

基于车载激光扫描的带状地物表面快速重建

江 水¹, 盛业华¹, 李永强¹, 刘会云^{1,2}, 戴华阳²

(1 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210046;

2 中国矿业大学(北京校区)3S与沉陷工程研究所, 北京 100083)

摘要: 根据带状地物空间形态特征以及车载激光扫描系统对带状地物数据采集的特点, 提出对相邻两条扫描线数据构建三角网进而完成整个带状地物表面快速重建方法。该方法充分利用了每条扫描线获取带状地物横截面的特点, 相邻两条扫描线构建的三角网能准确地反映其所覆盖的狭长条带区域的形态结构, 把所有狭长条带连接起来便能准确地描述整个带状地物的形态结构。在网格构建过程中自动建立点、线、面间的拓扑关系或隐含拓扑关系, 查询和动态更新操作都限制在非常狭小的范围内, 便于快速重建。

关键词: 车载激光扫描; 表面重建; 三角网; 拓扑关系

1 引言

公路、隧道、桥梁、堤坝等地物, 在空间形态上呈带状分布特征, 其信息表达也要求体现带状分布的特点。使用车载激光扫描系统对这些带状构筑物进行信息采集具有明显优势: (1) 数据采集速度快, 车载激光扫描系统在正常行驶过程中动态采集数据, 只需要沿带状地物行驶一次, 便采集了所有需要的信息; (2) 常速状态下, 车载激光扫描系统每0.3m采集一条扫描线, 每条扫描线中包含数百个三维数据点, 数据量和数据密度都是其他数据采集方式无法比拟的; (3) 激光扫描仪记录了所有能够探测的信息, 信息量非常丰富, 可根据需要提取信息; (4) 车载系统通过高精度的导航系统来获得瞬时的位置和姿态信息, 通过坐标转换获得目标的坐标, 相对精度和绝对精度都比较高, 适合高精度模型的构建。

把空间散乱点构建为 Delaunay 三角网在地形表面重建方面具有很多优势, 已经进行了相当多的研究工作^[1-4], 但是其复杂的空间搜索计算在一定程度上也限制了 Delaunay 三角网的应用。文中介绍了一种更适合车载激光扫描数据采集方式、更能体现带状地形形态特点的表面快速重建方法。

2 带状地物数据预处理

车载激光扫描系统获取的目标转换为空间点云图像后不能直接进行表面模型的构建, 必须经过一个预处理过程:

2.1 背景信息分离

对于路边的树木、行驶的车辆等背景信息, 必须采取有效措施快速滤除。作者开发了一系列背景分离工具, 其基本思想是在点云图像上沿带状地物与背景信息分界线画折线, 这个折线实际上是一系列垂直于屏幕且两两相接的平面, 这些平面的方向表现为一致性, 把背景信息与保留信息在空间上隔离开, 移除落在背景一侧的数据点, 便完成背景信息的滤除。由于激光扫描仪垂直于带状地物走向采集数据, 每列扫描线数据相当于带状地物的一个横断面, 相邻或相近扫描线数据具有相似性或相关性特征, 依据这个特征, 可以自动识别路面上行驶的车辆信息并自动填补由于车辆遮挡造成的数据空洞。

2.2 数据简化

在扫描线上靠近地面部分, 数据点非常密集, 而路面又相对平坦, 存在大量冗余数据, 需要进行

收稿日期: 2006- 12- 15; 修回日期: 2007- 04- 10.

资助项目: 国家自然科学基金(40671147), 江苏省重大基础研究基金(05KJA17001).

作者简介: 江水(1983-), 男, 江苏南京, 研究生, 主要研究方向: 虚拟地理环境、地学三维可视化, 已经发表2篇学术论文。

E-mail: jiangshui@email.njnu.edu.cn

简化。国内外已有很多关于线性扫描类型数据简化方法的研究^[8-10]。兼顾数据密度和地物局部细节特征,依据下列准则分别简化每条扫描线:

(1) 每条扫描线首尾点保留;

(2) 扫描线上的一点,若其与前面保留数据点间的距离或与后面相邻点间的距离大于阈值 U_1 ,则保留该点;

(3) 对保留下来的点,若空间距离最近的两点距离小于阈值 U_2 ,则合并这两个点,取中点作为新的数据点;

