

1-4-2019

Research of 3D Urban Modeling Based on 2D Digital Maps

Jinlian Du

Computer Science College of Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

Xu Shuo

Computer Science College of Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

Fengchao Zhao

Computer Science College of Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Research of 3D Urban Modeling Based on 2D Digital Maps

Abstract

Abstract: In order to reduce the cost of 3D urban modeling, *an automatic modeling method for large-scale urban scene based on 2D digital maps is proposed. In this method, ground features are classified firstly according to the characteristic that different features in 2D digital map have different color, then an extraction algorithm is designed to obtain the ground feature's boundary, and at the same time, a simplified algorithm based on distance measurement is designed for generating the boundary's key points* of ground features which construct the geometry information of the ground features in 2D digital maps. Finally, *the generating rule for the height of the buildings is designed according to the type of the buildings*. The experiment results show that this method can automatically generate realistic 3D urban models.

Keywords

digital maps, 3D urban, automated modeling, boundary extraction

Recommended Citation

Du Jinlian, Xu Shuo, Zhao Fengchao. Research of 3D Urban Modeling Based on 2D Digital Maps[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(10): 3710-3716.

基于二维数字地图的三维城市建模方法研究

杜金莲, 徐硕, 赵枫朝
(北京工业大学计算机学院, 北京 100124)

摘要: 为降低三维城市建模成本, 主要研究基于二维数字地图(2D Digital Maps)的三维城市自动建模方法。根据二维数字地图中不同地物具有不同颜色的特点对地物进行分类定义, 设计了地物轮廓提取算法获取地物对象的轮廓信息, 设计基于距离测度的简化算法生成地物边界关键点从而获得地物对象在二维平面上的几何形状信息。在获得建筑物二维几何形状的基础上, 利用不同类型建筑物层高有区别的特点设计了地物高度生成规则, 最终实现三维城市模型的自动构建。经测试, 提出的方法可以快速、自动地生成拟真性较强的三维城市模型。

关键词: 数字地图; 三维城市; 自动建模; 轮廓提取

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 10-3710-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201810014

Research of 3D Urban Modeling Based on 2D Digital Maps

Du Jinlian, Xu Shuo, Zhao Fengchao

(Computer Science College of Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to reduce the cost of 3D urban modeling, an automatic modeling method for large-scale urban scene based on 2D digital maps is proposed. In this method, ground features are classified firstly according to the characteristic that different features in 2D digital map have different color, then an extraction algorithm is designed to obtain the ground feature's boundary, and at the same time, a simplified algorithm based on distance measurement is designed for generating the boundary's key points of ground features which construct the geometry information of the ground features in 2D digital maps. Finally, the generating rule for the height of the buildings is designed according to the type of the buildings. The experiment results show that this method can automatically generate realistic 3D urban models.

Keywords: digital maps; 3D urban; automated modeling; boundary extraction

引言

由于三维城市建模广泛应用于城市交通、规划、环境保护、影视特效、视频游戏等领域, 因此其成为研究的热点。国内外学者对三维城市建模方

法做了大量的研究工作, 取得了许多研究成果。目前三维城市建模方法主要有基于影像识别技术的建模方法^[1-3], 基于三维激光扫描技术的建模方法^[4-8], 和基于过程式建模方法^[9-12]。其中过程式建模方法以其自动化程度高, 输入少, 参数可控, 方便调整, 以及适合于生成大规模建筑群体而成为人们研究的一个热点课题。过程式三维城市建模的主要思想是采用参数化方法表达建模对象, 利用建模算法控制几何造型, 并通过随机或迭代的过



收稿日期: 2016-06-24 修回日期: 2016-09-09;
基金项目: 北京工业大学学科建设基金(007000541
215042);
作者简介: 杜金莲(1972-), 女, 内蒙古赤峰, 博士
生, 副教授, 研究方向为数据分析与可视化。

<http://www.china-simulation.com>

• 3710 •

程构建城市场景。过程化建模典型的方法有 Merrel、Wonka 等, 其在基于建筑物过程化建模中提出使用输入几何模型集合和预定义语法生成复杂的城市建筑结构^[9]。Muller、Manocha 等在过程化建模算法中, 引入了 CGA, 实现了一种基于语法表示的建筑模型表示方法^[10]。过程式建模可以通过自动化的形式实现三维城市场景的虚拟构建, 但该方法技术门槛较高、操作复杂, 对于生成符合实际情况的三维城市场景还比较困难, 因此推广应用具有较大难度。

