# 基于稀疏网格改进的种子填充方法及其在 虚拟肝脏手术中的应用

朱晨阳1,熊岳山1,谭珂2,潘新华2

(1. 国防科技大学计算机学院,长沙 410073;

2. 中国解放军总医院教育技术中心, 北京 100853)

**摘要:**提出了一种基于稀疏网格的改进的种子填充方法,该方法通过定义一种新的种子点判定模式,将应用在平面区域中的种子填充方法扩展到了三维网格表面上;针对区域填充染色在稀疏网格上进行时遇到的毛刺现象,提出了使用贝赛尔曲线平滑处理方法来消除毛刺,达到平滑边界线的效果。最后将上述两种方法综合应用在虚拟肝脏手术的美兰标定过程中,达到了较好的实时性和逼真的模拟效果。

关键词: 种子填充算法; 稀疏网格; 虚拟肝脏手术; 贝塞尔曲线

**中图分类号:** TP391.9

5

10

15

20

25

30

35

40

# The improved seed fill algorithm based on sparse grid and the application to the virtual liver surgery

ZHU Chenyang<sup>1</sup>, XIONG Yueshan<sup>1</sup>, TAN Ke<sup>2</sup>, PAN Xinhua<sup>2</sup>

(1. School of Computer, National University of Defense Technology, ChangSha 410073;

2. Educational Technology Center, The PLA General Hospital, Beijing 100853)

**Abstract:** Providing an improved seed fill algorithm by defining a new seed point distinguishing method. Making the seed fill algorithm not only use in the flat problem but also in the three-dimensional grid problem. Against the Glitch when the improved seed fill algorithm using by the sparse grid, we provide a smooth method by using Bézier curve. At last, by summing up the two methods above, we take it into the virtual liver surgery to solve the methylene blue marking problem. The improved seed fill algorithm and the smooth method by using Bézier curve can provide a fast and visually realistic simulation for the boundary-fill problem of the sparse grid. **Keywords:** seed fill algorithm; sparse grid; virtual liver surgery; Bézier curve

# 0 引言

区域填充染色是根据区域的轮廓线,对其包围出来的区域进行染色的一个过程,这个问题在计算机图形学中是图形生成的一个基本问题。就目前而言,区域填充染色(boundary-fill)[1-3]的做法分为两大类:一种是通过横跨整个区域的扫描线对填充区域进行扫描填色的扫描线填充算法,还有一种是通过区域内某一点发散开来直到区域轮廓的种子边界填充算法[2-4]。扫描线填充算法主要适用于一些简单的轮廓的填充染色,在应对复杂的轮廓时,往往会失效。而种子填充算法则必须事先知道轮廓内的一点,并以其为种子进行发散,这种算法即使是面对复杂轮廓也可以有比较好的填充效果,但是其并不能直接应用于空间网格,只对平面网格有较好的效果。而且无论是哪一种方法,在应对稀疏网格时,因为轮廓线与其周围的网格点缝隙较大,填充边界都会有不光滑的毛刺现象。目前对于这种毛刺现象的平滑处理大都是使用插值的方法,经典的插值方法如牛顿插值法(Newton Interpolation),埃特金插值法(Aitken interpolation),三次样条插值法(Cubic spline interpolation)「6]等等,但是它们都要求已知的数据点是单调变化的,因此也就限制了这些经典插值方法的适用范围。贝赛尔曲线(Bézier

**基金项目**: 教育部博士点专项基金(20104307110003);全军医药卫生科研项目子课题(10MA025-FS006) **作者简介**: 朱晨阳,(1990-),男,硕士研究生,主要研究方向是计算机图形学和虚拟现实. E-mail: zhuchy123@163.com

curve)平滑方法<sup>[5]</sup>也属于插值方法的一种,但是其对数据点单调性上并没有要求,而且贝赛尔曲线计算复杂度小,适合用于消除区域填充染色的边界毛刺。

本文在经典的种子填充算法的基础上进行改进,将经典的平面处理方法扩展到三维空间 网格上,并在空间上使用贝赛尔曲线(Bézier curve)平滑方法对填充边界进行调整,该方法 能在稀疏网格中得到较好的填充效果。本文的最后,结合虚拟肝脏肝段切除手术中美兰染色的例子对整个算法进行效果展示。

## 1 种子填充方法

45

50

60

65

75

经典的种子填充方法是在平面上实现的算法,首先要已知封闭轮廓线内的一点作为初始种子点,然后开始搜索与此种子点距离在定义好的距离之内的点。<sup>[3-4]</sup>如果这些点在轮廓线之外,则搜索已经达到边界线;否则这些点就作为新的种子点,然后算法继续递归搜索下去。如果将经典的种子填充方法直接扩展到空间网格表面上,经典算法对于轮廓内外点的判定方式在空间上并不适用,所以本文设计了一个新的判定方法,使经典的种子填充方法可以扩展到空间网格表面上。

#### 55 1.1 改进的种子填充方法

经典的种子填充方法对于每一个数据点只会判定是否是种子点,以此来进行迭代和确定需要染色的点。本文提出的改进的种子点判定方法,对于每一个数据点都会判定两个属性,一个是否可以作为种子点继续发散,一个是是否可以染色。也就是说允许存在可以被染色但是不能继续发散的点,这是经典方法不允许存在的。

定义 1: 对于种子点  $x_0$ ,定义一个判定距离 l(一般取为整个网格上网格点之间距离的最大值),则所有在距离  $x_0$  空间距离小于 l 的网格点 y 记为可染色点,记入集合  $\Omega$  。再对集合  $\Omega$  中的点进行判定,若是其空间距离 2l 之内不存在边界点集  $\Delta$  中的点,则将这些点记为种子点记入集合  $\pi$  。

与经典的种子填充方法相比,本文改进的方法保留了其算法的精髓迭代思想,但是将迭代过程中种子点的判定过程细分,这样做的好处就是可以很好的进行边界判定,没有把种子点和可染色点混淆。

#### 1.2 改进的种子填充算法

整个算法的核心思想是由一个定义好的判定距离l和一个初始染色点 $x_0$ 根据一定的判别方法得到一个染色点集合 $\Omega$ 。

70 整个种子填充算法需要的初始信息有两个:染色区域边界点集 $\Delta$ 和初始染色点 $x_0$ 。染色区域边界点集 $\Delta$ 由系统根据操作者在网格表面勾画的闭合曲线采集得到,是之后算法获取染色点的判别条件之一。由于闭合轮廓线会将整个网格表面划分为两个部分,需要操作者来确定是哪一部分需要染色,所以初始染色点 $x_0$ 由操作者在染色区域内选择得到。

在整个改进的种子填充算法中,各个网格点处理判定的方式(即判别是否是染色点及是否可以成为种子点)如定义 1 所示。成为种子点的网格点就继续迭代下去,直到没有新的可染色点和种子点加入集合 $\Omega$  和集合 $\pi$ ,则算法结束。

整个算法的流程图如下:

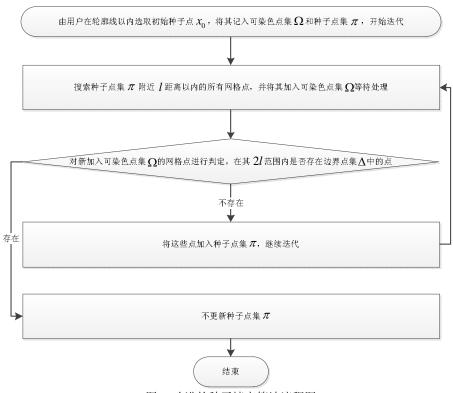


图 1 改进的种子填充算法流程图

80

85

# 2 染色区域的去锯齿处理

显然,如果网格上的网格点数量规模太大,种子填充算法对计算机的运算处理开销很大,所以在现实应用中更多的是使用较为稀疏的网格。对应到本文中问题中,由于网格点的稀疏,操作者在网格面上勾画的闭合曲线可能并不能正好对应到每一个网格点,如下图所示(蓝色线条为勾画闭合曲线的一部分,红色部分为根据上文算法获得的染色区域),如果勾画曲线落在三角面片的中间,就会在染色的过程中造成明显的锯齿现象。

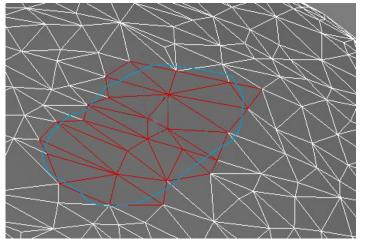


图 2 改进的种子填充算法在稀疏网格条件得到的可染色点存在一定的锯齿现象

90 为了克服这个问题,我们将提出一种使用贝塞尔曲线的平滑方法。

#### 2.1 贝塞尔曲线(Bézier curve)平滑方法

贝塞尔曲线(Bézier curve)平滑方法<sup>[5]</sup>总的来说就是将最靠近染色边界的染色点作为控

95

100

105

110

115

制点,绘制一条 Bézier 曲线,由于 Bézier 曲线有样条差值的特性,这样获得的染色区域边 界更加平滑,不会有锯齿现象出现和用户勾画获得的闭合曲线也更加贴近。

贝塞尔曲线逼近方法大致如下。假设给出n+1个控制点位置:  $p_k = (x_k, y_k, z_k)$ , k 可 以取到0到 $\mathbf{n}$ 。将这些坐标点混合为下列位置向量P(u),用来描述逼近多项式函数的路径 轨迹:

$$P(u) = \sum_{k=0}^{n} p_k BEZ_{k,n}(u), 0 \le u \le 1$$

其中贝塞尔混合函数  $BEZ_{k,n}(u)$  是:

$$BEZ_{k,n}(u) = C(n,k)u^{k}(1-u)^{n-k}$$

这里 C(n,k)
是二项式参数:

$$C(n,k) = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

将上述方法应用到本文中的问题中来,先在染色点集合 $\delta$ 中筛选出距离其最近的染色区 域边界点集 $\Delta$ 中的点的距离小于 $\frac{2}{3}l$ 的点作为边界范围点,记入控制点集 $\theta$ ,再根据上文中 提到的贝塞尔方法,根据控制点集 $\theta$ 中的数据绘制逼近的贝塞尔曲线作为新的染色边界,达 到消除锯齿的目的。

### 2.2 贝塞尔曲线(Bézier curve)平滑方法中控制点个数选择

现在主流的图形软件包一般将控制点的个数最大值限制为4个[5],因为随着控制点的增 长, 贝塞尔多项式的计算复杂度是增长的非常快的, 如果我们将所有的边界控制点都作为控 制点,一次性地进行贝赛尔曲线逼近,时间消耗是十分巨大的,远远不能达到实时性的需求, 所以为了性能的需求,在这里提出一种分段逼近的办法,利用低次的贝塞尔多项式来进行逼 近计算。

本文的做法是,将所有控制点按序分组,在每一组中使用低次的贝塞尔多项式进行逼近, 再将每一组得到的逼近曲线合并为一条,即为最后的染色区域边界曲线。经过多次试验,当 每一组控制点中的个数为3时,既可以很好的保证系统运行的实时性,也可以表现比较好的 显示效果。

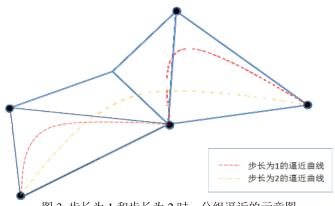


图 3 步长为 1 和步长为 2 时, 分组逼近的示意图

120 不同的轮廓曲线, 步长不同逼近的效果也不同, 所以在本算法中染色区域边界线取为步 长为 1.2 时获得的逼近曲线的平均值,经试验这样表现的效果最好。

125

130

135

140

# 3 改进的种子填充方法在虚拟肝脏手术中的应用

指定肝段的切除手术属于典型的肝脏外科手术,其目的是切除肝脏体上病变的肝段。肝脏切除手术前需要标定待切除的病变肝段,为了在手术过程中精确标定切除区域,在临床上一般使用美兰染色和电刀标定综合起来的方法。但在计算机上实现虚拟肝脏手术系统时,输入的肝脏网格模型是一个通过 CT 扫描得到的整体,并没有对肝段之间进行区分,所以若是要对指定肝段进行美兰染色必须对肝脏网格模型进行预处理。这个问题正好就是上文中提到的根据勾画的轮廓线进行填充染色的问题,我们将这改进的种子填充算法应用于虚拟肝脏手术美兰染色过程中,得到结果如图 2 所示。图 4(a)和图 4(b)是进行改进的种子填充算法之后得到的染色区域示意,图 4(c)和图 4(d)是对图 4(a)和图 4(b)处理结果进行贝塞尔曲线平滑处理之后的染色区域示意。

图 4 (b) 是图 4 (a) 的网格表示,可以清楚的看到,只使用改进的种子填充算法得到的填充区域与轮廓线之间还存在一些不吻合,也就是上文提到的毛刺现象。经过之后的贝赛尔曲线平滑处理之后,这些问题很明显地得到了改善,毛刺现象和之前相比少了很多。

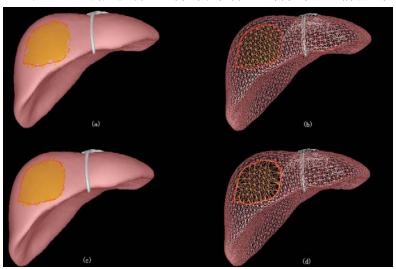


图 4 将改进的种子填充算法应用于虚拟肝脏手术

#### [参考文献] (References)

- [1] Donald Hearn, M. Pauline Baker. Computer Graphics with OpenGL(Third Edition). 蔡士杰 宋继强 蔡敏 译. 电子工业出版社 2009 年.
- [2] Yanovsky Vladimir M, Wagner Israel A, Bruckstein Alfred M. A linear-time constant-space algorithm for the boundary fill problem (J)// Computer Journal July 2007 50(4):473-477.
- [3] 柳稼航,方涛,杨建峰.适用于任意复杂区域的全自动填充方法(J).计算机工程 2008 34(4):238-240;
- [4] 余腊生,沈德用.扫描线种子填充算法的改进(J).计算机工程 2003 29(10):70-72;
- [5] Liu, Huayong, Wang, Huanbao, Li, Lu, Zhang, Daming. Blending trigonometric curve and Bézier curve with multi-shape parameters(J)//Journal of Information and Computational Science 2010 7(12): 2486-2494.
  - [6] 陈应祖,刘玉娟,彭军.非单调变化区间插值曲线的实现方法(J).计算机科学 2006 33(5):264-266.