

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2022.07.006

医学影像物理

## 医学图像三维重建系统的研究进展

方威扬<sup>1</sup>, 林东鑫<sup>2</sup>, 寇万福<sup>3</sup>, 黄文华<sup>2,4</sup>, 陈超敏<sup>1</sup>

1. 南方医科大学生物医学工程学院, 广东 广州 510515; 2. 南方医科大学基础医学院人体解剖学国家重点学科/广东省医学生物力学重点实验室/广东省医学3D打印应用转化工程技术研究中心, 广东 广州 510515; 3. 常州集硕医疗器械有限公司, 江苏 常州 213100; 4. 南方医科大学第三附属医院/广东省医学3D打印应用转化创新平台, 广东 广州 510630

**【摘要】**目前二维断层图像已无法满足临床诊疗的需求,而利用医学图像三维重建系统构建人体模型的方法可有效提高临床诊疗的效率。该综述首先对医学图像三维重建软件进行概述,然后介绍目前Mimics、3D Slicer、Simpleware及Amira这4款医学图像三维重建软件用于三维重建及辅助临床诊疗的主要功能,接着对比分析每个软件存在的优势与不足,最后总结医学图像三维重建软件辅助临床诊疗的可行性和有效性,并提出改进方法和未来展望。

**【关键词】**医学图像; 三维重建; Mimics; 3D Slicer; Simpleware; Amira; 综述

**【中图分类号】**R318

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2022)07-0823-05

## Advances in medical image three-dimensional reconstruction system

FANG Weiyang<sup>1</sup>, LIN Dongxin<sup>2</sup>, KOU Wanfu<sup>3</sup>, HUANG Wenhua<sup>2,4</sup>, CHEN Chaomin<sup>1</sup>

1. School of Biomedical Engineering, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China; 2. State Key Discipline of Human Anatomy, School of Basic Medicine, Southern Medical University/Guangdong Provincial Key Laboratory of Medical Biomechanics/Guangdong Provincial Medical 3D Printing Application Transformation Engineering Technology Research Center, Guangzhou 510515, China; 3. Changzhou Geasure Medical Apparatus and Instruments Co., Ltd., Changzhou 213100, China; 4. The Third Affiliated Hospital of Southern Medical University/Guangdong Provincial Medical 3D Printing Application Transformation Innovation Platform, Guangzhou 510630, China

**Abstract:** At present, two-dimensional cross-sectional images cannot meet the needs of clinical diagnosis and treatment, and the method of constructing human model using medical image three-dimensional (3D) reconstruction system can effectively improve the efficiency of clinical diagnosis and treatment. Herein an overview of medical image 3D reconstruction software is given. The main functions of the current 4 kinds of medical image 3D reconstruction software, including Mimics, 3D Slicer, Simpleware and Amira, which are used for 3D reconstruction and assisting in diagnosis and treatment are introduced. Subsequently, the pros and cons of each software are compared and analyzed. Finally, the feasibility and effectiveness of medical image 3D reconstruction software in assisted diagnosis and treatment are summarized, and the improvement methods and future prospects are put forward.

**Keywords:** medical image; three-dimensional reconstruction; Mimics; 3D Slicer; Simpleware; Amira; review

**【收稿日期】**2022-02-20

**【基金项目】**国家重点研发计划(2019YFC0118805);国家自然科学基金(31972915);广东省基础与应用基础研究基金(2020B1515120001);深圳市医疗卫生“三名工程”高层次医学团队(SZSM201612019)

**【作者简介】**方威扬, 硕士研究生, 研究方向: 电子信息, E-mail: 506486730@qq.com

**【通信作者】**黄文华, 博士, 教授, 研究方向: 数字医学及医学3D打印, E-mail: huangwenhua2009@139.com; 陈超敏, 博士, 教授, 研究方向: 生物医学工程, E-mail: 571611621@qq.com

