

## M3D:面向3D打印的医学图像重建平台

汪子歆<sup>1</sup>, 刘瑞<sup>1</sup>, 蒲根磊<sup>1</sup>, 方曙<sup>1</sup>, 周金华<sup>1,2</sup>, 张存柱<sup>3</sup>

1. 安徽医科大学生物医学工程学院, 安徽 合肥 230032; 2. 安徽医科大学3D打印与组织工程中心安徽省转化医学研究院, 安徽 合肥 230601; 3. 安徽中健三维科技有限公司, 安徽 芜湖 241200

**【摘要】**本研究旨在构建面向3D打印的医学图像3D重建平台,实现医学影像数据的目标分割、3D重建与3D打印所需区域裁剪与输出功能。该软件平台采用Qt设计用户界面,调用ITK、VTK类库处理医学影像数据。软件平台实现了医学影像数据的输入输出及处理、分割与3D重建等功能;在3D打印模型输出前,可实现对感兴趣区域的截取。以肘关节为例,利用该平台可实现模型重建,截取区域输出STL文件并完成3D打印。结果表明,该软件平台操作简单、界面简洁,可以从医学影像数据中重建得到3D模型,并进行3D打印,具有重要的临床应用价值。

**【关键词】**医学图像重建平台;3D打印;可视化

**【中图分类号】**R318;TP391.41

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2022)11-1369-08

## M3D: a medical image reconstruction platform for 3D printing

WANG Zixin<sup>1</sup>, LIU Rui<sup>1</sup>, PU Genlei<sup>1</sup>, FANG Shu<sup>1</sup>, ZHOU Jinhua<sup>1,2</sup>, ZHANG Cunzhu<sup>3</sup>

1. School of Biomedical Engineering, Anhui Medical University, Hefei 230032, China; 2. Anhui Provincial Institute of Translational Medicine, 3D-Printing and Tissue Engineering Center, Anhui Medical University, Hefei 230601, China; 3. Anhui Zhongjian 3D Sci-Tech Co., Ltd., Wuhu 241200, China

**Abstract:** A medical image three-dimensional (3D) reconstruction platform is built for 3D printing, with the functions of object segmentation of medical image data, 3D reconstruction, clipping and output of region required for 3D printing. The software platform uses Qt to design the user interface, calls ITK and VTK class libraries to process medical image data. The functions of import, export, processing and 3D reconstruction of medical image data are achieved via the platform. Furthermore, the region of interest can be clipped before the 3D printed model is exported. Taking the elbow joint as an example, the platform can be used to realize model reconstruction, intercept the region of interest to generate STL files as output, and complete 3D printing. The results reveal that the software platform with simple operations and concise interfaces can be used to reconstruct 3D model from the medical image data and realize 3D printing, with important clinical application value.

**Keywords:** medical image reconstruction platform; 3D printing; visualization

### 前言

传统的医学诊断方式,CT、MR等设备只能产生二维断层扫描图像,医生们通过获取胶片或影像显示屏对患者病灶二维断层序列的图像进行观察和分

析诊断<sup>[1]</sup>;而二维图像不能看到人体内部,通过将二维图像进行三维(Three-Dimensional, 3D)重建后可以便于观察人体结构。在过去几十年里,医学图像处理与分析相关的新算法以及软件被不断提出,目的都在于为诊断提供辅助工具。在国外,20世纪80年代3D VIEWNIX系统被推出,该系统提供了医学图像预处理、二维和3D可视化、图像分析等功能<sup>[2]</sup>;2010年,Materialise公司发明软件Mimics<sup>[3]</sup>,软件功能逐渐全面化且可以进行医学手术规划<sup>[4]</sup>;ITK-SNAP用于3D医学图像分割且被认为是生物医学工程学生学习的最佳软件包<sup>[5]</sup>。在国内,Tian等<sup>[6]</sup>研发了医学图像处理软件3D MED以及MITK&3DMed3平台;Liao等<sup>[7]</sup>开发了E3D。尽管这些软件都非常强

**【收稿日期】**2022-05-20

**【基金项目】**教育部产学合作协同育人项目(202002232021, 202102213032);安徽高校自然科学基金项目(KJ2021A0251);安徽医科大学校级科研基金(2020xkj016)

**【作者简介】**汪子歆,硕士研究生,研究方向:医学影像处理、计算机视觉、软件开发,E-mail: rainie914@126.com

**【通信作者】**周金华,博士,教授,研究方向:医学3D打印、生物医学光学、显微成像方法,E-mail: zhoujinhua@ahmu.edu.cn

大,但是难以掌握。对于临床医生,他们需要简单直观且可以提供与数据交互的软件。

3D 打印技术作为发展较快的主流技术,在临床医学中有越来越多的应用<sup>[8]</sup>。张勇等<sup>[9]</sup>发现3D重建模型和3D打印实体模型对于骨盆术前的参考及测量精度方面具有可靠性,可根据实际需求选择3D打印模型作为骨盆术前规划的参考。梁惠惠等<sup>[10]</sup>研究表明将3D重建联合3D打印技术应用于颅颌面多发骨折治疗提高了复位的精准度,大大减少了手术时间,降低了手术并发症,取得了良好的临床效果。医学图像的3D重建是完成3D打印的必要条件,开发医学影像数据重建软件为重建3D结构和开展3D打印医学模型以及进一步基于医学模型制作手术导板提供了必要的技术支持<sup>[11]</sup>。