借鉴过程化建模的优点, 本文设计一种基于二维数字地图的三维城市场景自动建模方法, 该方法使用二维地图作为数据源, 通过地物分类并定义边界提取算子获取地物的基本轮廓, 并利用建筑物的类型及相关规则自动生成建筑物的高度。该方法的特点是: (1) 数据源简单, 廉价, 容易获取。(2) 可以生成拟真性较强的城市模型。

1 基于数字地图的自动建模技术

1.1 总体思路的描述

本文使用的数字地图指百度地图或谷歌地图等软件生成的以栅格形式展现的二维电子地图, 如图 1 所示。此种地图中含有比较丰富的城市元素信息, 比如各种地物的位置, 形状。这些信息为三维城市的建模提供了重要且必要的基础信息。本文主要通过分析此种数字地图的特征, 通过预处理并利用数字地图中不同地物的颜色属性对地物进行识别归类和边界提取, 在此基础上通过建筑物高度生成规则生成完整的三维城市建筑模型。

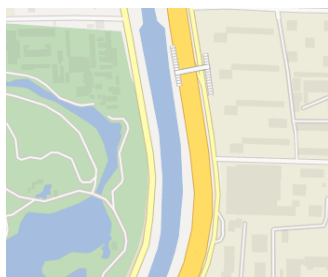


图 1 百度地图中所包含的城市元素
Fig. 1 Urban Elements in Baidu Maps

1.2 地物的识别与分类

从图 1 中可以看出, 在数字地图中包括建筑物、树木、绿地、水系、道路等不同的地物类型, 且不同地物均具有不同的颜色。这给我们一个启发: 通过分析比较二维数字地图中地物的灰度值 (RGB) 即可进行地物的识别。由于实际应用中同一地图或不同地图中各地物使用的颜色不一致, 为了方便地物的识别和分类, 我们对数字地图中的地物进行预处理操作, 将不同的地物的颜色定义成不同的 RGB 值, 其具体定义如表 1 所示。

表 1 地物颜色 RGB 值对照表
Tab. 1 Contrast Table of RGB of ground object color

地物类型	R	G	B
空地	255	255	255
街道	176	176	176
水系	144	219	255
绿地	80	255	80
写字楼	255	155	155
主干路	255	80	80
民楼	255	160	255

基于以上对地物的分类标识, 便可以通过对二维数字地图进行扫描, 获取到构成不同地物的像素的颜色值和相应的坐标信息。

1.3 地物轮廓提取算法的设计

由扫描获取的地物对象的位置信息是由若干连续的像素点构成, 但在进行地物模型构建时只需要表达地物信息的关键几何坐标即可, 因此必需对地物对象进行轮廓提取及关键边界点生成。

通过分析我们发现, 构成每个地物的像素的灰度值是相同的, 但不同地物像素点的灰度值则不一样, 因此各地物的边界点在灰度值上有着明显的不同。一般来说, 某一地物边界点的灰度值至少与其上下左右四个方向上一个相邻像素的灰度值不同, 而最多与其上下左右 4 个方向上 3 个相邻像素的灰度值不同如图 2 所示。

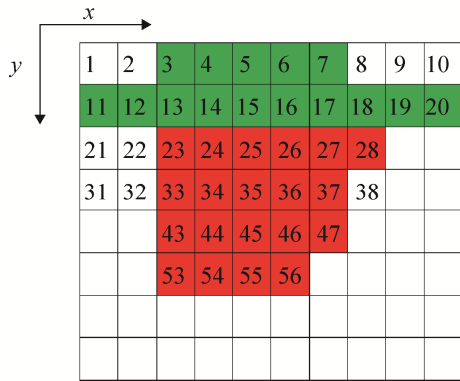


图2 地物边界示意图
Fig. 2 Map of the boundary of ground objects

图2中绿色代表草地，红色代表居民区建筑物。对于编号为24的边界像素，其上下左右相邻像素分别为14、23、34、25的值，显然只有像素14与其灰度值不同；而对于边界像素28，则其上下左右相邻像素分别为18、27、38、29，此时只有像素27与其灰度值相同，其它三个与其灰度值均不同。

为此我们令 $f(x,y)$ 为地图中每一个像素点的灰度值，并用公式(1)判断每个像素点是否为边界点。

$$G(x,y) = \text{count}(f(x,y) - f(x-1,y), f(x,y) - f(x,y-1), f(x,y) - f(x,y+1), f(x,y) - f(x+1,y)) \quad (1)$$

