

# 基于标志点的虚拟剖切面重建

黄玉峰

(上海交通大学图像处理与模式识别研究所, 上海 200240)

**摘 要:** 针对现有医学图像技术中三维模型的虚拟剖切面重建算法功能单一、不能完成复杂路径剖切面展开的缺点, 提出基于空间任意标志点的剖切面重建算法。该算法可以沿三维空间中的任意路径完成虚拟剖切面展开, 包括确定标志点、拟合虚拟剖切路径、重建剖切面 3 个部分。实验证明该算法可以得到稳定优异的重建图像, 精确度较高。

**关键词:** 医学图像; 虚拟剖切; 三维重建

## Reconstruction of Virtual Cutting Surface Based on Marked Points

HUANG Yu-feng

(Institute of Image Processing & Pattern Recognition, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

**【Abstract】** This paper discusses the shortage of traditional virtual cutting surface reconstruction algorithm in medical image, which can not reconstruct a complex cutting surface. This paper proposes a virtual cutting surface reconstruction algorithm based on marked points to reconstruct a cutting surface along marked points in 3D environment. The algorithm includes marked points measure, cutting path fitting and cutting surface reconstruction. Experimental results show that the algorithm can provide good reconstruction image and high precision.

**【Key words】** medical image; virtual cutting; 3D reconstruction

### 1 概述

在三维重建的图像中经常需要对感兴趣的组织、器官进行虚拟剖切观察, 医生通过虚拟剖切组织、器官获取病变部位的形状、大小以及位置分布信息。虚拟剖切技术在计算机辅助诊断和计算机虚拟手术中有着极其广泛的需求和应用。传统的多平面剖切展开算法可以沿任意剖切平面进行展开, 但此类重建算法只是基于某个任意平面的展开, 不能沿某个任意路径进行剖切面展开。在临床医学实践中, 医生感兴趣的组织剖切面往往不是沿着某个固定平面, 而是沿着某个规划路径, 并且与组织表面相垂直的方向切割出来的剖切面展开图。沿着任意路径的剖切面展开图能更加直观地反映某些病变区域的病理情况, 而传统的剖切面展开方法都是基于平面的展开图, 无法达到这个效果。

本文提出基于标志点的虚拟剖切面重建算法, 可以通过交互方式任意设定切割路径, 进行剖切面展开, 克服了传统算法不能沿任意路径进行剖切的缺点, 整个剖切过程更加灵活, 操作更方便。并且算法运算量低, 可以很好地做到实时切割、实时显示。

### 2 算法的具体实现

任意剖切面展开算法主要分 5 个步骤完成:

(1) 设定切割标志点

使用 Marching Cube 算法<sup>[1-2]</sup>对原始的 DICOM 三维数据场<sup>[3]</sup>进行等值面提取, 得到病人的组织、器官三维模型。在重建的三维模型空间中, 医生可以在模型上以鼠标交互点击方式设定  $M$  ( $M \geq 3$ ) 个切割标记点, 而不必将整一剖切曲线在三维模型上标记出来。标记点为一个三维坐标点, 鼠标点击三维模型上时, 点击点的屏幕二维坐标将通过投影计算得到对应模型上的三维空间坐标。本文在 VTK (Visualization Toolkit)<sup>[4]</sup>的基础上进行三维交互操作的开发, 可以使用

vtkWorldPointPicker 类中的 GetPickPosition() 函数直接得到鼠标点击点处对应的标记点坐标。

(2) 拟合曲线, 计算切割路径

对上述  $M$  个切割标记点集合  $P_i(x, y, z)$  ( $1 \leq i \leq M$ ) 中  $(x, y, z)$  参数建立参数化的 3 次样条方程:

$$f_x(i) = P_{ix}, f_y(i) = P_{iy}, f_z(i) = P_{iz}$$

并假定起点、结束点的二阶导数为 0:

$$f_x''(1) = f_x''(m) = f_y''(1) = f_y''(m) = f_z''(1) = f_z''(m) = 0$$

通过 3 次自然样条曲线计算公式求解各区间段内  $(x, y, z)$  点关于参数  $t$  的 3 次自然样条方程系数  $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i, g_i, h_i, i_i$ , 那么参数  $t$  在区间  $(i, i+1)$  上任意点  $Q_i(Q_{ix}, Q_{iy}, Q_{iz})$  关于  $t$  的坐标计算公式为

$$\begin{aligned} Q_x(t) &= P_i \cdot x + a_i \cdot (t - P_{ix}) + b_i \cdot (t - P_{ix})^2 + c_i \cdot (t - P_{ix})^3 \\ Q_y(t) &= P_i \cdot y + d_i \cdot (t - P_{iy}) + e_i \cdot (t - P_{iy})^2 + f_i \cdot (t - P_{iy})^3 \\ Q_z(t) &= P_i \cdot z + g_i \cdot (t - P_{iz}) + h_i \cdot (t - P_{iz})^2 + i_i \cdot (t - P_{iz})^3 \end{aligned}$$

