

基于CT影像的人体心脏三维重构

韩伟¹, 李志雄¹, 郝英剑¹, 冯慧敏¹, 李仁年¹, 曲占西才让¹, 强彦^{1,2}

1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 东南大学能源与环境学院, 江苏 南京 210096

【摘要】三维重构是研究心脏血流机理及特性等问题的有效手段,本文基于CT断层扫描数据,利用Mimics处理工具对心脏进行三维重构,并对左心室优化模型进行偏差分析,优化改变了重构模型的粗糙度,对左心室结构的影响较小为后续探究心脏内部血流模式及特性、血液生理学参数异常和组织结构病变提供了基础研究。

【关键词】心脏; 三维重构; CT影像; 模型优化; 偏差分析

【中图分类号】R318

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2023)02-0170-06

Three-dimensional reconstruction of the heart from CT images

HAN Wei¹, LI Zhixiong¹, HAO Yingjian¹, FENG Huimin¹, LI Rennian¹, QU Zhanxicairang¹, QIANG Yan^{1,2}

1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China

Abstract: Three-dimensional reconstruction is an effective means to study the mechanism and characteristics of cardiac blood flow. Based on CT scanning data, Mimics is used to carry out the three-dimensional reconstruction of the heart, and a deviation analysis is conducted on the left ventricular optimization model. The optimization changes the roughness of the reconstruction model, and has little impact on the left ventricular structure. The study provides a basis for the follow-up study on cardiac blood flow pattern and characteristics, abnormal blood physiological parameters and tissue structural lesions.

Keywords: heart; three-dimensional reconstruction; CT image; model optimization; deviation analysis

前言

心脏位于人体内部,在最早期的医学领域采用解剖尸体的方式研究心脏,随着计算机技术的发展,医学影像与计算机技术相结合,通过X射线扫描或者引发粒子共振,再使用接收器接收信号,最后计算机处理信号并转化为更加直观的三维医学图像,满足了人们对于心脏内部跳动规律以及流场流动规律等方面的研究。Dean-Ben等^[1]基于泊松型积分将模型离散化,建立了一种以光声产生的超声波作为吸收的光能量分布函数,运用光声成像对切除的小鼠心脏进行三维重构。Mina等^[2]提出一种基于矩阵补全理论,对动态超声图像的时间超分辨率进行优化,使

得心脏二维和三维成像的重构精度更高,重构偏差更低。Martino等^[3]将机电建模和超声纹理相结合,对心脏三维重构中心脏变形和应变进行检测,让心脏三维重构结构更加具有真实性。Laschinger等^[4]与西门子共同开发了新的基于心血管核磁共振成像(MRI)软件,并在临床上初步实验,能够较好地重构出人体心脏三维模型。Nölker等^[5]使用心脏CT断层扫描的方法,在心脏重建的过程中将心脏与其他组织进行有效剥离,是目前最优的基于旋转血管的术中成像方式。Chang等^[6]使用正交投影的方法,将心脏分成多层薄片,通过对心脏薄片的三维重建进而完成对整个心脏的三维重建。

在国内,对于心脏三维重构方面的研究逐渐深入。王章玉等^[7]使用改进型区域生长法,以灰度差为主要选取原则,使用一种带有人机交互的半自动方法,对心脏三维重构模型的精确性进行优化。张银丽等^[8]使用三维斑点追踪成像(3D-STI)技术,对透析患者的心脏进行三维重构,并与使用2D-STI技术重构的心脏模型进行比较,得出了3D-STI技术可以更好地模拟心脏在病变后情况,并将此技术进行推广。

【收稿日期】2022-10-11

【基金项目】国家自然科学基金(51966010)

【作者简介】韩伟,博士,教授,研究方向:流体机械及工程, E-mail: hanwei@lut.cn

【通信作者】强彦,博士,副教授,研究方向:流体测量与控制, E-mail: qiangyan0206@163.com

徐进^[9]对心脏冠脉CTA进行三维重构时,采用了面绘制和体绘制技术,并开发一款三维可视化软件,可以对重构后的心脏模拟进行去噪声处理。王子荣等^[10]对非瓣膜性心房颤动患者进行手术之前,使用心电门控心脏CT造影技术以及经食管超声心动图检查获取患者心脏数据,进行了心脏重构。蔡丹丹^[11]基于VC++技术和MITK软件对目前的心脏三维重建技术进行优化,通过重新编写算法使心脏重建技术更加成熟,功能更加完善。宫霞英^[12]使用遗传算法对心脏重新进行了数学建模,实现了对已知问题的标定求解,心脏三维建模更加准确。