目前医院已有的大型医疗设备自带的影像重建平台软件功能强大,但它们需要与设备绑定,需要专业人员操作且价格昂贵。因此,本研究致力于开发一套高效、便捷且可以面向3D打印用于临床应用的医学影像重建平台M3D。

# 1 方法

系统开发平台的搭建首先需要环境配置,然后设计一个医学图像文件读取的系统平台,在系统平台中集成阈值分割和区域生长分割算法。系统平台使用两种方法进行3D重建,对重建获得的3D模型进行后处理,并保存为STL文件,使用3D打印建模软件将3D模型打印出后可应用于医学教育、植入物设计、手术规划领域等方面。

## 1.1 系统的开发环境

本软件平台系统调用医学影像分割和配准库ITK5.1.2 (Insight Segmentation and Registration Toolkit)、影像可视化库VTK8.2.0 (Visualization Toolkit)<sup>[12]</sup>,基于CMake3.18.0在VS2019软件平台进行编译。首先使用Camke软件编译ITK及VTK源代码,再在Qt Creator中进行配置相关开源包及环境变量,最终在Windows操作系统下,搭建本地端软件平台。其中软件界面的设计和开发也均在Qt Creator中实现。系统的主要功能如图1所示。

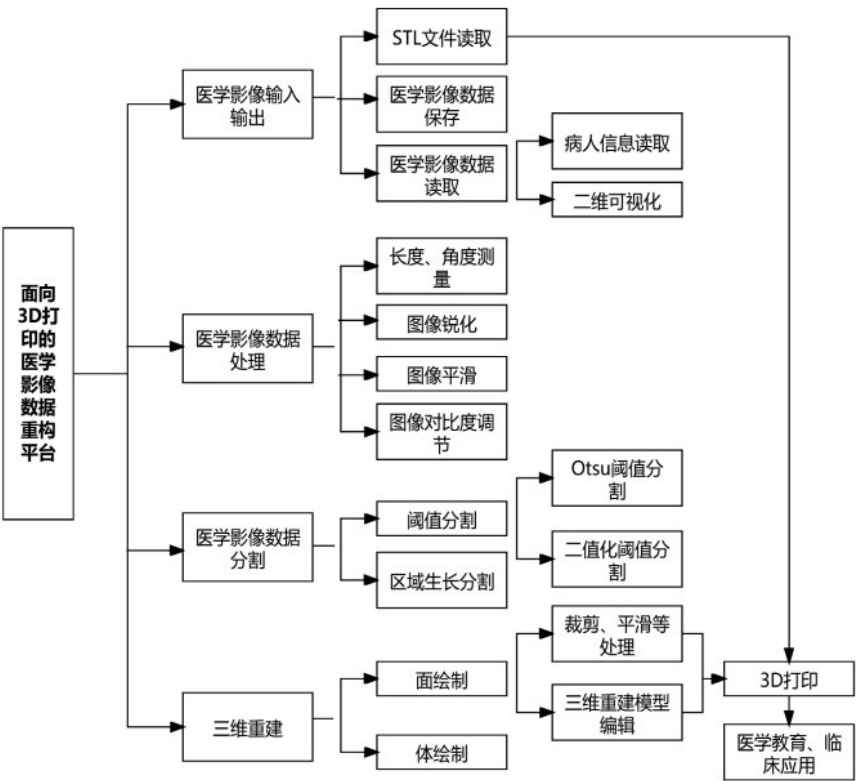


图1 面向3D打印的医学影像3D重建平台系统功能框图

Figure 1 Functions of medical image 3D reconstruction platform for 3D printing

ITK 与 VTK 均为开源软件库,两者都可以跨平台使用,但在安装编译时候需借助CMake软件。ITK不仅可以对医学图像进行处理,并且提供了图像分割与配准的算法平台;VTK提供一个可视化开发工

具,在本软件平台中采用VTK中强大的3D重建图形功能。Qt作为图形开发库,具有丰富的功能,而Qt Creator作为一个平台,可以像Microsoft Visual Studio一样进行桌面应用程序开发。本软件系统通过在Qt

Creator 平台新建一个 Qt 应用程序, 并选择普通窗体模板进行开发, 直接在此平台上通过鼠标拖动控件来进行窗口布局 and 调用。在 Qt Creator 中开发免去了每次测试都需要利用 CMake 编译的复杂性, 有利于本系统软件的开发。