## 前言

目前, 临床医生利用CT、MRI、超声等成像设备获取患者人体组织结构的二维断层图像, 观察并提取相关信息, 然后针对病情给出合理的诊疗方案。然而, 由于二维图像中人体器官组织的形状大小、空间相对位置及毗邻关系比较模糊, 医生难以获得清晰的三维空间立体感, 只能通过观察多幅二维断层图像以及自身积累的临床经验来推断患者病灶的形状大小以及周围组织器官的相对位置等, 并由此做出相应的诊断<sup>[1-2]</sup>。因此, 将二维断层图像转化为三

维图像已成为当代临床诊疗的迫切要求。通过基于医学三维重建技术研发的医学图像三维重建软件,临床医生可以在计算机上重建人体不同组织结构的三维模型,从而更直观和全面地了解医学图像数据,并得出合理的诊疗方案<sup>[3]</sup>。本研究将介绍医学图像三维重建软件,分析目前主要的医学图像三维重建软件的优势与不足,并对医学图像三维重建软件应用于临床诊疗提出展望。

## 1 医学图像三维重建软件的概述

医学图像三维重建软件是以医学图像三维重建技术为基础,在计算机上通过二维图像数据重建人体三维模型并进行定性定量分析等操作的软件。医学图像三维重建是指利用人类的视觉特性,对CT、MRI等数字成像技术的二维数字断层图像序列形成的三维体数据进行处理,将其变换为具有直观立体效果的三维图像,以更好地展示人体的三维状态<sup>[4]</sup>;其涵盖了数字图像处理、计算机图形学、生物医学工程等技术,已广泛应用于医学教学、医学诊断、生物力学分析、模拟外科手术、放射治疗等领域,是当前的一个研究热点<sup>[5]</sup>。

相较于传统二维影像需要医生在脑中重构人体三维关系的条件,医学图像三维重建软件可以将二维图像重建为三维模型,为临床医生提供人体组织器官的三维信息,进一步确保了临床诊疗的准确性与科学性。利用传统的CT、MRI等设备建立的人体组织结构的三维重建模型只能在特定设备下使用,具有一定的局限性,而医学图像三维重建软件可在计算机上实时完成对人体图像数据的三维模型重建,为临床工作提供了一定的便利,提高了临床工作的效率。与传统的建模软件或扫描测试仪获取三维模型相比,医学图像三维重建软件具有真实感强、成本低、图像逼真、市场需求广等特点<sup>[6]</sup>;而且利用医学图像三维重建软件建立的三维人体模型还可用于教学研究、辅助解剖训练与手术模拟评估等。

## 2 主要的医学图像三维重建软件

目前用于医学图像三维重建的主要软件有Mimics、3D Slicer、Simpleware以及Amira等。

### 2.1 Mimics

Mimics软件是Materialise公司发明的一种医学影像控制系统,具有高度整合且易用的3D图像生成与编辑处理功能。Mimics已广泛应用于医学诊断、外科手术模拟、假体定制以及临床教学等。Comanecanu等<sup>[7]</sup>利用Mimics软件进行肱骨骨折复位术的辅助设计与模拟、肝硬化的诊断以及颞下颌关

节假体的定位和定制;Mohammed等<sup>[8]</sup>利用Mimics软件完成下颌骨种植体的个体化定制;Shin等<sup>[9]</sup>使用Mimics软件对尸体心脏进行三维重建用于解剖教学。

Mimics软件拥有图像导入、图像分割、图像可视化、图像配准及图像测量等基础模块。Mimics支持DICOM格式的图像数据以及BMP、JPEG、TIFF等格式文件的导入,其图像分割模块能调整图像的灰度阈值,并对感兴趣区域进行阈值分割、区域生长、形态学操作、布尔操作、空腔填充、蒙版编辑等多项操作<sup>[10]</sup>。蒙版编辑完成后,Mimics的图像可视化模块可以对蒙版进行三维重建,计算三维模型并优化,同时将相应的人体结构三维可视化。通过图像配准模块,用户可以对畸变图像进行校准,或者对CT、MR图像进行比对配准。图像测量模块则提供了距离、角度、密度等信息的测量工具及标注工具。

