

# 复杂大地形下铁路与沿线环境三维自动化建模

位喜会,唐兆,马宗,袁晓林,张建军

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

**摘要:**铁路与沿线环境的大规模三维模型在铁路维护、应急救援、运行可视化等领域广泛应用。提出了一种利用开源地理信息和三维大地形技术相结合的铁路与沿线环境自动化建模方法。该方法利用卫星图对目标线路所在的地理环境进行重建,提取铁路线路的特征点,进而插值获取整条线路。通过对线路离散与坐标变换,建立起复杂地形下任意长大线路三维模型。通过案例验证表明,该方法可有效应对大范围复杂地形的铁路线路和沿线环境自动化建模,显著提高了线路建模的效率。

**关键词:**复杂大地形;长大铁路线路;自动化建模;线路绑定

**中图分类号:**TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)02-0101-04

## 3D Automatic Modeling of Railway and Environment Along Large Terrain

WEI Xihui, TANG Zhao, MA Zong, YUAN Xiaolin, ZHANG Jianjun

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Large-scale 3D models of railways and environments along the railway line are widely used in railway maintenance, emergency rescue, and operational visualization. An automatic modeling method of the railway and environment is proposed, in which the open source geographic information is combined with 3D terrain. The satellite image is used in this method to reconstruct the geographical environment where the target line is located, which is used to extract the feature points of the railway line, then interpolate thus obtaining the entire line. Based on the line discretization and coordinate transformation, the 3D model of arbitrary long lines in the difficult terrain is established. The case shows that the method can be used to effectively deal with the automatic modelling of the railway line and the environment in the large-scale difficult terrain, thus significantly improving the efficiency of the line modeling.

**Keywords:** difficult large terrain; long railway lines; automatic modeling; railway line binding

## 0 引言

近年来,铁道部提出了“数字铁路的设想”<sup>[1-2]</sup>,抽象的数据模型不能直观地表现铁路线路的相关参数,也不能反映线路与周围地理环境的相互关系,铁路线路空间数据的三维可视化表达成为数字铁路的一个重要组成部分。计算机图形性能的逐步提升,为大规模铁路线路的建模与可视化提供了条件<sup>[3-4]</sup>。铁路线路的空间三维模型在铁路设计、施工、运营、维护等方面有着广泛的应用<sup>[5-6]</sup>,大规模铁路线路的快速自动化建模逐渐得到人们的重视。

目前的铁路线路建模方式大体分为人工手动建模与程序化自动建模两种<sup>[7]</sup>。铁路线路的构成繁多复杂,导致人工建模效率不高,而且铁路线路涉及多个专业领域,建模人员可能缺乏相关的铁路专业素养,导致人工模型达不到铁路相关规范的要求,更加降低了建模的通用性和灵活性<sup>[8]</sup>。铁路线路的构成在线路维度上高度统一,据其特点,铁路线路更加适合程序化建模<sup>[9]</sup>。国内复杂的地理环境大大降低了大规模线路建模的自动化程度。本文

以西成高速铁路广元至宁强段为例,对铁路沿线及其三维地理环境进行重建。由此大大提高了在复杂地形中铁路线路建模的自动化程度,并建立起自动化构建任意大规模铁路线路的方法。

## 1 三维大地形技术

铁路线路依赖于真实的地理环境。本文利用 Bing Maps 卫星图对地理环境进行重建,该重建方式过程简单、数据量小。

本文利用 Bing Maps 选取了广元市附近 27×25 km<sup>2</sup> 的区域进行重建,该区域地理环境较为复杂,包含了铁路线路中地面、隧道、桥梁多种线路类型。如图 1(a)为在墨卡托投影中选择所需地形区域,并记录其中心点 center 经纬度,该中心点用于线路坐标对地形世界坐标的转换计算;图 1(b)为该区域的地形高度图;图 1(c)为该区域的卫星影像;图 1(d)为利用高度图生成相应地形并添加卫星影像纹理之后的三维地形,从中可以看出该区域的地形进行了较高精度的还原,可满足铁路线路重建的需要。

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51405402;51475396)

