引文格式：侯凯宇,邓凌云,刘鹏程,等. 高精地图车道高程向Opendrive格式快速转换方法[J]. 地理空间信息, 2026, 24(3): 21-24. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2026.03.005

高精地图车道高程向Opendrive格式快速转换方法

侯凯宇，邓凌云*，刘鹏程，秦　佐
（长沙市勘测设计研究院，湖南 长沙 410205）

摘　要：针对高精地图车道参考线矢量高程向Opendrive格式转换的问题，提出了一种基于拉格朗日乘子和最小二乘法的分段三次曲线拟合方法。首先以三次曲线通过矢量线首尾节点为条件构建约束方程；再以三次曲线在剩余节点处的误差平方和最小为条件构建目标方程；最后利用拉格朗日乘子求解三次曲线系数。当拟合误差超过阈值时，分割矢量线并分别求解系数。通过长沙市某立交桥数据的交通仿真结果证明了该方法的可行性。

关键词：高精地图；最小二乘法；拉格朗日乘子；分段三次曲线；Opendrive
中图分类号：P285　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）03-0021-04

Fast Conversion Method from High-definition Map Lane Elevation to Opendrive Format

HOU Kaiyu, DENG Lingyun, LIU Pengcheng, QIN Zuo
(Changsha Survey, Design and Research Institute, Changsha 410205, China)

Abstract: To solve the issue of converting the vector elevation of high-definition map lane reference lines to Opendrive format, we proposed a segmented cubic curve fitting method based on Lagrange multiplier and least squares method. Firstly, we constructed a constraint equation based on the condition that the cubic curve passed through the beginning and the end nodes of vector line. Then, we constructed the objective equation with the condition of minimizing the sum of squared errors of the cubic curve at the remaining nodes. Finally, we used Lagrange multiplier to solve the coefficients of cubic curve. When the fitting error exceeds the threshold, we should segment the vector line and calculate the coefficients separately. The traffic simulation results from an overpass in Changsha City proved the feasibility of this method.

Key words: high-definition map, least squares method, Lagrange multiplier, segmented cubic curve, Opendrive

高精地图的概念诞生于2010年梅赛德斯奔驰研究规划研讨会[1]，是L4级别以上自动驾驶的重要支撑，能提供丰富的道路先验知识和实时路况信息，在大雾、暴雨等恶劣天气环境下可有效弥补摄像头、GNSS、INS、毫米波雷达、激光雷达等环境感知设备的缺陷进而帮助智能驾驶汽车实现厘米级的路径规划，是智能网联汽车领域的一项关键技术[2]。2022年8月自然资源部公布了首批高精地图应用试点城市名单，2023年9月自然资源部发布了高精地图数据标准[3]等一系列相关规范，2024年7月工业和信息化部等5部委公布了“车路云一体化”应用试点城市名单，标志着高精地图生产应用进入新阶段。高精地图的学术研究主要集中在数据模型与标准[4-6]、数据生产[7-12]、语义表达[13-14]、地图质检[15-16]、众源更新[17-18]、格式转换[19]、信息加密[20-21]和协同应用[22-23]等方面。

高精地图生产通常以激光点云或遥感影像为数据源，通过语义分割、人工绘制等方式生成高精地图矢量要素；再根据自动驾驶方案将矢量要素转换为Opendrive等可供车辆识别的数据格式。与矢量不同的是Opendrive并不直接存储坐标点的三维信息，其车道高程由一个或多个三次曲线描述。在矢量要素向Opendrive转换时需保证：所有矢量节点与拟合三次曲线之间的误差小于阈值；三次曲线必须通过矢量线的首尾节点以保证与相邻车道参考线之间空间位置的连续性。值得一提的是，每个车道参考线矢量拟合三次曲线的数量应尽可能少，极端情况下每两个相邻节点之间使用一个三次曲线描述，将导致输出的Opendrive文件过于庞大且每个三次曲线对应的车道距离过短，使得三次曲线中隐含的曲率信息难以被车辆利用。此外，在理想状态下各三次曲线连接处的曲率值应相等，以减小汽车姿态变化引起的向心力急剧变化，但既要连接处的曲率值相等、又要节点与三次曲线的拟合误差小于阈值，势必会增加三次曲线的数量。因此，本文在平衡上述条件的基础上，利用较短的时间快速输出

