# 面向二维 GIS 矢量数据三维可视化的地形匹配技术研究

康 来 赵 健 宋汉辰 吴玲达

(国防科技大学信息系统与管理学院 长沙 410073)

摘 要 提出一种二维 GIS 矢量数据三维可视化过程中地物与地形的快速匹配方法。结合矢量所代表地物的特性, 对基于矢量信息的三维地物进行了分类,综合采用了地物匹配地形和地形匹配地物两种方法。地物匹配地形算法通 过实时调整地物的位置和姿态实现与地形的匹配,地形匹配地物算法以不同的距离度量为基础,对矢量约束域内地形 进行变形操作实现匹配。本算法还讨论了原始地形数据分辨率较低以及多个地形匹配影响域相交等特殊情况的处理 方法。试验结果表明,本方法能满足基于点、线、面矢量信息的三维地物与地形的匹配需求,实现地物与地形无缝结合 及平滑过渡,从而达到改善视觉效果的目的。

关键词 矢量,三维可视化,地形匹配,虚拟环境

中图法分类号 TP391 文献标识码 A

## Terrain Matching for Three-dimensional Visualization of Two-dimensional GIS Vector Data

KANG Lai ZHAO Jian SONG Han-chen WU Ling-da

(College of Information Systems & Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** A fast terrain matching method for 3D visualization of 2D GIS vector data was proposed. 3D terrain features based on vector information were firstly classified by its characteristic, then either feature adjusting or terrain adjusting method was chosen for matching of features and terrain. Feature adjusting method adjusted the position and gesture of features in real-time, terrain adjusting method applied terrain deformation to vector constrained field based on different distance measurement. The algorithms also dealt with some special cases such as low resolution of terrain dataset and multi-vector restriction applied to the same area. Experimental results show that our method could meet the requirement of terrain matching effectively for 3D terrain features based on vector data including points, lines and surfaces with high visual quality.

Keywords Vector, Three-dimensional visualization, Terrain matching, Virtual environment

## 1 引言

二维地理数据按数据结构大致可分为栅格数据和矢量数 据两大类,其中矢量数据包含了丰富的地物信息(如房屋、道 路、城市等)。三维虚拟环境中栅格数据的可视化已经得到了 广泛深入的研究<sup>[1-4]</sup>,矢量数据可视化的研究相对较少。目前 为止,二维矢量数据的三维可视化方法大致分为基于纹理的 方法<sup>[5]</sup>和基于几何的方法<sup>[6-8]</sup>两大类。基于纹理的方法将矢 量作为纹理映射到地形表面,因此不会产生矢量与地形不匹 配的问题,但这种方法本质上是一种二维的方法,无法表达三 维地物。基于几何的矢量可视化方法,将矢量数据模型集成 到地形网格或附于地形表面,需要解决地物与地形的匹配问 题。如果地物与地形不匹配,则可能出现地物悬浮在空中、陷 人地表等与真实世界不符的情况。许多情况都可能导致地物 与地形不匹配,比如地形数据分辨率过低、地物与地形数据非 同一时期测量所得、测量误差等。 近年来,国内外学者针对地物与地形的匹配问题提出了 一些解决方案。文献[9]将三维地物地基作为约束点和约束 线添加到地形网格中,实现地物与地形的无缝集成,但特征 点、线约束的插入可能导致地形局部突变。关于如何改善视 觉效果,该文献未作讨论。文献[10]提出一种基于 TM 算子 的地形动态规划方法,该地形匹配方法的实质是局部地形平 整,所以应用范围有限。文献[11]借助地形变形方法,实现了 点、面状模型与地形无缝融合,但对道路、边界线等线状地物 与地形的匹配却无能为力。文献[12]研究了运动对象与地形 的匹配问题,通过实时调整对象的位置和姿态实现匹配,该方 法不适用于道路、街区等姿态固定或范围较大的对象。针对 现有方法存在的不足,本文重点研究点、线、面矢量数据可视 化过程中地物与地形的匹配问题。

