

## 模拟手术刀方式的全心脏分割及冠状动脉分析

蒋先刚<sup>1</sup>, 张红斌<sup>2</sup>, 李广丽<sup>2</sup>

1. 华东交通大学理学院, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学信息与软件工程学院, 江西 南昌 330013

**【摘要】**针对全心脏器官各组织在灰度分布上存在的复杂粘连和交错叠加现象,提出用自适应的几何切割刀具的刀刃边缘对不同组织进行切割或保留,在保持心外膜和心外膜脂肪完好的情况下对心脏外组织进行有效剔除,采用模拟手术刀切割方式的心脏分割方法和其他相关分析算法采用GPU编程方式实现。实验结果表明,本文方法可对复杂的胸部数据进行分割,得到全心脏和冠状动脉的实时细节显示,对心脏疾病的分析判断提供图像导视,此切割方法可应用于现有算法器官分割技术无法完全切除的残余组织提供快速的剔除。

**【关键词】**全心脏分割;切割工具;冠状动脉;3D显示

**【中图分类号】**R318;TP391

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2025)05-0589-07

### Whole heart segmentation and coronary artery analysis based on virtual scalpel simulation

JIANG Xiangang<sup>1</sup>, ZHANG Hongbin<sup>2</sup>, LI Guangli<sup>2</sup>

1. School of Science, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Information and Software Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China

**Abstract:** In view of the complex adhesion and overlapping of whole heart image data on the luminance distribution, a novel adaptive geometric cutting tool for distinguished cutting or preservation of different tissues on the edge of the blade is proposed for efficiently eliminating the extra-cardiac tissues while preserving the epicardium and epicardial fat. The whole heart segmentation approach which simulate scalpel cutting and relative analysis algorithms are implemented by GPU programming. Experimental results demonstrate that the proposed method can provide virtual reality for whole heart and coronary artery details in real time from complex chest volume data, and offer graphic guiding for analysis and judgment of heart diseases. The proposed cutting method can be served as a quick culling tool for the organ remnant tissues which can't be appropriately segmented using the existing algorithms.

**Keywords:** whole heart segmentation; cutting tool; coronary artery; 3D rendering

### 前言

基于传统分割方法和人工智能等算法进行心脏器官的体数据分割已得到实现<sup>[1-2]</sup>,考虑到用金属捆绑胸骨的心脏体数据上存在许多金属伪影,基于经典算法的全心脏分割算法在分割过程中使心外膜和心外膜外面的脂肪山形外貌丢失,不利于心脏搭桥手术时对切口的定位<sup>[3]</sup>。本文着重研究基于图形处理器(Graphic Processor Unit, GPU)的心脏分割和渲染技术,主要采用OpenGL着色语言(GL Shading

Language, GLSL)技术实现对有大量心外膜脂肪占位和金属伪影干扰的心脏分割,主要研究不同形状和属性的切割刀具在心脏外部组织剔除中的应用,讨论冠状动脉的提取和显示分析方法。

### 1 心脏组织分割和显示方法

#### 1.1 心脏组织分割和显示的基本方法

心脏三维数据分割与显示的基本流程如图1所示,通过对心脏邻近数据的划分使这些处理数据在CPU和GPU间进行合理交换和处理<sup>[4-5]</sup>。通过作用于GPU的三维动态纹理掩模Dynamic Mask的构建,使得各种几何元素与这个掩模产生交、差、并运算得到与体数据对应的用0和1表达的三维掩模,当同样维度的纹理体数据3D Texture与动态纹理掩模的坐标空间点为“0”时,对应的体素视为被裁剪的像素点,这样用鼠标交互变换裁剪几何体的参数时,将产生

**【收稿日期】**2024-12-10

**【基金项目】**国家自然科学基金(62161011,61262031,62361027);江西省重点研发计划(20223BBE51036);江西省教育厅科技项目(GJJ2200640)

**【作者简介】**蒋先刚,教授,研究方向:医学图像处理, E-mail: 3308234483@qq.com

动态实时的切割效果,如果切割后模型达到满意效果,通过确认按钮将动态纹理掩模 Dynamic Mask 的内容添加到合成纹理掩模 Combined Mask 中,框架缓冲中最后显示的图像是医学体数据 3D Texture,为动态掩模 Dynamic Mask 和合成掩模 Combined Mask 的