通过文献可以看出,目前心脏研究领域对心脏三维重构的研究已经非常深入,心脏重构模型的精度和准确性都得到了保证。但对于能够进行动态仿真计算的心脏系统建模较少,本文主要基于CT断层扫描数据,利用Mimics处理工具对人体心脏进行三维重构,并将优化后的模型进行偏差分析,为后续研究左心室以及心脏内部血液流动特性奠定基础。

1 心脏CT重构算法

目前主要使用面绘制和体绘制两种方法对医学图像进行重构,面绘制主要是显示三维物体外表面的重构方法^[13-14]。体绘制主要利用数据场对三维物体进行数字化重构。体绘制算法现主要包括光线投影法、抛雪球法、错切形变法、基于3D的纹理映射等方法^[15-16]。本文中,Mimics主要使用体绘制算法对心脏进行三维重构。Mimics中体绘制所使用的数据主要是指在有限空间中,对一种或多种物理属性的一组离散采样,可表示为: $f(x)$ 、 $x \in R^n$, $\{x\}$ 是 n 维空间的采样点(sample point)的集合。采样空间的维数为3时($n=3$),则称 $f(x)$ 为三维(3D)体数据;则当 $n>3$ 时,则称 $f(x)$ 为高维体数据。医学影像数据为三维体数据。因此,医学影像数据可以看作体数据的一个子集,是三维有规则结构的标量体数据,可用三维数组表示为^[17]:

$$\{f[i,j,k] = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)\}, \begin{cases} i = 0, 1, \dots, d_1 - 1 \\ j = 0, 1, \dots, d_2 - 1 \\ k = 0, 1, \dots, d_3 - 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中, Δx 、 Δy 、 Δz 分别为采样点在3个轴向上的间距,对医学影像数据来说, Δx 、 Δy 相当于断层图像的像素尺寸,一般来说, $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ 相当于断层图像之间的层距。 d_1 、 d_2 、 d_3 是数据的维数, $f[i,j,k]$ 称为体数据在 $f[i,j,k]$ 上的灰度或密度,对医学影像数据来说, $f[i,j,k]$ 相当于第 k 张断层上第 j 列第 i 行像素的灰度值。对采集的CT断层扫描数据进行重构时,使

用三重卷积运算将数据重构为连续数据场。

$$S = \iiint h(u-x, v-y, w-z) \rho(x, y, z) \Sigma \delta(x, y, z) du dv dw \quad (2)$$

其中, S 为连续三维数据场, $h(u-x, v-y, w-z)$ 为重构函数, $\rho(x, y, z)$ 为此连续数据场的密度函数, $\Sigma \delta(x, y, z)$ 取样点所设函数。本式中,采用高斯函数作为核函数进行计算,高斯公式为:

$$h(x, y, z) = \exp(-\lambda(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2})) \quad (3)$$

其中, a 、 b 、 c 为函数在3个坐标系对应轴的截距, λ 为等值面密度值的变化率^[18]。

2 Mimics人体左心室三维重构

2.1 Mimics人体心脏三维重构

2.1.1 心脏CT数据DICOM传输与预处理 Mimics是对CT、MRI等断层图像以及3D透视图像进行图像分离及交互式查看的工具,在医疗领域可以应用于疾病诊治、手术设计及预演^[19]。图1为CT图像信息,当CT扫描数据采集后,需要对其进行传输与转换,目前国际通用的数字医学图像传输与储存标准为DICOM,应用范围几乎包括了所有的医学图像领域,为现代医学的进步与发展起到了重要的作用^[20]。

CT扫描数据的像素大小主要与人体中器官和组织对X射线的吸收程度有关,图像具有复杂性与多样性。CT图像在采集、传输以及分割过程中,受到外界以及设备自身的影响,会导致图片质量下降,使图像数据产生一定噪声,三维重构质量下降。因此,在分析和处理医学图像之前,有必要对缺失信息的图像进行预处理,以提高医疗质量。

