

基于3D打印技术构建仿真儿童CT增强腹部体模的测试研究

欧阳荣珍¹, 孙爱敏¹, 王谦¹, 郭辰¹, 李剑颖², 胡立伟¹, 钟玉敏¹

1. 上海交通大学医学院附属上海儿童医学中心放射科, 上海 200127; 2. GE 中国CT影像研究中心, 上海 201203

【摘要】目的:本研究构建仿真的儿童CT增强腹部体模,并验证其解剖结构的CT衰减特性与正常儿童腹部增强CT图像质量比较。**方法:**基于3D打印直写成型技术,将聚氨酯和三(2-氯乙基)磷酸酯(TCEP)作为混合的打印材料。使用不同浓度的TCEP(0%~60%)混合材料,在不同管电压下(80~120 kV),评价TCEP混合材料浓度和CT值的线性关系。根据患者CT影像数据设计并打印仿真动脉期儿童CT增强腹部体模。体模在CT下重复3次扫描以评估数据一致性。将仿真CT图像与正常儿童的CT图像比较,对肝脏、腹主动脉、肾皮质、脾脏和肌肉的CT值、图像噪声、对比噪声比(CNR)进行计算和客观评价。采用5分制,由两个放射科医生对图像质量进行主观评价。**结果:**在不同的管电压下,TCEP浓度变化和CT值之间都存在良好的线性关系($P<0.001$, $r=0.99$)。除了腹主动脉,仿真体模各解剖结构CT值与正常儿童一致($P>0.05$)。肝脏、肾皮质和脾脏的体模图像比正常儿童的图像有更高的CNR值(7.08 ± 0.83 vs 5.50 ± 0.48 , 14.18 ± 2.48 vs 10.67 ± 1.05 , 11.84 ± 1.69 vs 8.78 ± 0.53)。仿真体模CT图像噪声相比于正常儿童基本一致[(12.3 ± 1.47) HU vs (13.7 ± 1.5) HU]。但主观图像质量评分略低(4.35 ± 0.17 vs 4.72 ± 0.17 , 4.50 ± 0.16 vs 4.65 ± 0.12)。**结论:**研究证明通过3D打印直写成型技术构建仿真体模具有可行性,且图像质量和一致性良好。仿真的儿童CT体模能模拟不同患者体型的组织衰减特性,可用于优化CT剂量和重建算法。

【关键词】3D打印技术;CT;腹部体模;儿童

【中图分类号】R318

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2019)03-0307-04

Testing research on a realistic pediatric abdominal phantom with CT enhancement constructed with 3D printing technology

OUYANG Rongzhen¹, SUN Aimin¹, WANG Qian¹, GUO Chen¹, LI Jianying², HU Liwei¹, ZHONG Yumin¹

1. Department of Radiology, Shanghai Children's Medical Center, Shanghai Jiaotong University School of Medicine, Shanghai 200127, China; 2. CT Research Center of GE, Shanghai 201203, China

Abstract: Objective To construct a realistic pediatric abdominal phantom with CT enhancement, and validate its X-ray attenuation properties by comparing phantom images with the enhanced abdominal CT images of normal children. **Methods** Based on the rapid prototyping of 3D printing technology, polyurethane and tris (2-chloroethy) phosphate (TCEP) were used as printing materials. The TCEP mixed materials of different concentrations (0%~60%) was used to investigate the linear relationships between the concentration of TCEP mixed materials and CT values at different tube voltages (80-120 kV). According to the CT imaging data of the patient, a pediatric abdominal phantom with CT enhancement in the arterial phase was designed and printed. The printed phantom was scanned with CT for 3 times to assess the reproducibility. And then the phantom CT images were compared with the CT images of normal children. The CT values, image noises and contrast-to-noise ratios of liver, abdominal aorta, kidney cortex, spleen and muscle were measured. Finally, the subjective image quality was assessed by two radiologists using a 5-point scale. **Results** A good linear relationship was found between CT value and TCEP concentration at all tube voltages ($P<0.001$, $r=0.99$). The CT values of all tissues were similar between phantom and normal children (all $P>0.05$), except for the CT value of abdominal aorta. The contrast-to-noise ratios of liver, kidney cortex and spleen in phantom images were higher than those in the images of normal children (7.08 ± 0.83 vs 5.50 ± 0.48 , 14.18 ± 2.48 vs 10.67 ± 1.05 , and 11.84 ± 1.69 vs 8.78 ± 0.53 , respectively). The phantom images and CT images of normal children had similar image noise [(12.3 ± 1.47) HU vs (13.7 ± 1.5) HU]. However, the subjective image quality scores of phantom images were slightly lower (4.35 ± 0.17 vs 4.72 ± 0.17 , 4.50 ± 0.16 vs 4.65 ± 0.12).