式中： x,y 为像素的横，纵坐标值，或索引值。

$\text{count}()$ 函数用于计算像素 $f(x,y)$ 与其上下左右相邻四个像素之差不为0的个数，并赋给 $G(x,y)$ 。

当 $1 \leq G(x,y) \leq 3$ 时，说明 $f(x,y)$ 为边界点或轮廓点。

地物轮廓提取算法的伪代码如下：

输入：数字地图

输出：地物对象边界数组

Procedure ExtractingEdge(digitalmap)

```

1  for i ← 0 to n //第 i 行像素
2  for j ← 0 to m //第 j 列像素
3  计算 G(i,j)
4  if(G(i,j) >= 1 or G(x,y) <= 3)
5  addBorderPixelPoint( p(i,j) ); //将点 p(i,j) 添加到地物的边界点数组中
6  end if
    
```

1.4 关键边界点提取

通过地物轮廓提取算法获得的地物边界点具有两个特点：无序和冗余。边界点无序会造成几何模型构建错误，而冗余则既增加处理时间的开销，也增加存储空间开销，直接影响三维场景渲染的效率。因此需要对构成地物轮廓的像素点进行排序，并在排序的基础上进行简化，从而生成有序的、关键的地物边界点坐标。

通过对地物轮廓构成情况分析，拟设计基于距离判断的方法对边界点进行排序，基本原理如下：

定义水平或垂直相邻像素点间的距离为1。则地物的任意两个相邻边界点间的距离应该为1或 $\sqrt{2}$ ，如图3所示，边界点1与边界点2处于同一水平线上，两点距离为1；边界点2与边界点3之间的距离为 $\sqrt{2}$ 。

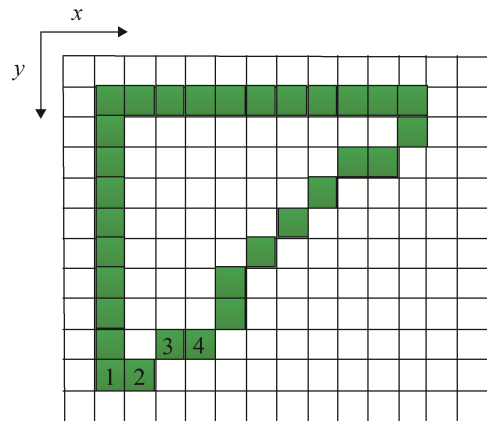


图3 地物对象及轮廓示例图
Fig. 3 Examples of objects and outlines of ground objects

基于此原理，我们通过计算边界点间的距离对边界点进行排序，具体方法是：首先在边界点中任意选取一点作为边界的起始点 s ，从 s 点开始，在余下的点中遍历寻找离 s 点距离1或者 $\sqrt{2}$ 的点 P ，把点 P 插入到 startPoint 点之后，并将点 P 作为新的数据起始点，以此类推直至将所有点排序。

排序算法的伪代码如下：

输入: 地物对象边界点数组

输出: 地物对象排序后边界点数组

Procedure Point sort (BorderPixelPoint)

```

1 for i ← 0 to BorderPixelPoint.size //查找第一个像素
点到最后一个像素点的相邻边界
2 for j ← i to BorderPixelPoint.size //在边界点 i 之
后查找距离为 1 或  $\sqrt{2}$  的点
3  $d = \sqrt{(p_j.x - p_i.x)^2 + (p_j.y - p_i.y)^2}$  //计算边界点 i 与边界
点 j 之前的距离
4 if  $d == 1 || d == \sqrt{2}$ 
5  $p[i+1] \leftarrow p[j]$ , break; //边界点 j 为 i 的相邻点,
将 j 放到 i+1 的位置. 并且跳出本次循环
6 end if
    
```

排序后的地物边界点仍然存在大量的冗余点, 需要设计简化算法删除不必要的边界点, 选取关键边界点用于构建地物几何模型。哪些点是冗余的呢? 通过对排序后数据的分析发现, 一种情况是处于同一直线上的多个点, 则除两端的端点外, 其它点均是冗余的。另一种情况是对于不处于一条直线上的点, 有时是因为制图技术而产生, 此时如果该点对于几何形状影响较小, 则该点视为冗余点, 如图 4 所示, $p_0 p_1$ 和 p_2 三个点中, 点 p_1 离直线 $\overline{p_0 p_2}$ 的距离较近, 因此可以近似认为三点处于同一直线上, 此时舍弃 p_1 点。而对于 p_2 点, 距离直线 $\overline{p_1 p_3}$ 距离较远, 则需要保留 p_2 点。