- 2 地物与地形匹配算法
- 2.1 方法概述

到稿日期;2008-12-22 返修日期;2009-03-02 本文受国家 863 高技术计划项目(2006AA01Z319)资助。

康 来(1983-),男,博士生,主要研究方向为虚拟现实技术,E-mail:lkang.vr@gmail.com;赵 健(1981-),男,博士生,主要研究方向为虚拟 现实技术;宋汉辰(1977-),男,副教授,主要研究方向为虚拟现实技术及可视化;吴玲达(1962-),女,教授,博士生导师,主要研究方向为多媒体信息系统、虚拟现实技术。

地物与地形的匹配大体上有两种方案,即地物匹配地形 和地形匹配地物。地物匹配地形适用于通过调整地物姿态和 位置就能实现匹配的场合,地形匹配地物适用于仅仅依靠调 节地物姿态和位置无法达到匹配目的,而需要调整地形的场 合。针对点、线、面模型的不同特点,需要选用不同的匹配方 法。其中,地形匹配地物涉及到的地形调整大致可以分为两 种类型:一种是地形平整,即将某个区域范围内或者某个方向 上的地形调整到同一高度,从而保证地物地基与地形无缝结 合;另一种是地形平滑处理。实际匹配中,为了防止修改后的 地形出现"棱角"或者"悬崖",地形调整既要考虑地物对地形 的约束,又要考虑地形的平滑。按以上思路,二维矢量三维可 视化中地物与地形匹配的框架如图1所示。



图 1 地物与地形匹配框架

地形匹配中地形平滑因子定义如下:

 $f(x) = e^{-\frac{d_x^2}{2g^2}}$ (1)

其中, $\sigma(\sigma > 0$ )为常数, $f(x) \in (0,1]$ , $d_x$  描述 x 到参考点的距离。f(x)的函数值从 1 平滑过渡到 0,通过参数  $\sigma$  的调节易于控制函数的衰减速度。针对点、线、面 3 类矢量的不同特点,需要定义不同的距离度量,并综合考虑原始地形与地物属性选取合适的  $\sigma$ 。

#### 2.2 点矢量建模与匹配

点矢量数据用来表示大小可忽略不计、只有位置信息和 属性信息的实体。在三维环境中,点状数据经过三维建模后 依照位置属性大致可分为以下 3 类:1)位于地表且高程值可 调(如独立树木);2)位于地表且高程值固定(如电线杆);3)悬 于某区域上空(如地名标注)。这 3 类点状地物与地形的匹配 方法各不相同,下面分别说明。

1)对于第一类点状地物,由于高程值可以调节,因此只要 将其高程(地物地基的位置)调节为其所在位置地形的高程值 即可实现匹配。这种匹配方法首先需要确定地物所在三角形 (本文地形建模采用不规则三角网)。对于不规则三角网三角 形定位,一种简单的方法是遍历所有三角形,判断点是否位于 该三角形内部。但是当三角形数量较多时,会因为遍历开销 过大而影响算法的实时性。本文采用方向定位算法<sup>[13]</sup>来实 现三角形的快速定位。对于点状地物 V(*x*,*y*),假定已定位其 所在三角形 T 的 3 个顶点分别是 V<sub>0</sub>(*x*<sub>0</sub>,*y*<sub>0</sub>,*z*<sub>0</sub>),V<sub>1</sub>(*x*<sub>1</sub>,*y*<sub>1</sub>, *z*<sub>1</sub>),V<sub>2</sub>(*x*<sub>2</sub>,*y*<sub>2</sub>,*z*<sub>2</sub>),则三角形 T 所在的平面方程为:

z 1 x ν  $x_0$ No  $z_0$ **≈**0  $x_1 \quad y_1$  $\boldsymbol{z}_1$  $x_2$  $y_2$ 22 1 点 V 的高程可以用式(2)内插得到:  $z = z_0 (x-x_0)(y_{10}z_{20}-y_{20}z_{10})+(y-y_0)(z_{10}x_{20}-z_{20}x_{10})$ (2)  $x_{10} y_{20} - x_{20} y_{10}$ 其中,

 $y_{20} = y_2 - y_0$ ,  $z_{10} = z_1 - z_0$ ,  $z_{20} = z_2 - z_0$ .

