

## 引文格式:

李修往, 吴家昌, 叶灼峰, 等. 骨组织模型 3D 打印建模中 CT 图像序列选择的策略分析 [J]. 集成技术, 2021, 10(3): 93-99.  
Li XW, Wu JC, Ye ZF, et al. The strategic analysis of CT image series selection in 3D reconstruction and printing of bone tissue model [J]. Journal of Integration Technology, 2021, 10(3): 93-99.

# 骨组织模型 3D 打印建模中 CT 图像序列选择的策略分析

李修往<sup>1</sup> 吴家昌<sup>1</sup> 叶灼峰<sup>1</sup> 吴铭杰<sup>1</sup> 庄伟达<sup>1</sup> 赵仁礼<sup>1</sup> 桑宏勋<sup>1\*</sup> 王 琮<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>(南方医科大学深圳医院骨科中心 深圳 518000)

<sup>2</sup>(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

**摘 要** 骨组织模型的精确 3D 打印对骨科手术前进行手术方案规划、术中定位和术后评估手术效果均有不可替代的作用。然而, 打印等比例的、与患者完全匹配的、精确的骨组织模型涉及术前 CT 影像扫描、3D 建模、3D 打印及打印后处理一系列流程。其中, 对于 3D 打印前的重建, CT 扫描图像序列的选择直接影响打印模型的质量。通过比较骨窗序列和标准序列 CT 图像的建模及打印结果可知, 后者的模型质量优于前者, 表明骨组织模型并非一定要采用骨窗序列。该研究为骨组织模型的精确 3D 打印和建模在 CT 图像序列选择阶段的决策提供了科学依据。

**关键词** 骨组织模型; 3D 打印; 三维重建; CT 图像序列; 标准序列; 骨窗序列

中图分类号 R 687.3 文献标志码 A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20210331001

## The Strategic Analysis of CT Image Series Selection in 3D Reconstruction and Printing of Bone Tissue Model

LI Xiuwang<sup>1</sup> WU Jiachang<sup>1</sup> YE Zhuofeng<sup>1</sup> WU Mingjie<sup>1</sup> ZHUANG Weida<sup>1</sup>  
ZHAO Renli<sup>1</sup> SANG Hongxun<sup>1\*</sup> WANG Qiong<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>(Department of Orthopaedics, Shenzhen Hospital, Southern Medical University, Shenzhen 518000, China)

<sup>2</sup>(Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

\*Corresponding Author: hxsang@smu.edu.cn; wangqiong@siat.ac.cn

**Abstract** 3D printed bone tissue model is important to the pre-operation planning, precision intraoperative

收稿日期: 2021-03-31 修回日期: 2021-04-19

基金项目: 广东省重点领域研发计划资助项目(2020B010165004); 国家自然科学基金面上项目(81871767); 深圳市医疗卫生“三名工程”高层次医学团队项目(SZSM201612019); 深圳市数字外科 3D 打印重点实验室项目(ZDSYS201707311542415); 南方医科大学临床研究启动项目(LC2016ZD036); 深圳市基础研究重点项目(JCYJ20200109150641992)

作者简介: 李修往, 高级工程师, 研究方向为数字外科 3D 打印、手术导航及手术机器人的临床应用及转化; 吴家昌, 副主任医师, 研究方向为骨外科学; 叶灼峰, 硕士研究生, 研究方向为 3D 打印在骨外科学的应用研究; 吴铭杰, 主治医师, 研究方向为骨外科学; 庄伟达, 博士研究生, 研究方向为骨组织工程; 赵仁礼, 硕士研究生, 研究方向为骨质疏松的免疫治疗; 桑宏勋(通讯作者), 主任医师, 研究方向为骨外科学, E-mail: hxsang@smu.edu.cn; 王琮(通讯作者), 研究员, 研究方向为人机交互技术, E-mail: wangqiong@siat.ac.cn.

location and post-surgery assessment. However, to print the same scale bone tissue model of patients depends on a series of processing from the CT image scanning, 3D reconstruction, 3D printing to post processes of the printed model. In the process, the quality of CT images and 3D reconstruction directly affects the precision and quality of the 3D printed model, especially the selection of which CT image series is a key problem that needs to be answered. Through the comparison of 3D reconstruction results between the bone series and stand series of CT images shown that the standard series produce better quality than the bone series. The conclusion is that the standard series may produce reconstructed 3D model of bone tissue in a better way than the bone series. And the conclusion provides a scientific proof for the selection of CT image series during the 3D reconstruction.

