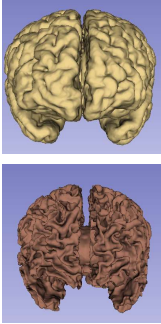


面绘制--基于体素的表面重建

这是一种直接从体数据提取物体表面的方法。代表性的是Lorensen等人提出的移动立方体法(Marching Cube)。以人脑图象为例加以说明。在剔除大脑皮层、颅骨和其它非脑成分之后,只剩下大脑部分。由于我们感兴趣的是脑表面的形态而不考虑其内部的细节,因此,要把位于大脑表面上的像素与大脑内部分开,这个过程称做轮廓提取(Contouring)。

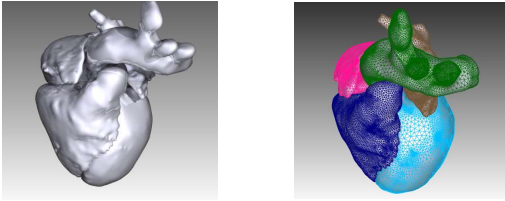


脑白质表面

脑灰质表面

对数据中感兴趣的部分(如皮肤、骨骼)进行轮廓识别和提取等操作,构造中间几何图元(如小三角形、小曲面片)来绘制等值面,以表面的方式还原被检测物体的三维模型。

可以加入光照模型、阴影处理等使重建的三维表面模型更加有真实感。



面绘制--基于体素的表面重建

◆本质: 从三维数据场中将具有某种阈值的等值面抽取出来,以某种拓扑形式连接成三角面片。

◆技术关键: 轮廓提取,即提取所要查看结构(感兴趣的)的表面轮廓(Contouring)。

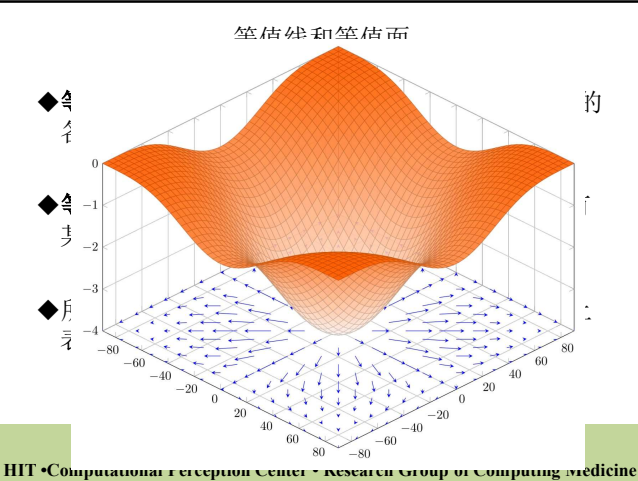
面绘制--基于体素的表面重建
--移动立方格 (Marching Cube)

◆直接从体数据提取物体表面的方法。

◆代表方法是Lorensen等人提出的
——移动立方体法(Marching Cube)

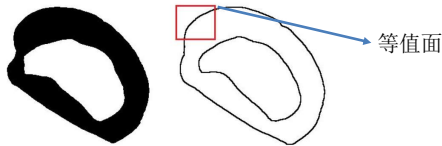
面绘制--基于体素的表面重建
--移动立方格 (Marching Cube)

- 相关概念:
- 等值线和等值面
- 构型表
- 轮廓提取方法



给定一个阈值，对三维医学体数据提取轮廓也就是对其提取满足指定阈值的等值面。
这里的阈值一般是灰度值。

- ✓ 等值面内部，所有的像素值都大于/小于阈值；
 - ✓ 等值面外部，所有的像素值都小于/大于阈值；
- 从而可以将感兴趣结构与其他部分分开。



哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

构型表 (Case Table)

定义:

对一个数据集单元及单元顶点的标量值计算所有可能拓扑状态，对这些状态建立的索引表。

- ◆ 拓扑状态数取决于单元顶点个数及一个顶点可能对于轮廓内外的关系数。
- ◆ 索引值可对每个顶点做二进制数字编码。

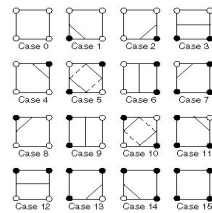
哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

2D图像的轮廓是由直线段连接而成。

例如，
一个正方形单元有四个顶点，
每个顶点可以在轮廓内部或外。
因此，轮廓通过该单元共有
 $2^4 = 16$ 种方式。

索引值：四位二进制编码



哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

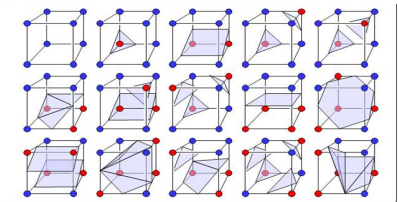
HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

3D图像的轮廓则复杂的多，是由许许多多的小三角形面片镶嵌而成的。

例如，一个立方体有八个顶点，当顶点标量值大于等于阈值 C_0 ，标记为内部点；小于 C_0 ，标记为外部点。

每个立方体与等值面相交情况有256种，但因为正方体具有反对称和旋转对称等特征，可将构型种类合并为15种。

索引值：
8位二进制码



哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

轮廓提取方法

基本步骤:

- ① 选择一个单元
- ② 计算该单元每个顶点的内/外状态
- ③ 生成每个顶点二进制状态的编码索引值；
- ④ 按照索引值查构型表得到所需的拓扑状态；
- ⑤ 确定构型之后，插值计算得到每条边的轮廓交点；
- ⑥ 连接交点即形成感兴趣的轮廓。

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

具体的算法细节是什么？

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

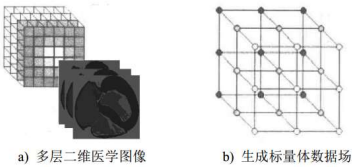
移动立方体法

对于正方形网格表示的2D数据，每个单元是一个正方形；
对于立方体网格表示的3D数据，每个单元是一个立方体；

用该算法处理完一个单元后，移动或前进到另一个单元。当所有单元都走过后，轮廓就完成了。

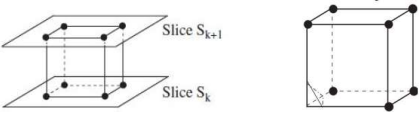
移动立方体法

基本思想
◆ 将序列断层图像看作一个离散的三维体数据场。



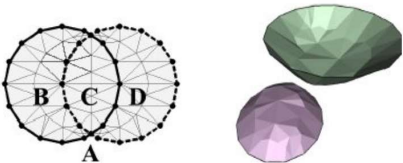
移动立方体法

基本思想
◆ 将序列断层图像看作一个离散的三维体数据场。
◆ 给出等值面阈值，进行**轮廓提取**：判断体数据场中的每个**体素与等值面的相交情况**，线性插值计算出交点。



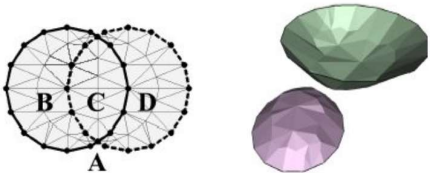
移动立方体法

基本思想
◆ 将序列断层图像看作一个离散的三维体数据场。
◆ 给出等值面阈值，进行**轮廓提取**：判断体数据场中的每个**体素与等值面的相交情况**，线性插值计算出交点。
◆ 按照法向量连接交点构成三角面片，拟合三维模型。



移动立方体法

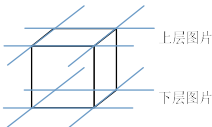
基本思想
◆ 将序列断层图像看作一个离散的三维体数据场。
◆ 给出等值面阈值，进行**轮廓提取**：判断体数据场中的每个**体素与等值面的相交情况**，线性插值计算出交点。
◆ 按照法向量连接交点构成三角面片，拟合三维模型。
◆ 结合**光照模型**，绘制模型。