**第一作者简介:**位喜会(1993—),男,硕士研究生,研究方向为计算机仿真与可视化。

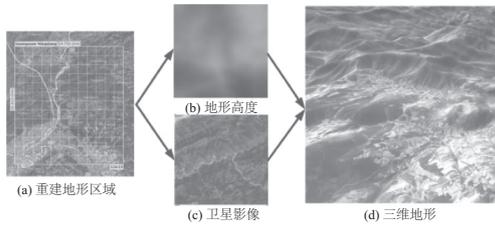


图1 三维地形重建

## 2 铁路线路空间位置

铁路线路的三维空间位置主要由线路平面和纵断面构成。本文建立了从 OSM 中提取线路特征点,根据已知特征点的高度信息插值得到整个线路特征点的高度信息,以特征点进行贝塞尔插值获取整条线路的过程。下面对其过程就西成线广元至宁强段线路进行举例说明。

### 2.1 线路特征点

铁路线路的平面坐标决定了线路的水平走向。在 OSM 地图集中,线路通过特征点的方式进行存储,包含了 Nodes、Ways、Relations 和 Tags 信息。

从 OSM 获取相应区域的地图数据集后,如图 2 所示,根据西成线的 Relation 关系对数据进行过滤,获取广元至宁强段铁路线路的 Nodes 节点、Ways 信息以及 Tags 属性;根据 Tags 的 tunnel、bridge 属性将特征点分为: NodesOfBridge、NodesOfTunnel、NodesOfGround、NodesOfPortal 4 类。

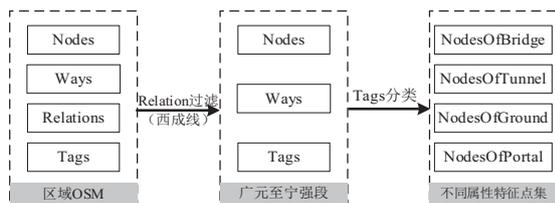


图2 不同属性特征点集筛选过程

广元至宁强段共包含 65 个线路特征点的经纬度信息。

### 2.2 线路平面

上文获取的线路特征点信息为地理坐标系下的经纬度值,仍需对其进行坐标变换,将其转换到地形世界坐标系中。

地形中心点 center 即为变换后地形世界坐标系的坐标原点。如图 3 所示,先将地理坐标转化为墨卡托投影坐标,简化计算变换公式如下:

$$\begin{cases} x = \frac{(long+180)}{360} \times w_{map} \\ y = \left(0.5 - \ln\left(\frac{1+lat'}{1-lat'}\right)\right) \times \frac{w_{map}}{4\pi} \\ lat' = \sin\left(\frac{lat \times \pi}{180}\right) \\ w_{map} = 256 \times 2^n \end{cases} \quad (1)$$

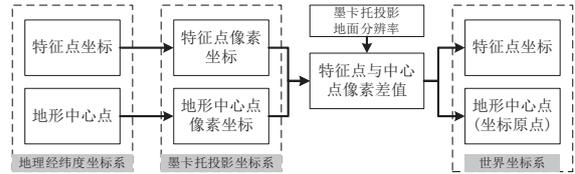


图3 地理坐标转换地形世界坐标

long 和 lat 为地理坐标下的经纬度。对该坐标系进行平移变换使得地形中心点为坐标原点,在得到以地形中心点为坐标原点的像素坐标值后,按照地面分辨率变换到世界坐标系下的坐标值。至此,便可将从 OSM 中提取的经纬度坐标变换到地形世界坐标系下的平面坐标。

### 2.3 线路纵断面

从 OSM 地图中只能获取线路特征点的平面信息,下面对线路特征点高度信息的计算进行描述。由上文可知获取到的线路特征点包括桥梁特征点、地面特征点、隧道特征点、隧道口特征点。图 4 描述了线路的纵断面信息,图中点 1 和点 2 为隧道口特征点,该特征点记录了隧道口的平面坐标位置,易知该点的线路高度即为该点的地形高度。