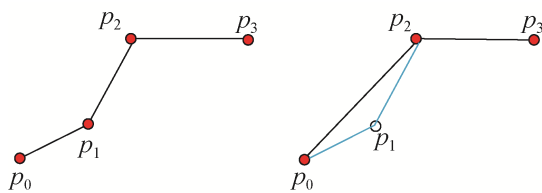


图 4 点处于不同直线示例图

Fig. 4 Point in a different straight line example diagram

由此, 我们采用基于距离测度的冗余判断机制, 具体原理为:

设 $p = (p_1, \dots, p_n)$ 代表某个地物对象排序后边界点集合, n 为边界点个数, $p_i, p_j, p_k (1 \leq i < j < k \leq n)$ 是 p 中三个相邻边界点, 通过计算边界点 p_j 的距离测度 $T(p_j)$ 判断其冗余性, 边界点 p_j 的距离测度计算公式如公式(2):

$$T(p_j) = d(p_i, p_j) + d(p_j, p_k) - d(p_i, p_k) \quad (2)$$

式中: $d(p_i, p_j)$ 表示求取边界点 p_i, p_j 之间距离的函数, 计算公式为公式(3):

$$d(p_i, p_j) = \sqrt{(p_j.x - p_i.x)^2 + (p_j.y - p_i.y)^2} \quad (3)$$

若距离测度 T 越接近于 0, 则表明边界点 p_j 与相邻两边界点近似趋近于同一直线上, 该点对于边界轮廓形状影响较小, 判断该点为冗余点; 反之, 则判断该边界点对于边界形状影响较大, 保留该边界点。因此可以通过预先设定最小距离测度 β , 小于 β 的边界点判断为冗余点并将其删除, 反之判断该点为边界关键点并将其保留。算法基本步骤如下:

1. 计算边界点数组 $p = (p_1, \dots, p_n)$ 上所有节点的距离测度, 得到集合 $c = \{T(p_1), T(p_2), \dots, T(p_n)\}$ 。
2. 从集合 c 中取出边界点 $p_j (1 \leq j \leq n)$ 的距离测度值 $T(p_j)$, 将其与预设的阈值 β 进行比较, 若 $T(p_j) < \beta$, 删除 p_j ; 否则, 保留 p_j 。继续对其他边界点重复执行步骤 2 直至将所有边界点处理完成。

在简化过程中, β 值的确定需要仔细研究。在本文方法获得的边界点中, 位于转折处的点有时是关键轮廓点, 需要保留。如图 5 所示: 绿色和蓝色的像素为提取出的地物边界点, 其中 1, 5, 7, 8, 9, 10, 11 为转折点, 而 1, 8 作为垂直轮廓的交汇点是关键轮廓点, 必须要保留。以 9 为代表的 10, 11 点以及点 7 则由于表达的边界具有弧度或倾斜度, 可能是必要的也可能是不必要的。为了保留关键轮廓点, 我们计算以 1 为代表的轮廓点和其它转折点的距离测度。

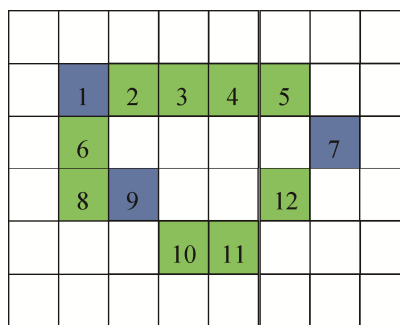


图 5 地物边界转折点及关键轮廓点

Fig. 5 Turning point and key point of the boundary of the ground object

$T(p_1) = 2 - \sqrt{2} \approx 0.5858$;
 $T(p_9) = 1 + \sqrt{2} - \sqrt{5} = 0.1781$;
 $T(p_{10})$, $T(p_{11})$ 与 $T(p_9)$ 的值相同 ;
 $T(p_7) = 2\sqrt{2} - \sqrt{5} \approx 0.5923$.
 当 β 值小于 $T(p_1)$ 时, 关键轮廓点得以保留。