2)对于第二类点状地物,由于高程值不能改变,因此需要 采用地形匹配地物的匹配方法。对于点状地物 V(x,y,z),原 始地形 DEM(Digital Elevation Model,数字高程模型)任意数 据采样点  $S(x_i, y_i, z_i)$ 采用式(3)修正  $z_i$  为:

$$z_{i}' = z_{i} + (z - z_{i}) \cdot e^{-\frac{D_{u}^{2}}{2c^{2}}}$$
(3)

其中, $D_u$ 为二维空间中点 S 到点 V 的距离:

 $D_{u}(V,S) = \|V-S\| = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \qquad (4)$ 

经过高程值修正后,V在xy平面投影位置的地形高程值 与地物V地基的高程值相同,且离地物V越远的地形采样点 高程修正值越小,相邻地形采样点高程修正值变化平滑,从而 达到既实现地物与地形的匹配,又无人工修改痕迹的目的。

3)对于第三类点状地物,要求悬浮于某区域上空,不能被 地形遮挡。以地名标注为例,在二维图形系统中,地标作为单 独的图层直接覆盖在其他图层上即可。而在三维系统中,地 标本质上也是一种三维实体,与地形有被覆盖、相交、相离 3 种空间关系(如图 2 所示),只有合理地控制地标的几何属性, 才能产生较好的视觉效果。本文采用四边形公告板(Bill-Board)来绘制地标,使地标始终面向观察者,且地标在屏幕上 的投影面积保持不变。



图 2 地标与地形匹配二维示意图

假定地标公告板的定位点为V(x,y,z),要求地标在屏幕 上的投影矩形 R 高度为h、宽度为w,当前视点位置为 $E(x_e, y_e, z_e)$ ,视线方向为EO(二维示意如图 2 所示)。当前模型视 点矩阵为 $M_{mu}$ ,投影矩阵为 $M_{pj}$ ,视口变换矩阵为 $M_{up}$ ,则地标 定位点的屏幕坐标V'(u,v,w)为 $V'=M_{mu}M_{pj}M_{up}V$ 。设 $V_0$  $(x_0, y_0, z_0)$ 为地标公告板一顶点在世界坐标下的坐标,相应 屏幕坐标为 $V'_0(u_0, v_0, u_0)$ , $V'_{01}(u_0, v_0, 1)$ 为线段 $EV_0$ 所在 直线上一点 $V''_0(s,t,r)$ 对应的屏幕坐标,则

$$\begin{cases} (V'_{01})_{x} = u_{0} = u - w/2 \\ (V'_{01})_{y} = v_{0} = v + h/2 \\ (V'_{01})_{z} = 1 \\ V_{0}'' = M_{\varphi p}^{-1} M_{p 1}^{-1} M_{m v}^{-1} V'_{01} \end{cases}$$
(5)

计算出顶点  $V_0$ "后,求解  $EV_0$ "所在直线与  $VV_0$  所在直线 的交点,便能得到  $V_0$  的坐标:

$$\begin{cases} EV_0'': X_1(t) = E + EV_0''t \\ VV_0: X_2(t) = V + (EV_0'' \times EV \times VE)t \end{cases}$$
(6)

用同样的方法,可以求出地标公告板其他 3 个顶点在世 界坐标系下的坐标  $V_1(x_1, y_1, z_1), V_2(x_2, y_2, z_2), V_3(x_3, y_3, z_3)$ 。

地标公告板四边形  $V_0V_1V_2V_3$  在 xy 平面上的投影即为 地标所覆盖的地形区域,计为  $P_b$ 。如果  $\min_{0 \le i < 4}$  大于  $P_b$  内地 形高程的最大值,则地标与地形相离,反之,地标与地形相交 或者被地形覆盖。地标公告板的定位点 V(x,y,z)中 x,y 值

$$x_{10} = x_1 - x_0$$
,  $x_{20} = x_2 - x_0$ ,  $y_{10} = y_1 - y_0$ 

不能改变,只能通过调节 z 实现与地形的匹配。地标与地形 的匹配实际上是寻找能保证地标与地形相离的最小的地标高 程值 z。为了保证地标公告板始终面向观察者,且在屏幕上 的投影面积和形状保持不变,调整 z 值后必须更新公告板的 形状和位置。z 的变化会导致地标覆盖区域和地标朝向的变 化,z 增大或减小均可能导致地标与地形不匹配,因此调整 z 后必须检验地标是否与地形匹配。如果不匹配,则需要再次 调整,直到匹配。实际操作中,可以借助折半查找的思想搜索 满足匹配要求的 z 值来加速匹配。