除此之外,Mimics软件还拥有MedCAD、Simulation、FEA、RP Slice(快速成型切片)以及STL+等可选模块。MedCAD模块允许用户以二维断层图像为参考,通过绘制及轮廓线拟合创建基本的CAD对象,并以IGES格式输出;Simulation模块可用人体测量分析模版进行细部的几何数据分析,还可对三维模型进行坐标变换及切割、合并、分离等编辑修改,常用于手术模拟评估;FEA模块用于模型的有限元分析及生物力学分析,其功能主要有非流形网格划分、有限元体网格创建、网格优化以及赋材质;RP Slice模块能从分割蒙版生成优化的格式文件,并自动生成RP Slice模型所需的支撑结构,可以同时输出多个解剖结构;通过STL+模块输出的多种格式文件可与任何RP机器进行交互<sup>[10]</sup>。

Mimics软件的优点主要有:(1)Mimics拥有丰富便利的图像分割工具箱,可以对心脏、肺组织、血管及骨骼等组织器官进行半自动识别分割,并且在图像进行分割后可通过颜色区分的蒙版快速搜索有缺陷的轮廓部位进行编辑<sup>[9]</sup>;(2)Mimics在建模时无需手动确定节点坐标,可直接自动生成三维模型,大大节省建模时间;(3)Mimics的手术仿真模块可用于手术模拟评估、个体化假体或模板设计等,方便医生模拟操练手术过程、评估术前术后解剖机构的改变并调整手术规划。

Mimics软件存在的不足有:(1)Mimics是商业软件,无法做到像开源软件那样面向大多数使用人群,适用性受到一定的限制;(2)虽然Mimics软件具备强大的图像分割功能,但这些功能均为通用型。曹桂平等<sup>[11]</sup>开展的肝脏模型三维重建的研究表明,Mimics在针对特殊组织器官如肝脏进行分割时,仍

需要较多的人为操作,耗时较长,且建模时间也大大增加。

## 2.2 3D Slicer

3D Slicer 软件是美国国立卫生研究院支持的开放源代码平台,用于医学图像的分析、三维重建可视化以及图像引导治疗研究等方面,适合 Linux、MacOSX 和 Windows 操作系统<sup>[12]</sup>。3D Slicer 多应用于医学诊断、三维打印、手术规划及预演等。Velazquez 等<sup>[13]</sup>通过 3D Slicer 模型对肺部非小细胞肺癌部位进行分割与重建,并进行图像分析与病情诊断;Domínguez 等<sup>[14]</sup>对脑室系统进行三维重建及容积测量,用于临床教学;夏学巍<sup>[15]</sup>总结了 3D Slicer 对于高血压脑出血手术的术前评估、术中辅助及术后预后以及神经导航方面的应用。

3D Slicer 的核心功能为图像分割、图像配准及三维体渲染,核心模块主要有 Volumes、Segment Editor、Models、Markups、Transforms 以及 Volume Rendering 等。Volumes 模块可以显示图像的容积信息,并在 Display 版块调整图像的窗口类型、窗宽窗位及灰度范围;Segment Editor 模块拥有阈值识别分割、手动绘制、擦除、区域生长、平滑、重建模型等多个操作选项,一般用于图像三维建模;在 Models 模块,用户可以对重建的模型在三维及切片显示上进行调整;Markups 模块提供了基准点、直线、角度、曲线、闭合曲线、平面以及感兴趣区域的标注与测量工具;Transforms 模块允许手动配准的空间变换以及多种方式的变换交互,可以对导入时畸变或歪斜的图像进行角度旋转、平移等校正,多用于图像配准;Volume Rendering 模块则可以对体积进行光线投射体渲染,允许对感兴趣区域进行裁剪用于可视化,也支持将体渲染与其他可视化元素(如横截面和三角化曲面模型)合成<sup>[16]</sup>。

3D Slicer 软件的优势主要有:(1)3D Slicer 软件是开源软件,完全不受限制的使用(特别是图像分析方面),可以在多个平台上、面向大多数群体使用;(2)3D Slicer 允许不属于开发团队的用户和开发人员根据自己的喜好修改程序,扩展应用程序的适用范围并引入新的功能,有助于新功能的开发以及软件的更新发展<sup>[16]</sup>;(3)3D Slicer 拥有 100 多个自带模块与 100 多个扩展模块,可供用户根据具体需求选择相应模块对体数据进行处理分析等操作;(4)3D Slicer 拥有阈值、边缘检测、快速行进法等多种图像分割方法,支持用户根据具体需求选择合适方法分割图像<sup>[17]</sup>;(5)3D Slicer 可以三维重建脑沟、脑回、脑室、颅内血管等解剖结构,已被普遍应用于脑部疾病特别是脑出血的定位与辅助治疗,同时还可以对神经