(4) 重复(3)中的操作,直到没有点可以合并为止。

2.3 扫描线数据排序

每列数据点在空间形态上表现为无序性,扫描的顺序并不确切代表空间形态的顺序,需要对每列数据进行排序,作者采用距离排序法对每列数据进行排序^[56]。一条扫描线的起始点与其相邻扫描线起始点位置高度基本相似、水平距离近似等于两扫描线间的距离,而与相邻扫描线的末点有很大的差别,应用这个特点校验排序后扫描点的存放顺序。

2.4 噪声滤除

在背景分离与数据简化过程中,绝大部分背景信息和噪声点被滤除,但是对于一些不很明显的噪声点,例如受低矮植被影响的噪声点,就不适合采取人工交互的方法进行滤除,而是看作随机的噪声点进行滤除^[7]。

经过以上处理,即可对保留数据进行表面网格的构建。

3 带状地物表面网格构建

激光扫描仪采集每条扫描线数据所用时间极短,因此每条扫描线数据点都近似于落在一个平面内,每条扫描线都相当于带状地物的一个横断面,相邻两条扫描线所在平面也近似平行,中间所夹区域为一个狭长条带,把相邻两条扫描线上的点构建为三角网就能准确反映这个条带区域的形态特点,整个带状地物就是由许多这样的狭长条带构成的,把这些条带状的三角网连接起来就能准确描述整个带状地物的形态结构。因此,表面重建过程就是

对相邻两列扫描线数据进行构网并不断重复的过程。下面分别介绍表面网格构建过程中采用的数据结构的定义、三角网构建的方法以及拓扑关系的建立。

3.1 定义数据结构

根据待构建三角网的特点,分别定义了空间坐标点 $DPoint$ 、格网点 $MeshP$ 、格网边 $MeshE$ 、格网三角形 $MeshT$ 的数据结构:

```
struct DPoint//空间点
```

```
{double x;//x 坐标
```

```
double y;//y 坐标
```

```
double z;//z 坐标};
```

```
struct MeshP//格网点
```

```
{DPoint p;//点的坐标
```

```
int no;//点在扫描线中的编号
```

```
int type;//点的类型};
```

```
struct MeshE//格网边
```

```
{MeshP *p1;//端点 1
```

```
MeshP *p2;//端点 2};
```

```
struct MeshT//格网三角形
```

```
{MeshP *p1;//顶点 1
```

```
MeshP *p2;//顶点 2
```

```
MeshP *p3;//顶点 3};
```

构建三角网前,定义了三个二维动态数组:

```
std::vector<std::vector<* MeshP> > mesh_p;
```

```
std::vector<std::vector<MeshE> > mesh_e;
```

```
std::vector<std::vector<MeshT> > mesh_t;
```

$mesh_p$ 、 $mesh_e$ 、 $mesh_t$ 分别用来存储格网点、格网边和格网三角形数据。

另外,还定义了几个临时一维动态数组:

```
std::vector<MeshE> start_e,mid_e,end_e;
```

```
std::vector<MeshT> begin_t,end_t;
```

设 $L(i)$ 为第 i 条扫描线数据, $start_e$ 用来存储第 $L(0)$ 上数据点间的连线; mid_e 用来存储 $L(i)$ 上的数据点与 $L(i+1)$ 上的数据点间的连线; end_e 用来存储 $L(i+1)$ 上数据点间的连线; $begin_t$ 用来存储 $L(i)$ 中相邻两点与 $L(i+1)$ 中一点构成的三角形; end_t 用来存储 $L(i+1)$ 中相邻两点与 $L(i)$ 中一点构成的三角形。

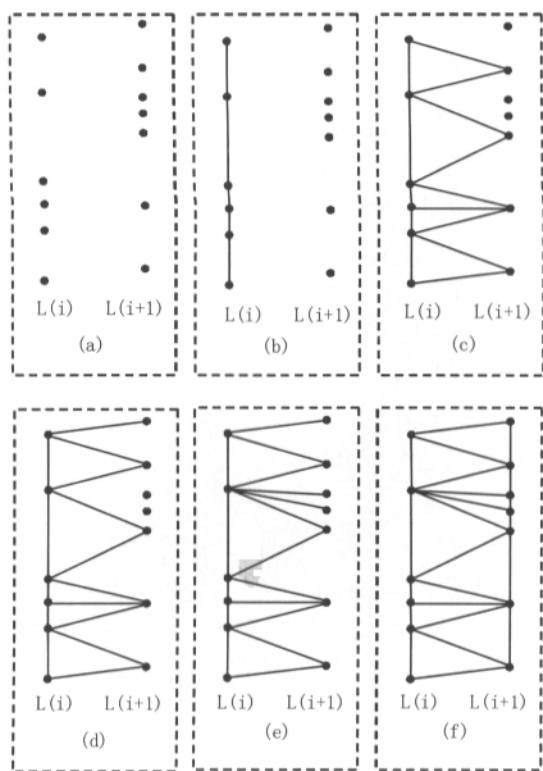


图1 构建三角网

Fig.1 Process of triangularization

3.2 构建三角网

经预处理后的数据存放在二维动态数组 $mesh_p$ 中, 且按顺序存放。设两相邻扫描线 $L(i)$ 和 $L(i+1)$ 分别有 u 和 v 个数据点, 如图 1(a)所示。