## 2.3 线、面矢量建模与匹配

线矢量在三维虚拟环境中主要有两种表现形式:一种是 没有宽度的线(如政区边界线),另一种是以原始线矢量为中 心线向两边扩展为面的线(如道路)。这两种形式的线矢量与 地形的匹配方法不同。前者可直接将线矢量作为特征线插入 到地形三角网中,后者由于线矢量扩展为面数据后,可能出现 与地形不匹配的现象,需要做匹配处理。本文研究的线矢量 匹配即针对这种情况,下面以道路线矢量为例加以分析。

二维线矢量通常为包含一系列特征点的折线。设包含n+1个顶点的道路线矢量L的顶点依次为 $V_0$ 至 $V_n$ ,连接这些顶点的线段为 $M_i(0 \le i \le n)$ 。定义点V到线矢量L的距离为点V到L上所有点的最短距离 $D_{it}$ :

$$D_{u}(V,L) = \operatorname{Min}\left(D_{u}(V,M_{i})\right) \tag{7}$$

其中, $D_{un}(V, M_i)$ 为V到线段 $M_i$ 的距离,由假设可知 $M_i$ 的 两个端点为 $V_i$ 和 $V_{i+1}$ ,方向向量 $\vec{d} = V_{i+1} - V_i$ ,则线段 $M_i$ 所 在直线的参数方程为 $X(t) = V_i + t\vec{d}$ , $D_{un}$ 由式(8)计算<sup>[14]</sup>:

$$D_{um}(V, M_i) = \begin{cases} \|V - V_i\|, & t' \leq 0\\ \|V - (V_i + t'\vec{d})\|, & t' \in (0, 1)\\ \|V - V_{i+1}\|, & t' \geq 1 \end{cases}$$
(8)

其中, $t' = \vec{d} \cdot (V - V_i) / \|\vec{d}\|^2$ 。不失一般性,考虑包含 3 个 特征点的线矢量  $L_c$ (如图 3(a)所示)。图 3(b)为此距离度量 定义下某区域内所有点到  $L_c$ 的距离图(距离越大灰度值越 低)。在  $L_c$  两边依次连接所有距离为 w/2 的点,可将  $L_c$  扩 展为宽度为 w 的路面。记两条扩展线分别为  $L_r$ , $L_l$ (如图 3 (c)所示)。



图 3 线矢量的距离度量及扩展

按常理,道路的同一横截面应保持水平,而沿其延伸方向 允许存在起伏,所以不能通过简单地将路面所覆盖的区域置 于同一高度实现匹配。本文采用如下方法实现有宽度的线矢 量与地形的匹配:对线矢量的任意横截面,假定分别交  $L_r$ ,  $L_e$ , $L_l$  于  $V_r$ , $V_e$ , $V_l$ (如图 3(c)所示),调整  $V_eV_r$  及  $V_eV_l$ 所覆 盖区域的地形高程值为  $V_e$ 处地形原始高程,并对  $V_eV_r$  及  $V_eV_l$  延长线上各点的高程值做平滑处理。对于原始地形格 网数据采样点  $S(x_i, y_i, z_i)$ 采用式(9)修正高程值  $z_i$  为:

$$z_{i}' = \begin{cases} z, & D_{d}(S, L_{c}) \leqslant \frac{w}{2} \\ z_{i} + (z - z_{i}) \cdot e^{-\frac{(D_{d}(S, L_{c}) - w/2)^{2}}{2s^{2}}}, & D_{d}(S, L_{c}) > \frac{w}{2} \end{cases}$$
(9)

