

基于CT数据的肺部影像可视化系统设计

付俊泽, 贾茜, 李几雄, 张建敏
江汉大学人工智能学院, 湖北 武汉 430056

【摘要】设计一种基于CT数据的肺部影像二维可视化与三维重建系统,首先对DICOM图像进行解析,分割和标记出肺结节的位置;然后利用CT序列的重采样、面绘制的三维重建、形态学处理等技术,实现肺实质和结节的多视角、多分辨率三维显示;最后设计交互界面,包括图像增强、肺部二维可视化、结节勾勒、肺实质和结节三维重建、旋转、缩放切换视角等功能。实验表明,本系统对于二维图像的可视化和病灶区域勾勒位置清晰、准确,并使三维图像呈现的结节完整且光滑。本系统相较于已有的类似医学处理软件,大幅度提高重建和可视化效率,使医生能够更加快速、精确地观察三维图像,辅助疾病诊断和手术方案制定。

【关键词】肺;CT;可视化;三维重建;医学图像

【中图分类号】R318;TP317.4

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2024)03-0327-08

Design of a lung image visualization system based on CT data

FU Junze, JIA Qian, LI Jixiong, ZHANG Jianmin
School of Artificial Intelligence, Jiangnan University, Wuhan 430056, China

Abstract: A system for achieving two-dimensional (2D) visualization and three-dimensional (3D) reconstruction of lung images using CT data is designed. After DICOM image processing, and lung nodule segmentation and labeling, the multi-view and multi-resolution 3D display of lung parenchyma and nodules is realized using techniques such as resampling of CT sequences, 3D reconstruction based on surface rendering, and morphological processing. Finally, the interactive interface is designed for implementing the functions of image enhancement, 2D visualization, nodule delineation, 3D reconstructions of lung parenchyma and nodules, rotation, zooming and switching the viewpoint. Experimental results show that the system provides clear and accurate 2D image visualization and lesion delineation, while reconstructing nodules in the generated 3D images completely and smoothly. Compared with the existing similar medical processing software, the developed system substantially improves the reconstruction and visualization efficiencies, enabling doctors to observe 3D images more quickly and accurately, and assisting in disease diagnosis and surgical planning.

Keywords: lung; CT; visualization; three-dimensional reconstruction; medical image

前言

目前,医学图像处理与三维重建系统已经成为医学领域中的重要技术手段。在传统的二维CT图像中,器官和组织的形态特征以及它们之间的空间信息难以被准确体现。为了作出诊断,医生不得不依靠其临床经验来推测患者病灶的形状大小和空间关系。然而,随着临床诊疗需求的不断增长,传统

的二维断层图像已经不能够满足医学诊断和治疗的需要,而利用医学图像处理与三维重建系统构建人体模型的方法可以显著提高临床诊疗的效率^[1-2]。本文提出一种肺结节可视化系统,医生可以通过标注结节信息并利用相关算法进行二维或三维可视化呈现,以便更直观、全面地观察疾病,这种可视化方式不仅可以帮助医生更好地理解病情,还可以有效地指导医生进行治疗和手术方案的制定。

1 CT图像二维可视化

CT图像二维可视化模块流程图如图1所示。在CT图像的二维可视化中,读取CT数据后需要解析DICOM和XML文件。通过对这两种文件的解析,可以分别获得医学图像数据、元数据信息以及结构、形

【收稿日期】2023-09-11

【基金项目】武汉市科技计划项目(2020020601012320)

【作者简介】付俊泽,研究方向:图像处理、计算机视觉, E-mail: ed-ia2536@163.com

状信息。解析后对DICOM数据进行调窗处理,使其在可视化时具有更好的可读性和对比度。同时,通过在DICOM数据上标记出CT图像中感兴趣的轮廓信息,可以更直观地呈现CT图像中感兴趣的区域和内容。因此,在CT图像的二维可视化过程中,需要将DICOM和XML文件的解析结果分别进行处理并整合,以共同完成二维可视化效果。