2.1.2 窗口化调节 窗口化调节可以线性地显示图像的灰度值,CT图像中的灰度值反映的是组织对X线不同的衰减系数。Mimics中使用灰度值和CT值显示CT断层图像的像素单位,主要通过窗口化调节改变灰度值进而改变CT图像的像素值,以便于观察CT图像中的组织。选择合适的窗位和窗宽统称为窗口技术,窗口技术选调是直接影组织影像对比度的重要因素。当重建不同的器官组织或同一器官组织中不同的疾病时,需对窗宽窗位进行不同的调整,通常对于对比度较大的组织器官,心脏的三维重建一般使用1000 HU到2000 HU的窗宽^[21],如图2所示。

2.1.3 阈值分割 在CT断层扫描数据中,不同组织器官的密度值存在较大区别,因此可通过阈值分割提取需要的组织结构^[22]。当灰度值处于设定的阈值之间时,组织结构会被提取,因此能否较好地提取组织的关键是相应阈值的设置。如图3所示,本文在使用

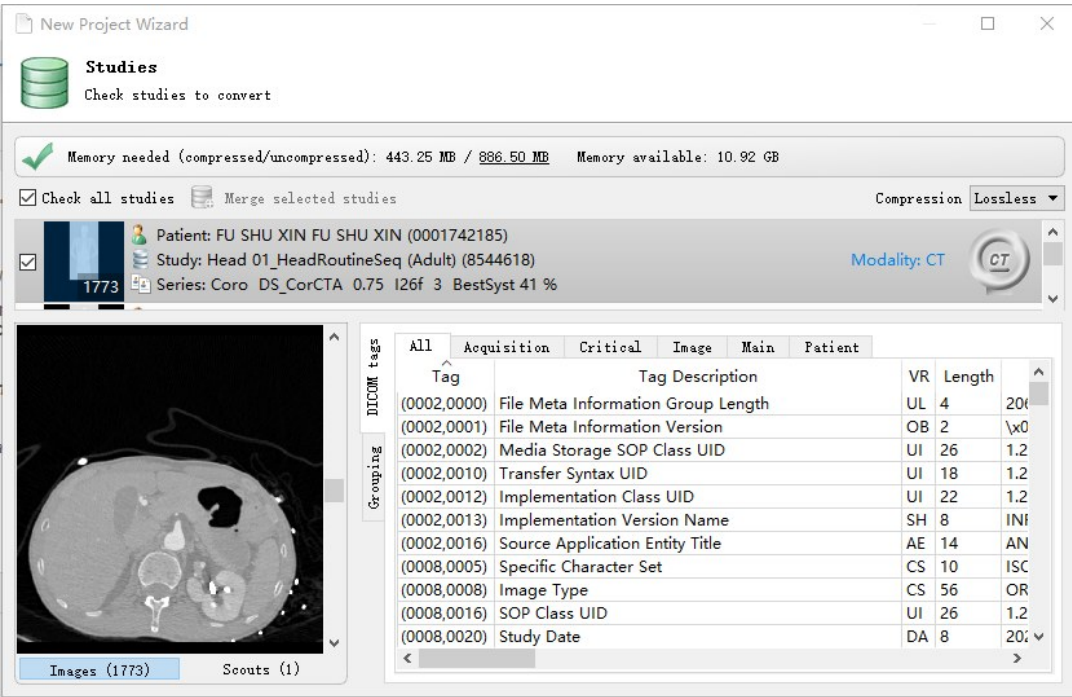


图1 CT图像信息
Figure 1 CT image information

Mimics软件中Thresholding命令时,对心脏三维的提取阈值为266~3 071。阈值过低,重构的心脏模型周围存在较多噪点,阈值过高,会使心脏部分组织丢失。

脏三维重构时,通过区域增长功能可以消除噪声对三维重建及其它操作的影响。通过区域增长可提取心脏的组织,分割成各自独立的物体进行三维重建,如图4所示。

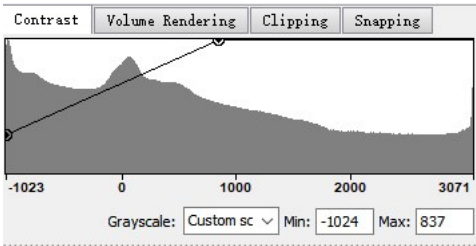
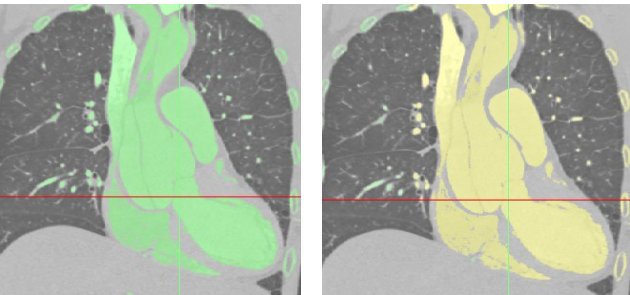