1.2 医学图像的获取

医学数字成像和通信 (Digital Imaging and Communications in Medicine, DICOM) 是医学影像和相关信息在通信过程中遵循的通用规则, 也是应用于 CT、MR、PETCT 等的标准电子影像信息格式<sup>[13]</sup>。DICOM 通过相应的元信息将影像数据与病人的信息关联起来, 患者 (Patient)、研究 (Study)、序列 (Series) 和图像 (Image) 包含了病人的基本资料以及检查的相关信息。本软件平台在读取医学序列图像后, 文件输入和病人信息显示流程图如图 2 所示。

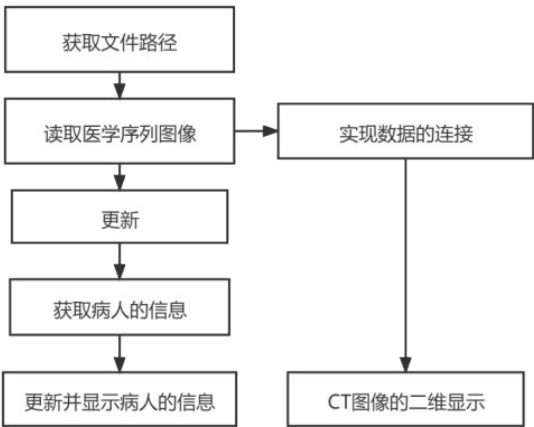


图 2 文件输入和患者信息显示流程图  
Figure 2 Flowchart of file importing and patient information display

在获取到文件的路径后, 由 ITKImageSeriesReader 来进行 DICOM 医学影像文件的读取, 读取后可以通过 ITKGDCMImageIO 中的函数获取病人相关信息。ITK 实现图像数据的读取, 然后通过连接器把 ITK 读取的图像数据传输到 VTK, ITK 到 VTK 的数据流由 ImageToVTKImageFilter 来实现数据的连接。

1.3 分割的算法

图像分割是医学图像处理的重要的环节之一, 通过分割提取感兴趣的区域组织实现目标组织的 3D 重建<sup>[14]</sup>。本软件平台集成了多种医学影像数据分割算法与模块, 将分割后的数据通过 VTK 可视化。

医学影像中感兴趣区域的分割需要通过窗技术实现。窗技术在临床诊断中占据重要地位, 它是 CT 中用于观察不同密度的正常组织或病变的一种显示技术, 该技术通过窗宽和窗位来进行调节, 将人体影像中难以区分的组织从整个范围突出显示并分

割<sup>[15]</sup>。在图像分割之前根据需要重构目标, 对图像使用调窗显示的方法选择适合观察该组织或病变的窗宽和窗位来实现对图像的分割预处理。

本系统平台所用到的医学图像分割算法主要有阈值分割和区域生长分割, 以下主要介绍这两种方法以及实现功能编程所需的一些调整。阈值分割是根据图像像素的灰度值不同来进行分割, 当确定一个阈值时, 可以将图像分割为目标图像和背景图像两部分, 而确定多个阈值可用于复杂的图像<sup>[16]</sup>。具体公式为:

$$G(x,y,z)=\begin{cases}1, I(x,y,z)\geq T\\0, I(x,y,z)<T\end{cases}\tag{1}$$

其中,  $T$  代表阈值;  $I(x,y,z)$  代表像素点  $(x,y,z)$  处的输入图像;  $G(x,y,z)$  代表像素点  $(x,y,z)$  处的输出图像。本软件平台使用 ITK 中的 itkBinaryThresholdImageFilter, 调用其函数 SetUpperThreshold、SetLowerThreshold 来实现二值化阈值分割; 利用 itkOtsuThresholdImageCalculator 类求出最佳阈值后, 再利用滤波器来实现 Otsu 阈值分割。

区域生长算法作为常见的医学图像分割算法, 其基本思想是将具有相似性质的像素集合起来构成区域, 具体分为生长点选取、生长准则判定和确定生长过程停止条件这 3 个部分<sup>[17]</sup>。本系统平台首先调整待分割医学图像的窗宽, 接着通过调用 ITK 类算法层的 ConnectedThresholdImageFilter, 使用 AddSeed 方法将种子点一个接一个地传递给滤波器, 从而进行区域生长的封装和实现。分割完成之后, 通过自定义的 QVTKImageWidget 类中的 SetMaskInputData、SetMaskImageLookup 函数, 将二维视图中分割部分的掩膜加载到软件平台。由于 ITK 不具备可视化功能, 需要基于 VTK 分割后的医学影像数据来显示。当 ITK 数据传入至 VTK 中时, 需要接口进行数据转换, ITK 中的 ImageToVTKImageFilter 提供了这种转换功能。在使用 ITK 及 VTK 二者图像数据互相转换后, 可能会出现图像数据的变化。为了保证二者图像的一致性, 需要设置图像数据的相关参数。

1.4 3D 重建和 3D 可视化

由于传统的 CT、MR 等影像设备只能产生二维断层扫描图像, 通过 3D 重建技术建立 3D 可视化模型可以为医疗诊断分析提供帮助。本系统平台所用到的 3D 重建技术包括体绘制和面绘制。