2 建筑物高度信息生成算法

从数字地图中获得的地图只具有二维几何信息, 不具有高度信息。对于绿地, 道路以及河流区域高度信息比较容易确定, 沿地表面进行确定即可。但建筑物高度信息的确定比较困难, 需要仔细设计。本文通过参照《民用建筑设计通则》设定了一种自动高度生成规则, 为每一个建筑物生成相应的高度信息, 方法如下:

根据《通则》中建筑物的分类以及现实中不同建筑类型的特点, 将建筑分为 6 类:

$$Building_Type = \begin{cases} 1住宅建筑 \\ 2公共建筑 \\ 3商业建筑 \\ 4行政办公建筑 \\ 5科研院所建筑 \\ 6工业建筑 \end{cases}$$

1 住宅建筑 2 公共建筑 3 商业建筑 4 行政办公建筑
 建筑科研院所建筑 6 工业建筑

其中: $Building_Type$ 表示建筑类型。

对建筑物进行层级定义如下:

$$Building_Layer = \begin{cases} 1低层建筑 \\ 2中层建筑 \\ 3高层建筑 \\ 4超高层建筑 \end{cases}$$

其中 $Building_Layer$ 为建筑物层级属性。

由于不同类型的建筑其层级对应的高度不同, 为每种类型建筑相应的层级定义高度如表 2 所示。

表 2 建筑物类别及相应的层级和高度

高度(m)	层级			
类型	1	2	3	4
1	3~9	12~18	21~27	≥ 30
2~6	≤ 21		24~99	≥ 102

基于此, 本文为每个建筑物设定了建筑类型 ($Building_Type$) 和建筑层级 ($Building_Layer$) 两个属性, 在假设每层楼的高度为 3m 的前提下, 通过设定不同建筑类型和层级, 利用公式(4)随机生成符合表 2 定义的对应该类型和层级的高度信息。

$$height = H(bt, bl) = \begin{cases} hrand(3,9), & \text{if } bt=1, bl=1; \\ hrand(12,18), & \text{if } bt=1, bl=2; \\ hrand(21,27), & \text{if } bt=1, bl=3; \\ hrand(30,60), & \text{if } bt=1, bl=4; \\ hrand(9,21), & \text{if } bt=2-6, bl=lor2; \\ hrand(24,99), & \text{if } bt=2-6, bl=3; \\ hrand(102,150), & \text{if } bt=2-6, bl=4; \\ 0, & \text{if } bt=\text{其它值}, bl=\text{其它值} \end{cases} \quad (4)$$

其中: bt 表示建筑物类型参数; bl 表示建筑物的层级参数; $H(bt, bl)$ 为建筑物高度生成数; $hrand(\min, \max)$ 为随机函数, 随机生成 $[\min, \max]$ 之间的值。

3 实验结果及分析

本文采用 c++ 作为开发语言, 在 VS2010 开发平台上使用 OpenGL 三维图形接口进行试验。实验系统为: Intel(R) Xeon(R) CPU E5-1603 v3 @2.80 GHz 2.80 GHz。实验选取了北京市某地区的数字地图, 如图 6 所示, 该图包含本文涉及的建筑、绿地, 道路、水系等所有地物类型。并且每个地物类型包含多个大小形状各异的地物对象。

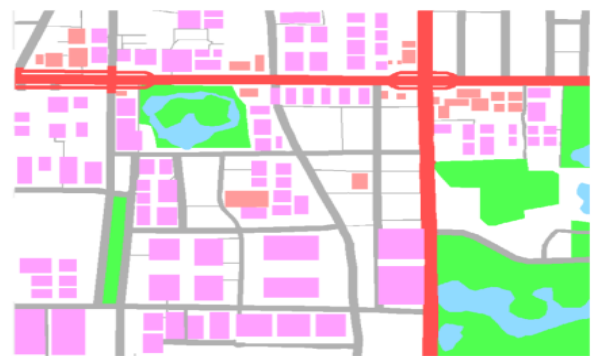


图 6 场景的测试用例图

Fig. 6 Test case diagram of the scene

为了在保证关键轮廓点的前提下尽可能的简化地物边界, 我们设置 $\beta=0.57$ 。通过本文算法提取

的地物轮廓图如图 7 所示, 生成的三维效果如图 8 所示。从实验结果可看出本文方法可以从二维地图中提取不同地物的轮廓, 并能够根据高度生成规则自动生成错落有致的建筑群效果, 能体现出建筑物的多样性和一定的真实感。