**Keywords** bone tissue model; 3D printing; 3D reconstruction; CT image series; standard series; bone series

**Funding** This work is supported by Key-Area Research and Development Program of Guangdong Province, China (2020B010165004), National Natural Science Foundation of China (81871767), Sanming Project of Medicine in Shenzhen (SZSM201612019), Shenzhen Key Laboratory of Digital Surgical Printing Project (ZDSYS201707311542415), Southern Medical University Clinical Project (LC2016ZD036) and Shenzhen Fundamental Research Key Project (JCYJ20200109150641992)

## 1 引 言

3D 打印在医疗领域的应用已成为数字医学发展的一个重要趋势,特别是在骨外科领域的应用越来越普遍。美国食品及药物管理局(FDA)于 2021 年 2 月 17 日宣布批准了 Additive Orthopaedics 公司的个性化 3D 打印距骨植入物用于人道主义用途。其中,特制距骨垫片是世界首个,也是同类首个替代距骨(连接腿和脚的踝关节中的骨骼)的植入物,可用于治疗踝关节缺血性坏死(Avascular Necrosis, AVN)。AVN 是一种严重的进展性疾病,该部位因缺乏血液供应而导致骨组织死亡。采用外科手术治疗晚期 AVN 可能导致患者踝关节无法运动,而采用植入物进行治疗则可避免这一副作用。特制距骨垫片是一种 3D 打印的植入物,可用于距骨置换手术中。其中距骨垫片是根据计算机断层扫描(CT)成像为每个患者单独制作的、适合患者的特定解剖结构。置换手术则是将患者的距骨取下并用钴铬合

金制成的植入物代替。若患者病情恶化需要融合手术,则使用特制距骨垫片进行距骨置换手术可以使患者的踝关节保留运动能力<sup>[1]</sup>。

采用 3D 打印技术在术前通过打印患者的等比例骨组织模型可以进行手术方案的精确规划<sup>[2]</sup>;术中通过等比例骨组织模型的观察可以确保手术的定位精准度<sup>[3]</sup>,从而缩短手术时间,减少病人出血量,减小创口以及术中反复透视的辐射剂量<sup>[4-5]</sup>;术后可以通过打印模型评估手术效果<sup>[6-7]</sup>。在骨组织的 3D 打印建模中,CT 图像是公认的最佳建模数据,其由于较高的空间分辨率和组织分辨率,成为骨组织建模以及后续力学有限元分析、3D 打印的最佳选择<sup>[8-10]</sup>。但打印出等比例的、与患者完全匹配的、精确的骨组织模型涉及术前 CT 影像扫描、3D 建模、3D 打印及打印后处理一系列的流程。前期的 CT 影像扫描和 3D 建模的质量直接影响后续打印出模型的质量和精度,故选择何种序列的 CT 图像进行 3D 打印仍是值得研究的问题。以 GE Revolution CT 为例,该 CT