纤维进行三维重建,用以观察、跟踪、测量和分析脑部发育以及脑白质传导束认知功能的发展<sup>[12]</sup>。

3D Slicer 的不足主要体现在:(1)虽然 3D Slicer 定位更为精准,但是由于病变的大小和深度的不同会导致其体表投影产生误差,重建的精度相较于 Mimics 等软件尚有欠缺;(2)虽然 3D Slicer 拥有多种分割功能,但是其在手动分割时对于细节的编辑修改比较粗糙,导致部分区域的分割效果较差,这也间接影响模型的重建效果;(3)3D Slicer 对于除了大脑外的如肺部、肝脏、心脏等其他身体组织器官的后处理而优化的图像采集分辨率仍不够理想,对于大脑部位以外的骨骼、血管、软组织等的应用模块或受病理影响的内脏等器官的图像分析,强大的后处理工具包太少,有必要研究和开发新的方法和工具<sup>[18]</sup>。

## 2.3 Simpleware

Simpleware 软件是 Simpleware Ltd 公司推出的一套数字图像三维重建与有限元分析专业软件,已广泛应用于生命科学、生物力学、材料科学及三维打印等方面。Simpleware 在医学上的应用主要集中于生物力学分析、骨科模型重建以及植入物的设计定制等,如胡晓晖等<sup>[19]</sup>利用 Simpleware 软件重建了全颈椎模型并进行有限元分析,探索颈椎的力学特性;Ma 等<sup>[20]</sup>将 Simpleware 软件用于骨肉瘤切除术的骨肉瘤模型的重建与引导模板的设计。

Simpleware 软件拥有核心图像处理平台 ScanIP,其中包括用于图像处理、图像可视化及图像分割的工具,可完成图像滤波、图像分割、形态学变换等操作,其主要功能是将二维平面序列图像转换为三维重建图像。Simpleware 的可选择模块有用于生成 FE/CFD 网格、进行网格划分优化以及赋材质的+FE 有限元网格生成模块,用于集成 CAD 模型、可结合 ScanIP 将 CAD 模型与三维图像配准的+CAD 模块,用于 IGES 格式模型生成及导出的+NURBS 曲面建模模块,以及通过均质化技术计算模型等效材料属性的+PHYSICS 物理模块。

Simpleware 软件的主要优点有:(1)Simpleware 为用户提供了从图像数据导入到模型重建再到有限元分析等一系列完整的图像三维建模技术路线,其前处理信息可以直接导入到分析求解软件中打开,使得用户的工作流程大幅简化;(2)Simpleware 软件具有针对复杂数据集的可视化功能,能快速自动生成精确的模型,可生成封闭的 STL 模型及高质量的表面网格。与此同时,Simpleware 软件独特的 CAD 与图像数据融合方法确保了图像的形态及保真度,能较好地解决医学三维仿真问题<sup>[21]</sup>。

然而,Simpleware 软件的 ScanIP 模块构建的实体



模型曲面是不均匀的,当图像本身拥有噪声时,可能需要在建立三维实体模型后形成有限元之前进行预处理,这在一定程度上加大了工作量<sup>[22]</sup>。不仅如此,Simpleware软件占用内存过大、操作较为复杂繁琐,且较多应用于石油勘探、地质等工业领域,在医学领域的应用存在一定的局限性<sup>[11]</sup>。

## 2.4 Amira

Amira软件是Visage Imaging公司用于对数据进行可视化及操纵控制的工具软件,能识别包括CT、MRI等图像在内的生命科学和生物医学数据,可利用自动与交互式的分割及建模工具创建人体的三维表面及有限元模型。张晓阳等<sup>[23]</sup>利用Amira软件对小脑核团进行三维重建并测量其体积;季渝军<sup>[24]</sup>通过Amira软件重建肝脏模型,用于肝切除手术的术前评估。