其中,  $1 \leq i \leq M-1$ 。由此可以得到拟合曲线上任意点的三维空间坐标。

(3) 计算切割路径上所有采样点的坐标

沿着拟合的切割路径曲线, 需每隔等长度采样计算剖切面展开信息, 因此, 需要计算出曲线上所有的等间隔点坐标。为了求解等间隔点, 需采用三维空间第 1 类曲线积分的方法求出所有等间隔点的坐标:

$$L = \int_l f(x, y, z) ds = \int_0^l f[x(t), y(t), z(t)] \cdot \sqrt{x'^2 + y'^2 + z'^2} dt$$

**作者简介:** 黄玉峰(1981-), 男, 硕士研究生, 主研方向: 医学影像处理, 虚拟手术系统开发

**收稿日期:** 2008-07-20 **E-mail:** yufeng.huang@hotmail.com

基于 3 次样条曲线的三维离散曲线长度积分推导公式如下：

$$L = \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{STEP} \left( \sqrt{Q_x(t) + Q_y(t) + Q_z(t)} \times STEP \right) = \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{STEP} \left( \sqrt{a_j + 2b_j(t - P_{jk}) + 3c_j(t - P_{jk})^2 + d_j + 2e_j(t - P_{jk}) + 3f_j(t - P_{jk})^2 + g_j + 2h_j(t - P_{jk}) + 3i_j(t - P_{jk})^2} \times STEP \right)$$

其中,  $STEP$  为积分步长。通过设定间隔长度, 可以计算出沿着曲线的所有等间距点坐标, 每个等间隔点即需要展开的采样点坐标。沿着拟合曲线的所有等间隔点的数量  $m$  则对应最终剖切面展开图的长度。图 1 中的  $M_1, M_2, M_3, M_4, M_5$  为设定的标记点, 通过曲线长度积分计算出  $P_1, P_2$  之间间隔  $STEP$  长度的等间隔点  $P_1, P_2, P_3, P_4$ , 整个拟合曲线上的等间隔点有  $m$  个。

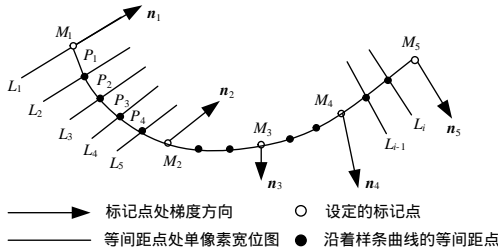


图 1 剖切面的构建

#### (4) 计算采样点处单像素宽位图

计算出所有采样点的三维空间坐标后, 需要计算当前剖切点的纵向切入方向。一般剖切面的纵向切入方向与组织表面相垂直, 所以, 可以认为每个采样点处的法向量方向就是剖切点的纵向切入方向, 由此可以计算当前采样点处沿  $x, y, z$  3 个方向的梯度值及当前法向量方向。本文采用三维 Sobel 算子计算空间某点处的梯度方向,  $x, y, z$  采用的 Sobel 算子为

$$Sobel_x = \begin{pmatrix} -1 & -3 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +3 & +1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -3 & -6 & -3 \\ 0 & 0 & 0 \\ +3 & +6 & +3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1 & -3 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +3 & +1 \end{pmatrix}$$

$$Sobel_y = \begin{pmatrix} +1 & +3 & +1 \\ +3 & +6 & +3 \\ +1 & +3 & +1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1 & -3 & -1 \\ -3 & -6 & -3 \\ -1 & -3 & -1 \end{pmatrix}$$

$$Sobel_z = \begin{pmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -3 & 0 & +3 \\ -1 & 0 & +1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -3 & 0 & +3 \\ -6 & 0 & +6 \\ -3 & 0 & +3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -3 & 0 & +3 \\ -1 & 0 & +1 \end{pmatrix}$$

分别对应  $(x-1, x, x+1), (y-1, y, y+1), (z-1, z, z+1)$  位置。通过 Sobel 三维算子可以计算出  $x, y, z$  3 个方向各自的分量, 归一化可得当前采样点处的法方向  $n(x, y, z)$ 。实验证明, 采样点处的法方向计算结果将直接影响最终剖切面的展开效果。多次实验的结果表明, 取采样点  $M_i$  为中心的立方体 8 个顶点处的法方向的平均值作为当前点的法向量值, 能较大幅度地抑制因 CT 噪声等因素造成的法方向计算误差偏大、剖切图效果不佳。

在实际做剖切面展开计算时, 2 个标记点之间的区域可能是空白区域或者组织表面不光滑区域, 这将严重影响这 2 个标记点之间采样点的法方向计算。经过多次实验证实, 2 个标记点之间采样点的法方向能以临近的 2 个标记点的法方向通过线性插值得到, 这样无论三维模型表面如何不光滑, 只要步骤(1)中的交互设定标记点位置合理, 总能得到非常好的剖切面展开结果。

见图 1, 在计算得到标记点  $M_1, M_2$  的法方向  $n_1, n_2$  之后, 位

于标记点  $M_1, M_2$  中间的采样点  $P_1, P_2, P_3, P_4$  的法方向通过  $n_1, n_2$  插值得到。在采样点  $P_i$  处, 沿着法方向计算出经过该点的直线方程, 然后计算出该直线上与点  $P_i$  相临近的  $N$  个连续点的坐标, 通过线性插值算法得到的这  $N$  个点的灰度值组成了  $P_i$  点所对应的一个单像素宽、长度为  $N$  的位图。

#### (5) 拼接所有采样点处的单像素宽位图

将步骤(4)中所有 ( $m$  个) 采样点处计算得到的、长度为  $N$  的单像素宽位图按照采样点的顺序拼接起来, 就能得到一个长度为  $m$ 、宽度为  $N$  的剖切面展开图, 该图是沿着标记点拟合曲线展开的剖切面的全景图。实验用的 DICOM 文件是 16 位灰度图, 需将计算得到的 16 位剖切面灰度图经过窗宽、窗位调节转换为 8 位灰度图后显示。通过术前计算机辅助分析该剖切面图, 医生可以方便地测量、分析组织上任意部位、任意路径的剖面展开图, 从而很方便地获取诊断、手术所需信息, 而整个剖切过程中, 医生的操作也大大减少了, 只需点击鼠标合理地选择标记点就可以完成整个剖切过程。

### 3 程序实现以及实验结果

本文选用了上海东方医院口腔科、放射科提供的  $512 \times 512 \times 300$  的病人 CT 数据对算法进行验证。实验分别对该病人的下颌骨、脊椎骨(图 2)、上牙床骨(图 3)、颅骨进行剖切点标定、剖切面重建, 并对重建的虚拟剖切面进行误差分析。

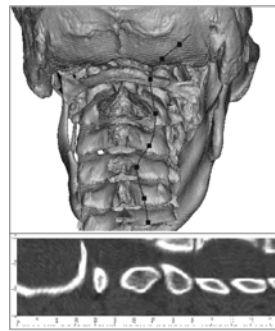


图 2 颈椎骨剖切面

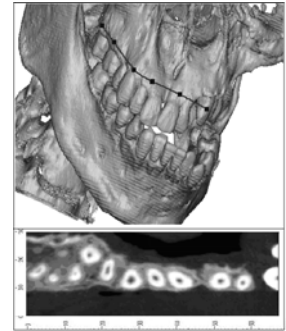


图 3 上牙床骨剖切面

图 2、图 3 所示模型中黑色圆点为点击鼠标作的标记点, 黑色曲线为拟合的空间三维样条曲线。从图 2 颈椎骨剖切面展开图可以看出, 本算法在不光滑三维模型表面选取合适标记点的情况下, 仍可以计算得到正确的剖切面展开图。

目前, 本算法已整合到后期开发的虚拟种植手术系统中, 为种植医生快速确定合理的种植点提供了极大的方便。此外, 为了测定重建虚拟剖切面的精确性, 选用了一颗参数已知(长度为 4.0 mm、直径为 5.0 mm)的种植体植入头颅模型, 对头颅模型进行 CT 扫描并实现三维模型重建, 然后使用本文的剖切面重建算法对三维模型中的种植体进行标记点设定, 实现对种植体的虚拟剖切面重建, 并对剖切面中的种植体直径与长度进行测量, 得到如下 5 组测量数据及误差统计结果:

剖切面上测量长度/mm	剖切面上测量直径/mm	长度最大误差值/mm	半径最大误差值/mm	长度测量方差	直径测量方差
3.6	5.1	0.4	0.3	0.017	0.028
3.6	4.7				
3.9	4.9				
3.8	4.8				
3.7	4.7				

从实验结果可知, 虚拟剖切面重建后测量真实种植体的误差小于等于 0.4 mm, 方差小于 0.03, 均小于医学影像分析的允许误差。  
(下转第 244 页)