交、差、并运算的心脏切割结果,Combined Mask 用于固定已确定的多次顺序裁剪的添加操作。

掩模体数据实时显示的操作,对心脏实体数据不会实质性的修改和引入新的噪声信息<sup>[6-7]</sup>,本研究还对冠状动脉的分割和显示进行了具体研究。

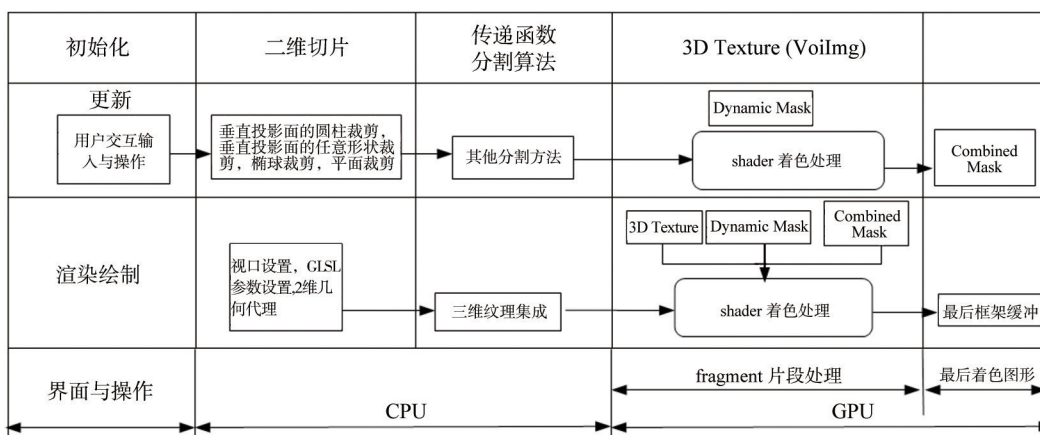


图1 全心脏分割和显示基本流程

Figure 1 Flowchart of whole heart segmentation and display

### 1.2 任意形状柱体分割的空间几何变换

三维器官任意形状柱体的切割效果由平行投影面的二维形状和它定义的属性确定,三维器官的投影面在图2右上角用绿色方框表示,正方体中的原始体数据在图2左下角用灰色图像表示,在平行投影面的平行面上画出一任意形状黄色图形,由黄色图形定义出母线垂直投影面的方向线作为导线的运动包络就是一个任意形状柱面,填充其内容就产生任意形状柱体,柱体与投影面相交的形状就是二维黄色掩模图形,通过定义二维平面内部上各点的属性就可使体数据投影在这个二维平面内部的各体素设置为透明、半透明或者不透明,在图2中设置柱体中的高亮度骨骼为不透明,而其他亮度分布的体素为透明。

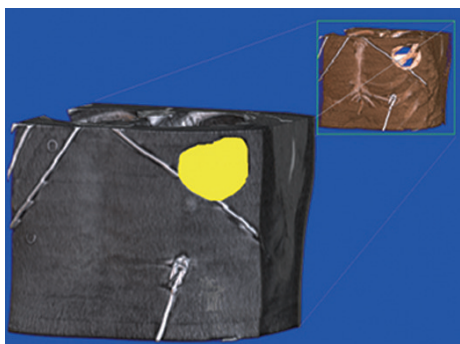


图2 任意形状柱体分割的空间几何变换

Figure 2 Spatial geometric transformation for segmentation of arbitrary-shape stylidium

绘制投影面上的矩形与平行投影面的绘制曲线形成的矩形是相似的,图2中绘制出的黄色图形的坐标与投影面上的坐标存在相应的转换关系,它们的关系如式(1)~(2)所示:

$$WX = OrthoWidth \times (2 \times X - VGPUWidth) + 0.5 \times VGPUWidth \quad (1)$$

$$WY = VGPUHeight - OrthoHeigh \times (2 \times Y - VGPUHeight) + 0.5 \times VGPUHeight \quad (2)$$

其中,WX、WY表示在投影面上记录二维图像的x、y坐标,X、Y表示与蓝色投影面平行的绘图面上鼠标移动曲线轨迹的坐标,OrthoWidth和OrthoHeigh表示蓝色投影面和绘图面的比例关系,通过改变视距而达到视图缩放的功能,VGPUWidth、VGPUHeight表示包含体数据的正方体在投影面上的最大宽和高,正方体的原点取被投影的人体容积体数据的中心位置,单位长度为1,故引入参数变量0.5,包含体数据的正方体在旋转过程中,其部分体素的投影落在绘制的二维曲线图形中,这些体素就由二维曲线图形掩模的属性定义而被切割或保留。