算法过程

- ◆ 每次读取两张切片，形成一层layer
- ◆ 两张切片上下对应的四个点构成一个**体素**(立方体cube)
- ◆ 从左到右，从前到后顺序处理一层中的所有cube，抽取每个cube中包含的等值面片
- ◆ 从下到上顺序处理n-1层

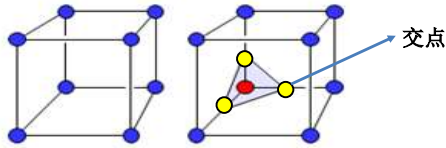
“移动立方体”的思想



交点计算

根据一个立方体8个顶点的状态, 可以获取一个0-255之间的索引值, 查询构型表可得到三角面片三个顶点所在边号。

在每条边上进行线性插值, 得到三角片的顶点坐标(即等值面与立方体的交点), 就可以进行三维模型拟合。



哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

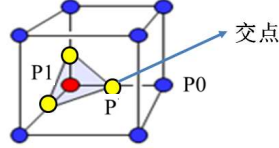
HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

交点计算的理论基础:

当三维体数据场规模较大时, X、Y、Z三个方向上的数据呈线性变化。

因此, 交点P可以根据下面的公式计算。其中, P0、P1为体素边的两端顶点坐标值, gray[0]、gray[1]分别为两顶点的灰度值。C₀是P点的灰度值。

$$P = P_0 + \frac{(C_0 - \text{gray}[0]) \times (P_1 - P_0)}{\text{gray}[1] - \text{gray}[0]}$$



哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

等值面明暗显示

- ◆ 三角片的生成仅仅完成了等值面的构造
- ◆ 为了使显示出的三维模型具有真实感, 需要考虑光线和对象表面的相互作用
- ◆ 需要结合**光照模型**, 实现等值面的明暗显示。
- ◆ 引入光照模型后, 屏幕上每个像素的颜色会由光源和对象表面的颜色决定。

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

光照模型

常用光源模型概念:

- 彩色光源: 将光源建模表示为三色分量的强度, 与人眼观察者所能看到的颜色分量对应, 三个分量的计算相互独立。

$$I = \{I_r, I_g, I_b\}$$

- 环境光(ambient light): 均匀照明。假定场景中每一处都有一个环境光强度, 每一点的 I_a 都相同

$$I_a = \{I_{ar}, I_{ag}, I_{ab}\}$$

- 点光源: 从一点发射光线, 所有方向光线强度都相等, 强度与距离成反比。

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

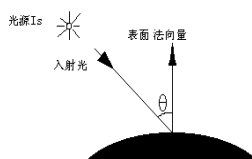
简单定义光照模型: $I = I_a + (I_s - I_a) \cos \theta$

I 是三角片的光强

I_a 是环境光强

I_s 是光源光强

θ 是三角片指向物体外部的法向量与光线的夹角



显然, 三角片的光强与光源的方向和强度均有关。

因此三角片的**表面法向量**的计算是真实、准确显示物体表面的关键问题。

注意: 实际光照模型很复杂, 有很多种类, 感兴趣可自行查阅资料

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

表面法向量计算

——基于灰度梯度计算

顶点(i, j, k)上的灰度值记为S(i, j, k), 灰度梯度记为 $g = (g_x, g_y, g_z)$, 则:

$$\begin{cases} g_x = [s(i+1, j, k) - s(i-1, j, k)] / 2 \\ g_y = [s(i, j+1, k) - s(i, j-1, k)] / 2 \\ g_z = [s(i, j, k+1) - s(i, j, k-1)] / 2 \end{cases}$$

对 g 进行归一化, 得到 $(g_x/|g|, g_y/|g|, g_z/|g|)$ 作为(i, j, k)上的单位法向量。然后, 对体素八个顶点上法向量进行线性插值就可得到位于体素棱边上的三角片的各个顶点上的法向量。