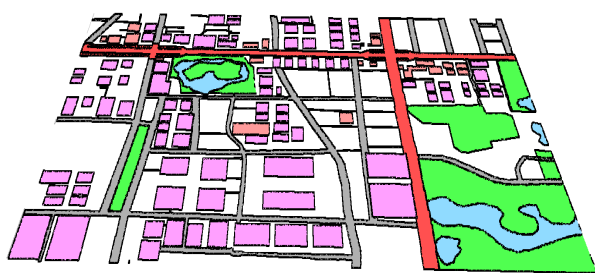


图 7 本文方法获取的地物轮廓效果图

Fig. 7 The contour map of the ground objects obtained by this method

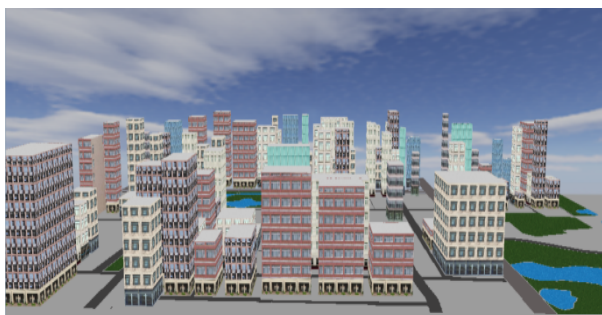


图 8 三维城市模型构建效果图

Fig. 8 Construction effect map of 3D city model

为测试本文方法的效率, 我们选取了 5 个不同尺寸的数字地图, 并分别对场景中地物分类用时、边界点提取用时、边界点简化用时及三维重建总用时进行了统计, 如表 3 所示。

表 3 不同规模场景建模过程所用时间

Tab. 3 Time used in modeling process of different scale scene

编号	地理范围 /km	地物个数/个	地物分类/s	轮廓提取/s	边界点简化/s	三维模型构建/s
1	2.149×2.358	655	0.136	0.292	0.042	2.487
2	5.240×4.176	1 419	1.009	1.279	0.193	12.651
3	5.120×5.120	1 063	1.163	1.129	0.102	14.647
4	7.125×6.156	2 178	1.231	1.615	0.235	15.835
5	8.452×7.258	2 331	1.305	1.896	0.265	15.921

从表 3 的测试结果可以看出, 5 个场景覆盖的地理范围很广, 涉及大量地物对象。从处理所用时间来看, 地物分类算法、地物轮廓提取与简化占用三维重建时间较少, 三维模型构建时间较长些。尤其是随着地物数量的增多以及地物形状复杂度的增加, 三维模型构建时间会大幅增加, 这主要是因为复杂形状, 如绿地、河流, 不规则建筑等在构建是需要进行复杂的三角剖分运算, 用时较长。从实验来看, 当地物数量在两千左右时, 整体建模的时间还是可以承受的。如果地理范围再扩大, 地物规模再增多时建模速度会比较慢, 但此时我们可以通过分割地图, 采用并行处理的方式提高建模的效率。

4 结论

本文对基于二维数字地图的三维场景自动快速构建技术进行研究, 通过分析二维数字地图的特点提出了基于地物分类的三维城市场景的快速构建方法。本文的主要工作包括:

(1) 对二维数字地图中的地物进行分类定义, 并在此基础上设计地物对象的轮廓抽取算子和关键边界点生成算法, 从而实现二维数字地图中地物对象的获取及二维几何信息的生成。

(2) 基于建筑物的类型和层高, 建立建筑物高度生成规则, 从而以自动化的方式完善建筑物的几何模型, 实现三维场景的自动生成。

本文方法的特点是以简单、廉价的数据源自动生成拟真性较好的三维城市场景, 用户干预程度低。

本文进一步工作主要集中在以下方面:

(1) 对建筑物的高度生成规则进一步细化, 加入符合实际情况的高度生成规则, 生成更加符合实际的城市模型。

(2) 对地物纹理生成技术进行研究, 发展多样化纹理生成技术, 实现地物纹理的自动生成和映射。

参考文献:

[1] 吴宁. 基于目标识别和参数化技术的城市建筑群三维重建研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.