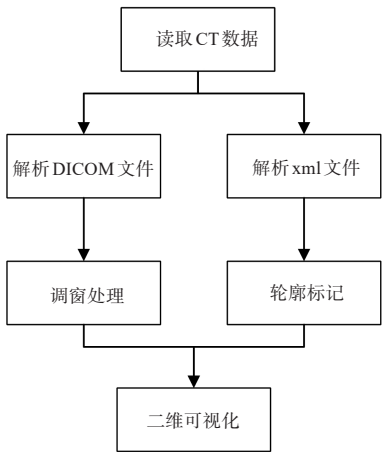


图1 CT图像二维可视化流程图
Figure 1 Flowchart of two-dimensional visualization of CT images

1.1 DICOM文件的读取与解析

CT文件采用DICOM国际标准作为医学图像格式,并对其进行解析。这个过程需从多个层面获取CT图像的信息,并对这些信息进行处理和存储,以便于后续的分析与诊断。在DICOM文件解析与可视化的过程中,需要使用相关的图像分析算法,以获取关键的图像信息,去除冗余信息^[3-6]。本系统采用调窗处理或直方图均值化处理,来突出图像中的目标组织。其中调窗处理是根据窗宽和窗位对CT的像素值进行调整,并对超出窗口范围的像素值进行截断^[7]。对图像中的每个像素值点进行以下操作:

$$n = \frac{ct_a - (c - 0.5 \times w)}{w} \tag{1}$$

其中, n 为像素值, w 为窗宽, c 为窗位, ct_a 为原CT序列的像素值。再对像素值进行截断,使其落在区间 $[0, 1]$ 内:

$$n = \begin{cases} 0, & n < 0 \\ 1, & n > 1 \\ n, & 0 \leq n \leq 1 \end{cases} \tag{2}$$

1.2 结节轮廓的标记

结节的位置、大小及形态等特征对于病变的诊断和分型能够帮助医生更加方便、快捷地观察病例,进一步提高医生的诊断效率^[7]。提取结节轮廓步骤

如下:(1)形态学处理^[8-9]:对图像进行膨胀和腐蚀处理,以去除与肺部结节相连的其他组织;(2)连通域分析:通过8连通分析得到结节区域的位置和大小信息;(3)使用多边形函数,根据得到的结节区域信息,绘制出准确的结节轮廓,以便医生和研究人员进行后续的结节形态、纹理和增强特征等定量分析。

2 肺实质与结节三维重建

2.1 CT图像序列的重采样

在CT、MRI、PET这样的断层扫描数据中, x 、 y 、 z 3个扫描方向像素间距不一致,会导致三维建模结果的失真和模型形态畸变。对于CT图像,根据DICOM标准定义, x 方向对应人体左右方向, y 方向对应人体前(胸)后(背)方向, z 方向对应人体上下(头脚)方向。 x 、 y 方向的像素间距较小、分辨率较高,一般约为0.5 mm; z 方向的像素间距(层间距)相对大一些,通常为1~3 mm。为了便于后续分析,一般在预处理阶段通过图像插值^[9]把像素间距调整为各向同性,也就是 x 、 y 、 z 3个方向的像素间距一致。本数据集 x 、 y 方向的像素间距为1 mm, z 轴像素间距为2.5 mm,需要将 x 、 y 、 z 轴间距都为1 mm需要使用以下步骤。

假设 D 为原医学影像的像素间距, D_n 为重采样后的新像素间距,那么可以通过以下公式来计算调整系数 rf :

$$rf = \frac{D}{D_n} \tag{3}$$

由此,可以计算出重采样后的新数据分辨率大小 S_n :

$$S_n = [S \times rf + 0.5] \tag{4}$$

其中, $[\cdot]$ 表示向下取整。进一步,根据新数据大小以及原始数据大小,可以计算出真实的新像素间距:

$$D_{rn} = \frac{D}{\frac{S_n}{S}} \tag{5}$$

最后,通过重采样,可以将原医学影像调整到新的像素间距下,从而保证图像的分辨率和质量,如图2所示。

2.2 三维可视化实现

工具包在医学图像处理领域被广泛使用,目前VTK提供全面的功能支持,封装了很多优秀的三维数据场可视化算法,让用户可以方便转换和操作数据集,支持二维和三维图形的可视化计算,提供几何计算、体绘制、图像算法。本系统通过VTK可视化工具包^[10-14]来完成医学图像的三维重建。