项目来源：湖南省自然资源科研（标准）后补助项目（HBZ20240110）；长沙市自然科学基金资助项目（kq2502270）。
第一作者简介：侯凯宇（1992—），硕士，高级工程师，从事地理信息软件开发、高精地图、工程测量等工作，E-mail：739275645@qq.com。
通信作者：邓凌云（1979—），博士，高级工程师，从事城市规划、高精地图等工作，E-mail：41523295@qq.com。

城市级体量的Opendrive格式数据。由于自动驾驶面临的困难环境是城市道路，驾驶速度适中，曲率突变带来的影响较小；但立交桥净空高度等驾驶环境则对车辆尤其是货车的行驶具有一定风险，因此上述条件的优先级为拟合误差>三次曲线数量>连接处曲率变化。

由于道路平曲线比竖曲线更复杂，因此线形参数估计研究主要针对平曲线，竖曲线可参考平曲线做法。国内外已对该内容进行大量研究[24-31]，但所提方法不满足本文高精地图数据的高拟合精度和批量转换需求，具体理由为：①由于道路施工、道路标线喷涂、样本点测量存在误差，若按道路设计线形恢复参数，则可能导致拟合中误差过大，上述研究的目的是在缺乏道路设计资料时改造老旧公路或进行公路普查，拟合精度要求不高，而高精地图要求的坐标相对精度为0.2 m；②上述研究的实验样本点取逐桩坐标，点间距相等、相近或规律变化，而高精地图样本点间距大小不一，加大了线形识别难度，将使拟合中误差更大；③上述研究有些需要人机交互识别特征点，有些仅拟合一条道路的样本点而未考虑多条道路间的位置连续性，不适用于高精地图的大批量数据处理。因此，本文采用带约束的分段三次曲线拟合样本点，目的不是恢复道路竖曲线设计参数，而是为车辆提供尽可能多的竖向曲率和坡度信息，以辅助自动驾驶决策。

1 研究方法

1.1 附加约束的最小二乘三次曲线拟合法

$P=(x_i,y_i)$ 为点集合，$\boldsymbol{a}=[a_0\ a_1\ a_2\ a_3]^{\mathrm{T}}$ 为三次曲线系数，$\boldsymbol{E}=[e_0\ e_1\cdots e_n]^{\mathrm{T}}$ 为 P 与三次曲线的误差，去掉首尾两个点，剩余点的方程为：

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdots \\ y_{n-1} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & x_1^3 \\ 1 & x_2 & x_2^2 & x_2^3 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 1 & x_{n-1} & x_{n-1}^2 & x_{n-1}^3 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \cdots \\ e_{n-1} \end{bmatrix} \tag{1}$$

将式（1）表示为 $\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{XA}+\boldsymbol{E}$，根据最小二乘原理，使其误差平方和最小，即 $\min\|\boldsymbol{XA}-\boldsymbol{Y}\|^2$。

首尾两个点的方程为：

$$\begin{bmatrix} y_0 \\ y_n \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1 & x_0 & x_0^2 & x_0^3 \\ 1 & x_n & x_n^2 & x_n^3 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} e_0 \\ e_n \end{bmatrix} \tag{2}$$

将式（2）表示为 $\boldsymbol{Y}_2=\boldsymbol{X}_2\boldsymbol{A}+\boldsymbol{E}_2$，为保证不同三次曲线之间的连续性，令 $\boldsymbol{E}_2=0$，则有：

$$\boldsymbol{X}_2\boldsymbol{A}-\boldsymbol{Y}_2=0 \tag{3}$$

以 $\min\|\boldsymbol{XA}-\boldsymbol{Y}\|^2$ 为目标函数，式（3）为约束条件，λ 为拉格朗日乘子，则有：

$$(\boldsymbol{XA}-\boldsymbol{Y})^2+(\boldsymbol{X}_2\boldsymbol{A}-\boldsymbol{Y}_2)\lambda=0 \tag{4}$$

$$2\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{XA}-2\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}+\boldsymbol{X}_2^{\mathrm{T}}\lambda=0 \tag{5}$$

$$\lambda=2(\boldsymbol{X}_2(\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X})^{-1}\boldsymbol{X}_2^{\mathrm{T}})^{-1}(\boldsymbol{X}_2(\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X})^{-1})\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}-\boldsymbol{Y}_2 \tag{6}$$

$$\boldsymbol{A}=(\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X})^{-1}(\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}-\frac{1}{2}\boldsymbol{X}_2^{\mathrm{T}}\lambda) \tag{7}$$

1.2 寻找分段点

求得三次曲线系数后，将 P 代入求得 E，假设在点 (x_e,y_e) 处有最大误差 $\max\|E\|$，threshold 为阈值，若 $\max\|E\|<\text{threshold}$ 拟合结束；否则，在点 (x_e,y_e) 处将 P 分割为两个点集合 P_1 和 P_2，再分别计算 P_1 和 P_1 的三次曲线系数，直至 $\max\|E\|<\text{threshold}$ 为止。

1.3 最小拟合点数和应对策略

由于式（6）、式（7）中共有6个待定参数，因此至少需要6个点参与拟合。当只有5个点参与拟合时，附加约束的三次曲线拟合将退化为附加约束的二次函数拟合，此时 $\boldsymbol{A}$ 的分量由4变为3，式（1）改写为：

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdots \\ y_{n-1} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 \\ 1 & x_2 & x_2^2 \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ 1 & x_{n-1} & x_{n-1}^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_3 \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \cdots \\ e_{n-1} \end{bmatrix} \tag{8}$$

由于三次曲线拟合至少需要4个点，当只有4个点参与拟合时，可取消三次曲线通过首尾点的约束条件，附加约束的三次曲线拟合退化为三次曲线拟合，式（7）改写为：

$$\boldsymbol{A}=(\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X})^{-1}\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y} \tag{9}$$

当只有3个和2个点参与拟合时，分别退化为二次函数拟合和线性函数拟合。

2 实验与结果分析

2.1 数据来源

实验选取长沙市三一大道与万家丽路立交桥高精地图车道参考线矢量数据（图1），车道参考线位于车道中心，存储车道相关属性，位置信息通过车道参考线节点的三维坐标描述。在Opendrive中，三次曲线的自变量为车道参考线上某节点距离车道参考线起点的里程，因变量为节点的绝对高程。采集高精地图车道参考线矢量数据时，应尽量保证节点间距在3~5 m，道路坡度变化剧烈处可适当加密。

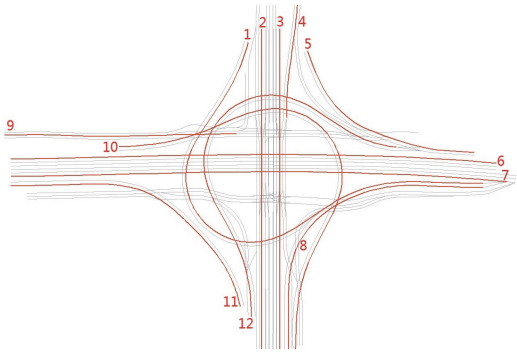


图1　立交桥车道参考线

2.2　数据预处理

1）参考线合并。由于在车道性质和周边环境发生改变时，车道参考线必须打断，因此城市道路的车道参考线较短且高程变化较小，通常仅需使用一个三次曲线拟合。为更好地测试分段三次曲线的拟合效果，将216条测试数据合并为133条。

2）线节点抽稀。节点密度越小越容易遗失车道坡度变化关键位置的高程，节点密度越大越有利于拟合。为在实验中暴露更多的问题，对节点进行抽稀处理。为不改变平面线型，抽稀条件为节点与前后相邻节点连线的弦距小于0.03 m，抽稀后节点减少60%。

3）坐标系处理。根据三次曲线拟合理论，用于描述一个车道参考线的 n 条三次曲线处于同一坐标系内，而在Opendrive中则对应 n 个坐标系。坐标系依次沿 X 轴平移至各分段位置，即每个分段内的点集合 x 需要减去段内第一个点的 x 值，假设 P 在点 (x_e, y_e) 处分割为 P_1 和 P_2，则 $P_1=(x_0,y_0),(x_1,y_1)、\cdots,(x_e,y_e)$，$P_2=(x_e-x_e,y_e),(x_{e+1}-x_e,y_{e+1})、\cdots,(x_n-x_e,y_n)$。