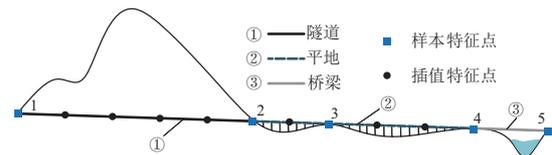


图4 部分线路纵断面

点 1 和点 2 之间的隧道特征点的高度可根据点 1 和点 2 的高度进行线性插值得到。

点 2 到点 4 之间为平地,该部分线路近似沿地面高度进行延伸,但仍有一定的地势起伏。本文采用近似模拟的方式进行处理:从点 2 沿线路向点 4 进行搜索 10 km,取该段距离范围内地形最高点 3 为线路和地形相切点,点 3 的地形高度即为该特征点的高度,以点 2 和点 3 的高度对两者之间的特征点高度进行线性插值,中间特征点与地面可能产生高度差,该部分的高度差可通过高架桥进行补偿。然后从点 3 继续进行搜索,直至完成整个平地线路特征点高度的获取。对于点 4 和点 5 桥梁特征点,其高度可按照与平地相同的处理方式获取。

线路的平面信息还包括曲线段线路的超高信息,直接存储超高信息较为繁琐,本文在线路特征点添加旋转角属性值  $\gamma$ ,计算出线路特征点的旋转角属性后,对特征点之间的部分采用相似的插值处理。

### 2.4 特征点插值

上文确定了线路特征点在地形坐标系中的空间位置,需对上述特征点进行插值处理进而获取整条线路。显然简单的线性插值不能满足线路平滑性的要求。如图 5 所示本文利用三阶贝塞尔插值获取整条线路。

每段曲线由  $\{P_0^i, P_1^i, P_2^i, P_3^i\} (i=0, 1, 2, \dots, m-1)$  4 个点以及式(2)插值确定;其中  $m$  为线路特征点的总个数。

$$B^i(t) = P_0^i (1-t)^3 + 3P_1^i t (1-t)^2 + 3P_2^i t^2 (1-t) + P_3^i t^3 \quad (2)$$

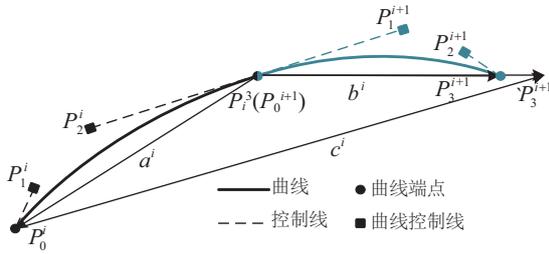


图5 贝塞尔插值

式中  $P_0^i$  和  $P_3^i$  为贝塞尔曲线的锚点,即为上文所述的线路的特征点,且  $P_3^i$  和  $P_0^{i+1}$  共用同一个点。为保证两条相邻的插值曲线可平滑地过渡,显然  $P_2^i, P_3^i, P_0^{i+1}$  三点共线。如图5所示,  $P_2^i$  和  $P_0^{i+1}$  按照式(3)进行计算,  $\alpha$  为曲线调控常数,本文取 0.5。

$$\begin{cases} a^i = P_{0(x,y,z)}^i - P_{3(x,y,z)}^i \\ b^{i+1} = P_{3(x,y,z)}^{i+1} - P_{0(x,y,z)}^{i+1} \\ c^i = \frac{|a^i|}{|b^{i+1}|} \cdot b^{i+1} - a^i \\ P_{2(x,y,z)}^i = -\alpha \cdot \frac{c^i}{|c^i|} \cdot |a^i| + P_{3(x,y,z)}^i \\ P_{1(x,y,z)}^{i+1} = \alpha \cdot \frac{c^i}{|c^i|} \cdot |a^i| + P_{0(x,y,z)}^{i+1} \end{cases} \quad (3)$$

对于线路的起点与终点需做特殊处理,即点  $P_0^0$  与点  $P_1^0$  重合,点  $P_2^{m-1}$  与点  $P_3^{m-1}$  重合。由此可获得整条铁路,如图6所示,图6(a)为特征点集,图6(b)为插值获取的整条铁路线路。

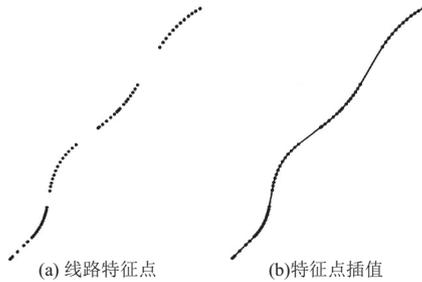


图6 特征点插值

### 3 线路自动化建模

#### 3.1 线路离散与坐标映射

线路模型的空间位置在计算机中以世界坐标的方式进行存储,需对线路数据进行离散处理,并转化为地形世界坐标。本文对定义域进行离散来获取离散点的坐标值。对所有离散点按式(4)计算整个线路的长度,  $m-1$  为曲线段的个数,  $c_j^i$  为每段曲线相邻样本点的距离,  $P_{\max}^i$  为第  $i$  条曲线的采样数。

$$L = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{P_{\max}^i} c_j^i \quad (4)$$

通过式(4)可得出线路任意离散点的世界坐标。如

图7所示,根据线路的切线方向、垂直方向、切线的垂线方向建立局部坐标系,在局部坐标系下建立轨道模型的三维位置,进一步转换到世界坐标系中。

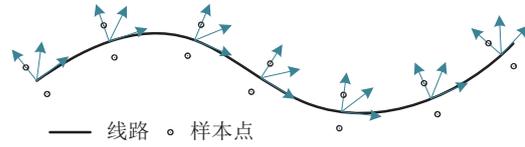


图7 线路模型空间位置

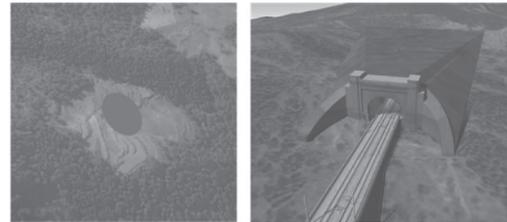
其中局部坐标系和世界坐标系的变换公式为

$$c_w = R'c_l + T' \quad (5)$$

式中:  $R'$  为对应的旋转矩阵;  $T'$  为对应平移矩阵;  $c_l, c_w$  分别为局部坐标和世界坐标。

#### 3.2 地形与隧道

目前针对地形洞穴的处理方式都需要较多的人工干预,这大大降低了大规模铁路线路建模的自动化程度。为此,本文采用了调整模型渲染队列的方式来模拟隧道洞口。该方式在事先设置好隧道口遮罩后,将隧道、遮罩模型和地形的渲染顺序调整为地形-遮罩-隧道,因渲染顺序的关系,遮罩会遮挡地形,但隧道仍对其保持可见。最终实现效果如图8所示,图8(a)为地形挖孔的实现效果,图8(b)为隧道口的模拟情况。

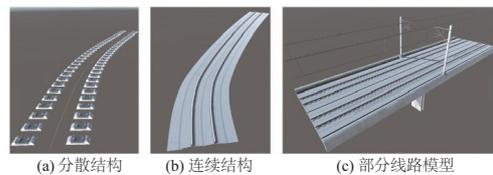


(a)地形挖孔 (b)隧道口模拟

图8 隧道洞口的实现

#### 3.3 模型的线路绑定

不同的铁路线路具有不同的基础模型,为建立起过程统一且高自动化的建模流程,可构建基础模型库。基础模型库主要包含两类模型:一类为轨枕、吊弦、支柱等具有完整结构的单位模型;另一类为路基纹理、隧道纹理等纹理文件的基元模型。两类不同的基础模型采用不同的自动化生成方式。如图9所示,单位模型如轨枕,可直接计算模型在世界坐标系中的点位坐标值;连续结构如轨道和路基则先绘制其横截面轮廓,横截面沿线路生成对应的连续结构,然后提取基础模型库中对应的纹理基元,绘制成完整的连续结构模型。两种模型生成方式相结合,最终生成完整的线路模型。图9(c)为自动生成的部分线路模型。



(a)分散结构 (b)连续结构 (c)部分线路模型

图9 线路模型的生成

由此,不同线路的自动化建模流程如图 10 所示。首先,建立通用的基础模型库,根据线路的类型提取线路模型的位置参数以及线路特征点属性;根据线路信息以及上文建立的线路离散与坐标变换规则,计算出线路与模型的空间关系、线路与地形的空间关系、模型与地形的空间关系;根据线路特征点记录的地形信息,识别线路地形,由此建立起复杂地形下包含隧道、地面、桥梁不同线路情况的线路自动化建模流程。