图3是产生任意形状柱体分割掩模的源码,二维掩模 eraserTexture2D 表示图2绘制的黄色区域的投影,二维掩模在图形区域内用透明度表示其属性,gHigh、gLow表示在任意形状柱体内进行第二次过滤将被切割掉的体素亮度的高和低阈值,SampleV表示三维体数据在该点的亮度值,投影矩阵为 projPlaneMatrix,当三维体数据在投影面上的投影与

```
const kStyldiumAttributeClipFrag = '#version 330 core'
+ #10' in vec2 TexCoord;
+ #10' out vec4 FragColor; //GLSL处理结果
+ #10' uniform float coordZ, gHigh, gLow;
+ #10' uniform mat4 projPlaneMatrix; //投影平面矩阵
+ #10' uniform sampler3D dynamicMask; //动态掩模
+ #10' uniform sampler3D intensityVol; //亮度体数据
+ #10' uniform sampler2D eraserTexture2D; //2维掩模纹理对象
+ #10' void main(void) {
+ #10' vec4 vp = vec4(TexCoord.xy, coordZ, 1.0); //每片的齐次坐标
+ #10' vec4 vpj = projPlaneMatrix * vp; //计算在投影面上的坐标
+ #10' vec4 maskIntensitySample = texture(dynamicMask, vp.xy); //获得动态掩模的值
+ #10' maskIntensitySample.a = 1.0; //强制动态掩模的初始透明度为1的值
+ #10' vec4 intensitySample = texture(intensityVol, vp.xyz); //获得亮度纹理的值
+ #10' float SampleV = intensitySample.r; //取红色为亮度值
+ #10' vec4 Intensity2DSample = texture2D(eraserTexture2D, vpj.xy + 0.5); //二维平面值
+ #10' if ((Intensity2DSample.a < 0.0001) && (SampleV > gLow) && (SampleV < gHigh));
+ #10' maskIntensitySample.a = 0.0; //输出不透明度亮为0
+ #10' FragColor = maskIntensitySample; //柱体切割后每片动态掩模的值
+ #10';
```

图3 产生任意形状柱体分割掩模的源码

Figure 3 Source code of generating arbitrary-shape styldium segmentation mask

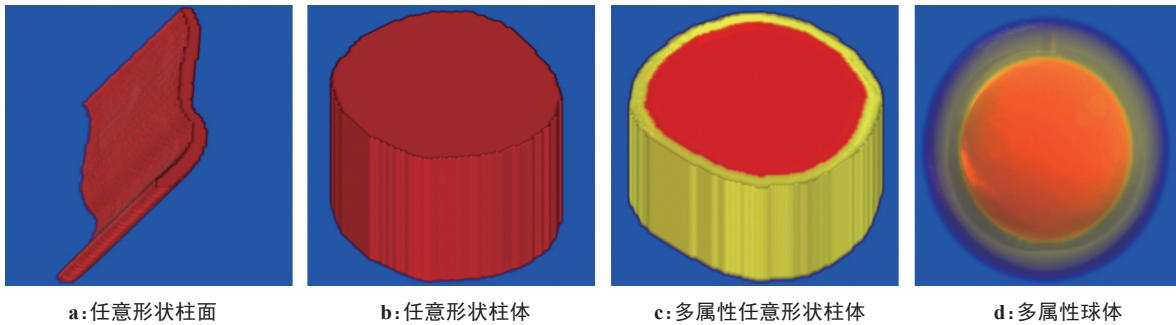
二维掩模重合时, 如代表连通域的掩模的值 maskIntensitySample 为 0, 它对应的体素点属于被切割掉的组织。

### 1.3 切割刀具的形状和属性定义

在平行投影面的平面上绘制二维曲线, 二维曲线的演变形式决定了虚拟切割工具的几何形态, 图 4a 表示一条由不封闭曲线产生的垂直投影面

的任意形状柱面, 图 4b 表示一条曲线封闭后并填充中间各点而产生一个平行投影面的二维平面图形, 通过向投影面拉伸而产生的任意形状柱体。

通过掩模的多属性定义可减少经典分割算法对器官组织分割的单一阈值分割的局限性。图 4c 表示通过绘制一条黄色封闭曲线, 并填充封闭曲线内部得到一个平行投影面的红色二维平面, 向投影面方向拉伸而产生垂直投影面的黄色柱面和红色柱体, 图 4c 中的红色区域和黄色区域分别用不同的切割属性规范切割器官组织。如包含在红色区域中的器官组织体素在任意亮度范围都被切除掉, 而包含在黄色区域中只有在高亮度范围内的器官组织体素被切除掉<sup>[8-9]</sup>, 如应用图 4c 所示的切割工具时, 当切割工具的边缘靠近心外膜脂肪处进行切割时, 靠近心外膜脂肪附近的高亮度金属伪影和骨头组织在对应刀具的黄色区域被切除掉, 而靠近心脏边界附近的低亮度心外膜脂肪在对应刀具的黄色区域仍然被保留, 这样保证了切割过程中, 手工操作的鼠标不必过分关注切割曲线各点的精确性而使切割速度减慢, 又达到保留心外膜脂肪外形的目的, 人体器官组织在红色区域内部的所有体素将被完全切割掉。图 4d 表示共圆心的红色和黄色球体构成的切割工具。



a: 任意形状柱面      b: 任意形状柱体      c: 多属性任意形状柱体      d: 多属性球体

图4 各种几何形状和属性的切割刀具

Figure 4 Cutting tools for various geometric shapes and properties

图 5 为产生多属性球体分割掩模的源码, 椭球中心和椭球小半径确定红色小球对应的体素部分将被彻底切除, 而黄色透明大球的球壳所对应的体素根据大球半径、灰度阈值进行过滤而被部分保留, 动态掩模的采用将只在视角上产生切割效果而不实际修改三维体数据内容。