体绘制是直接利用体数据来绘制图像的技术, 能够通过对不透明度值的控制来反映体数据内部的不同成分和细节, 即显示 CT 图像中的不同器官和组织。本软件平台是基本 VTK 中的



vtkFixedPointVolumeRayCastMapper 类实现体绘制,即固定点光线投影算法<sup>[18]</sup>。根据梯度不透明函数、颜色传输函数和不透明度传输函数,通过设置体数据的属性,调用 VTK 中的 vtkPiecewiseFunction、vtkColorTransferFunction 类来实现相应的梯度不透明效果、颜色值和不透明度。

面绘制有两种方法,一种是通过 CT 图像的不同切片来获取感兴趣的轮廓线,再基于相邻切片的轮廓线来构建三角面片集;另一种是移动立方体法(Marching Cubes)<sup>[19]</sup>,也称为等值面提取算法。后者在 3D 离散数据场中通过线性插值来逼近等值面,即在 3D 离散数据场中找出与等值面相交的立方体,然后通过线性插值计算出立方体边与等值面的交点。本软件平台是基于移动立方体法算法来实现面绘制,在 VTK 中需要建立可视化渲染管线来完成数据的传输,建立 VTK 渲染管线,实现其 3D 重建。

1.5 3D 模型的编辑及输出打印

3D 打印是将所需制作的模型通过计算机以 3D 形式呈现,再采用特定的材料进行逐层打印,直至产品成型的技术。3D 重建是 3D 打印的前提,3D 打印的重建模型应尽量避免以下 3 种情况:(1)模型存在破面;(2)模型表面粗糙;(3)模型存在多余部分,以免无法打印模型实体或者打印出的实体质量不佳,因此本软件平台加入了 3D 模型编辑的模块。

针对以上需要避免的情况,3D 模型编辑模块包括了裁剪掉模型多余的部分、平滑及填补重建后的模型。软件平台利用 vtkClipPolyData 类来设置切割截面,用 vtkImplicitPlaneWidget 来设置一个平面 box 可以通过右键来进行放大缩小处理,从而控制切割体的大小,切割可以通过箭头来调整角度,移动设置的 box 来进行不同位置的切割。获得裁剪后的模型后,利用 vtkSmoothPolyDataFilter 类对模型进行平滑处理,同时利用 vtkFillHolesFilter 类对模型进行填补处理。

本软件平台将编辑后的模型导出为 STL 文件,对导出的 STL 文件进行切片处理,利用光敏树脂材质的材料及 LCD 光固化打印机进行实体打印。利用此方法打印出

的实物表面平滑且完成速度较快。

2 软件平台的功能实现

通过构建本地化的面向 3D 打印的医学影像重建软件平台实现医学影像 3D 可视化以及分割算法和 3D 打印之间的结合。以股骨颈和肘关节序列图像为例,在本软件平台中构建 3D 重建模型,展示其二维 CT 图像测量其骨头的长度、角度,以及 3D 模型编辑、保存为 STL 文件和 3D 打印,从而帮助医生直观地了解患者的健康情况。

2.1 医学图像的读取与预处理

本软件平台的用户界面包括菜单栏、快捷工具栏、三视图与 3D 重建显示区、窗宽窗位参数调节界面这 4 个部分。如图 3 所示,点击菜单栏中的“文件”下的“打开”选项,在本地导入患者的数据文件夹,在主界面的左方视图界面生成图像,左方视图从上到下分别为:横断面、冠状面、矢状面。3 个界面旁均有垂直滚动条可以用来进行 CT 切片数的调节。导入数据后,可以点击菜单栏中的“文件”下的“窗位/窗宽”选项,采用调窗处理对图像进行预处理,图 4 为参数设置模块。读入患者 CT 数据后,不同窗宽下肢骨颈图像可视化结果如图 5 所示。同时,点击菜单栏中的“病人信息”,右上角的文字界面读取患者的信息。在图像预处理部分,通过调用 VTK 中的 vtkImageHybridMedian2D 和 vtkImageConvolve 滤波器来对图像进行平滑处理,调用 ITK 中 itkBinaryErodeImageFilter、itkBinaryDilateImageFilter 和 itkBinaryFillholeImageFilter 等成员及函数来进行形态学处理。