提供的主要常规重建算法包括 SOFT、STND、DETAIL、CHEST、LUNG、BONE、BONE+ 以及 EDGE。根据检查目的不同, 这些算法对空间分辨率和密度分辨率各有侧重。在实际应用中, 重建方法分为低分辨重建算法和高分辨重建算法。其中, 低分辨重建算法主要表现低对比度的软组织细节, 密度分辨率较高, 可用于增强扫描, 包括 SOFT、STND、DETAIL 及 CHEST; 高分辨重建算法主要表现空间分辨率, 用于展现骨边缘等细节信息, 密度分辨率偏低, 一般不用于增强扫描, 包括 LUNG、BONE、BONE+ 及 EDGE。而现有的文献还没有对不同 CT 序列图像骨组织模型建模效果进行对比研究。本研究在多年的骨组织模型 3D 打印中发现不同 CT 图像序列重建的骨组织模型有一定差异, 特别是骨窗序列常被默认为重建骨组织模型的序列, 而通过笔者对比发现, 在三维建模的效果上骨窗序列并不是最佳选择。

## 2 实验

### 2.1 实验材料和工具

选择骨病患者中的 10 例作为研究对象, 其中颈胸椎、腰椎、骨盆、四肢、足踝各 2 例。该研究获得南方医科大学深圳医院伦理委员会批准(批准号 NYSZYEC20180002)以及患者的知情同意。根据不同临床应用领域的需求, CT 设备的厂家提供了不同的 CT 图像序列, 本团队采用的是 GE 医疗 Discovery CT750 HD, 将患者的手术部位进行 CT 扫描, 扫描数据以 Dicom 3.0 格式存储于光盘。扫描参数如下: 管电压 120 kV, 管电流 349 mA, 层厚 0.625 mm, 无间隔容积扫描, 扫描矩阵为 512 像素×512 像素, 层内像素尺寸为 0.54 mm, 机架倾角为 0°, 图像序列包含标准窗(STND)序列和骨窗(BONE)序列。三维建模软件采用 Mimics Medical 21.0 医用设计软

件(Materialise 公司, 比利时)。建模后采用微软的 3D 查看器 V7.2 查看模型参数及效果。

### 2.2 实验方法

将 10 例骨病患者 CT 扫描后输出的原始 Dicom 3.0 数据拷贝到 Mimics 图像工作站, 点击图像工作站上 Mimics Medical 21.0 医用设计软件菜单栏的“New Project”新建病人项目, 选择并导入 STND 扫描序列和 BONE 扫描序列, 选择软件 Segment 菜单下的“New mask”中的“Bone(CT)”预置分割阈值, 提取出骨骼组织的 Mask, 随后右键点击分割出的骨骼组织 Mask, 再右键菜单栏选择“Calculate Part”即可将分割出的骨骼组织重建为三维结构, 并显示于软件视窗右下角视图内。可通过工具栏或右键菜单选择不同的工具对重建的三维结构进行旋转、平移、缩放、半透明、拆分、切割、合并和修饰等操作, 以调整重建模型达到要求, 模拟手术切除范围。随后分别将 STND 扫描序列和 BONE 扫描序列的重建结果通过软件“STL+”功能导出 STL 格式的建模数据, 用于后续的分析 and 3D 打印。

通过微软的 3D 查看器 V7.2 对 Mimics 21.0 软件输出的 10 例患者(颈胸椎、腰椎、骨盆、四肢、足踝各 2 例)的骨组织 3D 建模的 STL 文件结果进行对比分析。其中, 重点对建模阶段选择 CT 影像的骨窗图像序列和标准窗图像序列进行比较——在软件中输入选定的 CT 序列图像后, 采用相同分割参数和重建算法的前提下对建模效果和打印效果进行对比。具体地, 对比相同条件参数下的重建构成三角形面片数量(表 1)和三角形顶点数量(表 2)、三维显示的效果、重建结果的吻合度和医生目测观察结果(图 1)。目测观察实验由 5 名具有 10 年以上工作经验的骨科医师对建模图像进行主观评价, 采取盲法, 同一台 Mimics 图像工作站, 每位医师阅片时房间亮度和屏幕亮度均一致, 每评完 1 组图像闭目休息 20 s, 以避免因视觉疲劳而产生误差。