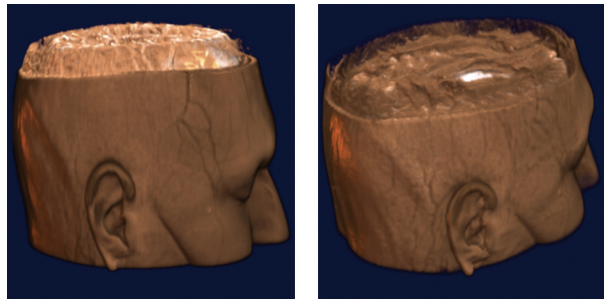
图 6 是用多属性任意形状柱体切割头部的例子, 在头部从右向左方向投影面上画一封闭曲线, 图 6a 表示在全部切割上部头顶组织(图 4c 红色区域对应的小径区域)的情况下使靠近下部刀刃的头骨高亮度组织(图 4c 黄色区域对应的大径区域)得到保留,

```
+ #10' in vec2 TexCoord;
+ #10' out vec4 FragColor;
+ #10' uniform float coordZ, radius1, radius2; //Z 坐标和大小球半径
+ #10' uniform float GrayLow, GrayHigh; //灰度阈值
+ #10' uniform vec3 sphereCenterP; //椭球中心
+ #10' uniform sampler3D dynamicMask; //动态掩模
+ #10' uniform sampler3D intensityVol; //体数据亮度纹理
+ #10' void main(void) {
+ #10' vec3 vp = vec3(TexCoord.xy, coordZ); //获得三维坐标
+ #10' float intensityV = texture(intensityVol, vp).r; //取体素亮度
+ #10' vec4 dynamicMaskSample = texture(dynamicMask, vp); //切割掩模
+ #10' dynamicMaskSample.a = 1.0; //缺省为全部体素全切消除
+ #10' float d = length(sphereCenterP - vp); //各点满足球的方程
+ #10' if ((d > radius1) && (d < radius2) && ((intensityV >= GrayLow)
+ #10' && (intensityV <= GrayHigh)))
+ #10' dynamicMaskSample.a = 0.0; //半径和亮度在阈值内则保留相应体素
+ #10' FragColor = dynamicMaskSample;
+ #10';
```

图5 产生多属性球体分割掩模的源码

Figure 5 Source code of generating multi-attribute sphere segmentation mask

图6b表示在切割头顶组织的情况下使靠近下部刀刃的低亮度软体组织(图4c黄色区域对应的大径区域)得到保留而切除掉头骨组织。



a:刃边区域保留头骨      b:刃边区域保留软组织

图6 多属性任意形状柱体切割例子

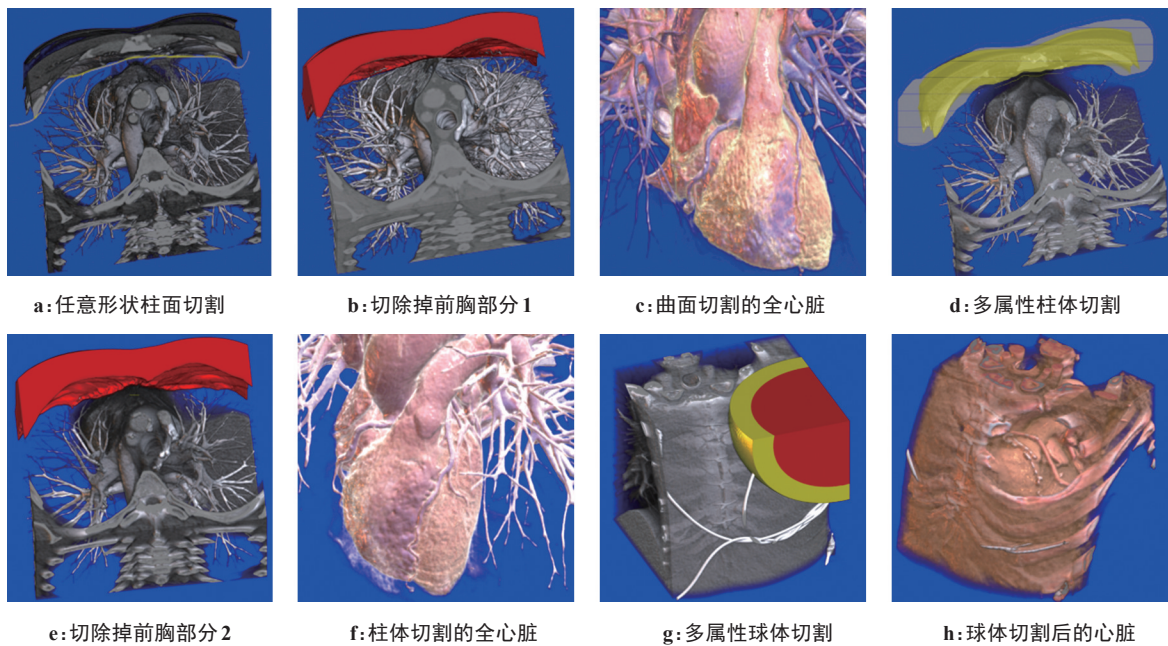
Figure 6 Multi-attribute arbitrary-shape stylidium cutting example