【收稿日期】2018-09-25

【基金项目】十三五科技部重大专项“增材制造与激光制造”子课题(2018YFB1107105);上海市级医院新兴前沿技术项目(SHDC12015128);上海市科学技术委员会重点项目(17DZ1930505)

【作者简介】欧阳荣珍, 硕士, 住院医师, 研究方向: 儿童先天性心脏病影像诊断, E-mail: oyrzhen@163.com

【通信作者】胡立伟, 硕士, 主管技师, 研究方向: 生物医学工程、3D打印技术, E-mail: huliwei11@hotmail.com

Conclusion Using the rapid prototyping of 3D printing technology to construct realistic phantom is proved to be feasible. The phantom image has a high quality and consistent attenuation characteristics. The realistic pediatric phantom can be used to simulate the attenuation characteristics of patients of different body shapes, so as to optimize dose distribution and reconstruction algorithms.

Keywords: 3D printing technology; computed tomography; abdominal phantom; pediatric

前言

增材制造(3D打印)是指应用粉末状、液态或金属等可黏合材料,通过逐层打印方式来构造物理模型的技术。3D打印发明于1983年,起初应用于模具制造、工业设计等领域。随着打印材料的多样化和打印精度的提高,其在医学术前规划^[1]、手术模拟^[2]、手术教学^[3]领域应用越来越广泛。直写成型技术是一种新型的无模成像3D打印技术,精确控制悬浮液的沉积,通过逐层叠加的方式制备三维周期结构,是目前最新的3D打印技术之一^[4]。前期研究中,通过对高透明环氧树脂、石膏、光敏树脂等打印材料的CT衰减组织特性研究发现,可能存在一种3D打印混合材料与CT值呈线性关系。本研究的目的是:①通过混合聚氨酯和三(2-氯乙基)磷酸酯(TCEP)材料,探索不同CT扫描条件下的混合材料组织衰减特性。②设计、打印仿真动脉期儿童CT增强腹部体模,比较仿真腹部模型与正常儿童CT的图像质量。

1 材料与方法

1.1 混合材料组织衰减特性

按0%~60%的比例配置16种不同浓度TCEP混

合聚氨酯液体存放于塑料试管内。根据浓度从低到高,将试管从左到右,从上到下等距离排列(图1a)。结果表明,CT值和TCEP浓度之间均有良好的线性相关性($P<0.001$, $r=0.99$)。等待混合材料冷却凝固后,使用CT检查(GE Discovery CT750 HD)重复扫描3次。CT扫描参数:机架转速0.35 s/圈,准直器宽度0.625 mm×64层,管电压80、100、120 kV,管电流100 mAs,重建层厚0.625 mm,矩阵512×512。评价不同管电压下,不同浓度混合材料的CT值变化。

1.2 儿童体模

提取本院1例正常儿童腹部CT检查的DICOM动脉期图像,使用Mimics17.0软件提取腹部CT图像构建成脊柱单元、血管单元、肝脏单元等;通过直写成型技术选择不同比例混合材料,打印儿童CT增强腹部体模(图2)。使用正常儿童CT扫描参数对腹部体模进行扫描。

1.3 图像处理与分析

使用ADW4.6工作站重建扫描图像,分别测量体模CT图像和正常儿童CT图像的的背景噪声、感兴趣区域CT值和对比噪声比(Contrast to Noise Ratio, CNR)。具体方法为选定在肝脏、肾脏皮质、腹主动脉、脾和肌肉