构网的过程如下:

(1) 依次连接第一条扫描线 $L(0)$ 上相邻两个数据点, 把连接成的边存入数组 $start_e$ 中并加入二维动态数组 $mesh_e$ 中, 如图 1(b)所示;

(2) 对于 $L(i)$ 上相邻的两个数据点 $P(i,s)$, $P(i,s+1)$, 在 $L(i+1)$ 上找一点 $P(i+1,k)$, 使角 $P(i,s)P(i+1,k)P(i,s+1)$ 最大, 则三点构成三角形并存入数组 $begin_t$ 中, 把 $P(i,s)$ 、 $P(i,s+1)$ 与 $P(i+1,k)$ 连接成的边存入 mid_e 中。同时记下 $P(i+1,k)$ 的序号 k , 为避免三角形的重叠, 在后面的查找中, 必须在序号为 k 及其后面的点中查找。完成 $L(i)$ 上 u 个点 $u-1$ 次操作后, 删除 mid_e 中重复的边, 并把 $begin_t$ 中的 $u-1$ 个三角形加入数组 $mesh_t$ 中, 如图 1(c)所示;

(3) 检查 $L(i)$ 上的首尾点是否分别和 $L(i+1)$ 上的首尾点相连, 若没有连线, 则连接成边并存入数组 mid_e 中, 如图 1(d)所示;

(4) 对于 $L(i)$ 上的每个点 $P(i,s)$, 在 mid_e 中搜索与其相连的边, 若边的个数为 2, 则检查它们另一端点的序号 k 和 t , 若 $t < k$, 则交换 k 和 t , 若 $t - k > 1$, 则夹在 k 和 t 中间的点都与 $P(i,s)$ 连线, 连接的边存入 mid_e 中, 并把 mid_e 加入数组 $mesh_e$ 中, 如图 1(e)所示;

(5) 依次连接 $L(i+1)$ 上相邻的两个数据点 $P(i+1,k)$, $P(i+1,k+1)$ 成 $v-1$ 条边, 存入数组 end_e 中, 并把 end_e 加入数组 $mesh_e$ 中。同时, 在 mid_e 中分别查找与 $P(i+1,k)$ 和 $P(i+1,k+1)$ 相连的边, 找出这些边中在 $L(i)$ 上的一个公共顶点 $P(i,s)$ 则点 $P(i+1,k)$ 、 $P(i+1,k+1)$ 、 $P(i,s)$ 构成一个三角形, 共构成 $v-1$ 个三角形, 存入数组 end_t 中并加入数组 $mesh_e$ 中, 如图 1(f)所示;

(6) 重复步骤(2)~(5), 直到所有列数据都参与了计算。

3.3 建立拓扑关系

拓扑关系是在三角网构建过程中自动建立的, 且很多关系是隐含的。

(1) 二维数组 $mesh_p$ 中每个一维项对应一条扫描线数据, 在这个一维项中, 数据点按照排序的顺序存放, 空间点与二维数组中的数据一一对应;

(2) $L(i)$ 中所有相邻点连接的边对应 $mesh_e$ 中的 $2*i$ 项, 且每条边的 $p1$ 指向编号较小的点, $p2$ 指向编号较大的点, 边与 $L(i)$ 中的点对按顺序一一对应; $L(i)$ 中的点与 $L(i+1)$ 中的点连接的边对应 $mesh_e$ 中的 $2*i+1$ 项, 且每条边的 $p1$ 指向 $L(i)$ 中的点, $p2$ 指向 $L(i+1)$ 中的点;