其中,z为V。所在位置的原始地形高程。

面矢量是包含一系列特征点的多边形,根据所代表的对 象不同,地形匹配的方法也不一样。比如,代表街区的面矢 量,地形匹配时要求街区所覆盖的区域高程值应基本相同,而 代表植被的面矢量对地形就没有这种约束。类似于植被的面 矢量与地形的匹配实际上可以转化为包含于面矢量内部的 点、线矢量与地形的匹配。类似于街区的面矢量与地形的匹 配,需要对面矢量覆盖区域内的地形进行平整处理,对面矢量 边缘的地形进行平滑处理。为此,定义二维空间中任一点 V (x,y)与多边形 P 的距离  $D_{uv}(S,P)$ 如下:当V位于多边形 P 内部时  $D_{uv}$ 为 0,当V 不在多边形内部时, $D_{uv}$ 等于 V 到多边 形 P 边界上各点距离的最小值。对于原始地形采样点高程值  $z_i$ 为:

$$z_{i}' = \begin{cases} z, & D_{vp}(S,P) = 0\\ \\ z_{i} + (z - z_{i}) \cdot e^{-\frac{D_{vp}(S,P)^{2}}{2\sigma^{2}}}, & D_{vp}(S,P) > 0 \end{cases}$$
(10)

其中, z 为面矢量欲调整到的高度。按照以上介绍的二维点、 线、面矢量匹配方法,匹配结果如图 4 所示。





## 3 匹配影响域的计算及叠加

对于某一特定矢量数据,其在地平面上的投影所对应的 区域是有限的。地形匹配对原始地形的影响范围也是有限 的,如果能在地形匹配前计算出匹配影响范围,将大大提高匹 配效率。另一方面,在地形匹配过程中,需要对矢量约束边界 进行平滑处理。当原始地形数据分辨率较低时,只有通过扩 大平滑范围才能达到地形平滑目的,易造成较大失真。再者, 两个矢量约束域距离过小时,由于两个矢量约束相互影响,可 能导致匹配结果错误。本节将讨论如何解决这些问题。

## 3.1 参数选择及匹配影响域计算

对于正态分布  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ , 查表可知  $P(\mu - 3\sigma < X < \mu + 3\sigma) = \Phi(3) - \Phi(-3) = 99.74\%$ ,此  $3\sigma$  原则说明尽管正态 变量的取值范围是整个实数域,但它的值落在 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ 内几乎是肯定的。本文定义的平滑函数(式(1))与正态分布 形式相同,函数值相差常数倍,因此也应该具有  $3\sigma$  性质。这说明,当参考点距离地物的距离大于  $3\sigma$  时,地形匹配引入的 地形变形几乎可以忽略不计,因此  $\sigma$  应当作为地形匹配影响 区域计算的重要参考。下面以第二类点状地物为例,说明如 何确定地形匹配的影响区域。设原始地形数据分辨率为 r (单位:m,表示采样点间隔为 r m),点状地物的高程值为  $e_1$ , 点状地物在地平面的投影点对应的原始地形高程值为  $e_2$ 。 令:

 $\sigma = |e_1 - e_2| \cdot k \tag{11}$ 

其中,k为可调参数。当 r≤3σ/N,即平滑域可用 N(实验表明,当 N=10 时已经能够满足平滑过渡要求)个以上离散点 来拟合时,称原始地形数据分辨率满足精度要求。反之,称原 始地形数据分辨率不满足精度要求。

如图 5(a)所示,为便于作图,假定 N=3,对于点状地物 P(x,y),当原始地形数据满足精度要求时,匹配范围为以 P为圆心、 $3\sigma$  为半径的圆形。为了更加快速地计算匹配影响区 域,将匹配影响区域扩展为矩形。如图 5(b)所示,当原始地 形数据不满足精度要求时,需要插入新的顶点。为了保证平 滑效果,新插入的顶点将以 P 为圆心、 $3\sigma$  为半径的圆的外接 矩形划分为 2N \* 2N 等分。新插入顶点的初始高程通过对 原始地形进行双线性插值来获取,然后按照 2.2 节中的方法 对新插入顶点的高程进行修正。最后,新插入的顶点同原始 地形采样点一并参与地形三角网的构造。