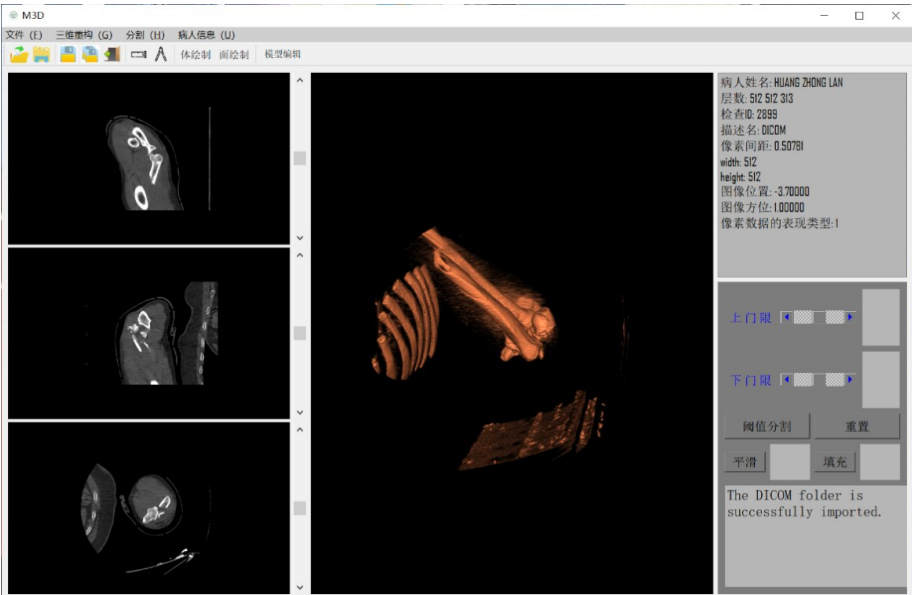


图 3 软件平台界面图

Figure 3 Software platform interface

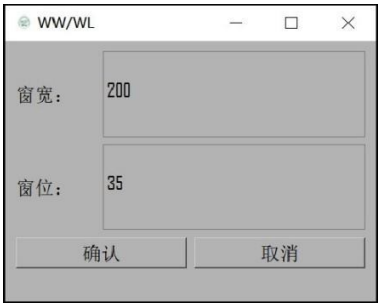


图4 窗宽窗位参数设置  
Figure 4 Parameters settings of window width and window level

2.2 图像的距离、角度测量

本软件平台实现了对二维图像的距离、角度测量,对于骨头组织的测量可以帮助医生清晰地判断骨块是否移位及其移位程度,有利于诊断和及时治疗。使用时,点击工具栏的“距离测量”或“角度测量”的图标,距离及角度测量运用了 VTK 中的 vtkDistanceWidget 和 vtkAngleWidget 类,再调用函数通过响应事件来进行更新计算及显示。测量的角度通常由两条线段组成,通过移动线段的端点就会响应一定事件并对端点信息进行更新及计算,最后显

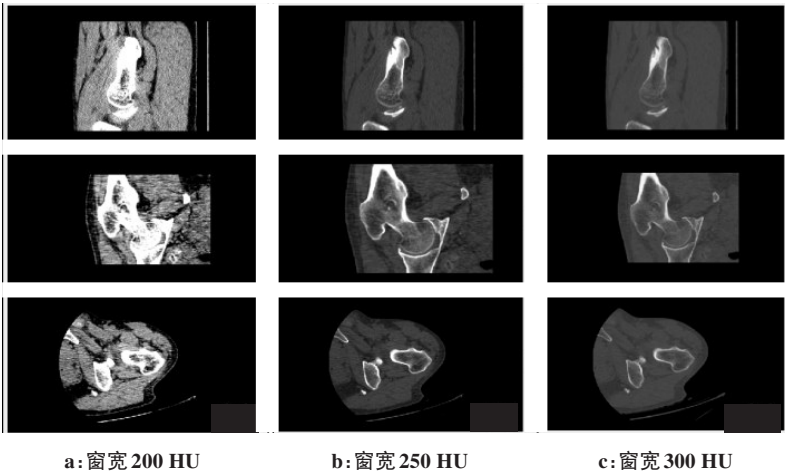


图5 不同窗宽下的图像可视化效果图  
Figure 5 Image visualization under different window widths

示角度结果。对骨颈二维图像长度、角度测量的结果如图6所示。

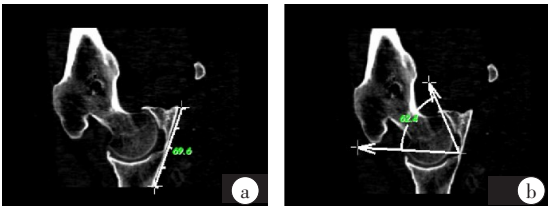


图6 二维CT图像的长度、角度测量图  
Figure 6 Length and angle measurements in two-dimensional CT images  
a: 长度测量图,长度为69.6 mm; b: 角度测量图,角度为62.4°

2.3 分割及3D重建的模型编辑

本软件平台阈值分割的模块如图7所示,点击“阈值分割”即可直接使用OTSU阈值分割算法。OTSU算法是一种自适应的阈值分割方法,可根据图像灰度自动分析最佳的阈值,将图像分成背景和目

标两部分。二值化阈值分割则需要设置上、下门限参数,本软件平台的参数通过滑动水平滚动条进行设置,同时在滚动条右侧文字区显示相应的参数值。选取肘关节的DICOM序列图像进行阈值分割,从图7b、c的分割效果中可分别分割出骨头及皮肤组织。