(3) $L(i)$ 上的两相邻点 $P(i,s)$ 、 $P(i,s+1)$ 与 $L(i+1)$ 上的一点 $P(i+1,k)$ 构成三角形, 分别对应三角形的 $p1$ 、 $p2$ 、 $p3$, $L(i)$ 中的 u 个点共构成 $u-1$ 个三角形, 这些三角形对应 $mesh_t$ 中的 $2*i$ 项; $L(i+1)$ 上相邻两点 $P(i+1,k)$ 、 $P(i+1,k+1)$ 与 $L(i)$ 上一点 $P(i,s)$ 构成三角形, 分别对应三角形的 $p1$ 、 $p2$ 、 $p3$, $L(i+1)$ 中的 v 个点共构成 $v-1$ 个三角形, 这些三角形对应 $mesh_t$ 中的 $2*i+1$ 项;

通过这些隐含的拓扑关系, 点、边、三角形的关联关系明确界定或隐含在局部很小的范围内, 在三角网构建过程和后期动态处理中都避免了大量的运算。

4 带状地物动态构建

构建的三角网表面模型必须能够满足动态操作,如查询、点的添加、删除以及数据的合并等。

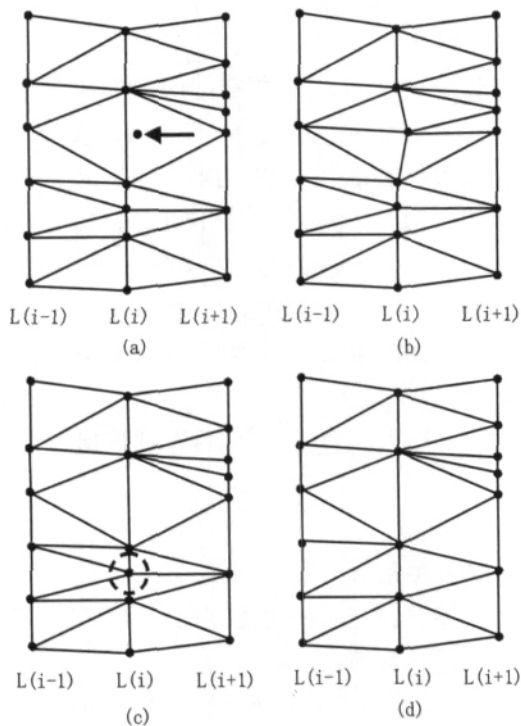


图 2 点的添加与删除

Fig.2 Insertion and deletion of points

4.1 查询

点的查询、边的查询以及三角形的查询都最终归结为点的查找。每条扫描线上数据间最大距离为几十米,相对于带状地物的长度很短,因此可以先用每条扫描线上的一个点代替该扫描线用折半法大致确定查找点的范围,然后逐点比较来确定需要查找的点。确定了某个点后,与其邻接的点、边、三角形可以通过拓扑关系和隐含关系直接确定或在很小的范围内查找。

4.2 点的插入

落在 $L(i)$ 和 $L(i+1)$ 中间的点 P , 进行以下插入操作:

(1) 计算 P 到 $L(i+1)$ 所在扫描平面的距离,若距离比较近,小于给定的阈值,则把点 P 加入 $L(i+1)$ 中,对 $L(i+1)$ 进行重新排序,对 $L(i)$ 和 $L(i+1)$ 、 $L(i+1)$ 和 $L(i+2)$ 重新构网并置换 $mesh_e$ 和 $mesh_t$ 中相应的数据;(2) 若 P 到 $L(i+1)$ 所在扫描平面的距离大于给定的阈值,则计算 P 到 $L(i)$ 所在扫描平面的距离,

若大于给定的阈值,则对 P 做标记,否则不做标记,把点 P 加入 $L(i)$ 中,计算 $L(i)$ 中标记点的数目,若不大于给定阈值数目,则对 $L(i)$ 进行重新排序,对 $L(i-1)$ 和 $L(i)$ 、 $L(i)$ 和 $L(i+1)$ 重新构网并置换 $mesh_e$ 和 $mesh_t$ 中相应的数据;(3) 若 (2) 中标记点的数目大于给定阈值的数目,则把 $L(i)$ 中的标记点分离为一个新的数据列 $L(i+1)$, 插入到 $L(i)$ 的后面,对 $L(i)$ 和 $L(i+1)$ 重新排序,并对 $L(i-1)$ 和 $L(i)$ 、 $L(i)$ 和 $L(i+1)$ 、 $L(i+1)$ 和 $L(i+2)$ 进行构网,删除 $mesh_p$ 、 $mesh_e$ 、 $mesh_t$ 相关的数据并插入新产生的数据。