图7表示用不同几何形状和属性的切割刀具对心脏进行切割的图像例子,图7a是使用任意形状柱面切割的例子,通过旋转体数据使心脏与前胸交界部分在投影图上重合最小的投影角度时,在投影面的平行面上绘制一根黄色的曲线,与投影面垂直的任意形状柱面将胸部体数据分成前部的胸腹部和后部的的心脏两部分,通过扩散种子填充算法剔除掉红色掩模占据的胸腹部组织,如图7b所示,黑色的切割面清晰可见。图7c是切割后包含背部脊柱和心脏的投影图,可见右冠状动脉有4处包含脂肪粒或者粥样

硬化斑块。该切割方法用鼠标以三维方式切割出器官组织。

图7d~f为使用多属性任意形状柱体切割的例子,图7d表示在体数据旋转到合适投影角度时,画一平行投影面的封闭曲线,通过填充封闭曲线而得到封闭图像,通过封闭图像的形态学腐蚀得到2个属性区域,即腐蚀后的黄色封闭图像以及腐蚀前的图像与腐蚀后的黄色封闭图像的差运算图像。黄色封闭图像范围对应的投影体素在所有亮度范围将被完全切割掉,在差运算图像范围(黄色区域与等距黄色细线间区域)对应的投影体素只有高亮度的组织被切割掉,即在较大的黄色细曲线框和黄色封闭图形区域对应的心外膜脂肪体素将被保留。与投影面垂直的任意形状柱面将胸部体数据分成前部的胸腹部和后部的心脏两部分,红色掩模表达的前胸腹部组织与心外膜脂肪的接触面是交错的<sup>[10-12]</sup>,即可理解为在前胸腹部和心外膜脂肪间进行柔性软切割,切割掉前胸腹部分而保留心外膜脂肪的绒毛状丘形分布,如图7e所示,其分界面不像图7b那样出现明显的黑色隔断面线条。图7f是用多属性柱体切割后的全心脏分割投影图,心外膜脂肪的外形分布保持良好,可见其左支冠状动脉上没有粥样硬化斑块分布。

图7g~h表示临床快速分析左冠状动脉状态的实验,用鼠标交互地点击一下三维投影图上一个点,就可快速(0.5 s)观测另一外部遮挡较多的心脏体数据和左冠状动脉状态的例子,图7g所示的红色区域对应的体数据全部被剔除,而黄色区域对应的体素采



a:任意形状柱面切割      b:切除掉前胸部分1      c:曲面切割的全心脏      d:多属性柱体切割  
e:切除掉前胸部分2      f:柱体切割的全心脏      g:多属性球体切割      h:球体切割后的心脏

图7 各种切割刀具对心脏外组织的切割结果

Figure 7 Cutting results of peeling extra-cardiac tissue with various cutting tools

用低亮度容积不被剔除的属性使靠近心外膜和心外膜脂肪的组织不被切除掉<sup>[13-17]</sup>,图7h显示经过多属性球体切割后,心脏的左前降支上的粥样硬化斑块分布状态清晰可见,左回旋支基本畅通,由此可见器官组织的软切割方式的快捷性不是依赖刀刃进刀的精确性上,而在于刀刃对器官组织属性的自动识别上。

## 2 心脏器官切割和显示实验

本研究心脏组织分割和显示系统采用开源编程环境 Lazarus2.0.8 开发,三维实验数据选自于 RAS Dataset、HVS MR 和合作医院提供的病例数据,心脏体数据的维数为 512×512×390,单个多属性球体分割和显示只要 0.5 s,多属性任意形状柱体切割和显示花费 1~3 s,单根冠状动脉的提取和显示需花费 3~6 s。

### 2.1 各种全心脏分割算法的效率比较

表1是几种全心脏分割方法的效率比较,实验中采用尺寸为 256×256×290 的体数据,其中统计形状方法和 U-net 方法需要事先构建相关模型。分割精度包括针对有器官组织粘连和非粘连体数据两种情况,组织粘连包括由于手术后产生组织粘连、交错、叠加、伪影、肿瘤占位、心外起搏器干扰和体数据尺寸过小等情况,模拟刀具的分割方式更适用于心脏周边组织有许多粘连和存在伪影的情况,统计形状