2.3　实验结果

实验采用的编程语言为C#，运行框架为.NET Framework，矢量读取采用第三方GIS库ESRI ArcObjects，矩阵计算采用第三方科学计算库Math.net，曲线绘制采用第三方绘图库NPLOT。高精地图相关标准中规定的数据精度为0.2 m[32]，设threshold为0.1 m，部分车道拟合结果见图2，其中横轴表示距车道参考线起点的里程，竖轴表示绝对高程，灰色空心圆圈表示参考线节点，参考线各分段三次曲线以红、绿、品红3种颜色循环表示。

2.4　结果分析

三次曲线拟合时附加了通过首尾点的约束条件，但未考虑不同分段间导数的连续性，导致分段点处相邻三次曲线的曲率不连续。然而，在判定分段点阈值合理设置和保证线节点密度的前提下，分段点处的曲率变化通常较小，对实际车辆行驶的影响较小。交通仿真软件PTV Vissim的仿真结果（图3）也表明分段点处的曲率变化程度不足以影响车辆正常行驶。此外，分段点数量和位置不一定是最优，但对于后续应用影响较小，本文的目的是利用较小的计算成本快速获取一份具有性价比的Opendrive数据。

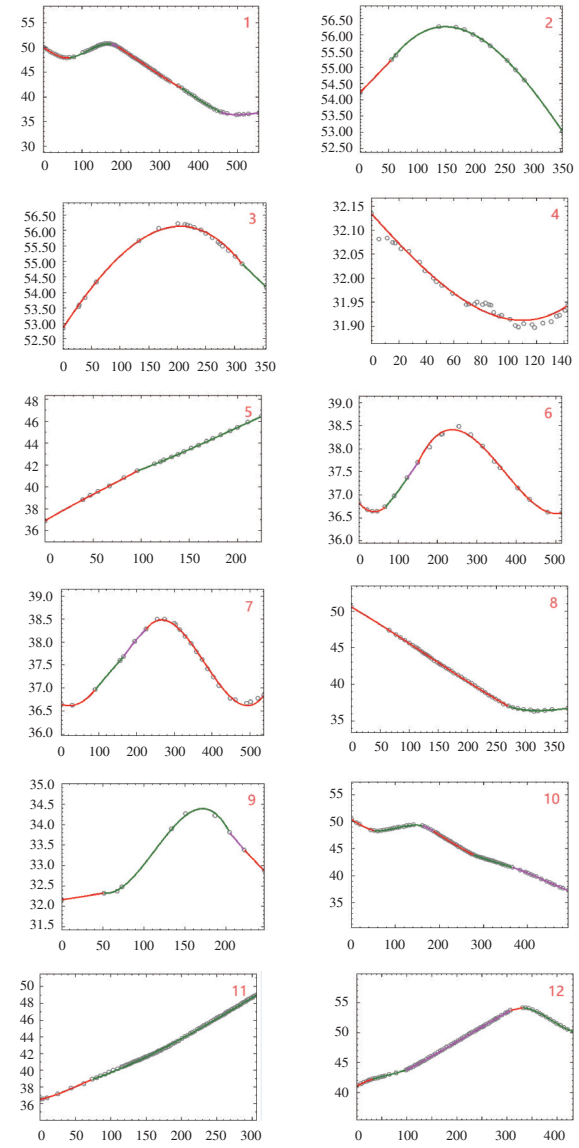


图2　高程分段拟合结果

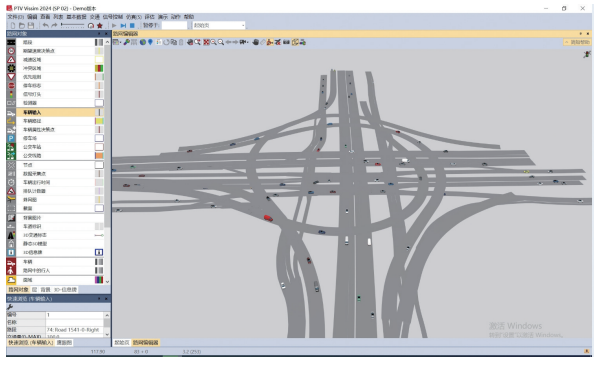


图3　高精地图交通仿真

3 结 语

Opendrive数据仅记录车道起始节点的三维坐标，车道高程通过一个或多个三次曲线描述，因此高精地图车道参考线矢量高程向Opendrive转换时需根据节点信息进行拟合。本文提出了一种基于拉格朗日乘子和最小二乘法的分段三次曲线拟合方法，并利用长沙市三一大道与万家丽路立交桥数据进行了拟合实验和交通仿真。实验结果证明了该拟合方法的可行性。

