裂的诊断价值研究[J]. 中国骨伤, 2011, 24(1): 25-29.
- LUO X P, CHEN W J, YIN W W, et al. The value of MSCT reformation techniques in the diagnosis of lumbar spondylolisthesis [J]. China Journal of Orthopaedics and Traumatology, 2011, 24(1): 25-29.
- [8] ISLEY M R, ZHANG X F, BALZER J R, et al. Current trends in pedicle screw stimulation techniques: lumbosacral, thoracic, and cervical levels[J]. Neuro Diagn J, 2012, 52: 100-175.
- [9] 谢元忠, 孔庆奎, 公维云, 等. 多层螺旋CT图像后处理技术对腰椎峡部裂的诊断价值[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2008, 18(7): 526-529.
- XIE Y Z, KONG Q K, GONG W Y, et al. Diagnostic value of imaging reconstruction technique by multi-slice spiral CT on spondylolysis[J]. Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2008, 18(7): 526-529.
- [10] MASON A, PAULSEN R, BABUSKA J M, et al. The accuracy of pedicle screw placement using intraoperative image guidance systems[J]. J Neurosurg Spine, 2014, 20: 196-203.
- [11] 刘良峰, 严金岗. 多层螺旋CT三维重建应用于腰椎骨折诊断中临床价值分析[J]. 医学影像学杂志, 2014, 24(3): 492-494.
- LIU L F, YAN J G. Analysis of in the clinical value in the diagnosis of lumbar fracture MSCT three-dimensional reconstruction[J]. Journal of Medical Imaging, 2014, 24(3): 492-494.
- [12] 阮斌, 张国栋, 吴章林, 等. 3D打印导航模块辅助腰椎椎弓根螺钉精确植入的实验研究[J]. 中国临床解剖学杂志, 2014, 32(3): 252-255.
- YAN B, ZHANG G D, WU Z L, et al. Experimental study on accurate placement of the lumbar pedicle screws assisted by 3D printing navigation module [J]. Chinese Journal of Clinical Anatomy, 2014, 32(3): 252-255.
- [13] 黄轩, 王毅峰, 李凤宁, 等. 基于三维打印成型技术制备个性化椎弓根置钉导航模板的动物实验研究[J]. 第二军医大学学报, 2014, 35(9): 992-996.
- HUANG X, WANG Y F, LI F N, et al. Preparation of individualized navigation templates for pedicle screw insertion in goats using a three-dimensional printing forming technique [J]. Academic Journal of Second Military Medical University, 2014, 35(9): 992-996.
- [14] 赵峰, 高勃, 刘震侠, 等. Dicom标准和Mimics软件辅助建立下颌骨三维有限元模型[J]. 西南国防医药, 2005, 15(5): 479-481.
- ZHAO F, GAO B, LIU Z X, et al. Establishment of a three-dimensional finite element model of mandible with Dicom and Mimics software [J]. Medical Journal of National Defending Forces in Southwest China, 2005, 15(5): 479-481.
- [15] 陈宣煌, 许卫红, 黄文华, 等. 基于3D打印的腰椎椎弓根螺钉数字化置入及临床应用[J]. 中国组织工程研究, 2015, 19(17): 2752-2757.
- CHEN X H, XU W H, HUANG W H, et al. Digital placement and clinical application of lumbar pedicle screws based on 3D printing [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2015, 19(17): 2752-2757.
- [16] 步国强, 毛仲轩. Mimics软件模拟置钉在腰椎关节突重度退变椎弓根螺钉内固定中的应用[J]. 中国组织工程研究, 2015, 19(17): 2745-2751.
- BU G Q, MAO Z X. Mimics simulation software for screw placement in pedicle screw fixation for treating severe lumbar facet joint degeneration[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2015, 19(17): 2745-2751.
- [17] 赵峰, 曾勇明. 仿真体模研制及在胸部CT应用的进展[J]. 重庆医学, 2011, 40(23): 2371-2373.
- ZHAO F, ZENG Y M. Research and development of simulation body model and its application in chest CT [J]. Chongqing Medicine, 2011, 40(23): 2371-2373.
- [18] 朱利涛. 社区就诊腰椎滑脱患者的X线平片分析[J]. 中国社区医师, 2013, 15(23): 74-75.
- ZHU L T. Analysis of X-ray plain film in patients with lumbar spondylolisthesis [J]. Chinese Community Doctors, 2013, 15(23): 74-75.
- [19] 江静, 祁文军, 阿地力·莫名. 快速成型技术在医学上的应用[J]. 机械设计与制造, 2011, 5(5): 254-256.
- JIANG J, QI W J, ADILI M M. Application of rapid prototype technology in medicine [J]. Machinery Design & Manufacture, 2011, 5(5): 254-256.
- [20] GLORIA A, RUSSO T, SANTIS R, et al. 3D fiber deposition technique to make multifunctional and tailor-made scaffolds for tissue engineering applications[J]. J Appl Biomater Biomech, 2009, 7(3): 141-152.
- [21] KRUPSKI W, MAJCHER P, FATYGA M, et al. 3D CT imaging of the lumbosacral spine after surgical treatment of L5-S1 spondylolisthesis by postero-lateral spondylodesis[J]. Orthop Traumatol Rehabil, 2003, 5(2): 243-247.
- [22] 陈玉兵, 陆声, 徐永清. 快速成型三维实物模型在脊柱外科中的应用进展[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2009, 19(10): 784-787.
- CHEN Y B, LU S, XU Y Q. Application of rapid prototyping 3D physical model in spinal surgery[J]. Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2009, 19(10): 784-787.

(编辑:陈丽霞)