表 1 10 例患者重建数据三角面片数量对比

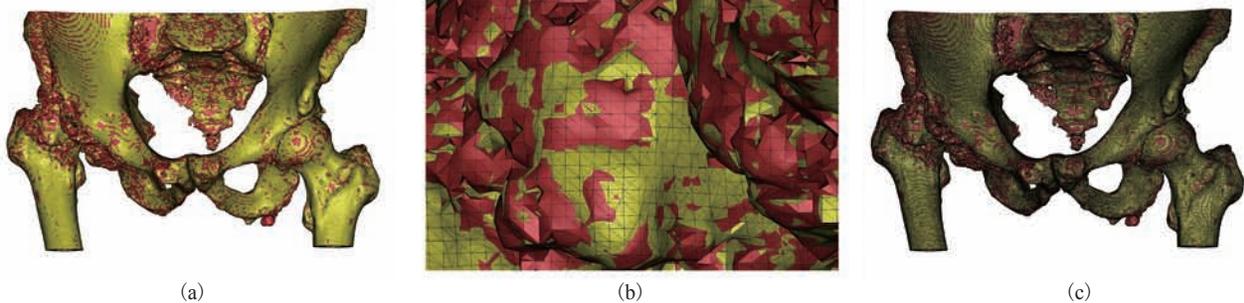
Table 1 3D reconstruction triangles numbers comparison of 10 patients

三角面片数量	计数 (个)		
	标准序列重建	骨窗序列重建	偏差
颈胸椎 1	1 280 404	1 592 363	-311 959
颈胸椎 2	1 030 586	1 241 235	-210 649
腰椎 1	968 546	1 175 324	-206 778
腰椎 2	896 742	1 001 348	-104 606
骨盆 1	3 865 749	4 886 452	-1 020 703
骨盆 2	3 678 752	4 692 715	-1 013 963
足踝 1	324 879	431 568	-106 689
足踝 2	286 574	394 457	-107 883
四肢 1	456 981	563 296	-106 315
四肢 2	409 822	513 219	-103 397

表 2 10 例患者重建数据三角形顶点数量对比

Table 2 3D reconstruction triangles vertex numbers comparison of 10 patients

三角形顶点数量	计数 (个)		
	标准序列重建	骨窗序列重建	偏差
颈胸椎 1	3 841 212	4 777 089	-935 877
颈胸椎 2	3 091 758	3 723 705	-631 947
腰椎 1	968 546	3 525 972	-2 557 426
腰椎 2	2 690 226	3 004 044	-313 818
骨盆 1	11 597 247	14 659 356	-3 062 109
骨盆 2	11 036 256	14 078 145	-3 041 889
足踝 1	974 637	1 294 704	-320 067
足踝 2	859 722	1 183 371	-323 649
四肢 1	1 370 943	1 689 888	-318 945
四肢 2	1 229 466	1 539 657	-310 191



注：图中红色为骨窗序列重建结果；黄色为标准序列重建结果

图 1 结果比较：(a) 重建吻合度比较，(b) 局部细节比较，(c) 三角面片构成比较

Fig. 1 Comparison of results: (a) 3D reconstruction coincide, (b) local details, (c) triangle facets

对于需要 3D 打印的模型, 首先将重建的建模 STL 文件导入 iSLA450 树脂 3D 打印机(中瑞科技有限公司)进行打印前支撑设计和打印格式转换; 然后, 采用光固化立体造型工艺(材料为中瑞科技光敏树脂, 型号 ZR710)进行实物打印(打印结果见图 2); 最后, 去除模型支撑和清洗模型上残留树脂, 并用紫外光固化(99 min)完成打印模型后处理。