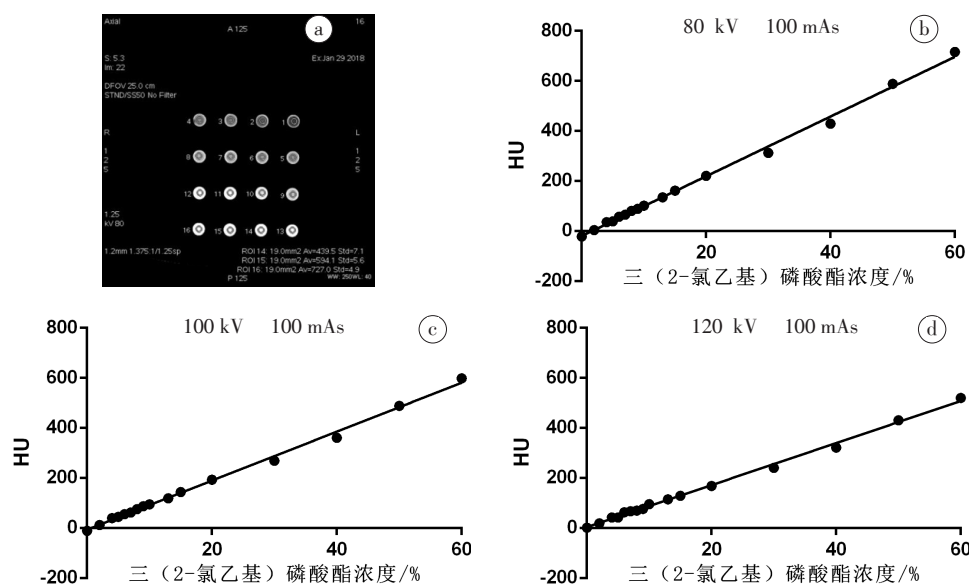


图1 0%、2%、4%、5%、6%、7%、8%、9%、10%、13%、15%、20%、30%、40%、50%、60%浓度三(2-氯乙基)磷酸酯混合聚氨酯CT扫描模型(a)以及模型在管电压80 kV(b)、100 kV(c)和120 kV(d)和管电流100 mAs扫描下的CT值
Fig.1 CT imaging patterns (a) of phantom with tris (2-chloroethyl) phosphate at the concentrations of 0%, 2%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9%, 10%, 13%, 15%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, and the CT values under the scan tube voltages of 80 kV (b), 100 kV (c) and 120 kV (d), with a constant tube current of 100 mAs

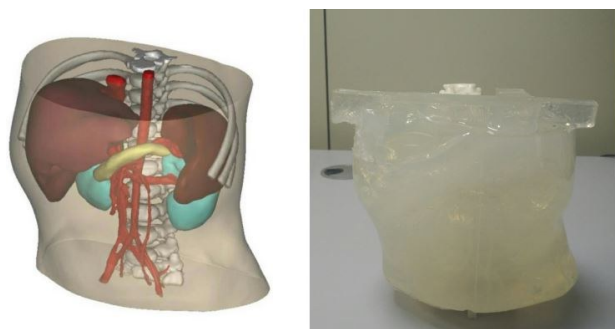


图2 1例儿童腹部体模设计和打印,模拟各解剖结构动脉期增强CT组织衰减特性

Fig.2 A pediatric abdominal phantom designed and printed to simulate the tissue attenuation characteristics after CT enhancement in the arterial phase

图像中的相同层面,测量设置感兴趣区(Range of Interest, ROI)面积为 19 mm^2 。重复测量3次取平均值。背景噪声指图像中肌肉CT值的标准差。对比噪声比 $\text{CNR}=(\text{感兴趣区域CT值}-\text{背景组织CT值})/\text{SD}$,其中,感兴趣区域包括肝脏、肾脏皮质、腹主动脉、脾脏,SD指背景噪声(图3)。

1.4 统计学方法

采用Graphpad 5.0软件进行统计学分析。计算不同CT扫描条件下的混合材料浓度和CT值的线性关系。计算体模和正常儿童各解剖部位CT值、噪声,CNR的平均值和标准差用柱形图表示。 $P<0.05$ 为结果有统计学意义。

2 结果

在不同的管电压下,TCEP浓度变化和CT值之间都存在良好的线性关系($P<0.001$, $r=0.99$)。除了腹主动脉,仿真体模各解剖结构CT值与正常儿童基本一致($P>0.05$)。肝脏、肾皮质和脾脏的体模图像比正常儿童的图像有更高的CNR值(7.08 ± 0.83 vs 5.50 ± 0.48 , 14.18 ± 2.48 vs 10.67 ± 1.05 , 11.84 ± 1.69 vs 8.78 ± 0.53)(图4)。仿真体模CT图像噪声与正常儿童接近[(12.3 ± 1.47) HU vs (13.7 ± 1.5) HU];但主观图像质量评分略低(4.35 ± 0.17 vs 4.72 ± 0.17 (观察者1)、 4.50 ± 0.16 vs 4.65 ± 0.12 (观察者2)],见表1。