图 5 点状地物地形匹配影响区域

#### 3.2 多个影响域作用叠加

如图 6(a)所示,设面矢量 A,B 为两个距离较近的多边 形。按照上述方法依次对 A,B 进行地形匹配后,A,B 匹配影 响区域相互重叠的部分的匹配结果并不理想(如图 6(b)所 示,已用椭圆标记)。对于数据真实性要求不高、仅注重视觉 效果的系统而言,可以将影响域重叠的矢量高程限定为同一 高度来消除这种影响。此时,对于地形采样点 S(x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>, z<sub>i</sub>), 经过两次高程修正后,有:

$$z_{i}'' = \left(e^{-\frac{D_{yp1}^{2}}{2g^{2}}} + e^{-\frac{D_{yp2}^{2}}{2g^{2}}} - e^{-\frac{(D_{yp1}^{2} + D_{yp2}^{2})}{2g^{2}}}\right) \cdot z + (1 - e^{-\frac{D_{yp1}^{2}}{2g^{2}}})(1 - e^{-\frac{D_{yp2}^{2}}{2g^{2}}}) \cdot z_{i}$$
(12)

其中,D<sub>\$\phi</sub>1,D<sub>\$\phi</sub>2分别为点到矢量 A,B 的距离,z 为面矢量欲 调整到的高度。处理结果如图 6(c)所示。类似地,这种方法 可以扩展为多个影响域重叠的情况。

在对数据真实性要求高于视觉效果的情况下,不能采用 上述方法,但应尽可能使影响域重叠区域平滑过渡。实际上, 对于任意地形采样点,离它越近的地物对其影响应该越大。 基于这种思想,我们得到如下带权匹配方法:记 n 个地物  $O_i$  $(0 \le i < n)$ 的匹配影响域分别为  $F_i(0 \le i < n)$ ,目标高程为  $z_i$ 。 集合  $I = \bigcap_{i=0}^{n-1} F_i$ ,且  $I \ne \Phi$ ,对于  $\forall S \in I$ ,记 S(x, y, z)与各个地 物之间的距离(根据地物的类型不同,距离度量可能不同)分 别为  $d_i$ ,S 点高程值按式(13)修改为;

$$z' = z + \sum_{i=0}^{n-1} \frac{f_i^2}{\sum_{j=0}^{n-1} f_j} \cdot (z - z_i)$$
(13)

其中, $f_i = e^{-\frac{d_i^2}{\omega^2}}$ 。带权匹配处理结果如图 6(d)所示。



4 实验结果与分析

为了验证本文算法的有效性,笔者利用 Visual C++

6.0和 OpenGL 在 Windows XP Professional 操作系统下实现 了本文算法。实验用地形数据含 4086 \* 4086 个采样点,三维 地形绘制采用基于不规则三角网的视相关 LOD 技术。对各 种二维矢量数据进行了测试,图 7 为部分实验截图。从图中 可以看出,地形匹配前,由于地标采用同一高度,许多地标都 被地形所遮挡(如图 7(a)所示)。地形匹配后,地标公告板随 视点移动实时更新,未出现地标陷入地表的情况(如图 7(b) 所示)。如果直接将矢量数据对应的三维建筑置于地形表面, 建筑物与地形存在多处不匹配(如图 7(c)所示)。通过本文 算法处理后,建筑物与地形实现了无缝结合(如图 7(d)所 示)。可见,通过本文算法的处理,地物与地形的匹配得到了 较好解决,处理后的地形过渡自然,视觉效果得到较大提升。



图 7 匹配实例

结束语 本文提出一种面向二维 GIS 矢量数据三维可 视化的地形匹配方法。针对点、线、面矢量的不同特点,采用 了不同的地物地形匹配方法,并综合考虑了原始地形数据分 辨率较低以及多个地形匹配影响域相交等特殊情况。实验结 果表明,本文算法能实现矢量数据的三维可视化及地物与地 形的较好匹配。但是,本文未考虑矢量数据组织及调度算法, 当矢量数据规模过大时,系统性能会受影响,这将是以后研究 的重点。