2.2.1 Marching Cubes面绘制算法 基于三角化面绘制的等值面生成算法^[15],用于实现医学影像的三维

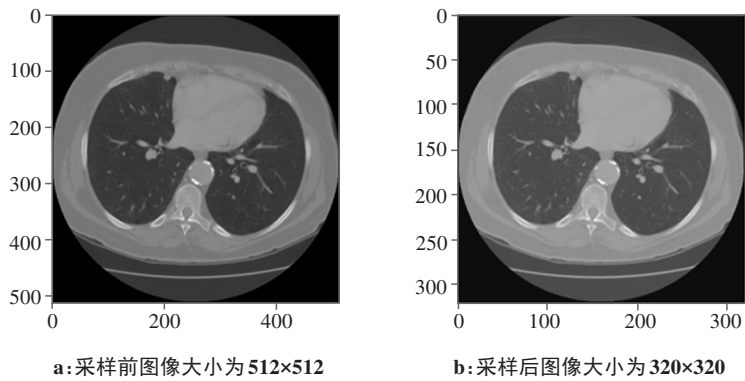


图 2 CT 图像重采样前后对比

Figure 2 Comparison of CT images before and after resampling

可视化。实现步骤如下：(1)将医学影像数据划分为若干等大小的小立方体,然后寻找每个小立方体内的等值面;(2)在等值面与当前小立方体的表面相交时,使用线性插值计算等值面交点,并用这些交点和周围顶点构建三角形面;(3)完成对整个体数据的扫描、交点计算和三角面构建之后,就能够生成医学影像的三维表面,通过调整等值面的阈值可生成不同的三维表面模型。该算法具有快速、高效、可视化直观的特点,在实现医学影像的三维可视化方面具有重要作用。此算法能够快速地生成医学影像的三维表面并进行三维可视化展示。

2.2.2 基于连通域肺实质分割 使用肺实质连通域切割^[7-8]的方法,以实现自动分割医学CT图像中的肺部组织,实现步骤如下：

(1)对重采样后的数据进行处理,使用阈值处理将HU值小于-320的像素设置为0,其余的像素设置为1,按以下公式进行处理：

$$f(x,y)=\begin{cases}1, f(x,y)\geq -320\\0, f(x,y)< -320\end{cases}\tag{6}$$

(2)将二值化数据做26连通分析并进行标签化，

目的是能够区分和标记各个肺部实体。

(3)从每个切片的显示实体中提取最大的肺部实体标记,去除肺部中出现的气泡区域干扰,最终生成肺部二值化掩模。该方法具有去除背景噪声和气泡干扰,生成高精度的肺部二值化掩模的功能。

2.2.3 结节空间位置标记 对肺部CT图像数据进行结节的快速、准确提取,并将提取出的结节信息保存为二维图像^[16-18]。具体流程如下：(1)从DICOM格式的肺部CT图像数据和结节位置信息中提取出需要的信息；(2)对每个切片进行处理,提取出二维平面中的结节轮廓信息,再计算每个轮廓的最大外接圆,生成对应的掩膜,图3所示是某一病例中9张包含结节的切片；(3)根据保存的结节轮廓mask与原CT图像相乘,得到每个包含结节的最大外接圆切片,将每个切片保留结节信息的二维数组沿z轴堆叠起来,并进行重采样形成结节的空間信息,如图4所示；(4)堆叠起来的三维数组做前文提到的二值化并与连通域分析,只保留结节部分,并用面绘制方法将结节标注出来。