图2 窗口化调节
Figure 2 Windowing adjustment



a:区域增长前 b:区域增长后

图4 区域增长效果

Figure 4 Before and after regional growth

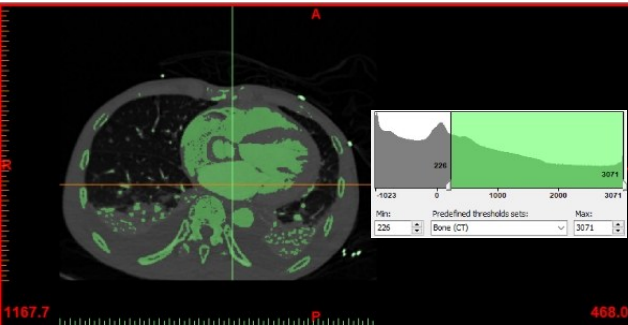


图3 阈值分割
Figure 3 Threshold segmentation

区域增长(Region Growing)的基本思想是指将具有相似性质的像素集合起来构成区域。在进行心

区域增长后进行蒙板裁剪,在完整的体数据中集中分割,限制心脏区域,确保心脏部分被全部剪切出来。裁剪后的心脏区域仍包含其他组织蒙板,肋骨与心脏并没有完全分离,通过Split Mask能够快速分离心脏与肋骨之间的联系,如图5所示在矢状视图用region A选取心脏蒙版,用region B选取心脏周围的肋骨结构。

2.1.4 心脏三维重构 三维重构实质上是对蒙板体素边界的拟合^[23]。心脏三维重建模型是通过分离的区域计算三角面片而成,三角面片的数量决定了重构

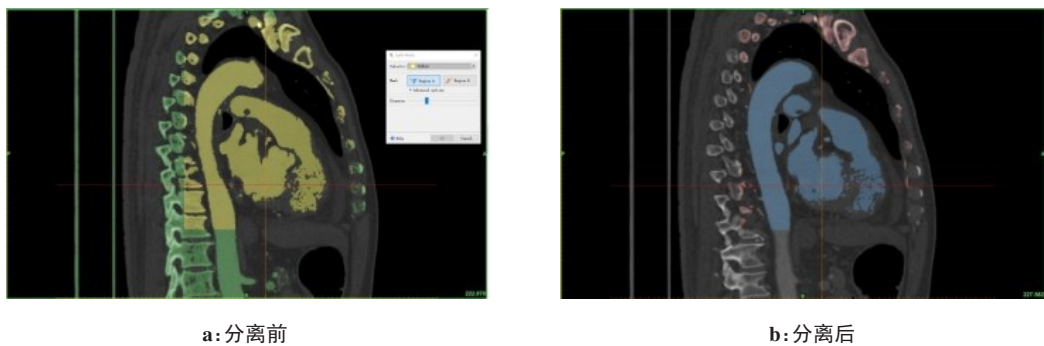


图5 Split Mask 分割
Figure 5 Split Mask segmentation

后模型的质量。重建时,Mimics 会将分割提取到的所有像素存在Mask之下,同时也有相应的编辑和修改操作,进而提取和完善所需要的心脏模型^[24-25]。从Calculate 3D from Masks 实现二维蒙版到三维的转化,最终分离的蓝色蒙版并选择最理想的质量进行计算,图6为提取的人体心脏三维重构模型。