Amira软件的主要功能可以分为处理重构、可视化探索、分析量化这3部分。Amira可以通过数字过滤器及交互式编辑器对图像进行滤波、自动或手动配准、体数据裁剪编辑等操作,并对图像体内的组织和区域进行重构。可视化探索即利用快速交互式及高质量的可视化技术,通过手动或半自动分割技术对图像进行裁剪和配色等操作来探索所需的体数据。Amira还可以对体数据进行面和网格分析,交互式地测量距离、角度等几何数据,并拥有组织材料分析统计、二维或三维线性测量及标注、联合定位分析等功能<sup>[25]</sup>。Amira软件还拥有虚拟现实模块、分子模块、网格模块等扩展模块可供选择使用。

Amira软件包含以下几个优势:(1)Amira直接体绘制所需的具有不同特征的传递函数可以自动生成,也可以使用直观的colormap编辑器进行交互编辑,这在一定程度上扩大了体绘制的应用范围与灵活性,可以满足更多用户的特殊需求;(2)Amira可以对多个数据集同时进行可视化及体积渲染<sup>[26]</sup>;(3)Amira实现的曲面重建方法完全自动,速度快且确保了生成的多边形表示的拓扑正确解,确保高质量有限元网格的划分与优化<sup>[27]</sup>。

与Simpleware软件相似,Amira软件并不是完全应用于医学图像领域的三维重建软件,在医学领域的应用存在一定的局限性。

## 3 医学图像三维重建软件的未来展望

随着数字医学的不断推广与计算机技术的快速发展,医学图像三维重建软件相较于传统的二维图像及特定设备的三维重建,在一定程度上更契合医疗领域的诊疗需求,为临床诊疗提供新的辅助工具,进一步提高临床诊疗的效率。虽然医学图像三维重

建软件目前在医疗领域具有一定的优势和益处,但医疗领域中的问题复杂且多变,三维重建软件在该方面的应用与发展也有待深入研究。

在图像配准方面,医学图像三维重建软件可应用于通过不同模态检索的图像,并进行多模态图像配准,但其测量应用仅限于单模态配准,医生无法观察多模态下解剖结构位置差异<sup>[28]</sup>。在图像分割方面,医学图像三维重建软件对于灰度值与周围对比明显易分辨的组织器官,如骨骼、心脏、肺部以及数字减影造影的血管等拥有自动分割的方法,但对于其他组织器官尚未形成有效乃至高效的自动分割方法。在手术模拟及解剖教学方面,部分软件的功能有待完善。

除了软件功能问题,软件的更新速度能否跟上时代步伐也需考虑在内。在当今的医疗体系下,传统模式培养出来的医生在一定程度上缺乏使用三维重建软件的能力,而通过工程人员使用软件对医学图像进行分割重建以及测量分析得出的结果又不够理想,医学图像三维重建软件的规范使用也面临一定的挑战<sup>[10]</sup>。

针对以上提及的医学图像三维重建软件应用于临床诊疗所存在的不足,可以从以下几个方面进行改善:(1)增加或完善医学图像三维重建软件在多模态配准上的测量分析功能,以满足医生对于多模态解剖位置的观测需求。(2)借鉴新晋的三维重建平台Nextmed<sup>[29]</sup>(可以自动分割不同的解剖结构并生成三维模型),传统的医学图像三维重建软件可以结合人工智能方法进行改进,在自身已有的图像分割方法的基础上,尝试更多地开发面向人体多种组织器官的半自动或自动分割方法,以创建划分区域的蒙版或者进行自动分割重建等操作,在提高图像分割的简便性的同时,提高图像分割的效率,确保三维重建模型的精准度。(3)医学图像三维重建软件也需要在手术模拟评估、解剖教学等功能上加以扩展完善,以适应更广泛的医疗需求。(4)除了对于商业软件的完善与开发,未来的医学图像三维重建软件开发也应更多面向于如3D Slicer的开源软件,允许并鼓励更多用户及开发人员扩展应用程序的适用范围并加以创新,这将大大提高新功能的开发程度,加速未来医学图像三维重建软件的更新发展。(5)加大医学与工学相结合的推广力度,鼓励临床工作人员学习与使用医学图像三维重建软件,做到快速且确切地了解临床工作所需的人体结构信息,从而才能真正地解决相应的临床问题。