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

设计算得到的某个三角片的三个顶点上的单位法向量分别为：
 (x_1, y_1, z_1) 、 (x_2, y_2, z_2) 、 (x_3, y_3, z_3)

设这个三角片的几何重心为：

$$(c_x, c_y, c_z)$$

则该三角片的法向量

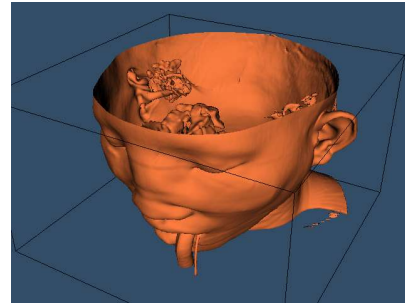
- 起于 (c_x, c_y, c_z)
- 终于 $((x_1+x_2+x_3)/3+c_x, (y_1+y_2+y_3)/3+c_y, (z_1+z_2+z_3)/3+c_z)$ 。

将法向量代入光照模型公式，就可计算出小三角片表面的光照强度。

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

案例展示



※对人的头部扫描数据进行皮肤等值面的提取

※基于VTK实现

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine



※对心脏血管进行等值面的提取

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

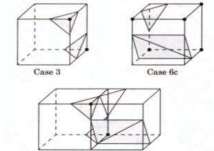
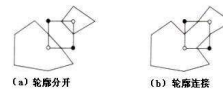
HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

缺点

◆ 轮廓(拓扑结构)的二义性

当我们将不同颜色赋予一个单元某一面的对角顶点时，顶点位于轮廓线内外状态不同，连接起来会出现下面的二义性。

因为面的二义性，会导致如果任选立方体状态连接轮廓，可能导致等值面产生**空洞**



哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

◆ 数据量大，效率低

算法需要遍历每个体素构成的立方体。

假如有 $512 \times 512 \times 58$ 的体数据，则有 $511 \times 511 \times 57$ 个立方体，假设 $1/10$ 立方体与等值面相交，每个立方体平均有两个三角片，那么这个体数据最终会产生接近300万个三角片。

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

随着CT、MR等成像技术不断地进步和发展，断层数据的层片间距越来越小，层片内部的空间分辨率越来越高，Marching Cube算法在体素上产生的小三角面片数目激增。

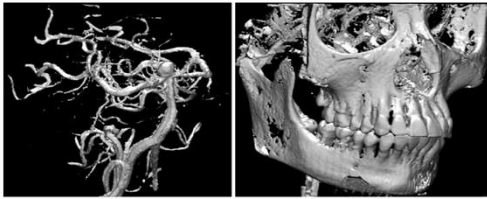
而且屏幕显示的空间分辨率有限，由Marching Cube生成的小三角面片可能比显示屏上的像素还小，这时计算三角面片来绘制反而很耗时间。

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

Marching Cubes implementation using OpenCL and OpenGL

BY ERIK SMISTAD · PUBLISHED OCTOBER 7, 2011 · UPDATED MAY 30, 2016



In a school project I recently created a fast implementation of Marching Cubes that uses OpenCL to extract surfaces from volumetric datasets and OpenGL to render the surfaces on screen. I wrote a paper together with my two supervisors about the implementation and presented it at the Joint Workshop on High Performance and Distributed Computing for Medical Imaging at the MICCAI 2011 conference. Our implementation achieved real-time speeds for volumes of sizes up to 512x512x512 on a standard GPU with 1GB memory. The paper entitled "Real-Time Surface Extraction and Visualization of Medical Images using OpenCL and GPUs" describing the implementation can be downloaded [here](#). The source code of the implementation can be downloaded from my [GitHub page](#).

OpenCL™ (Open Computing Language) is a low-level API for heterogeneous computing that runs on CUDA-powered GPUs. Using the OpenCL API, developers can launch compute kernels written using a limited subset of the C programming language on a GPU.

OpenCL support is included in the latest NVIDIA GPU drivers, available at www.nvidia.com/drivers

In addition to OpenCL, NVIDIA supports a variety of GPU-accelerated libraries and high-level programming solutions that enable developers to [get started quickly with GPU Computing](#).