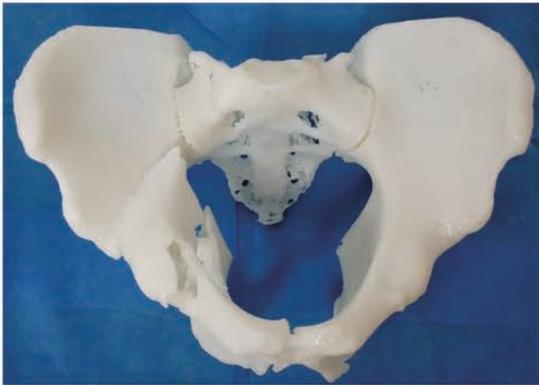


图 2 标准序列重建骨盆打印结果

Fig. 2 3D printed pelvis reconstructed from standard CT image series

### 3 实验结果

通过对 10 例骨组织模型的建模数据采用软件算法分析发现, 采用标准窗序列的建模和打印效果优于采用骨窗序列的。其中, 标准窗序列的建模结果中三角面片的数量和三角形顶点数量显著少于骨窗序列。推测骨窗序列的建模效果和质量下降的原因: CT 厂家在把标准窗的图像序列转化为骨窗图像序列时做了图像锐化处理<sup>[11-12]</sup>, 该处理降低了骨组织周围相邻组织(如软骨、肌腱、肌肉等)的灰度值<sup>[13-14]</sup>, 通过该处理后在二维断层图像上骨组织的对比度有显著提升<sup>[15-16]</sup>(图 3), 便于阅片期间对骨组织病变的快速识别<sup>[17-18]</sup>。但在 3D 建模中, 建模的效果是通过三角面片顶点的相邻图像像素的灰度梯度先计算出法向量, 再将该法向量代入计算机图形学

的光照模型方程计算得到, 而锐化后的图像相邻像素的灰度梯度过大, 导致建模效果上出现明显的颗粒状失真。标准窗由于能够准确地反映骨组织和邻近组织(如软骨、肌腱、肌肉等)的真实灰度梯度过渡关系, 在重建中的法向量计算中能准确体现骨组织和周围组织的真实关系, 建模效果与真实一致, 其重建和打印出的模型在质量和精度上都优于骨窗的。

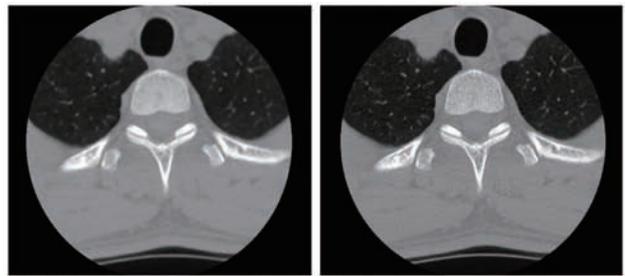


图 3 标准序列(左)与骨窗序列 2D(右)对比

Fig. 3 Comparison between STND (left) and bone (right) series

### 4 结 论

CT 图像的不同序列来源于扫描阶段采用的不同重建算法改变图像噪声的频段, 目的是方便不同组织结构的阅片。其中, 低分辨重建算法可提高各个噪声点之间的相关性, 降低噪声频段, 噪声结构趋于平滑, 如标准序列; 而高分辨重建算法可提高各噪声点之间的差异, 提高噪声频段, 噪声结构趋于锐利, 如骨窗序列。因而低分辨重建算法往往降低噪声, 提高密度分辨力, 降低空间分辨力; 高分辨重建算法提高噪声, 降低密度分辨力, 提高空间分辨力。根据检查目的合理地运用重建算法可以有效提升二维图像质量, 提高疾病检出率。但目前缺乏不同序列对骨组织三维建模效果影响的相关研究。本研究结果表明, 骨组织的 3D 打印建模阶段应选择标准窗的 CT 扫描序列图像作为输入图像, 如选择骨窗序列图像作为建模的输入图像则会导致最终打印模