图 2(a) 中箭头所指的点为需要插入的点,图 2(b) 为点插入 $L(i)$ 后的效果图。

4.3 点的删除

要删除 $L(i)$ 上的一点 P , 先删除 $mesh_e$ 和 $mesh_t$ 中与 $L(i)$ 关联的项,再在 $mesh_p$ 中删除点 P , 并对 $L(i)$ 中剩余数据进行排序,并对 $L(i-1)$ 和 $L(i)$ 以及 $L(i)$ 和 $L(i+1)$ 进行重新构网,并把新产生的数据插入 $mesh_e$ 和 $mesh_t$ 中相应的位置。当 $L(i)$ 中点的个数少于给定阈值的时候,则先删除 $mesh_e$ 和 $mesh_t$ 中与 $L(i)$ 关联的项,然后在 $mesh_p$ 中删除 $L(i)$ 项,把原 $L(i)$ 中剩余数据进行逐点的插入操作。

图 2(c) 中圈选的点为需要删除的点,图 2(d) 为点删除后的效果图。

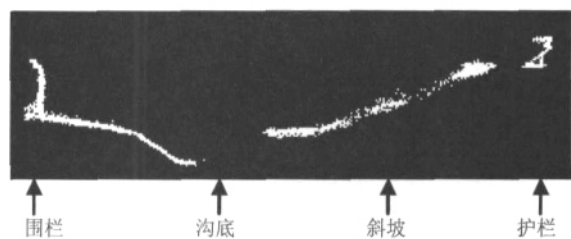
4.4 数据的合并

大型带状地物,特别像公路这样的地物,其数据量非常大,空间形态狭长,不可能一次完成所有数据的构网操作,需要进行分段处理并对各段数据进行合并。设两段需要合并的数据 $data1$ 和 $data2$, 其点、边、三角形数组分别为 $mesh_p1$ 、 $mesh_e1$ 、 $mesh_t1$ 和 $mesh_p2$ 、 $mesh_e2$ 、 $mesh_t2$ 。先把 $mesh_p2$ 加入 $mesh_p1$ 的尾部,再对 $mesh_p1$ 的最后一列与 $mesh_p2$ 的第一列数据进行构网操作,把新产生数据分别插入 $mesh_e1$ 和 $mesh_t1$ 的尾部,然后分别把 $mesh_e2$ 和 $mesh_t2$ 插入 $mesh_e1$ 和 $mesh_t1$ 的尾部,便完成 $data1$ 和 $data2$ 合并操作。

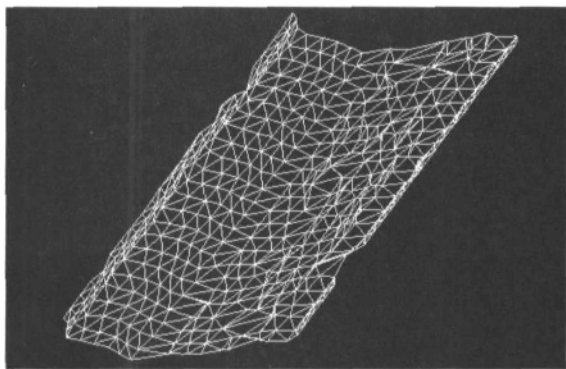
5 实例分析

作者选取了地形条件比较复杂的一段高速公路边坡信息,图 3(a) 为边坡横截面点云图像,从图中

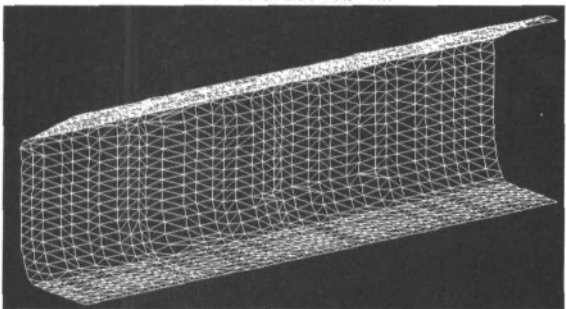
可以看出,公路边坡中包含了围栏、斜坡、护栏等信息,并且在沟底部分地形更为复杂。依据上述表面模型构建算法,全自动完成从数据简化到表面模型构建,没有进行任何交互处理,图 3(b)为该边坡的三角格网图,充分表达了该区域的地形特征。



(a) 公路边坡截面点云图像



(b) 公路边坡三角网格



(c) 隧道表面三角网格

图 3 带状地物三角化效果图

Fig.3 Triangularization result of strip objects

对于公路隧道这样的带状地物,由于结构相对简单,一般不需要交互操作,所有的操作都可以全自动完成。一般情况下,一段 500m 的隧道信息可以在 10 分钟内完成从原始点云图像到最终表面模型的重建工作。图 3(c)为一段隧道三角格网效果图(一