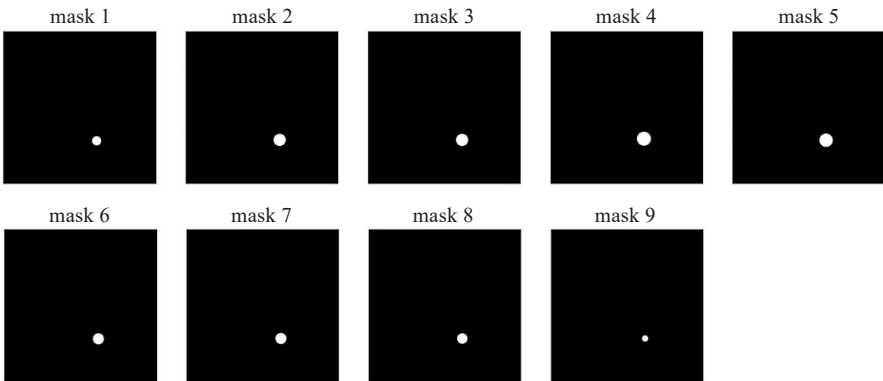


图 3 结节掩膜

Figure 3 Nodular masks

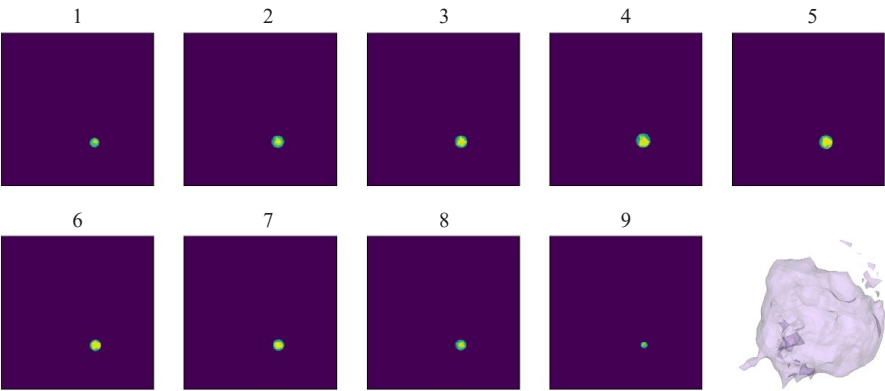


图4 包含结节的切片与结节三维效果图

Figure 4 3D rendering of the nodules and the section containing the nodules

3 系统软件的设计及实验

系统框架图如图 5 所示。系统软件配置采用 Python 语言,在 64 位的 Windows10 系统中,以 Pycharm 为开发平台,结合 VTK、Pyqt5、OpenCV 等开发工具包进行开发。硬件配置为 IntelR CoreTM i7-10750H 2.60 GHz (CPU) 6.0 Gbyte 显存 (GPU)。数据集为 LIDC-IDRI,由美国国家癌症研究所发起收集,目的是为了研究高危人群早期癌症检测。该数据集由胸部医学图像文件(如 CT、X 光片)和对应的诊断结果病变标注组成,共收录 1 018 个研究实例,对于每个实例中的图像,都由 4 位经验丰富的胸部放射科医师进行两阶段的诊断标注^[19-21]。

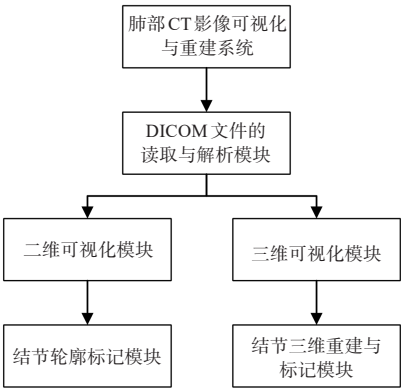


图5 系统框架图

Figure 5 System framework

3.1 二维 DICOM 图像的处理和可视化模块

二维 CT 图像的处理和显示模块中,标签展示区中设置 3 列:第 1 列为标签代码(tab),第 2 列为标签名称(tagName),第 3 列为对应标签的值(Value)。同时,在图像展示区也可显示对应的二维图像,如图 6a 所示。为了对不同组织进行区分,CT 诊断中使用不