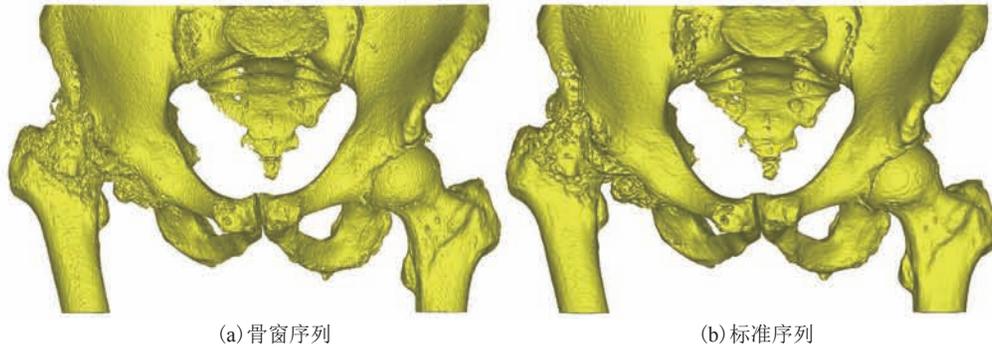


图 4 重建效果(前视图)

Fig. 4 3D reconstruction view (Anterior)

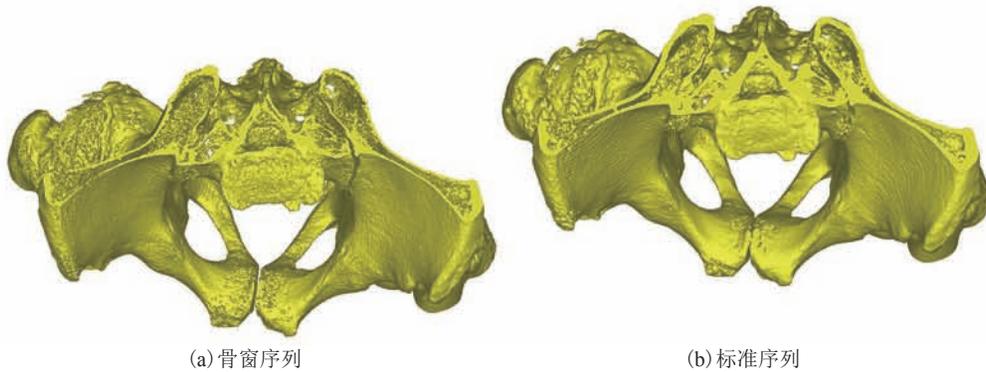


图 5 重建效果(顶视图)

Fig. 5 3D reconstruction view (Top)

型的质量和精度下降(图 4、图 5)。本研究可为从事医疗领域骨组织 3D 打印相关业务在建模阶段选择序列的 CT 图像提供科学依据,避免在骨组织的 3D 打印建模阶段陷入选择骨窗序列的误区。

### 参 考 文 献

- [1] FDA Approves First in the World. First-of-Its-Kind Implant for the Treatment of Rare Bone Disease as a Humanitarian Use Device [EB/OL]. [2021-02-17]. <https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-approves-first-world-first-its-kind-implant-treatment>.
- [2] 吴家昌, 李修往, 方国芳, 等. 3D 打印人工椎体在脊柱肿瘤手术中的设计及初步应用 [J]. 中华创伤骨科杂志, 2020, 22(10): 855-861.  
Wu JC, Li XW, Fang GF, et al. Design and preliminary application of 3D printing artificial vertebral body in spinal tumor surgery [J]. Chinese Journal of Orthopaedic Trauma, 2020, 22(10): 855-861.
- [3] 苏鹏, 孟纯阳. 3D 打印技术在脊柱肿瘤诊疗中的应用 [J]. 济宁医学院学报, 2019, 42(6): 436-440.  
Su P, Meng CY. Application of 3D printing technology on the diagnosis and treatment of spinal tumors [J]. Journal of Jining Medical University, 2019, 42(6): 436-440.
- [4] 郇科, 苏菲, 王飞, 等. 3D 打印技术在骶骨骨折治疗中的临床应用 [J]. 中国医药导报, 2018, 15(24): 67-70, 83.  
Huan K, Su F, Wang F, et al. Clinical application of 3D printing technique in treating sacral fracture [J]. China Medical Herald, 2018, 15(24): 67-70, 83.
- [5] 白博, 白雪岭, 赵小文, 等. 3D 打印在脊柱外科的应用现状与未来 [J]. 中国骨与关节杂志, 2017,

- 6(5): 321-325.
- Bai B, Bai XL, Zhao XW, et al. Application of 3D printing technology in spinal surgery: status quo and future [J]. Chinese Journal of Bone and Joint, 2017, 6(5): 321-325.
- [6] 裴国献. 着力打造 3D 打印在骨科应用的技术平台 [J]. 中华创伤骨科杂志, 2016, 18(1): 4-5.
- Pei GX. Construct a technical platform for application of 3D printing in orthopaedics [J]. Chinese Journal of Orthopaedic Trauma, 2016, 18(1): 4-5.
- [7] Lee A, Hudson AR, Shiowski DJ, et al. 3D bioprinting of collagen to rebuild components of the human heart [J]. Science, 2019, 365(6452): 482-487.
- [8] 赵改平, 蒋庚辛, 杨珣, 等. 基于 CT 图像颈椎三维实体模型重建及 3D 打印 [J]. 中国医疗器械杂志, 2019, 43(6): 451-458.
- Zhao GP, Jiang GX, Yang X, et al. Reconstruction of the three-dimensional model of cervical vertebrae segments based on CT image and 3D printing [J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2019, 43(6): 451-458.
- [9] 杨存, 杨磊, 宗会迁, 等. 基于 3D 打印的人体腰椎骨的三维建模研究 [J]. 中国医疗设备, 2019, 34(9): 90-92.
- Yang C, Yang L, Zong HQ, et al. Three-dimensional reconstruction of human lumbar vertebrae based on 3D printing [J]. Chinese Journal of Medical Equipment, 2019, 34(9): 90-92.
- [10] 刘盾, 李磊, 陈兴春, 等. 3D 打印体外建模辅助微创治疗复杂骨盆骨折 [J]. 局解手术学杂志, 2019, 28(1): 51-54.
- Liu D, Li L, Chen XC, et al. 3D printing *in vitro* modeling for minimally invasive treatment of complex pelvic fractures [J]. Journal of Regional Anatomy and Operative Surgery, 2019, 28(1): 51-54.
- [11] Xu NF, Wei F, Liu XG, et al. Reconstruction of the upper cervical spine using a personalized 3D-printed vertebral body in an adolescent with ewing sarcoma [J]. Spine, 2016, 41(1): E50-E54.
- [12] Mobbs RJ, Coughlan M, Thompson R, et al. The utility of 3D printing for surgical planning and patient specific implant design for complex spinal pathologies: case report [J]. Journal of Neurosurgery Spine, 2017, 26(4): 513-518.
- [13] 原媛, 卢东升, 钟朝辉. 基于噪声功率谱的不同重建类型 CT 图像噪声分析 [J]. 中国医学装备, 2017, 14(4): 32-35.
- Yuan Y, Lu DS, Zhong ZH. The noise analysis of CT imaging based on noise power spectrum of different reconstruction type [J]. China Medical Equipment, 2017, 14(4): 32-35.
- [14] Zhang D, Li XH, Liu B. Objective characterization of GE discovery CT750 HD scanner: gemstone spectral imaging mode [J]. Medical Physics, 2011, 38(3): 1178-1188.
- [15] Verduna FR, Racinea D, Otta JG, et al. Image quality in CT: from physical measurements to model observers [J]. Physica Medica, 2015, 31(8): 823-843.
- [16] Wilson JM, Christianson OI, Richard S, et al. A methodology for image quality evaluation of advanced CT systems [J]. Medical Physics, 2013, 40(3): 031908.1-031908.9.
- [17] Hara T, Ichikawa K, Sanada S, et al. Image quality dependence on in-plane positions and directions for MDCT images [J]. European Journal of Radiology, 2010, 75(1): 114-121.
- [18] Siewerdsen JH, Cunningham IA, Jaffray DA. A framework for noise-power spectrum analysis of multidimensional images [J]. Medical Physics, 2002, 29(11): 2655-2671.