个侧面),隧道带状结构特征得到了充分表达。

6 结论

用车载激光扫描系统获取带状地物信息,每条扫描线相当于带状地物的一个横截面,各条扫描线把带状地物分割为许多狭长的条带,以相邻两条扫描线为基本单位构建狭长条带三角网,这些三角网能准确反映其所覆盖的狭长条带区域的结构形态,相邻狭长条带三角网无需任何运算就能自然连接成为能准确表达整个带状地物的三角网。文中算法在一定程度上类似于分块构建 Delaunay 三角网,但又优于后者。把构建的三角网信息保存在二维动态数组中,充分利用了点、边、三角形间隐含的拓扑关系,使查询和动态更新操作都限制在狭小的范围内,利于带状地物表面的快速重建。

参考文献

- [1] 刘学军,符铨砂,赵建三. 三角网数字地面模型快速构建算法研究. 中国公路学报, 2000, 13(2):31~36.
- [2] 蒲浩,宋占峰,詹振炎. 基于 Delaunay 三角网数字地面模型的线路三维建模方法. 铁道学报, 2001, 23(4):81~87.
- [3] 蒋红斐. 离散点集实时 Delaunay 三角网剖分算法的研究. 中国铁道科学, 2003, 24(2):44~47.
- [4] 易思蓉,吕希奎,张家玲. 一种大型带状数字地形模型建模方法. 西南交通大学学报, 2005, 40(3):308~312.
- [5] 盖绍彦,达飞鹏,雷明涛等. 三维重构中的杂乱点云排序问题研究. 计算机与现代化, 2003, (10):33~35.
- [6] 潘洋宇,李东波,慈瑞梅. 点云数据曲面重构和小波分解研究. 计算机集成制造系统, 2005, 11(10):1496~1500.
- [7] 董明晓,郑康平. 一种点云数据噪声点的随机滤波处理方法. 中国图象图形学报, 2004, 9(2):245~248.
- [8] Lee K, Woo H, Suk T. Data reduction methods for reverse engineering. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 17(10):735~743.
- [9] 洪军,丁玉成,曹亮. 逆向工程中的测量数据精简技术研究. 西安交通大学学报(自然科学版), 2004, 38(7):661~664.
- [10] 平雪良,李进亮,徐荣礼等. 逆向工程中扫描线类型数据的简化技术. 江南大学学报(自然科学版), 2006, 5(3):258~260.

map websites are being promoted greatly, and will have a broad prospect of application. But currently the design of tourist map websites is also in a very disordered condition and a lack of theoretic guidance, hence the further development is restricted. Firstly this paper sums up the main problems existing in tourist map websites after analyzing many famous ones at home and abroad. Then it discusses the characteristics of tourist map websites, and classifies the websites according to the differences in the theme of tourist map websites and the functions of tourist web maps, after that, sums up the designing of different kinds of map websites. Finally, the authors identify the design principles of tourist map websites, and complete the design of the Henan tourist map websites according to the above principles.

Key words: tourist map website; tourist web map; design principle; map website designing

上接 P23

Rapid Surface Modeling of Large Strip Objects Based on Vehicle-borne Laser Scanning

JIANG Shui¹, SHENG Yehua¹, LI Yongqiang¹, LIU Huiyun^{1,2}, DAI Huayang²

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, MOE, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China;

2. Institute of RS/GPS/GIS and Subsidence Engineering, China Uni. Min. Tech., Beijing 100083, China)

Abstract: Some large objects, such as roads, bridges, tunnels and so on, have strip characteristics in spatial structure, so vehicle-borne laser scanning system has great advantage in gathering 3D information of these large strip objects. Laser scanners can record all the detectable data of the ground objects when gathering information and acquiring many scan lines, each scan line data in fact is equivalent to a cross section of the strip object, and these scan lines can divide the object into many narrow regions. If we build triangular mesh with two adjacent scan lines data, the corresponding narrow region will be overlapped accurately by the triangular mesh. All of the triangular meshes were merged into one big triangular mesh naturally without any extra operation and the whole large strip object is accurately described by this big triangular mesh. Topological relations were built automatically. Dynamic update was limited in the limited range and fit for rapid modeling.

Key words: vehicle-borne laser scanner; ground object reconstruction; triangular mesh; topological relation