同的 CT 值表示不同密度的组织,这些 CT 值也称为 Hounsfield(HU)单位。展示的二维图像是将像素值转为 HU 值后的图像。当切换至图像展示区的“CLAHE 处理后”时,可以看到经过限制对比度的自适应直方图均衡后的图像,有助于阅片人员更清晰、准确地分辨病灶,如图 6b~6c 所示。

3.2 结节轮廓的标记模块

结节轮廓的标记模块使用 OpenCV 开发库,通过以下步骤进行标记:(1)形态学处理:为解决掩膜中可能存在与肺壁相连的结节影响肺部轮廓提取的问题,该方法通过将肺部分为左右两个部分分别进行凸包处理,并进行膨胀和腐蚀,最终得到剔除与肺壁相连结节的肺部掩膜;(2)连通域分析:在二维切片上通过阈值处理获取肺部区域的掩膜,在此基础上进行连通性分析,去除掩膜面积小于 30 mm²或离心率大于 0.99 的区域,并在三维空间中保留掩膜中未连接边缘部分和体积在 0.68~7.50 dm³区域,以得到准确的肺部掩膜^[22-23];(3)勾勒结节轮廓:通过读取 DICOM 图像的 XML 文件中结节区域<roi>中的结节轮廓坐标信息,绘制出准确的结节区域轮廓,为后续的肺癌诊断提供帮助。结节标记结果如图 7 所示,图中选取部分病人含有结节的切片。

3.3 CT 图像的三维可视化模块

三维可视化模块集成 4 个不同的功能:可调整等值面的三维可视化、肺实质分割、显示结节、标记结节。三维可视化窗口如图 8 所示。

3.3.1 可调整等值面功能 在三维可视化模块中,勾选“调整等值面”复选框,并在其右侧的文本框中输入所需的等值面阈值,随后点击“提交”按钮。这一功能允许用户根据其需要,得到不同的表面模型。等值面是指一组等值的数值,在三维图像中,等值面是由三维曲面构成的,表现为具有相同数值的三维曲面,在 CT 图像中每个点的数值即为 HU 值。用户