医学图像三维重建软件应用于临床诊疗是当今医疗领域精准医疗模式下的有效实践,其针对医学

图像的模型重建及测量分析等功能与临床诊疗及科研需求高度契合。随着计算机技术与医学图像三维重建技术的发展,医学图像三维重建软件必将更多被应用于临床诊疗,在未来具有广阔的发展前景。

## 【参考文献】

- [1] 张文园,刘雪莹,王福. 生物医学图像三维重建技术应用研究进展[J]. 中华实用诊断与治疗杂志, 2016, 30(7): 629-631.  
Zhang WY, Liu XY, Wang F. Application of three-dimensional reconstruction based on biomedical images[J]. Journal of Chinese Practical Diagnosis and Therapy, 2016, 30(7): 629-631.
- [2] Liu S. Optimization of reconstruction of 2D medical images based on computer 3D reconstruction technology[J]. J Digit Inform Manag, 2015, 13(3): 142-146.
- [3] 雷若鸣. 医学图像三维重建技术研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.  
Lei RM. Research on 3D reconstruction of medical image [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [4] Pan Z, Tian S, Guo M, et al. Comparison of medical image 3D reconstruction rendering methods for robot-assisted surgery[C]. 2017 2nd International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM), 2017.
- [5] 王娇,刘洋,张晓玲,等. Mimics软件在医学图像三维重建中的应用[J]. 医疗卫生装备, 2015, 36(2): 115-118.  
Wang J, Liu Y, Zhang XL, et al. Application of Mimics software to 3D reconstruction of medical image[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2015, 36(2): 115-118.
- [6] Karatas OH, Toy E. Three-dimensional imaging techniques: a literature review[J]. Eur J Dent, 2014, 8(1): 132-140.
- [7] Comanecanu RM, Tarcolea M, Vlasceanu D, et al. Virtual 3D reconstruction, diagnosis and surgical planning with Mimics software [J]. Int J Nano Biom, 2012, 4(1): 69-77.
- [8] Mohammed MI, Fitzpatrick AP, Malyala SK, et al. Customised design and development of patient specific 3D printed whole mandible implant[C]. Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Laboratory for Freeform Fabrication and University of Texas, Austin, Texas, 2016: 1708-1717.
- [9] Shin DS, Lee S, Park HS. Segmentation and surface reconstruction of a cadaver heart on Mimics software[J]. Folia Morphol, 2015, 74(3): 372-377.
- [10] 苏秀云,刘蜀彬. Mimics软件临床应用-计算机辅助外科入门技术[M]. 北京: 人民军医出版社, 2011.  
Su XY, Liu SB. Clinical Mimics software tutorial [M]. Beijing: People's Military Medical Press, 2011.
- [11] 曹桂平,张明娇,刘非,等. Arigin 3D Pro 软件与 Mimics 软件三维重建模型的精度研究[J]. 中国组织工程研究, 2018, 22(15): 2384-2389.  
Cao GP, Zhang MJ, Liu F, et al. Accuracy of three-dimensional reconstruction models using Arigin 3D Pro and Mimics software[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2018, 22(15): 2384-2389.
- [12] Zhang X, Zhang K, Pan Q, et al. Three-dimensional reconstruction of medical images based on 3D Slicer[J]. J Complex, 2019, 2(1): 1-12.
- [13] Velazquez ER, Parmar C, Jermoumi M, et al. Volumetric CT-based segmentation of NSCLC using 3D-Slicer[J]. Sci Rep, 2013, 3(1): 3529.
- [14] Domínguez GM, Hernández C, Ruisoto P, et al. Morphological and volumetric assessment of cerebral ventricular system with 3D Slicer software[J]. J Med Syst, 2016, 40(6): 154.
- [15] 夏学巍. 3D Slicer 在高血压脑出血外科治疗中的应用[J]. 华夏医学, 2021, 34(2): 176-180.  