方法和 U-net 方法的分割需要的人机交互越少,但对数据分布的适应鲁棒性较差。

表1 各种全心脏分割方法的效率比较

Table 1 Efficiency comparison among different method for whole heart segmentation

分割方法	建模需求	分割时间/s	分割精度 (%,粘连/非粘连)	人机交互/%
统计形状	需要	5.6	91/94	10
区域增长	不需要	12.0	88/93	32
图割	不需要	4.2	86/92	43
U-net	需要	3.2	84/96	10
模拟刀具	不需要	8.1	92/93	90

### 2.2 全心脏分割实验

图8a显示在心脏的左前部绘制多属性柱体切割用的二维掩模,图8b显示切割后的结果,心脏左中部的心脏实体和冠状动脉清晰可见,而心外膜脂肪等组织无损伤和丢失,在心脏的右前部继续绘制一多属性柱体切割用的二维掩模并切割前部体数据就可得到全心脏的实体和冠状动脉分布的图像,图8c~f为全心脏和冠状动脉在不同方位的投影图像,左冠状动脉的左前降支和左回旋支都完整饱满,右冠状动脉也分布均匀。

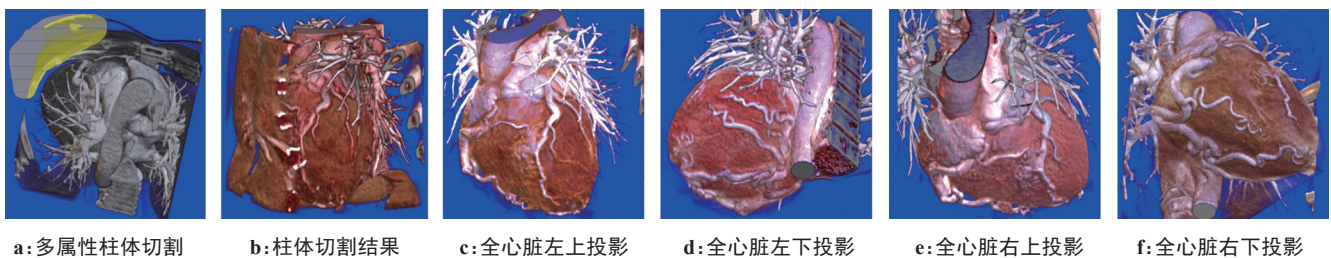


图8 全心脏分割和冠状动脉分析和显示

Figure 8 Whole heart segmentation and coronary artery analysis and display

### 2.3 冠状动脉的分割与显示

**2.3.1 球形包络簇提取冠状动脉** 多属性球体切割将切割出一个球形范围的体数据,如果将冠状动脉的中心线上各点作为球的球心,一系列的球簇包络就可切割出冠状动脉及附近组织。通过在三维视图上用鼠标选择冠状动脉中心线上几个控制拐向的关键点,然后通过参数样条拟合成精细平滑的中心线<sup>[18]</sup>。三维参数样条曲线的定义如式(3)所示:

$$\begin{aligned} x(t) &= a_{3x}t^3 + a_{2x}t^2 + a_{1x}t + a_{0x}, \\ y(t) &= a_{3y}t^3 + a_{2y}t^2 + a_{1y}t + a_{0y}, \\ z(t) &= a_{3z}t^3 + a_{2z}t^2 + a_{1z}t + a_{0z}, \end{aligned} \quad t \in [0, 1] \quad (3)$$

其中,  $x$ 、 $y$ 、 $z$  表示样条的各向坐标,  $t$  为曲线样条的增量参数,取值为 0~1,  $a_{3x}$ 、 $a_{2x}$ 、 $a_{1x}$  和  $a_{0x}$  表示样条在 X 向的调理参数,通过累加弦长的取值而得到表示冠脉中心线的样条曲线。

**2.3.2 边界调和的传递函数加强管状图像** 为了表达心脏组织多层次的三维结构分布,通常采用多维传递函数表达体数据,在体素点亮度的一维传递函数基础上用边界梯度对其进行调和,将二维和多维传递函数的概念用一维传递函数来表达,就是对新的一维传递函数中体数据的不透明度用体数据本身的不透明度和梯度值调和<sup>[19-22]</sup>,如式(4)所示:

$$S.a = 0.3 \times lumW \times lum.a + 0.3 \times gradW \times gradV \quad (4)$$

$$gradV = \nabla v = \left( \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (5)$$

其中, S.a 为体素点调和的不透明度, lum.a 为体素点的不透明度, 式(5)中 gradV 为计算体素点的梯度值, 而新的在一维传递函数中表达的不透明度是原有亮度和梯度的调和结果, lumW 和 gradW 为新的体素点的不透明度受亮度和梯度的调和权重。