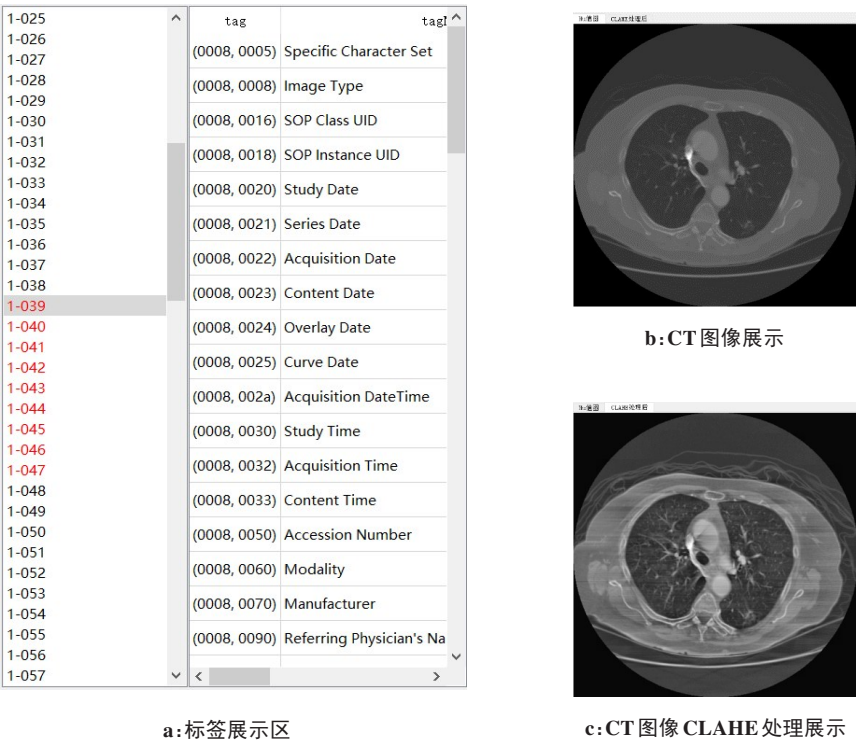




图9 不同等值面效果图
Figure 9 Results with different isosurfaces

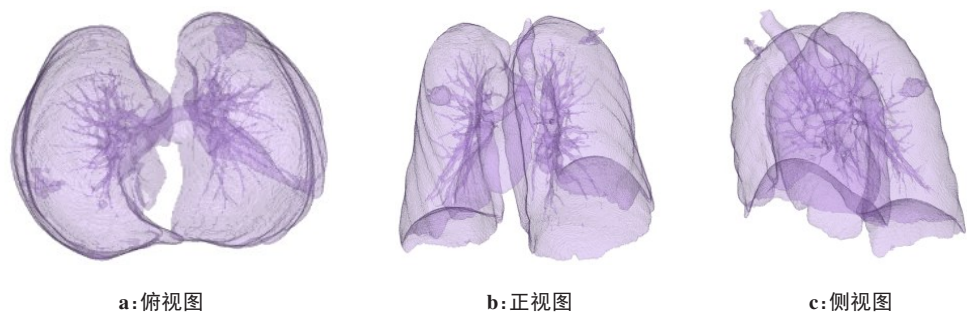


图10 肺实质切割三维视图
Figure 10 3D views of lung parenchyma segmentation

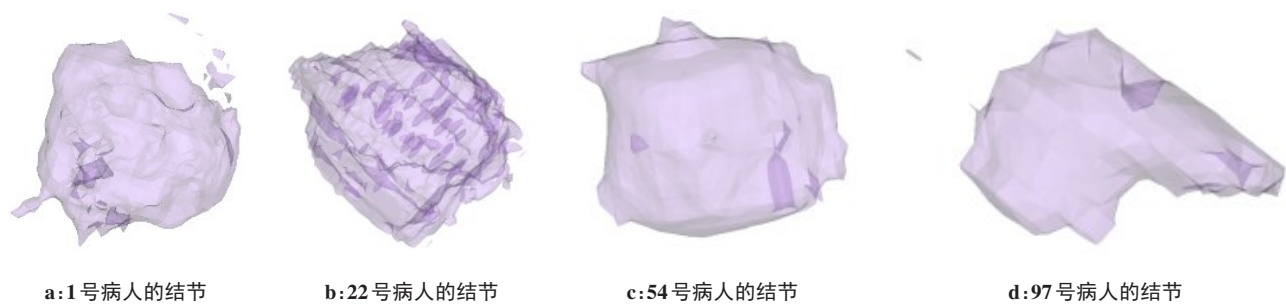


图11 结节三维视图
Figure 11 3D views of nodules

明确地掌握结节的位置、大小、形态等信息,可以帮助医生快速准确地评估肺癌的形态特征,并且提高疾病诊断的准确性。标记结节后三维视图如图12所示。

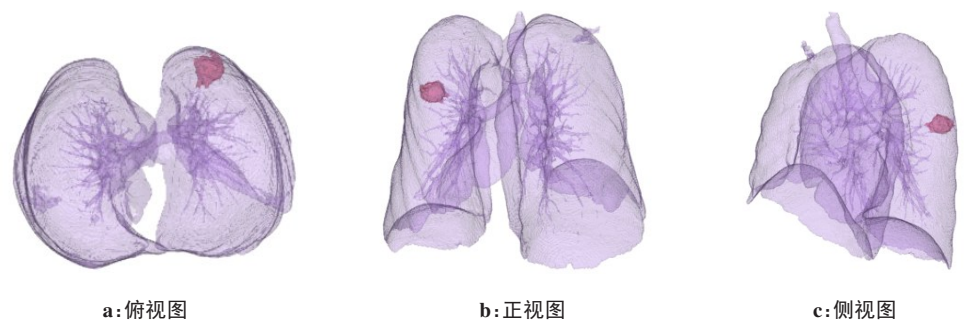


图12 标记结节后三维视图
Figure 12 3D views after nodule labeling

3.4 实验分析结果及算法效率分析

在二维可视化模块中,实现了以下功能:(1)在标签区中,用户可以选择任意一个切片,并将其在右侧的窗口中显示出来,这种交互式的操作使得用户可以方便地查看和分析DICOM图像中的不同切片;(2)针对具有结节的切片实现结节轮廓的标记功能,用户可以使用标记工具在切片上绘制结节的轮廓,以便于后续的检测和分析。