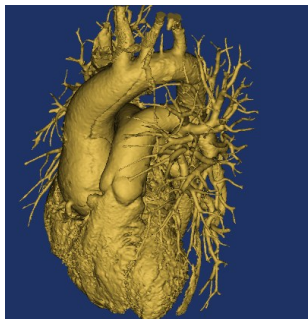


图6 心脏三维重构模型
Figure 6 Three-dimensional reconstruction model of the heart

2.2 人体左心室三维重构

2.2.1 人体左心室三维分割提取 左心室承担着心脏运动的主要作用,左心室对反映心脏变化形态、心脏是否病变具有重要的研究意义,因此,人体左心室建模对研究左心室结构,进一步了解心脏的运动有着重要的意义。研究左心室的血流机理以及特性时,需要对左心室进行分割提取,而半自动心脏分割工具实现了心脏的快速分割。当对4个腔室进行分割时,血液进入不同的蒙版,使其可视化并在高级细分菜单中呈现不同的颜色。选取Segment中 Cardiovascular(心血管)部分,进行CT Heart建模,在建模时,将CT数据调整到边界框之内,并尽可能靠近心脏。通过拖动滑块设置阈值范围的最小值,能够清晰地捕获血液。本文基于心脏生理学基础,进行不同腔室提取时,通过手动添加种子点对心脏各部分进行识别。添加的种子点依次是左心室(LA)、左心房

(LV)、右心室(RL)、右心房(RV)、主动脉(Aorta)、肺动脉(PA),确保种子添加到对应的蒙板或将种子放在对应蒙板的附近。在主动脉附近,放置多个种子点便于更好地提取升主动脉和降主动脉,在肺动脉中血液流向左肺动脉分支以及右肺动脉分支,因此需要多放置种子点。所有的种子点放置完成之后,进行Calculate 完成创建,确认所有的种子都在对应的蒙版之中,形成不同的颜色,图7为不同种子点添加的蒙版。

2.2.2 左心室三维优化 在建好的心脏分割模型中提取左心室,并复制到3-matic中进行优化处理,模型优化主要包括修剪、包裹、光滑以及布尔操作等方法。包裹相当于将重构好的心脏三维模型包裹起来,类似于用灰将墙壁抹平。包裹后的三维模型是单一的封闭壳,即无孔、无悬浮面片或自交面片。Smallest Detail用来设置包裹三角面片的最小尺寸,Closing Distance 设置心脏三维模型将被包裹空隙的间隙长度,小于此长度的空隙将被包裹填平。光滑相当于用砂纸将墙壁打磨平滑,光滑因子表示光滑时三维模型局部几何构象的重要性,光滑因子越接近1,表示三维模型越光滑,越接近球状。但是光滑是以损失模型的精度为代价的。光滑因子越大,精度越低。

本文将阈值分割后的心脏CT图像重构为心脏三维模型,使用包裹和光滑进行左心室三维优化,使模型达到计算要求。图8为心脏三维重构模型以及三维优化模型。

2.2.3 优化模型的偏差分析 在对左心室模型使用3-matic 进行优化处理后,一定程度上改变了原左心室三维模型的结构,因此,需要进行左心室偏差分析以确保优化后的模型精度可以满足研究的需要。本文通过使用三维检测软件Geomagic Control X将优化后的模型与原模型的数据进行对比、检测和分析,以得到模型之间的偏差。对模型误差分析时,将扫描数据与参考数据进行转化对齐,得到初始匹配数据,