图9是图7g所示存在检测导线和金属捆绑胸骨的心脏体数据分割的例子, 心外膜附近和心肌数据中存在大量金属伪影, 传统分割方法无法对其进行正确分割<sup>[23]</sup>。通过模拟手术刀的切割方式可得到分割的全心脏, 其心外膜和心外膜脂肪山行分布得以保留。图9表示在不同传递函数下投影图像的不同显示效果<sup>[24]</sup>, 该心脏的右冠状动脉细小且不连续, 属于冠状动脉重度狭窄状态, 位于图像中间的左前降

支基本上由脂肪粒或者粥样硬化斑块占据, 心脏的左回旋支基本完整, 但仍然有12~14个脂肪粒或者粥样硬化斑块附着其上。图9a~b是一维彩色传递函数下表示的心脏投影, 而图9c~d是强调边界的二维彩色传递函数下表示的心脏投影, 采用边界调和的传递函数能实时呈现极其细微的隔膜界面, 包含边界要素的冠状动脉和心室形状及外形得到保留和加强, 亮度均匀分布的心肌以透明方式呈现, 心外膜和全心脏外形轮廓仍然得以保留<sup>[25-28]</sup>。

图9e、f通过在心脏左回旋支的三维投影图上选取8个中心线关键点, 以此拟合计算得到球形包络簇切割需要的40个冠状动脉的中心线节点, 并以包络簇切割提取的左回旋支在两个方向的投影, 由此可精确判断其唯一比较畅通的左回旋支每段的动脉斑块分布情况。

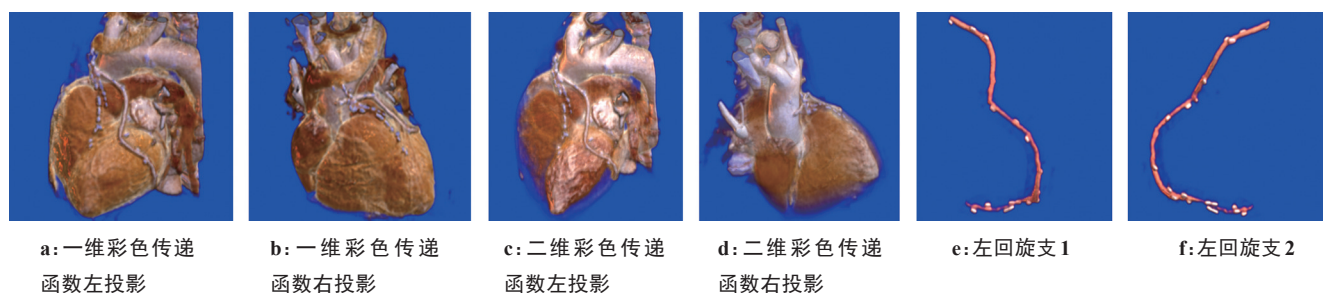


图9 心脏和冠状动脉在不同传递函数下的图像

Figure 9 Renderings of the heart and coronary artery with different transfer function

### 3 结语

本文着重研究通过设计不同形状和属性的切割工具, 以模拟手术刀操作方式对心脏外部组织进行剔除的软、硬切割方法。通过模拟手术中的水刀切割方式在分离坏死组织的前提下保留有用的器官组织。在不依赖复杂分割算法的情况下对存在复杂粘连的全心脏体数据和冠状动脉进行快速有效分割, 依靠GPU的数据和图像处理能力快速呈现出全心脏和冠状动脉的生理状态, 将对疾病的诊断交给医生, 器官分割工具只提供易于医生理解的操作性强的快速医学图像分析手段, 本研究的切割工具还适用于其他器官组织的切割, 也可对由智能和经典分割算法没分割干净的多余粘连组织进行实时剔除的后处理。

### 【参考文献】

[1] Bai WJ, Sinclair M, Tarroni G, et al. Automated cardiovascular magnetic resonance image analysis with fully convolutional

networks[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2018, 20(1): 65.

- [2] Bortsova G, Dubost F, Hogeweg L, et al. Semi-supervised medical image segmentation via learning consistency under transformations [C]//Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention-MICCAI 2019. Cham: Springer International Publishing, 2019: 810-818.
- [3] Bruns S, Wolterink JM, Takx RA, et al. Deep learning from dual-energy information for whole-heart segmentation in dual-energy and single-energy non-contrast-enhanced cardiac CT[J]. Med Phys, 2020, 47(10): 5048-5060.
- [4] Qin C, Bai WJ, Schlemper J, et al. Joint learning of motion estimation and segmentation for cardiac MR image sequences[C]//Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention-MICCAI 2018. Cham: Springer International Publishing, 2018: 472-480.
- [5] Cianciulli A, Lasso A, Pinter C, et al. Simulation of delivery of clip-based therapies within multimodality images to facilitate preprocedural planning[J]. J Am Soc Echocardiogr, 2021, 34(10): 1111-1114.
- [6] Li H, Ding JR, Zhang H, et al. The spatial distribution of renal fibrosis investigated by micro-probe terahertz spectroscopy system [J]. Diagnostics (Basel), 2022, 12(7): 1602.
- [7] He KM, Zhang XY, Ren SQ, et al. Deep residual learning for image recognition[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 770-778.
- [8] Tomlinson SB, Hendricks BK, Cohen-Gadol A. Immersive three-dimensional modeling and virtual reality for enhanced