在三维可视化模块中,实现了以下功能:(1)通过调整等值面的设置,用户可以观察到不同阈值下的三维表面模型,这种功能使用户能够根据自身需求选择合适的等值面,并以三维形式展示CT图像中的结构;(2)通过肺实质分割功能,能够精确地将肺实质从CT图像中分离出来,这为进一步的结节分析和疾病诊断提供重要的基础;(3)在结节显示功能方面,呈现出了平滑而清晰的结节三维模型,通过将检测到的结节进行适当的表面渲染,能够将结节的形态特征以逼真的方式展示给用户,这有助于医生们更好地理解和分析结节的形态和分布;(4)在标记结

节的功能中,实现了准确地标记出结节的空间位置并用红色进行显示,这项功能对于结节的定位和跟踪是至关重要的,使医生能够明确地看到结节的位置,并在后续的研究和治疗中参考这些标记结果^[24-26]。

对不同的病人标记结节的功能进行分析,结果如表1所示,表中列出6例病人肺部三维重建所需的DICOM文件数量、顶点个数、三角面个数、模型文件大小、数据处理时间和三维重建时间。根据表1提供的数据分析,本系统所使用的肺部三维重建模型具有空间效率高、重建速度快且细节保留较好的优点。从数据处理时间来看,本系统以高效的方式处理了足够的数据量,并在较短时间内完成三维重建。同时,本系统在三角面个数和顶点个数方面也表现出明显的性能优势,具有更加精细的细节呈现能力。此外,模型文件大小也较小,说明本系统采用合适的算法,在保证数据质量的前提下最大程度地减少存储空间占用。

表1 不同病例的三维模型参数及处理时间

Table 1 Parameters and processing time of the 3D model for different cases

病人编号	DICOM文件数量	顶点个数	三角面个数	模型文件大小/MB	数据处理时间/s	三维重建时间/s	总时间/s
1	133	446 462	891 780	0.044	29.343	19.158	48.501
2	140	647 040	1 292 642	0.058	40.638	27.899	68.538
3	133	444 615	887 490	0.044	24.214	18.649	42.863
4	133	791 271	1 575 228	0.089	29.555	32.695	62.250
5	133	576 897	1 152 252	0.058	35.061	25.041	60.102
6	245	749 874	1 498 132	0.089	43.070	31.423	74.494

4 结 语

本文开发一套集CT影像分割、重建、二维可视化与三维重建功能的医学图像处理系统。该系统的特色包括:(1)能够同时进行CT影像的二维可视化与三维重建;(2)重建出的三维模型可以将正常组织与病灶区分开,并且可自由缩放与旋转视角,便于用户更加清晰地观察;(3)系统较常用的医学图像处理软件Mimics具有更快的处理速度,使用户能够快速浏览和处理医学图像,以辅助医疗诊断和科研分析;(4)本系统使用的二维可视化与三维重建的方法也可迁移到其他部位的结节疾病辅助诊断中。对于其他部位疾病的医学影像重建和可视化研究,也是今后的研究工作。

【参考文献】

[1] 刘子成, 杨赫, 王鸿亚, 等. 基于三维重建的影像学分析在部分实性肺结节中的研究进展[J]. 中国肺癌杂志, 2022, 25(2): 124-129.
Liu ZC, Yang H, Wang HY, et al. Research progress in 3D-reconstruction based imaging analysis in partial solid pulmonary nodule[J]. Chinese Journal of Lung Cancer, 2022, 25(2): 124-129.

[2] 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.

[3] 罗旋. 基于DICOM序列影像的肺结节检测算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
Luo X. The study of pulmonary nodule detection algorithm based on DICOM sequence image [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.