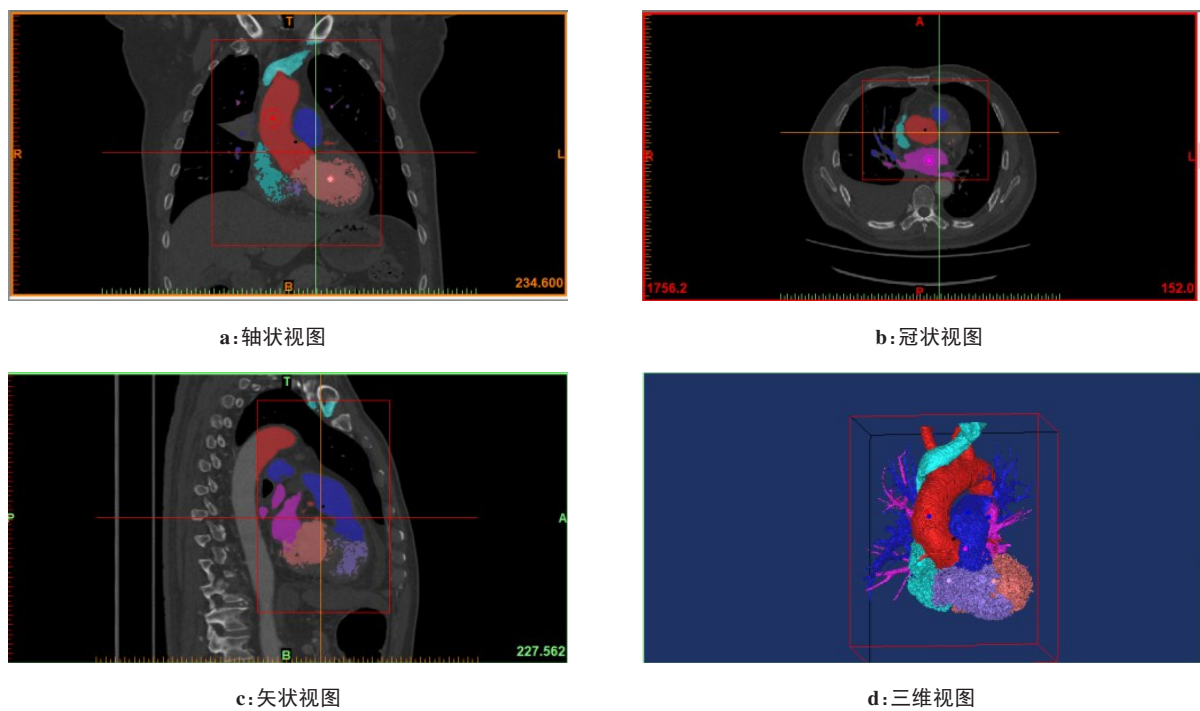


图 7 不同种子点对应的蒙板
Figure 7 Masks corresponding to different seed points

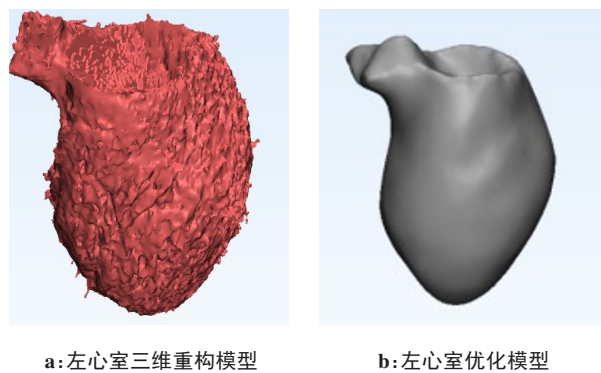


图 8 左心室模型
Figure 8 Left ventricular model

再进行最优拟合对齐,使两个模型匹配达到最优状态,此时整体的偏差比较均匀。偏差分析时,将优化后的模型与原模型进行拟合,以得到优化模型的偏差。优化模型偏差色谱分析如图9所示,随着颜色的变深,优化模型的偏差逐渐增大,而颜色最浅的部分为优化模型向内部凹陷的偏差,因此,颜色居中的部分越多,则偏差越小。

由表1可看出,模型偏差区间 <-4.0 mm的偏差点数为117,占总区间点的0.24%,模型偏差区间 ≥ 4.0 mm的偏差点数为519,占总区间点的1.05%,可得到偏差较大的部分在整个优化模型中占比很小。模型偏差区间在 $[-0.88, 0.88]$ 的偏差点数为34 241,占总区间点的69.47%,误差区间在 $[-1.66, 0.88]$ 的占比为79.90%,可得到优化模型的绝大多数部分都与原模

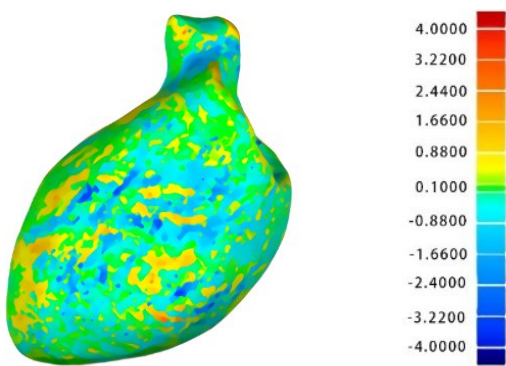


图 9 优化模型偏差色谱分析图
Figure 9 Deviation chromatographic analysis on the optimized model

型偏差较小,优化仅改变了壁面的粗糙度,但是并未改变模型内部结构,可以作为研究使用。

3 结 论

本文基于CT断层扫描数据对心脏的三维重构算法,将CT数据以Dicom格式导入到Mimics中,并进行预处理、窗口化调节、阈值分割以及裁剪蒙板等操作,实现对人体心脏的三维重构。通过Cardiovascular工具,进行CT Heart建模,对三维模型进行分割,并提取出左心室,将左心室模型导入到3-matic中进行裁剪、包裹、光顺等优化。对优化后的左心室模型与三维重构模型进行对比与偏差分析,发现二者之间偏差点为 $[-0.88, 0.88]$ 占总区间的69.47%,偏差区间超过4 mm的偏差点占总区间点的