- visualization of operative neurosurgical anatomy[J]. *World Neurosurg*, 2019, 131: 313-320.
- [9] Tong QQ, Ning MN, Si WX, et al. 3D deeply-supervised U-Net based whole heart segmentation[C]//*Statistical Atlases and Computational Models of the Heart. ACDC and MMWHS Challenges*. Cham: Springer International Publishing, 2018: 224-232.
- [10] Chen L, Bentley P, Mori K, et al. DRINet for medical image segmentation[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2018, 37(11): 2453-2462.
- [11] Dalvand M, Fathi A, Kamran A. Flooding region growing: a new parallel image segmentation model based on membrane computing [J]. *J Real-Time Image Proc*, 2021, 18(1): 37-55.
- [12] Bonasia S, Bouthillier A, Robert T. Segmental classification of the internal carotid artery: an overview[J]. *Contemp Neurosurg*, 2020, 42(18): 1-5.
- [13] Gautam N, Saluja P, Malkawi A, et al. Current and future applications of artificial intelligence in coronary artery disease[J]. *Healthcare (Basel)*, 2022, 10(2): 232.
- [14] Muthu R, Saritha S, Rani C, et al. Morphological operations in medical image pre-processing[C]//2017 International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS-2017). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 2065-2070.
- [15] Joshi M, Melo DP, Ouyang D, et al. Current and future applications of artificial intelligence in cardiac CT[J]. *Curr Cardiol Rep*, 2023, 25(3): 109-117.
- [16] Liang S, Zhang RG, Liang DY, et al. Multimodal 3D DenseNet for IDH genotype prediction in gliomas[J]. *Genes (Basel)*, 2018, 9(8): 382.
- [17] Sinha A, Dolz J. Multi-scale self-guided attention for medical image segmentation[J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2021, 25(1): 121-130.
- [18] Chai SM, Fu XM, Hu X, et al. Sphere-based cut construction for planar parameterizations[J]. *Comput Graph*, 2018, 74: 66-75.
- [19] Cai LL, Nguyen BP, Chui CK, et al. Rule-enhanced transfer function generation for medical volume visualization[J]. *Comput Graph Forum*, 2015, 34(3): 121-130.
- [20] Wijewickrema S, Zhou Y, Bailey J, et al. Provision of automated step-by-step procedural guidance in virtual reality surgery simulation[C]//VRST'16 Proceedings of the 22nd ACM Conference on Virtual Reality Software and Technology. [S.l.]: [s. n.], 2016: 69-72.
- [21] de Albuquerque VH, de A Rodrigues D, Ivo RF, et al. Fast fully automatic heart fat segmentation in computed tomography datasets [J]. *Comput Med Imaging Graph*, 2020, 80: 101674.
- [22] Sudre CH, Li WQ, Vercauteren T, et al. Generalised dice overlap as a deep learning loss function for highly unbalanced segmentations [C]//*Deep Learning in Medical Image Analysis and Multimodal Learning for Clinical Decision Support*. Cham: Springer International Publishing, 2017: 240-248.
- [23] Chen T, Zhang Y, Ding C, et al. Virtual reality as a learning tool in spinal anatomy and surgical techniques[J]. *N Am Spine Soc J*, 2021, 6: 100063.
- [24] Elsayed M, Kadom N, Ghobadi C, et al. Virtual and augmented reality: potential applications in radiology[J]. *Acta Radiol*, 2020, 61(9): 1258-1265.
- [25] Chen C, Qin C, Qiu HQ, et al. Deep learning for cardiac image segmentation: a review[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2020, 7: 25.
- [26] Binder C, Duca F, Stelzer PD, et al. Mechanisms of heart failure in transthyretin vs. light chain amyloidosis[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2019, 20(5): 512-524.
- [27] Javaid M, Haleem A, Singh RP, et al. Understanding roles of virtual reality in radiology[J]. *Internet Things Cyber-Phys Syst*, 2022, 2: 91-98.
- [28] Wu FP, Zhuang XH. Unsupervised domain adaptation with variational approximation for cardiac segmentation[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2021, 40(12): 3555-3567.

(编辑:薛泽玲)