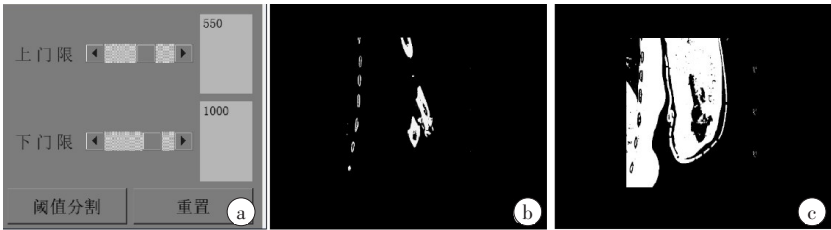


图7 阈值分割模块图  
Figure 7 Threshold segmentation module  
a: 阈值分割参数设置; b: 肘关节的骨头组织分割图; c: 肘关节的皮肤组织分割图

通过手动在医学二维图像中点取分割种子点实现区域生长分割。该模块为鼠标单击感兴趣区域作为种子点,它的坐标显示在左侧表格窗口内,点击“清除”即可清除上一个点击的种子点。对于牙齿

DICOM 序列图像的种子点的设置及分割后的效果如图 8 所示。从图 8b、c 可以看出鼠标点取的种子点(红色点)坐标在参数模块能够对应显示,并且分割掩膜出现在不同视图的每一层面。

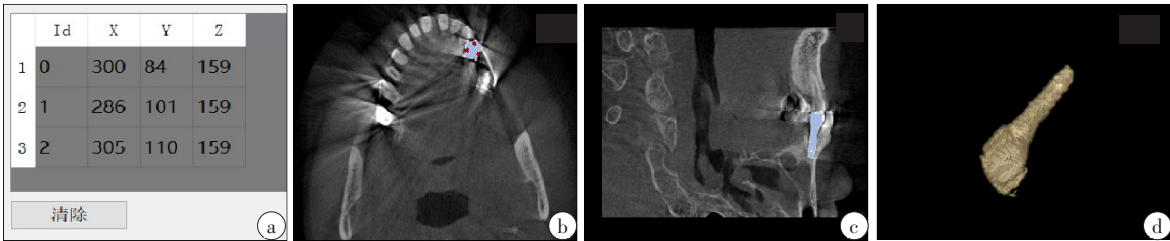
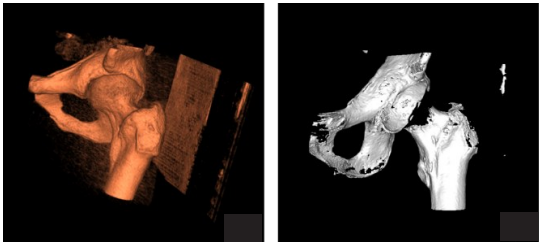


图 8 区域生长分割模块图  
Figure 8 Region growth and segmentation module  
a: 区域生长分割参数设置;b: 种子点选取;c: 其他视图分割掩膜结果;d: 分割后的 3D 重建图

3D 可视化模块包括面绘制和体绘制<sup>[20]</sup>。通过点击菜单栏中的“3D 重建”选项选取重建的方法或者直接点击工具栏中的重建方法进行 3D 影像重建。对股骨颈 DICOM 序列图像进行体绘制及面绘制的效果如图 9 所示。在交互方面,提供了 VTK 中的常用交互,实现了 3D 模型的放大缩小及旋转等功能。



a: 体绘制                      b: 面绘制

图 9 3D 可视化结果  
Figure 9 3D visualization results

考虑到 3D 打印需要对 3D 模型进行编辑,因此在本软件平台上增加了 3D 模型编辑的功能。点击工具栏中的“模型编辑”,会弹出编辑的新窗口。以肘关节的 DICOM 序列图像面绘制重建后的 3D 模型为例,图 10 中视图左侧为切割操作平台界面,右侧为切割完成后的模型部分;图 10 中的右图则为模型导出为 STL 文件后由 3D 打印机所打印出的实体。在 3D 模编辑界面按下“平滑”按钮,可通过手动输入拉普拉斯平滑系数来对模型进行平滑处理;按下“填充”按钮,可对模型进行填充处理。

### 3 讨论

本研究提出了面向 3D 打印的医学影像数据重建软件平台的设计方案。本研究设计的 3D 重建软件系统在



a: 3D 打印视图                      b: 3D 打印实物

图 10 3D 模型编辑界面及 3D 打印实物  
Figure 10 3D model editing interface and an object printed by 3D printer

骨头重建及模型编辑、打印方面取得了一定的成果。本软件平台与董默等<sup>[21]</sup>开发的医学影像计算机辅助分析系统相比,其系统利用 Matlab 编程,更偏向于图像处理,功能较少,而本软件平台界面功能相对于 3D 重建软件功能较为齐全;与孙浩等<sup>[22]</sup>设计开发的基于 VTK 的 3D 医学影像可视化系统相比,其软件模拟了种植体植入牙床板的过程,而本软件系统平台则将重建平台面向 3D 打印,除了添加对 3D 模型编辑处理的过程以外,本软件平台在骨科、口腔科、心脏外科、神经外科等均能进行应用。3D 重建技术与 3D 打印技术相结合医学诊断和手术规划应用中具有重要意义,韩晓燕等<sup>[23]</sup>自制的 3D 打印非共面尼龙模板在老年晚期肺癌患者粒子植入中发挥了重要的临床辅助治疗作用。