Xia XW. Application of 3D Slicer to surgical treatment of patients with hypertensive intracerebral hemorrhage[J]. Acta Medicinæ Sinica, 2021, 34(2): 176-180.
- [16] Kikinis R, Pieper SD, Vosburgh KG. 3D Slicer: a platform for subject-specific image analysis, visualization, and clinical support[M]// Jolesz FA. Intraoperative imaging and image-guided therapy. New York: Springer, 2014: 277-289.
- [17] Bücking TM, Hill ER, Robertson JL, et al. From medical imaging data to 3D printed anatomical models [J]. PLoS One, 2017, 12(5): e0178540.
- [18] Fedorov A, Beichel R, Kalpathy-Cramer J, et al. 3D Slicer as an image computing platform for the quantitative imaging network[J]. Magn Reson Imaging, 2012, 30(9): 1323-1341.
- [19] 胡晓晖,洪翔,何冰凡,等. 基于 Simpleware 全颈椎三维有限元模型的构建与分析[J]. 医用生物力学, 2014, 29(6): 530-535.  
Hu XH, Hong X, He BF, et al. 3D finite element modeling and analysis of the whole cervical spine based on Simpleware [J]. Journal of Medical Biomechanics, 2014, 29(6): 530-535.
- [20] Ma L, Zhou Y, Zhu Y, et al. 3D-printed guiding templates for improved osteosarcoma resection[J]. Sci Rep, 2016, 6(1): 23335.
- [21] 尹庆水,万磊. Simpleware 软件功能及其在数字骨科的应用-数字骨科入门(三)[J]. 中国骨科临床与基础研究杂志, 2010, 2(1): 72-74.  
Yin QS, Wan L. Simpleware software function and its application in digital orthopaedics-introduction to digital orthopaedics (III) [J]. Chinese Orthopaedic Journal of Clinical and Basic Research, 2010, 2(1): 72-74.
- [22] Li Z, Ma C. Study on methods of constructing three-dimensional model for the femur[C/OL]//2010 3rd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics. Yantai: IEEE, 2010: 1265-1268.
- [23] 张晓阳,王单单,袁武,等. 基于 Amira 5.4 对小脑核团重建和体积测量的研究及其意义[J]. 中国临床解剖学杂志, 2014, 32(6): 666-670.  
Zhang XY, Wang DD, Yuan W, et al. Reconstruction and volume measurement research and value of cerebellar nuclei based on Amira 5.4[J]. Chinese Journal of Clinical Anatomy, 2014, 32(6): 666-670.
- [24] 季渝军. 基于 Amira 软件的三维立体重建技术在精准肝切除术中的应用研究[J]. 影像科学与光化学, 2020, 38(5): 801-806.  
Ji YJ. Application of 3D reconstruction technology based on Amira software in precise hepatectomy [J]. Imaging Science and Photochemistry, 2020, 38(5): 801-806.
- [25] Stalling D, Westerhoff M, Hege HC. Amira: a highly interactive system for visual data analysis [M/OL]//Visualization Handbook. Amsterdam: Elsevier, 2005: 749-767.
- [26] Zhang YZ. Virtual reality technology[M]// Pei G. Digital orthopedics. Dordrecht: Springer Netherlands, 2018: 21-33.
- [27] Zachow S, Zilske M, Hege HC. 3D reconstruction of individual anatomy from medical image data: segmentation and geometry processing [C]. Proceeding of the 25 CADFEM Users Meeting, Germany: Congress Center Dresden, 2007, ZIB-Report (07-41).
- [28] Kalra A. Developing FE human models from medical images[M]// Basic finite element method as applied to injury biomechanics. Amsterdam: Elsevier, 2018: 389-415.
- [29] González Izard S, Sánchez Torres R, Alonso Plaza Ó, et al. Nextmed: automatic imaging segmentation, 3D reconstruction, and 3D model visualization platform using augmented and virtual reality[J]. Sensors, 2020, 20(10): 2962.

(编辑:谭斯允)