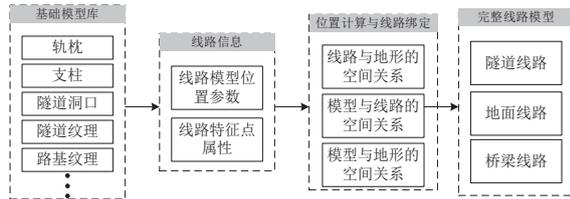


图 10 线路模型的生成

## 4 案例试验

基于上文建立的复杂地形环境下铁路线路的自动化建模方法,对西成线广元至宁强段上下行双线线路建模,该过程仅需要选择线路所在的地理区域,无需其他人工干预,即可自动提取卫星图与线路特征点进而完成线路与沿线环境的自动化建模。该段线路长约 35 km,包含了平地、桥梁、隧道全部复杂地形的线路建模情况。主要线路结构及其对应的轨道坐标系坐标、模型间距如表 1 所示。

表 1 线路模型相对位置

线路结构	局部坐标 $(x, y, z)$	模型间距/m
吊弦	(0, 5.86, 0)	10
支柱	(3.1, 0, 0)	50
桥支座	(0, 0, 0)	35
吊柱	(-3, 0, 0)	50
轨枕	(-1.15, 0, 0)	0.3
接触线	(0, 5.85, 0)	—
承力索	(0, 7.65, 0)	—
路基	(0, 0, 0)	—
桥面	(0, -0.25, 0)	—

最终线路建模效果如图 11 所示,可见本文建立的复杂地形下铁路线路自动化建模拥有良好的可视化效果。

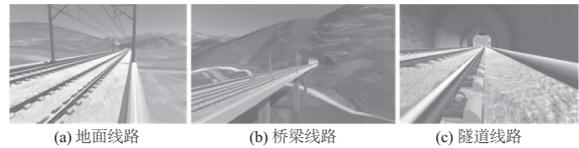


图 11 西成线广元至宁强段线路建模

## 5 结语

随着我国铁路网建设的不断完善,复杂地形下的铁路线路逐步增多,地形的复杂度大大降低了大规模铁路线路建模的自动化程度。本文首先根据卫星图建立目标区域的三维地形,从 OSM 地图中提取对应的铁路线路数据,将线路数据与地形数据相结合插值得到整条铁路线路,并记录线路的地形信息,在此基础上对线路离散化,并进行坐标变换,然后对模型进行线路绑定,最终建立了复杂地形下构建任意铁路线路的快速自动化建模方法。根据该方法对西成线广元至宁强段的双线铁路线路进行自动化建模,结果表明仅需要极少的人工干预即可完成线路的建模,大大缩小了建模的复杂度和建模的时间,提高了线路建模的自动化程度。

### 参考文献:

- [1] 刘仍奎, 李长城, 王福田. 铁路信息化的发展方向——数字铁路[J]. 信息系统工程, 2002(4): 25-26.
- [2] 陆东福. 铁路“十二五”发展规划研究[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2013: 272.
- [3] WEI P, XU Y. Research on realtime rendering of 3D high-speed rail GIS[C]. International Conference on Image & Graphics, 2013: 731-736.
- [4] 夏欢, 王培俊, 李保庆, 等. 三自由度运动模拟器动态场景设计与可视化仿真[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(1): 100-102.
- [5] LIU L, XIA Y, HAN Y. Research on three-dimensional modeling of railway route in railway route selection[C]. International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, 2010: 2907-2911.
- [6] 王明生, 张振平. 基于 GIS 的铁路路基三维可视化技术研究[J]. 图学学报, 2009, 30(1): 66-69.
- [7] WANG J, LAWSON G, SHEN Y. Automatic high-fidelity 3D road network modeling based on 2D GIS data[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 76(3): 86-98.
- [8] 张恒. 多层次空间语义约束的高速铁路场景自动建模方法[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [9] ZHU J, ZHANG H, CHEN M, et al. A procedural modelling method for virtual high-speed railway scenes based on model combination and spatial semantic constraint[J]. International Journal of Geographical Information Systems, 2015, 29(6): 1059-1080.

收稿日期: 2019-01-04