3 讨论

在过往的研究中,国内外CT体模研究均使用专业机构认证的标准体模^[5-8]。2009年Kumar等^[8]报道3D打印技术构建人体特征体模进行剂量学验证测量的可行性。2017年Jahnke等^[9]首次报道使用3D打印技术和灰度矫正方法定制真实体模可用于诊断和放射治疗。在2017年北美放射学年会上多伦多大学有

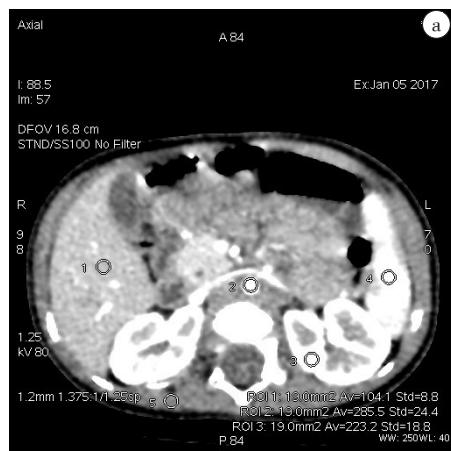


图3 体模和正常儿童CT图像对比

Fig.3 Comparison of phantom images and CT images of normal children

a:测量肝脏、肾脏皮质、腹主动脉、脾和肌肉的CT值、图像噪声示意图;b、c和d是正常儿童CT图像;图e、f和g是模型CT图像,连续3个层面评价图像质量[感兴趣区: 19 mm^2 、厚度: 0.625 mm 、自适应统计迭代重建(Adaptive Statistical Iterative Reconstruction, AiSR)50%]。

多篇仿真等效X线衰减人体体模的报道。本研究通过3D打印直写成型技术混合聚氨酯和TCEP,评价TCEP混合材料浓度和CT值的线性关系。国内首次尝试打印仿真动脉期儿童CT增强腹部体模,比较仿真腹部模型与正常儿童CT的图像质量。

本研究中,经过重复3次扫描后,不同的管电压下的TCEP浓度变化和CT值之间都存在良好的线性关系($P<0.001$, $r=0.99$)。研究证明使用混合材料确实可构建具有CT衰减特征的人体模型。在整个模型设计和3D打印过程中,都有放射科医生参与保证模型质量^[10]。

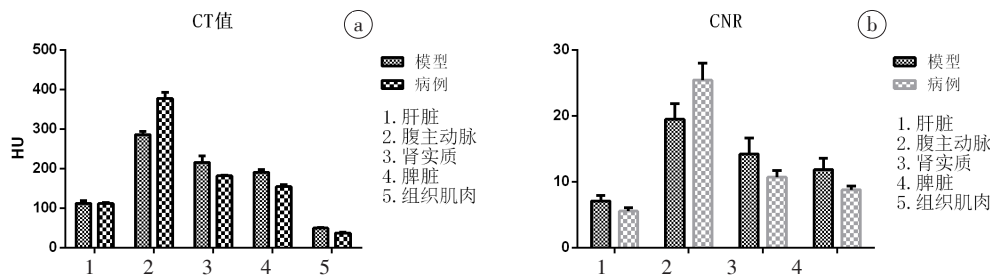


图4 体模和正常儿童的CT值(a)和CNR(b)的平均值和标准差

Fig.4 Mean and standard deviation of the CT value (a) and contrast-to-noise ratios (b) for tissues in phantom and normal children

表1 体模和正常儿童的图像质量评分比较

Tab.1 Comparison of image quality scores between phantom and children

图像特征	体模		儿童	
	观察者1	观察者2	观察者1	观察者2
锐利度	4.3	4.5	4.8	4.8
噪声	4.6	4.3	4.5	4.6
伪影	4.3	4.7	4.7	4.7
诊断可接受度	4.2	4.5	4.9	4.5