OpenCL is a trademark of Apple Inc., used under license by Khronos.



作业：下载源代码，调通并运行，给出结果及分析。

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组
HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

基于移动立方格方法的改进 ——划分立方体法(Dividing Cubes)

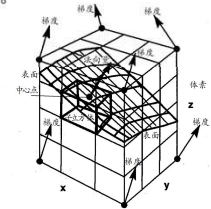
基本思想：
通过生成与显示像素对应的点元直接形成显示图像。

- ◆ 基于点元的绘制要比基于小三角面片的绘制在存储和计算方面都具有较大优越性。
- ◆ 适用于三维数据场具有很高密度的情况。
- ◆ 消除了二义性，并且比基于三角面片的绘制在存储和计算方面都有较大优越性。

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组
HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

主要改进

- 逐步扫描每个单元，当单元与等值面相交时，如果该单元在显示平面的投影面积大于一个像素的大小，就将体素细分为 $n_1 \times n_2 \times n_3$ 个子体素，使得每个子体素投影在显示平面上是一个像素的大小。



哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组
HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

- ◆ 每个子体素对应绘制一个表面点，子体素的8个顶点灰度值由原体素顶点灰度值线性插值得到。
- ◆ 对于与等值面相交的子体素，简单地在其中心生成一个点，再用线性插值方法计算出法向量，进行亮度明暗计算得到光照效果。
- ◆ 感兴趣的同学可以调查相关文献，进行深入了解！

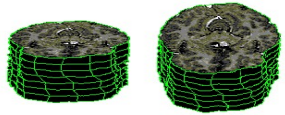
哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组
HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

目录

- 基于体素的表面重建
- 基于切片的表面重建
- 面绘制优缺点

基于断层切片轮廓线的表面重建

先对每个单张切片数据进行处理，根据给定阈值用轮廓提取的方法提取出感兴趣的等值线；
然后根据相邻切片的轮廓线构造出三角面片集，生成等值面，重建出三维物体的表面形态。



哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

主要步骤：

第1步：切片平面轮廓的提取。

一般基于物体与背景间灰度或其它属性的差异进行分割和提取。高质量的轮廓提取往往需要生物医学领域知识的引导。

第2步：切片间轮廓的对应。

片间轮廓的对应具有较大的任意性。一般可通过对不同层面上轮廓重叠部分定量投影和比较。

第3步：轮廓拼接。

确定了对应的轮廓之后，还需要确定对应轮廓上的对应点，然后通过三角化的方法连接两个轮廓。

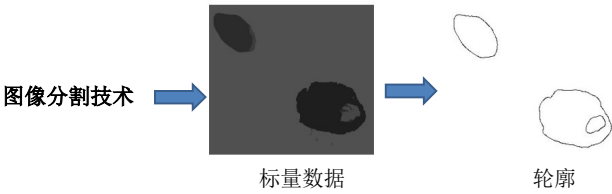
第4步：曲面重建。

基于拼接好的轮廓，可以直接进行曲面重建和调优，可以灵活的设计曲面的材质和光照。

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

第1步：切片平面轮廓的提取

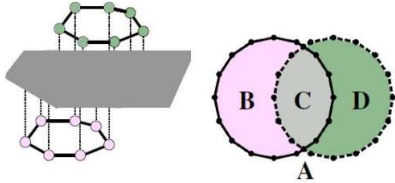
医学图像分割方法是常用的轮廓提取技术。



哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

第2步：切片间轮廓的对应

首先在两个平面之间构造中间面作为投影面，两个轮廓线之间的灰色面为投影面。然后将上下两个轮廓线在投影面进行正交投影。



哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

第3步：轮廓拼接

确定了对应的轮廓之后，还需要确定对应轮廓上的对应点，然后通过三角化的方法连接两个轮廓。



哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

第4步：曲面重建

基于拼接好的轮廓，可以直接进行曲面重建和调优，可以灵活的设计曲面的材质和光照。



哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

基于断层切片轮廓线的表面重建分析

■ 优点:

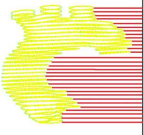
➢ 占用内存少，速度快，交互操作性好，能纠正因分类不当而导致的错误。

➢ 可以通过改变轮廓的采样密度，控制轮廓重建的精细程度。


■ 缺点:

➢ 在确定多分支等值线在相邻切片之间的拓扑对应关系方面没有很好的解决思路，分支处顶点的连接关系在一些情况下难以确定。

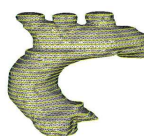
案例展示—不同采样密度的主动脉重建



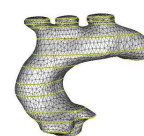
a) 等距采样



b) 基于轮廓相似度的采样



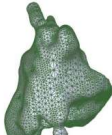
c) 等距采样轮廓线的曲面生成结果




d) 轮廓相似度采样的曲面生成结果

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

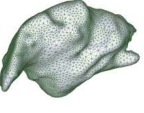
案例展示—心脏不同组织的重建结果



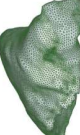
左心房



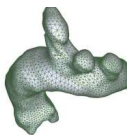
左心室




右心房



右心室



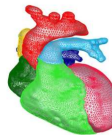
主动脉



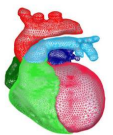
肺动脉

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

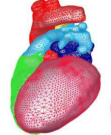
案例展示—心脏重建结果



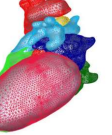
(a)



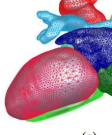
(b)



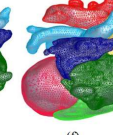
(c)



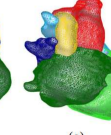
(d)



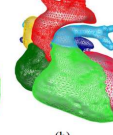
(e)



(f)



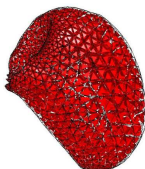

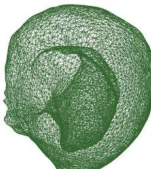

(g)



(h)

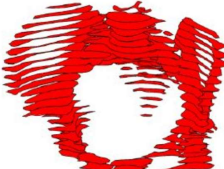
哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

案例展示—点云、网格、曲面、剖分

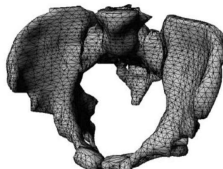


哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

案例展示—盆骨重建



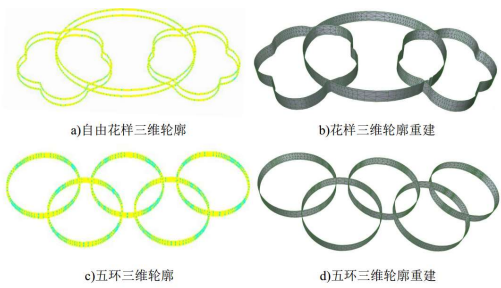
a) 盆骨轮廓数据集



b) 盆骨三维重建结果

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

案例展示



哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

目录

- 基于体素的表面重建
- 基于切片的表面重建
- 面绘制优缺点



优点	缺点
<ul style="list-style-type: none">➢ 处理体数据的一部分➢ 利用了计算机图形学的多边形绘制技术，借助图形硬件加速，绘制速度快，并且可以快速灵活地进行交互➢ 适用于绘制表面特征分明的组织和器官，例如CT数据生成骨骼的三维图像，形象清晰，可以一定程度上代替实物模型	<ul style="list-style-type: none">➢ 对表面分割精确程度要求高，对形状特征不明显、有亮度变化特征的软骨组织、血管、支气管等精细组织或器官的三维显示，效果不佳。➢ 不能保留数据的完整性。➢ 不能提供器官内部细节。

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

Thanks

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine