

# 基于B样条曲线的断层离散数据平滑算法

李衷怡, 徐欣康

(华中科技大学 数字化工程与仿真中心, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**通过二维断层图像进行三维对象重建是现今较为活跃的研究领域,而二维断层数据的质量将直接影响到三维重建的效果。提出了一种对医学断层离散数据在三维重建前进行预处理的方法,通过单层轮廓平面内平滑以及多层轮廓基于层间关系的B样条曲线拟合对原始数据进行了平滑处理,减少了重建后层与层之间的锯齿现象,使得在此基础上的三维重建效果得到了明显的改善。算法具有一定的通用性,同样适用于其它领域的数据处理。

**关键词:**离散数据;B样条曲线;拟合;平滑

中图分类号:TP301.6

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2007)10-0016-04

## Algorithm of Scattered Data Smooth Based on B-Spline Curves Fitting

LI Zhong-yi, XU Xin-kang

(Digital Engineering Research Center, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Three-dimensional reconstruction based on the slices is now an active research field, and the quality of slice data will directly affect the reconstruction results. Presents a preprocessing method for the medical scattered data before the three-dimensional reconstruction. With single contour smoothing in plane and multi-contour smoothing based on B-spline curve fitting in space, the original data has been improved much. The experimental results indicate that this method makes reconstruct effect based on the processed data in a marked improvement. It is a common method, and is equally applicable to other areas of data processing.

**Key words:** scattered data; B-spline curve; fitting; smooth

## 0 引言

数字化虚拟人是医学科学技术、信息科学以及计算机科学技术高度综合的结晶,在医学教育等领域具有广泛的应用前景。而虚拟人三维重建的质量将会直接影响到其在各个领域的应用效果,因此如何提高三维重建的质量和可视化效果成为现今较为活跃的研究课题。

三维重建过程首先要对断层图像进行预处理,如轮廓识别和矢量化处理等,再提取出一系列截面轮廓线构造出三维形体供后继交互式使用。从一组平面轮廓重建三维曲面是一个具有普遍意义的研究主题,比如说从一组断层图像中的轮廓重建器官和组织的三维结构。这首先要求利用分割技术去提取每个断层上的体轮廓。由于二维断层图像是进行三维重建的原始数据,因此它的精确性将直接影响到三维重建的效果<sup>[1]</sup>。

在二维断层数据的采集过程中存在着误差,原因

主要有两方面:

- (1)在对断层图像校准的时候坐标出现偏差;
- (2)对器官边缘轮廓进行手工交互提取的时候,器官边界的判断存在误差。

因此,导致了在此基础上的三维重建效果不是很理想,其表面层与层之间会出现较为明显的锯齿现象。而人体器官和组织的三维表面通常是连续和平滑的,所以希望能够对各层轮廓数据进行纵向的平滑以便提高三维重建后的效果,为后期的曲面重建及网格简化提供较好的数据基础。

现有的平滑方法主要集中在三维重建之后的三角面片平滑方面,而针对重建之前的平滑处理研究比较少。因此,提出了一种对断层离散轮廓数据在三维重建前进行平滑预处理的方法,通过对单层轮廓的平滑以及对象整体的B样条曲线拟合平滑来达到改善三维重建效果的目的。

## 1 算法思想及实现框架

断层离散轮廓数据的整体平滑处理主要结合断层内的平滑和基于层间关系的B样条曲线平滑实现。由

收稿日期:2007-01-04

基金项目:中国教育和科研网络计划 ChinaGrid (CG2003-GA00102)

作者简介:李衷怡(1976-),男,湖南岳阳人,副教授,博士后,研究方向为医学影像处理、计算机图形学。

于原始数据在同一断层上已比较理想,只需做简单的处理,算法集中在层间的平滑处理,主要涉及到控制点的采样、管理以及 B 样条曲线的平滑控制。层间的平滑在一定程度上会影响到层面上的轮廓效果,所以在层间平滑后需对层面轮廓作进一步处理。图 1 所示是平滑算法实现的基本框架。

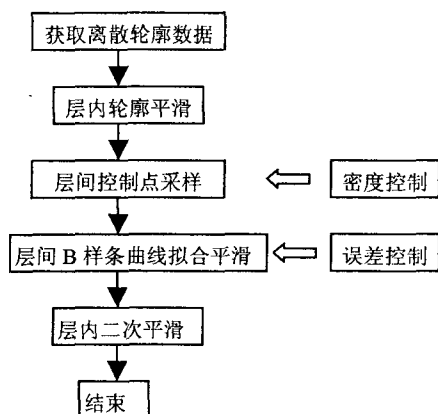


图 1 平滑算法实现框架图

## 2 层间平滑处理

### 2.1 坐标对齐

针对断层数据误差出现的一个因素—坐标校准偏差,首先须将各层轮廓的坐标统一标准化。基于理想轮廓中心坐标基本对齐的事实,先求出各层轮廓的中心点,然后可以求得整体对象的中心坐标,之后再根据各层中心点与整体中心点的误差调整轮廓数据的坐标,使得各断层轮廓的坐标一致。由于局部断层数据相对于整体数据具有更高的关联性,在实现过程中进行了对象分段处理,用局部中心坐标代替整体中心坐标,进一步提高坐标对齐的精度。

### 2.2 B 样条曲线拟合

在对齐坐标的基础上,文中提出的算法通过利用 B 样条曲线对轮廓沿纵向进行拟合来平滑层间的锯齿现象。如图 2 所示。

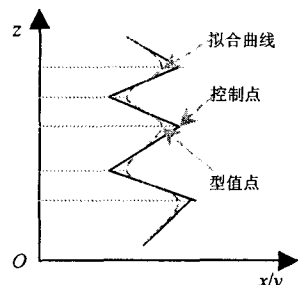


图 2 曲线拟合示意图

图 2 中所示实线为纵向上的控制点控制多边形,虚线为根据该多边形拟合出来的 B 样条曲线。通过曲线对控制点进行调整,获取型值点。

### 2.2.1 B 样条曲线介绍

B 样条曲线是在 Bezier 曲线的基础上提出来的,克服了 Bezier 曲线存在的不足:控制多边形的顶点个数决定了 Bezier 曲线的阶次以及不能作局部修改。它具有良好的性质:局部性、凸包性、几何不变性、变差缩减性、分段多项式、仿射不变性。正是基于 B 样条曲线的这些良好性质,使得在拟合过程中能够进行灵活地控制。

B 样条曲线的数学表达式为:

$$p(t) = \sum_{k=0}^n P_k B_{k,m}(t) \quad (1)$$

在式(1)中, $P$ 表示样条控制多边形, $P_k(k=0,1,\dots,n)$ 是控制多边形的顶点, $B_{k,m}(k=0,1,\dots,n)$ 为  $m$  阶( $m-1$ 次)B 样条基函数。从式(1)中可以看出:B 样条曲线是分段定义的,如果给定  $n+1$  个顶点  $P_k(k=0,1,2,\dots,n)$ ,则可定义  $n-m+1$  段  $m$  阶的参数曲线<sup>[2]</sup>。B 样条基函数定义为:

$$B_{k,l}(t) = \begin{cases} 1 & \text{若 } t_k \leq t \leq t_{k+1} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

$$B_{k,m}(t) = \frac{t - t_k}{t_{k+m-1} - t_k} B_{k,m-1}(t) + \frac{t_{k+m} - t}{t_{k+m} - t_{k+1}} B_{k+1,m-1}(t)$$

在式(2)中: $m$ 是曲线的阶数, $(m-1)$ 为曲线的次数,曲线在连接点处具有 $(m-2)$ 阶连续。

在实际拟合过程中,需要综合考虑拟合的效果和实现的效率。经过尝试性测试,我们采用了均匀三次 B 样条曲线作为拟合曲线,即在式(1)取  $m=4$ 。基于 B 样条曲线的性质,定义一段三次 B 样条曲线只需要 4 个多边形控制顶点,即在式(1)中取  $n=3$ <sup>[3]</sup>。下面是取定  $m=4, n=3$  时 B 样条曲线的各参数值。

$$\begin{aligned} B_{0,4}(t) &= \frac{1}{6}(-t^3 + 3t^2 - 3t + 1) \\ B_{1,4}(t) &= \frac{1}{6}(3t^3 - 6t^2 + 4) \\ B_{2,4}(t) &= \frac{1}{6}(-3t^3 + 3t^2 + 3t + 1) \\ B_{3,4}(t) &= \frac{1}{6}t^3 \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $t \in [0,1]$ 。

式(3)表示取定  $m, n$  值时 B 样条基函数的表达式。

$$p(t) = \sum_{k=0}^n P_k B_{k,m} =$$

$$[B_{0,4}(t) \ B_{1,4}(t) \ B_{2,4}(t) \ B_{3,4}(t)] \cdot \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} =$$

$$[t^3 \ t^2 \ t \ 1] \cdot \frac{1}{6} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = T \cdot M_B \cdot G_B \quad t \in [0,1) \quad (4)$$

式(4)表示取定  $m, n$  值时 B 样条曲线的表达式。

### 2.2.2 控制点采样

为了将断层轮廓沿纵向进行曲线拟合平滑,首先需要采样获取用于曲线拟合的控制点。文中通过纵向平面旋转切割断层轮廓的方法实现采样过程<sup>[4]</sup>。

如图 3 所示,首先求得断层的中心点  $O$ ,过中心点定义与  $Z$  轴平行的平面。该平面与各个断层之间的“交点”即为采样点。通过以过中心点与  $Z$  轴平行的直线为轴旋转平面一周,每隔一个固定角度  $\theta$  则可以实现对各层轮廓数据的完整采样,而  $\theta$  则直接决定型值点的采样密度,  $\theta$  越大采样密度越大。

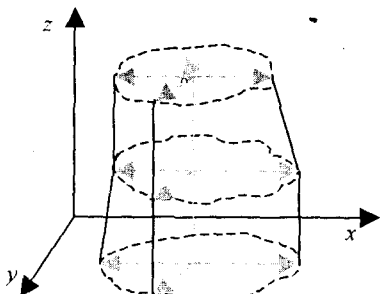


图 3 截面切割示意图

文中设计了一种较为灵活的网格模型对控制点进行存储管理。网格的横向表示单层轮廓的控制点索引,纵向表示断层索引<sup>[5]</sup>,如图 4 所示。

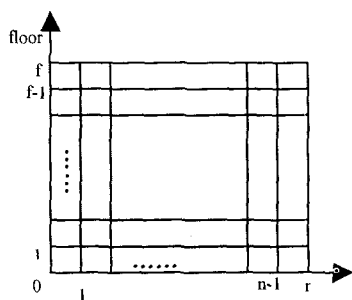


图 4 控制点控制网格

每一个网格元素包含以下信息:该元素所在轮廓平面内  $x, y$  坐标值,轮廓所在断层索引  $f$  和该元素的采样旋转角度  $\theta$ 。因此,每一列元素即包含进行一次曲线拟合的控制点,接下来的工作即对控制点进行曲线拟合平滑。

### 2.2.3 曲线拟合步骤

用于曲线拟合的控制点在采样后保存于网格模型中,每个控制点除了包含有对应的平面坐标值  $x, y$

外,还附有相对于平面中心点的旋转角度  $\theta$ ,且每一列网格上的型值点具有相同的角度值。为了使对象轮廓在平滑后不发生形变,曲线拟合必须在对象坐标系中进行。所以在对控制点进行纵向的拟合平滑时,须先将坐标系转换为对象坐标系。

下面为实现曲线拟合平滑的具体步骤:

(1) 获取对象中心坐标在  $xy$  平面上的投影  $O$ 。将原直角坐标系原点平移至中心  $O$ ,即将世界坐标系转化为对象坐标系。

(2) 从存储控制网格中读取一列控制点,根据该列控制点的旋转角度信息将其平面坐标投影到  $x$  轴,以便可以在  $xz$  平面内进行曲线拟合<sup>[6]</sup>。如图 5 所示。

(3) 进行 B 样条曲线拟合,根据控制点求取对应的平滑点。如图 5 所示。

(4) 对获取的型值点进行相应的逆操作,即先旋转,后平移,使其坐标重新转换为世界坐标系。

依次对网格中所有列数据进行上述操作,即可完成对象整体轮廓的空间  $z$  向平滑。为了提高平滑的效率,可以对控制点进行分段拟合。由于人体各个部位以及器官切片数据采集密度不同,在拟合过程中可以试探性地设定步长,视效果而定。并且利用网格存储控制优势,可以自动对控制点进行多次平滑处理<sup>[7]</sup>。

在曲线拟合的过程中,为了保证单层轮廓不发生大的形变,需要增设相应的约束性控制。文中采用的是最小二乘法拟合误差控制,即用最小二乘法保证拟合误差控制在预设值之内。

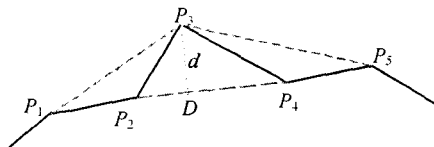


图 5 单层轮廓平滑示意图

## 3 层内轮廓数据平滑

层间的控制点曲线拟合平滑在一定程度上会对层内的轮廓产生影响。层内平滑处理的目的是为了消除这种影响,使轮廓数据达到平滑的效果。并且,层内平滑可以同样适用于手工提取轮廓时产生的凹凸现象,即在层间平滑处理之前应用。

为了保证单层轮廓处理的效率,文中采用了一种比较简易的方法。如图 5 所示,设  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$  为 5 个离散点。基于单层离散数据分布相对比较均匀的实际情况,利用点  $P_3$  到相邻点  $P_2$  与  $P_4$  连线  $P_2P_4$  的距离  $d$  来判断  $P_3$  的凹凸幅度。然后根据经验值对幅度变化太大的点进行坐标调整,如可以取垂线的中点作

为  $P_3$  的调整点。在实际处理中为了提高处理速度,利用  $P_3$  到  $P_2P_4$  中点的距离来取代  $P_3$  到  $P_2P_4$  直线的距离。经过这一简单的处理,单层轮廓取得了明显的改善。

在对离散点优化处理之后,再将各层的离散数据插值为封闭轮廓,继而填充为黑白二值图以备后期的重建工作。

## 4 实验结果

文中所采用的原始数据是从中国数字人男 1 号人体切片中提取的胃部器官离散轮廓,采用的三维重建算法是 Marching Cubes 算法。通过该算法对处理后的二维断层数据集进行三维重建可以看出效果有了明显的改进。如图 6 所示。

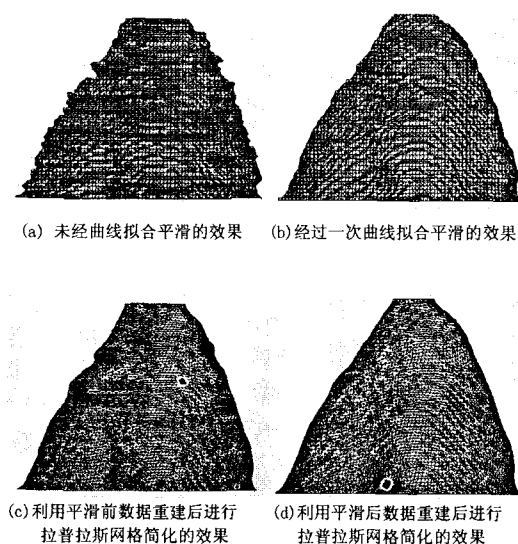


图 6 胃部 50 层轮廓数据三维重建效果

## 5 结论与展望

文中提出了一种对二维断层轮廓数据进行平滑预

处理的算法,结果显示,利用处理后的数据进行三维重建可以得到更为理想的效果,减少了重建后表面层与层之间的锯齿现象。并且,文中提出的算法在操作过程中具有良好的通用性和灵活性,可应用于人体器官重建以外的其他领域。

由于文中所用的控制点采样方法通过旋转平面实现,具有一定的局限性,对于一些凹凸幅度巨大的轮廓数据处理不是非常明显。因此,下一步工作是进一步改进型值点的采样方法,增加该算法的适用领域。同时需要对空间平滑做进一步的研究探索,以改进现在的 B 样条曲线拟合平滑。

### 参考文献:

- [1] 王宗彦,梁远蕾,李奇敏,等. 断层数据三维重构技术的研究进展[J]. 工程图学学报,2002(1):125-130.
- [2] 秦开怀. B 样条曲线升阶经典算法中的问题及其解决办法[J]. 清华大学学报:自然科学版,1997,37(4):4-6.
- [3] 潘日晶,潘日红,姚志强. B 样条曲线同时插入多个节点的快速算法[J]. 小型微型计算机系统,2003,24(12):2295-2298.
- [4] Franke R, Nielson G M. Scattered Data Interpolation and Applications: A Tutorial and Survey[C]//Hagen H, Roller D, eds. Geometric Modelling: Methods and Their Application. Berlin: Springer-Verlag, 1991:131-160.
- [5] Lee Seungyong, Wolberg G, Shin Sung Yong. Scattered Data Interpolation with Multilevel B-Splines[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1997, 3(3): 228-244.
- [6] Arge E, Hlen M D, Tveito A. Approximation of Scattered Data Using Smooth Grid Functions[J]. J Computational and Applied Math, 1995, 59:191-205.
- [7] Goldenthal R, Bercovier M. Spline curve approximation and design by optimal control over the knots[J]. Computing, 2004, 72:53-64.

(上接第 15 页)

### 参考文献:

- [1] Yourdon E, Argila C. 实用面向对象软件工程教程[M]. 殷人昆,田金兰,马晓勤,译. 北京:电子工业出版社,1998.
- [2] Chidamber S R, Kemerer C F. A Metrics Suite for Object Oriented Design[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 1994, 20(6):476-493.
- [3] Chidamber S R, Kemerer C F. Towards a metrics suite for object-oriented design[C]//Proceedings of 6th ACM Conference on Object Oriented Programming, Systems, Languages and Applications (OOPLSLA). Phoenix, AZ: [s. n.], 1991: 197-211.
- [4] Pfleeger S L. 软件工程理论与实践[M]. 吴丹等译. 北京:清华大学出版社,2003:256-261.
- [5] Vernazza T, Granatella G, Succis G, et al. Defining metrics for software components[EB/OL]. 2000. www.unibz.it/web4/archiv/objects/pdf/cslibrary.
- [6] Fenton N E, Pfleeger S L. 软件度量[M]. 杨海燕等译. 北京:机械工业出版社,2004.