# 参考文献

- Levenberg J. Fast view-dependent level-of-detail rendering using cached geometry[A] // Proceeding of IEEE Visualization 2002
   [C]. Boston, USA, 2002;259-266
- [2] Schneider J, Westermann R. GPU-Friendly High-Quality Terrain Rendering[J]. Journal of WSCG, 2006, 14(1-3): 49-56
- [3] Clasen M, Hege H. Terrain Rendering Using Spherical Clipmaps
   [A] // Eurographics/IEEE-VGTC Symposium on Visualization
   [C]. Lisbon, Portugal, 2006;91-98
- [4] 李胜,冀俊峰,刘学慧,等.超大规模地形场景的高性能漫游[J]. 软件学报,2006,17(3):535-545
- [5] Kersting O, Dollner J. Interactive 3D visualization of vector data in GIS[A]// ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems[C]. McLean, VA, USA, 2002, 107-112
- [6] Weber A, Benner J. Interactive generation of digital terrain models using multiple data sources [A] // First International Symposium on Digital Earth Moving [C]. Manno (Lugano), Switzerland, 2001, 60-64
- [7] Wartell Z, Kang E, Wasilewski T, et al. Rendering vector data over global, multi-resolution 3D terrain[A]// Eurographics Symposium on Data Visualization[C]. Grenoble, France, 2003; 213-222
- [8] Agrawal A, Radhakrishna M, Joshi R. Geometry-based mapping and rendering of vector data over LOD phototextured 3D terrain models[A]//Proceedings of WSCG[C]. Plzen, Czech Republic, 2006;1-8

(下转第 292 页)• 265 •

(9)判断当前目的种子点和第一个种子点的距离小于给 定值 ε 时,置搜索结束标志 Flag 为 TRUE;

(10)把当前的目的种子点置为源种子点,如果 Flag= TRUE,把第一个种子点置为目的种子点,否则获取新的目的 种子点,转(2)执行。

基于配对堆的交互式分割算法动态寻优过程的流程如图 3 所示。

#### 3.3 算法性能分析

基于配对堆的交互式医学图像分割算法动态寻优过程的 时间复杂度主要由配对堆的基本操作决定。其中"合并"、"插 入"和"降级"3种操作均在常量时间内完成,其时间复杂度是 O(1)。"删除最小"操作的最坏情况是根节点具有 n-1 个儿 子节点,因此"删除最小"操作的最坏时间复杂度是 O(n)。采 用"两趟合并法"需要对所有儿子节点进行"合并"操作,能够 有效减少同一层次的兄弟节点数,因此降低了最坏情况的发 生机率。文献[9]指出了配对堆能够达到与斐波那契堆相同 的摊还时间复杂度 O(logn),因此对于边数为 E、节点数为 V 的有权图,基于配对堆的交互式医学图像分割算法动态寻优 过程的时间复杂度为 O(E+VlogV),即为 O(nlogn),与传统 的 Live-Wire 算法动态寻优过程的时间复杂度 O(n<sup>2</sup>)相比有 了显著的提高。

## 4 实验结果

为了验证算法的可行性与有效性,采用 vc++6.0 编程 实现了 Live-Wire 交互式分割算法以及本文提出的基于配对 堆改进动态寻优过程的交互式分割算法,并利用兰州军区总 医院提供的病人医学影像图像片做了大量的实验。在配置为 Winxp sp2,Pentium 2.4G,1G DDR2 的 PC 机上,对一张 512 \* 512 的原始 CT 图像构造代价函数后转化成具有 512 \* 512 个顶点的带权无向图,然后交互选择种子点,再通过本文提出 的动态寻优算法搜索源种子点和目的种子点间最短路径,直 至形成封闭的分割区域,实验结果如图 4 所示。