- Wu Ning. Study on 3D Reconstruction for City Building Based on Target Recognition and parameterization Technology [D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2013.
- [2] Kuschik Georg. Model-free Dense Stereo Reconstruction Creating Realistic 3D City Models [C]// 2013 Joint Urban Remote Sensing Event, JURSE2013, Sao Paulo, Brazil. Seiten 159-162. Holland: Elsevier, 2013: 202-205.
- [3] Lin H, Ji Y Z, Liang L, et al. Reconstruction of Three Dimensional City Model Based on LIDAR [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, v518-523: 5648-5655.
- [4] 张晖, 刘超, 李妍, 等. 基于 CityEngine 的建筑物三维建模技术研究 [J]. *测绘通报*, 2014, 11(期): 108-112.
Zhang Hui, Liu Chao, Li Yan, et al. Research on 3D Building Modeling Technology Based on City Engine [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping | Bull Surv Map*, 2014, 11: 108-112.
- [5] 邓世军, 朱卓娃, 江宇, 等. 基于激光点云数据的三维建模技术研究 [J]. *科技资讯*, 2015, 10(期): 32-33.
Deng Shijun, Zhu Zhuowa, Jiang Yu. Three-dimensional modeling technology Laser Point Cloud Data Base [J]. *Technology Information*, 2015, 10: 32-33.
- [6] 陈崇帮, 欧新良, 唐伟, 等. 基于点云数据的去噪算法研究 [J]. *长沙大学学报*, 2013, 27(5): 58-60.
Chen Chongbang, Ou Xinliang, Tang Wei, et al. Denoising Method Based on Point Cloud Data [J]. *Journal of Changsha University*, 2013, 27(5): 58-60.
- [7] Wang Y, Liang X, Flener C, et al. 3D Modeling of Coarse Fluvial Sediments Based on Mobile Laser Scanning Data [J]. *Remote Sensing (S2072-4292)*, 2013, 5(9): 4571-4592.
- [8] Pylvanainen T, Berclaz J, Korah T, et al. 3D City Modeling from Street-Level Data for Augmented Reality Applications [C]// 2011 International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission. USA: IEEE, 2012: 238-245.
- [9] Merrell P, Manocha D. Model Synthesis: A general procedural modeling algorithm [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (S1077-2626)*, 2011, 17(6): 715-728.
- [10] Müller P, Wonka P, Haegler S, et al. Procedural modeling of buildings [J]. *ACM Transactions on Graphics (S0730-0301)*, 2006, 25(3): 614-623.
- [11] Shi Yun-fei, Zhang Shu-sheng, Cao Ju-lu, Fan Hai-tao. 3D Model Reconstruction Based on Process Information [J]. *Computer Aided Drafting, Design and Manufacturing (S1003-4951)*, 2007, 2: 15-22.
- [12] Li J, Zhang Y, Kong D. Rule-based procedural modeling of buildings [C]// *Computer Science and Automation Engineering (CSAE)*, 2012 IEEE International Conference on. USA: IEEE, 2012, 2: 450-454.

(上接第 3709 页)

- [17] Wang L, Jajodia S, Singhal A, et al. k-zero day safety: A network security metric for measuring the risk of unknown vulnerabilities [J]. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing (S1941-0018)*, 2014, 11(1): 30-44.
- [18] Visumathi J, Shunmuganathan K L. A computational intelligence for evaluation of intrusion detection system [J]. *Indian Journal of Science and Technology (S0974-5645)*, 2011, 4(1): 40-45.
- [19] 高翔, 祝跃飞, 刘胜利. 一种基于广义随机颜色 Petri 网的网络攻击组合模型 [J]. *电子与信息学报*, 2013, 38(11): 2608-2614.
Gao Xian, Zhu Yuefen, Liu Shengli. Attack Composition Model Based on Generalized Stochastic Colored Petri Nets [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 38(11): 2608-2614.
- [20] 陈小军, 方滨兴, 谭庆丰, 等. 基于概率攻击图的内部攻击意图推断算法研究 [J]. *计算机学报*, 2014, 37(1): 62-72.
Chen Xiaojun, Fang Binxing, Tan Qingfeng, et al. Inferring attack intent of malicious insider based on probabilistic attack graph model [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2014, 37(1): 62-72.
- [21] Igor Kotenko, Andrey Chechulin. Computer Attack Modeling and Security Evaluation based on Attack Graphs. [C]// The 7th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing System: Technology and Applications, Berlin, Germany. USA: IEEE, 2013, 9: 614-619.
- [22] 张红旗, 王鲁. 信息安全技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
Zhang Hongqi, Wang Lu. *Information Security Technology* [M]. Beijing, China: Higher Education Press, 2008.