2010年,国内学者报道使用中国人仿真胸部体模与正常成人的CT图像比较,结果显示体模组织的X线衰减等效程度良好^[11]。本研究中儿童CT增强腹部体模与正常患儿的CT图像质量比较发现,仿真体模大部分解剖结构CT值与正常儿童基本一致($P>0.05$)。肝脏、肾皮质和脾脏的体模图像比正常儿童的图像有更高的CNR值(7.08 ± 0.83 vs 5.50 ± 0.48 、 14.18 ± 2.48 vs 10.67 ± 1.05 、 11.84 ± 1.69 vs 8.78 ± 0.53)。仿真体模CT图像噪声与正常儿童接近(12.3 ± 1.47) HU vs (13.7 ± 1.5) HU]。

本研究存在一些局限性:①由于本模型是一个造影剂增强模型,目的是模拟儿童增强腹部CT衰减程度。本研究没有和标准儿童物理体模(Model 704-D)进行对比^[12]。②由于3D打印直写成型技术的局限性,儿童腹部模型没有打印CT图像提取的肋骨部分,这对于模型图像的CT值和信噪比计算会存在差异。③3D打印CT增强腹部体模体内存在少量气泡,在接下去的研究中会优化工艺,解决这个技术问题。

4 结论

综上所述,3D打印直写成型技术构建仿真体模具有可行性,且图像质量和一致性良好。仿真的儿童CT体模能模拟不同患者体型的组织衰减特性,可用于优化CT剂量和重建算法。

致谢:感谢宁波创导三维医疗公司公司宫海波和毛茅对儿童腹部体模设计和打印中作出的贡献。

【参考文献】

- [1] VALVERDE I, GOMEZ-CIRIZA G, HUSSAIN T, et al. Three-dimensional printed models for surgical planning of complex congenital heart defects: an international multicentre study[J]. Eur J Cardiothorac Surg, 2017, 52(6): 1139-1148.
- [2] CHAOWU Y, HUA L, XIN S. Three-dimensional printing as an aid in transcatheter closure of secundum atrial septal defect with rim deficiency: *in vitro* trial occlusion based on a personalized heart model[J]. Circulation, 2016, 133(17): e608-e610.
- [3] LOKE Y H, HARAHSHEH A S, KRIEGER A, et al. Usage of 3D models of tetralogy of fallot for medical education: impact on learning congenital heart disease[J]. BMC Med Educ, 2017, 17(1): 54.
- [4] 孙月花, 彭超群, 王小锋, 等. 直写成型技术: 一种新型微纳尺度三维结构的制备方法[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(6): 1525-1537. SUN Y H, PENG C Q, WANG X F, et al. Direct ink writing: a novel avenue for engineering micro-nanoscale 3D structures[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(6): 1525-1537.
- [5] VAN HAMERSVELT R W, WILLEMINK M J, DE JONG P A, et al. Feasibility and accuracy of dual-layer spectral detector computed tomography for quantification of gadolinium: a phantom study[J]. Eur Radiol, 2017, 27(9): 3677-3686.
- [6] BRENNE K R, FLINDER L I, ALMENNING MARTINIUSSEN M, et al. A liver phantom study: CT radiation dose reduction and different image reconstruction algorithms affect diagnostic quality[J]. J Comput Assist Tomogr, 2016, 40(5): 735-739.
- [7] LAMBERT J W, PHELPS A S, COURTIER J L, et al. Image quality and dose optimisation for infant CT using a paediatric phantom[J]. Eur Radiol, 2016, 26(5): 1387-1395.
- [8] KUMAR R, SHARMA S D, DESPANDE S, et al. Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) plastic-based low cost tissue equivalent phantom for verification dosimetry in IMRT[J]. J Appl Clin Med Phys, 2009, 11(1): 3030.
- [9] JAHNKE P, LIMBERG F R, GERBL A, et al. Radiopaque three-dimensional printing: a method to create realistic CT phantoms[J]. Radiology, 2017, 282(2): 569-575.
- [10] GEORGE E, LIACOURAS P, RYBICKI F J, et al. Measuring and establishing the accuracy and reproducibility of 3D printed medical models[J]. Radiographics, 2017: 160165.
- [11] 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 phantom[J]. Journal of Chongqing Medical University, 2010, 35(7): 1060-1063.
- [12] 王栋, 邱睿, 潘羽晔, 等. 基于物理体模CT图像的1岁儿童体素体模构建[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(4): 757-762. WANG D, QIU R, PAN Y X, et al. Construction of 1-year old child voxel phantom based on CT imaging of physical phantom[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, 50(4): 757-762.

(编辑:薛泽玲)