本研究开发的软件平台仍存在一定的改进空间。医学影像只能提供单一的组织结构信息,对 DICOM 图像进行分割和重建技术是医学影像 3D 重建软件所需的关键技术,其中医学图像分割也一直都是医学图像处理中的重难点和研究热点。本研究所提出的几种医学图像分割方法,在阈值分割算法方面,人体不同器官有



着不同的CT值,而不同组织之间CT值又存在交集,这就使阈值选取较为困难。如何准确地选择阈值是今后医学图像处理亟需解决的重大问题。在区域生长分割算法方面,马思然等<sup>[24]</sup>设计与开发的肺结节智能检测和3D可视化系统使用基于人工智能的检测技术进行肺结节自动检测,接下来的研究需要将新的分割方法集成成本软件平台,例如基于深度学习的分割算法<sup>[25]</sup>,Ge等<sup>[26]</sup>通过提出了用于2D X-射线图像的X-CTRSNet,可准确实现颈椎CT的3D重建与分割;未来我们会为用户提供更多的分割选项,实现自动分割,从而节省时间。

## 4 结 论

3D重建技术在医学中应用越来越广泛,其可以辅助医生诊断病情,从而极大地提高医疗诊断的准确性和科学性。本研究基于ITK、VTK实现了对医学图像的导入和读取以及医学图像文件头信息的读取,通过阈值分割以及区域生长分割的方法,实现了医生对病灶区域及其他感兴趣的区域进行分割和分析。同时通过体绘制和面绘制两种重建算法,实现了医学图像的3D重建与可视化。本研究构建的软件系统平台实现了对医学影像的半自动分割,重建得到3D模型并能对3D重建模型进行编辑修改;将修剪等处理后的3D模型输出STL文档后,能将3D打印用于医学教育及临床应用。本系统操作界面简单,对于开展医学影像3D重建软件的设计与开发具有临床应用潜能;优化分割算法,将手术规划也加入到软件平台能进一步拓展该软件的功能。