## 图 4 交互式分割算法分割示例

其中,图 4(a)为一张人体胸部的原始 CT 图片。图 4(b) 为用传统的 Live-Wire 算法勾画胸部空腔后的结果。图 4(c) 为用基于配对堆改进的交互式分割算法勾画胸部空腔后的结 果。图中勾画边界上的点为种子点。图 4(d)为对 10 张 512 \* 512 的原始CT 图片序列采用配对堆改进的交互式算法进行 分割,并将分割出的区域进行三维重建后的结果。在图 4(b) 和图 4(c)中,在相同位置均取 10 个种子点,在不计人工交互 取点耗费时间的情况下,传统的 Live-Wire 算法在该图上完 成区域勾画过程中,顺序搜索完成所有种子点间最短路径需

#### (上接第265页)

- [9] 蒲浩,宋占峰, 詹振炎. 基于 Delaunay 三角网数字地面模型的路 线三维建模方法[J]. 铁道学报, 2001, 23(4): 81-87
- [10] 王晨昊. 地理环境建模关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术 大学,2005,12
- [11] Intel. Dynamic Terrain Modification Using A Correction Algorithm[OL], 2006, http://www.andesengineering.com/Pro-

要 2870ms,基于配对堆的交互式分割算法在该图上完成区域 勾画过程中,顺序搜索完成所有种子间点最短路径需要 667ms。图 5 为重离子放射治疗计划软件系统图像分割模块 的实现界面。实验表明,采用配对堆改进的交互式分割算法 有更快的运行效率,缩短了在制定放射治疗计划时对医学图 像序列进行交互式分割的时间。



图 5 放射治疗计划系统图像分割模块的实现界面

**结束语**本文针对 Live-Wire 交互式分割算法在动态搜 索最短路径过程中效率低下的问题,提出了一种基于配对堆 的交互式医学图像分割算法。在动态寻优过程中通过使用配 对堆结构实现了可降级的优先队列,把 Live-Wire 算法动态 寻优过程的时间复杂度由 O(n<sup>2</sup>)降低为 O(nlogn),从而提高 了交互式分割算法在搜索最短路径过程中的运行效率,缩短 了在制定放射治疗计划前期对医学图像序列进行分割的时 间。

# 参考文献

- [1] 高新波,雷云,姬红兵. 一种改进的 Live-Wire 交互式图像分割 算[J]. 系统工程与电子技术,2003,25(8):915-918
- [2] 罗希平,田捷.一种改进的交互式医学图像序列分割方法[J].电 子学报,2003,31(1):29-32
- [3] Dang Jianwu, Wang Yangping, Li Sha, et al. Heavy-ion Radiotherapy Treatment Planning System and Medical Image Processing Algorithm Used in It[C] // IEEE CASE2008. USA, Aug. 2008
- [4] William B A, Eric M N. Fast, Accurate, and Reproducible Live-Wire Boundary Extraction[C] // Proceeding of the 4th International Conference on Visualization in Biomedical Computing. Hamburg, Germany, 1996
- [5] Weiss M A. Data Structures and Algorithm Analysis in C (Second Edition)[M], Beijing, China Machine Press, 2005; 372-376
- [6] Falcao A X, Udupa J K, Samarasekera S, et al. Usersteered image segmentation paradigms; live wire and live lane [J]. Graphic models and Image Processing, 1998, 60: 233-260
- [7] 田捷,赵明昌,何晖光.集成化医学影像算法平台理论与实践 [M].北京:清华大学出版社,2004
- [8] Cormen T H, Leiserson C E, Rivest R L, et al. Introduction to Algorithms, Second Edition [M]. The MIT Press, 2001
- [9] Stasko J T, Vitter J S, Pairing heaps: experiments and analysis
   [J]. Communications of the ACM, 1987, 30(3):234-249

jects/TDS/Docs/Dynamic\_Terrain\_IMAGE\_2006. pdf, 2008-5-27

- [12] 宋汉辰,魏迎梅,吴玲达. 三维对象模型与地形的匹配方法研究 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2003,15(9),1167-1171
- [13] 蒲浩,宋占峰,詹振炎.一种快速的逐点插入算法构建 DTM[J]. 铁路计算机应用,2001,10(9);27-30
- [14] Philip J, David H. 计算机图形学几何工具算法详解[M]. 周长 发,译. 北京:电子工业出版社,2005

• 292 •