表1 优化模型偏差分析表
Table 1 Deviation analysis on optimization model

偏差区间/mm	偏差点数	区间点/总区间点/%
<-4.0	117	0.24
[-4.00, -3.22)	1 004	2.03
[-3.22, -2.44)	1 182	2.39
[-2.44, -1.66)	2 108	4.27
[-1.66, -0.88)	5 145	10.43
[-0.88, -0.10)	16 701	33.88
[-0.10, 0.10)	5 657	11.47
[0.10, 0.88)	11 886	24.12
[0.88, 1.66)	3 195	6.48
[1.66, 2.44)	1 062	2.15
[2.44, 3.22)	423	0.86
[3.22, 4.00)	289	0.59
≥4.0	519	1.05

1.29%, 优化改变了壁面的粗糙度, 并未改变模型内部结构, 因此优化后的左心室模型能够为心脏内部血流模式及特性、血液生理参数异变和心脏组织结构病变机理的研究奠定基础。

【参考文献】

[1] Dean-Ben XL, Buehler A, Ntziachristos V, et al. Three-dimensional single-shot optoacoustic visualization of excised mouse organs with model-based reconstruction[J]. Proc Spie, 2013, 8581(3): 236-242.

[2] Mina H, Hamid B, Maryam S. Temporal super-resolution of ultrasound imaging using matrix completion[J]. Ultrasonic Imaging, 2020, 42(3): 115-134.

[3] Martino A, Mathieu DC, Olivier B, et al. A Pipeline for the generation of realistic 3D synthetic echocardiographic sequences: methodology and open-access database[J]. IEEE Trans Med Imaging, 2015, 34(7): 1436-1451.

[4] Laschinger JC, Vannier MW, Gronemeyer S, et al. Noninvasive three-dimensional reconstruction of the heart and great vessels by ECG-gated magnetic resonance imaging: a new diagnostic modality[J]. Ann Thorac Surg, 1988, 45(5): 505-514.

[5] Nölker G, Gutleben KJ, Marschang H, et al. Three-dimensional left atrial and esophagus reconstruction using cardiac C-arm computed tomography with image integration into fluoroscopic views for ablation of atrial fibrillation: accuracy of a novel modality in comparison with multislice computed tomog[J]. Heart Rhythm, 2008, 5(12): 1651-1657.

[6] Chang SK, Chow CK. The Reconstruction of three-dimensional objects from two orthogonal projections and its application to cardiac cineangiography[J]. IEEE Trans Comput, 1973, C-22(1): 18-28.

[7] 王章玉, 杨翠微. 基于改进型区域生长法的心脏三维建模的实现[J]. 中国医疗器械杂志, 2014, 38(5): 315-317.

Wang ZY, Yang CW. Implementation of three-dimensional heart modeling based on improved region growth method[J]. Chinese Journal of Medical Devices, 2014, 38(5): 315-317.

[8] 张银丽, 张春霞. 三维斑点追踪成像超声技术评估腹膜透析患者心脏功能的价值[J]. 国际移植与血液净化杂志, 2021, 19(6): 27-30.

Zhang YL, Zhang CX. Evaluation of cardiac function in peritoneal dialysis patients by three-dimensional speckle tracking ultrasound[J]. International Journal of Transplantation and Hemopurification, 2021, 19(6): 27-30.

[9] 徐进. 基于图像配准的心脏冠脉CTA模型建立方法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.

Xu J. Research on coronary artery CTA model based on image

registration [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019.

[10] 王子荣, 杨栋, 张那炜, 等. 基于心脏CT血管成像的三维重构在经皮左心耳外盖型心脏封堵器植入术中的临床应用[J]. 心电与循环, 2020, 39(5): 424-428.

Wang ZR, Yang D, Zhang XW, et al. Clinical application of three-dimensional reconstruction based on cardiac CT angiography in percutaneous implantation of left atrial appendage external cap cardiac occluders[J]. Journal of Electrocardiology and Circulation, 2020, 39(5): 424-428.