[4] 赵媛媛, 雷建锋, 王战京. 基于DICOM动态图像的Web浏览系统开发[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(4): 151-154.
Zhao YY, Lei JF, Wang ZJ. Development of Web browsing system based on DICOM dynamic image[J]. Experimental Technology

- and Management, 2018, 35(4): 151-154.
- [5] Nguyen VS, Tran MH, Vu HM. A research on 3D model construction from 2D DICOM [C]//International Conference on Advanced Computing and Applications. IEEE, 2017: 158-163.
- [6] 任正伟, 宋晓梅, 黄素真. 基于ITK、VTK、Qt的DICOM文件的读取与显示[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(11): 62-66.
Ren ZW, Song XM, Huang SZ. Read and display of DICOM files based on ITK, VTK, Qt [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(11): 62-66.
- [7] 王贝. CT图像的肺结节检测与分割[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
Wang B. Research on pulmonary nodule detection and segmentation using CT images [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [8] 刘莹芳. 基于CT图像的肺实质分割方法研究[D]. 昆明: 云南大学, 2019.
Liu YF. Research on pulmonary parenchyma segmentation method based on CT image [D]. Kunming: Yunnan University, 2019.
- [9] 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.
- [10] 胡战利. 基于VTK的医学图像三维重建及交互研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
Hu ZL. Three-dimensional reconstruction and interaction research of medical images based on VTK [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008.
- [11] 陈文驰. 基于VTK的医学图像三维重建系统研究与实现[D]. 西安: 长安大学, 2016.
Chen WC. Research and implement of medical image threedimensional reconstruction system based on VTK [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [12] 苏瑞朋, 李益杰, 尹小芳, 等. VTK在医学图像处理中的应用[J]. 信息与电脑, 2018, 12(4): 107-109.
Su RP, Li YJ, Yin XF, et al. Application of VTK in medical image processing [J]. China Computer & Communication, 2018, 12(4): 107-109.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 万里涛. 基于等值面提取的医学数据三维重建系统的设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
Wan LT. Design and implementation of medical data 3D reconstruction system based on isosurface extraction [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [16] 尹哲. 医学图像三维重建系统的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
Yin Z. Design and implementation of medical image 3D reconstruction system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [17] 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.
- [18] 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 & Software, 2018, 39(1): 87-90.
- [19] 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.
- [20] 闫洪波, 王梦薇, 徐洋, 等. 基于Matlab GUI的医学图像处理仿真系统设计[J]. 计算机应用, 2020, 40(S1): 226-230.
Yan HB, Wang MW, Xu Y, et al. Design of medical image processing simulation system based on Matlab GUI [J]. Computer Applications, 2020, 40(S1): 226-230.
- [21] 黄春桦. 医学影像三维可视化系统设计与关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
Huang CH. Design of a medical visualization system and research on some key techniques [D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2005.
- [22] Wu F, Tian SP, Jin X, et al. CT and histopathologic characteristics of lung adenocarcinoma with pure ground-glass nodules 10 mm or less in diameter [J]. Eur Radiol, 2017, 27(10): 4037-4043.
- [23] 赖婵, 李儒琼, 张嘉瑜, 等. 最大径 ≤ 1 cm肺小结节螺旋CT靶扫描及重建的良恶性判断分析[J]. 中国CT和MRI杂志, 2020, 18(6): 41-42.
Lai C, Li RQ, Zhang JY, et al. Benign and malignant judgment of targeted spiral CT scanning and reconstruction techniques in small pulmonary nodules of 1 cm or less in maximal diameter [J]. Chinese Journal of CT and MRI, 2020, 18(6): 41-42.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 王剑, 陈清勇, 郁东伟, 等. 基于Mimics软件构建多种肺部疾病的三维模型[J]. 浙江医学, 2021, 43(13): 1432-1434.
Wang J, Chen QY, Yu DW, et al. Construction of 3D model of pulmonary diseases based on Mimics software [J]. Zhejiang Medical Journal, 2021, 43(13): 1432-1434.

(编辑:陈丽霞)