## 【参考文献】

- [1] 闫红华,牟云森.医学影像技术在医学影像诊断中的临床应用分析[J].影像研究与医学应用,2018,2(2): 118-119.  
Yan HH, Mou YS. Analysis of clinical application of medical imaging technology in medical imaging diagnosis [J]. Journal of Imaging Research and Medical Applications, 2018, 2(2): 118-119.
- [2] Udupa JK, Goncalves RJ, Iyer K, et al. 3DVIEWNIX: an open, transportable software system for the visualization and analysis of multidimensional, multimodality, multiparametric images [C]// Medical Imaging 1993: Image Capture, Formatting, and Display. International Society for Optics and Photonics, 1993, 1897: 47-58.
- [3] 方威扬,林东鑫,寇万福,等.医学图像三维重建系统的研究进展[J].中国医学物理学杂志,2022,39(7): 823-827.  
Fang WY, Lin DX, Kou WF, et al. Advances in medical image three-dimensional reconstruction system [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2022, 39(7): 823-827.
- [4] Comanescu RM, Tarcolea M, Vlasceanu D, et al. Virtual 3D reconstruction, diagnosis and surgical planning with Mimics software [J]. Int J Nano Biomater, 2012, 4(1): 69-77.
- [5] Buffinton CM, Baish JW, Ebenstein DM. An introductory module in medical image segmentation for BME students [J]. Biomed Eng Educ, 2022: 1-15.
- [6] Tian J, Xue J, Dai Y, et al. A novel software platform for medical image processing and analyzing [J]. IEEE Trans Inf Technol Biomed, 2008, 12(6): 800-812.
- [7] Liao SH, Tong RF, Dong JX. 3D human mandible reconstruction from CT data [C]//International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design. IEEE Xplore, 2004.
- [8] 刘旭,张宏亮,刘文彬.3D打印技术与产业的发展及前景分析[J].化工管理,2017,1(6): 140.  
Liu X, Zhang HL, Liu WB. Development and prospect analysis of 3D printing technology and industry [J]. Chemical Enterprise Management, 2017, 1(6): 140.
- [9] 张勇,张雁儒,杨云峰,等.三维重建及3D打印技术在骨盆三维特征测量准确性研究[J].中国临床解剖学杂志,2020,38(6): 697-702.  
Zhang Y, Zhang YR, Yang YF, et al. Study on the accuracy of three dimensional reconstruction and three dimensional printing technique in the measurement of pelvic three dimensional features [J]. Chinese Journal of Clinical Anatomy, 2020, 38(6): 697-702.
- [10] 梁惠惠,马宇锋,邢劲松,等.三维重建联合3D打印技术在治疗颅颌面多发骨折中的临床研究[J].中国药物与临床,2020,20(18): 3062-3064.  
Liang HH, Ma YF, Xing JS, et al. Clinical study of 3D reconstruction combined with 3D printing in the treatment of multiple cranial and maxillofacial fractures [J]. Chinese Remedies and Clinics, 2020, 20(18): 3062-3064.
- [11] 陈继民,张成宇,曾勇,等.骨科数字化3D打印技术及应用[J].激光与光电子学进展,2018,55(1): 126-134.  
Chen JM, Zhang CY, Zeng Y, et al. 3D printing technology in orthopedics and its application [J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 126-134.
- [12] 关天民,刘光孟,轩亮.基于ITK和VTK的医学图像分割与重建[J].大连交通大学学报,2019,40(3): 61-65.  
Guan TM, Liu GM, Xuan L. Medical image segmentation and reconstruction based on ITK and VTK [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2019, 40(3): 61-65.
- [13] Shin HB, Sheen H, Lee HY, et al. Digital imaging and communications in medicine (DICOM) information conversion procedure for SUV calculation of PET scanners with different DICOM header information [J]. Phys Med, 2017, 44: 243-248.
- [14] 郑彩侠,张同舟,孙长江,等.图像分割方法在医学领域中的应用[J].中国医疗设备,2018,33(6): 1-5.  
Zheng CX, Zhang TZ, Sun CJ, et al. Application of image segmentation method in medical field [J]. Chinese Medical Devices, 2018, 33(6): 1-5.
- [15] 袁忠武.灵活应用窗口技术的临床价值探讨[J].中国保健营养,2018,28(36): 356-357.  
Yuan ZW. Discussion on clinical value of flexible application window technology [J]. China Health Care and Nutrition, 2018, 28(36): 356-357.
- [16] 潘晓航.医学图像分割方法[J].电子技术与软件工程,2018,3(11): 84-85.  
Pan XH. Medical image segmentation method [J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2018, 3(11): 84-85.
- [17] 刘光孟.基于医学CT序列图像的分割与重建技术研究[D].大连:大连交通大学,2019.  
Liu GM. Research on segmentation and reconstruction technology based on medical CT sequence image [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2019.
- [18] 张玉芳,关天民,刘光孟,等.基于CT数据的医学图像处理系统设计[J].中国医学物理学杂志,2019,36(9): 1055-1062.  
Zhang YF, Guan TM, Liu GM, et al. Design of medical image processing system based on CT data [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2019, 36(9): 1055-1062.
- [19] 刘思奇,张来峰,范立成,等.基于医学图像序列面绘制的骨组织快速成型方法[J].计算机应用,2017,37(5): 1456-1459.  
Liu SQ, Zhang LF, Fang LC, et al. Rapid prototyping method for bone tissue base on medical image surface rendering reconstruction [J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(5): 1456-1459.
- [20] 刘侠,刘欢,王森森,等.改进Marching Cubes算法的椎骨CT图像三维重建与可视化[J].哈尔滨理工大学学报,2019,24(6): 84-92.  
Liu X, Liu H, Wang MM, et al. 3D-reconstruction and visualization of vertebral CT images based on improved Marching Cubes algorithm [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2019, 24(6): 84-92.
- [21] 董默,赵若晗,周志尊,等.医学图像三维重建系统设计与应用[J].软件,2018,39(1): 87-90.  
Dong M, Zhao RH, Zhou ZZ, et al. A design and application of medical image three-dimensional reconstruction system [J]. Computer Engineering and Software, 2018, 39(1): 87-90.
- [22] 孙浩,雒伟群.基于VTK的三维医学影像可视化系统设计与实现

- [J]. 西藏科技, 2019, 5(11): 67-71.
- Sun H, Luo WQ. Design and implementation of 3D medical image visualization system based on VTK[J]. Tibet Science and Technology, 2019, 5(11): 67-71.
- [23] 韩晓燕, 方曙, 吴惠梅, 等. 3D模板技术在老年晚期肺癌患者粒子植入中的临床应用[J]. 安徽医科大报学报, 2021, 56(2): 315-321.
- Han XY, Fang S, Wu HM, et al. Clinical application of 3D template technology in particle implantation of elderly patients with advanced lung cancer[J]. Acta Universitatis Medicinalis Anhui, 2021, 56(2): 315-321.
- [24] 马思然, 杨媛媛, 倪扬帆, 等. 肺结节智能检测和三维可视化系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(9): 177-181.
- Ma SR, Yang YY, Ni YF, et al. Design and implementation of intelligent detection and three-dimensional visualization system for pulmonary nodules [J]. Computer Measurement and Control, 2020, 28(9): 177-181.
- [25] 王国力, 孙宇, 魏本征. 医学图像深度学习分割算法综述[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(12): 37-50.
- Wang GL, Sun Y, Wei BZ. A survey of deep learning segmentation algorithms for medical image [J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(12): 37-50.
- [26] Ge R, He Y, Xia C, et al. X-CTRSNet: 3D cervical vertebra CT reconstruction and segmentation directly from 2D X-ray images[J]. Knowl-Based Syst, 2022, 236: 107680.

(编辑:谭斯允)