[11] 蔡丹丹. 心脏超声图像的三维虚拟影像重构技术的研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2012.

Cai DD. Study on 3D Virtual image reconstruction of cardiac ultrasound image[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2012.

[12] 宫霞英. 基于CT图像重构真实感心脏系统绘制方法[D]. 昆明: 云南师范大学, 2013.

Gong XY. Rendering method of realistic heart system based on CT image reconstruction[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2013.

[13] 石教英, 蔡文立. 科学计算可视化算法与系统[M]. 北京: 北京科学出版社, 1996: 20-38.

Shi JY, Cai WL. Visualization Algorithm and System of Scientific Computing[M]. Beijing: Beijing Science Press, 1996: 20-38.

[14] 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 in 3D reconstruction of medical image[J]. Medical and Health Equipment, 2015, 36(2): 115-118.

[15] Levoy M. Display of surfaces from volume data[J]. IEEE Comput Graph, 1988, 8(3): 29-37.

[16] 刘让, 陈李李, 俞经生, 等. Mimics三维重建技术在胸腔镜解剖性肺段切除手术中的应用效果分析[J]. 临床肺科杂志, 2022, 27(12): 1845-1849.

Liu R, Chen LL, Yu JS, et al. Application of Mimics 3D reconstruction technique in thoracoscopic anatomic segmental resection[J]. Journal of Clinical Pulmonology, 2022, 27(12): 1845-1849.

[17] 王涛, 王运来. 基于4D-CT和Mimics软件模拟分析肺癌肿瘤的呼吸运动规律[J]. 中国医学物理学杂志, 2014, 31(5): 5132-5135.

Wang T, Wang YL. Analysis of respiratory movement in lung cancer by 4D-CT and Mimics software[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2014, 31(5): 5132-5135.

[18] 贺楠楠. 医学图像三维重构算法研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2018.

He NN. Research on 3D reconstruction algorithm of medical image [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2018.

[19] 傅栋. 三维医学影像交互式控制系统在骨科数字仿真与有限元建模的应用[D]. 广州: 南方医科大学, 2007.

Fu D. Application of 3D medical image interactive control system in digital simulation and finite element modeling of Orthopedics[D]. Guangzhou: Southern Medical University, 2007.

[20] 刘永. Mimics软件三维重建在临床骨科疾病中的应用[J]. 中临床床研究, 2020, 12(9): 121-124.

Liu Y. Application of Mimics software 3D reconstruction in clinical orthopedic diseases[J]. Clinical Research of Traditional Chinese Medicine, 2020, 12(9): 121-124.

[21] 王全贵, 卫淑琴, 马伟泓, 等. 窗口技术在CT诊断中的应用研究[J]. 实用医技杂志, 2011, 18(3): 268.

Wang QG, Wei SQ, Ma WH, et al. Application of window technique in CT diagnosis[J]. Journal of Practical Medical Technology, 2011, 18(3): 268.

[22] 赵峰, 高勃, 刘震侠, 等. Dicom标准和Mimics软件辅助建立下颌骨三维有限元模型[J]. 西南国防医药, 2005, 15(5): 479-481.

Zhao F, Gao B, Liu ZX. Establishment of a three-dimensional finite element model of mandible with Dicom and Mimics software[J]. Medical Journal of National Defending Forces in Southwest China, 2005, 15(5): 479-481.

[23] 胡辉莹, 何忠杰, 吕丽萍, 等. 应用Mimics软件辅助重新人体胸廓三维有限元模型的研究[J]. 解放军医学杂志, 2008, 33(3): 273-275.

Hu HY, He ZJ, Lü LP, et al. Establishment of the three-dimensional finite element model of human thorax with Mimics software[J]. Medical Journal of Chinese People's Liberation Arm, 2008, 33(3): 273-275.

[24] Li XL. Reconstructing a bone finite element model of human thoracolumbar spine based on CT images by using Mimics software [J]. Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research, 2009, 13(39): 7619-7622.

[25] 李俭, 王帆, 孙欣, 等. 应用Mimics软件重建环状关节三维CT图像[J]. 听力学及言语疾病杂志, 2019, 27(4): 422-424.

Li J, Wang F, Sun X, et al. Reconstruction of three dimensional CT images of cricoarytenoid joint by Mimics software[J]. Journal of Audiology and Speech Disorders, 2019, 27(4): 422-424.

(编辑: 陈丽霞)