参考文献

[1] Liu R, Wang J L, Zhang B Q. High Definition Map for Automated Driving: Overview and Analysis[J]. Journal of Navigation,2020,73(2):324-341

[2] 李必军,郭圆,周剑,等. 智能驾驶高精地图发展与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2024,49(4):491-505

[3] 道路高精导航电子地图数据规范:CH/T 4026-2023[S].

[4] 应申,蒋跃文,顾江岩,等. 面向自动驾驶的高精地图模型及关键技术[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2024,49(4):506-515

[5] 詹骄,郭迟,雷婷婷,等. 自动驾驶地图的数据标准比较研究[J]. 中国图象图形学报,2021,26(1):36-48

[6] 杨莹,金钊,钱赛男,等. 智能驾驶道路高精地图基础数据规范研究[J]. 测绘科学,2023,48(10):90-97

[7] 侯翘楚,李必军,蔡毅. 高分辨率遥感影像的车道级高精地图要素提取[J]. 测绘通报,2021(3):38-43

[8] 侯翘楚,李必军,张红娟,等. 交叉口安全驾驶区域高精地图生成方法[J]. 测绘学报,2023,52(10):1784-1796

[9] 丁阳. 道路全息测绘地形成果向高精地图转换的探索研究[J]. 测绘通报,2024(增刊1):271-273

[10] 徐杰,侯飞,曹广航. 高精道路地图制作方法及关键技术[J]. 测绘通报,2022(1):155-158

[11] 王越,何伟,周琳,等. 基于车载LiDAR数据的高精道路地图制作[J]. 地理空间信息,2022,20(6):92-95

[12] 赵赛帅,李艳宾,李俊峰,等. 宁波市数字公路高精地图的建设方法探索[J]. 地理空间信息,2020,18(9):32-35

[13] 齐如煜,尹章才,顾江岩,等. 高精地图的知识图谱表达[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2024,49(4):651-661

[14] 王舒曼,应申,蒋跃文,等. 智能驾驶场景中高精地图动静态数据关联方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2024,49(4):640-650

[15] 李月华. 高精地图道路交叉口拓扑连接问题的分析方法与实践[J]. 测绘通报,2024(4):150-155

[16] 赵明姝. 一种更新高精地图置信度的方法[J]. 测绘通报,2024(5):166-171

[17] 史雪静. 高精度地图构建及更新技术[J]. 测绘通报,2024(增刊1): 261-265

[18] 郭圆,李必军,应申,等. 高精度地图众源更新地理信息安全问题浅析[J]. 测绘通报,2024(8):122-127

[19] 马英才,徐之俊,刘子雯,等. 高精地图OpenDRIVE数据格式转换研究[J]. 测绘地理信息,2023,48(1):93-96

[20] 张明旺,张黎明,谭涛. 运用特征不变量的高精地图零水印算法[J]. 地理与地理信息科学,2024,40(6):11-15

[21] 吕旭超,任娜,周齐飞,等. 不可见字符下适用于OpenDrive格式高精地图的数字水印算法[J]. 地球信息科学学报,2024,26(9):2026-2037

[22] 王冕. 面向自动驾驶的高精度地图及其应用方法[J]. 地理信息世界,2020,27(4):109-114

[23] 张闯,应申,王润泽,等. 智能网联汽车的高精地图数据交互模式[J]. 测绘通报,2024(2):107-112

[24] 姚连璧. 车载GPS道路数据采集与线形参数的计算[J]. 测绘学报,2002,31(增刊1):45-49

[25] 姚连璧. 应用稳健估计方法计算道路线形参数[J]. 同济大学学报(自然科学版),2002,30(11):1350-1354

[26] 姚连璧,刘春. 样条函数与稳健估计在线路线形识别中的应用[J]. 同济大学学报(自然科学版),2004,32(7):943-946

[27] 康传利,姚连璧. 利用Hough变换和稳健估计计算道路线形参数[J]. 公路工程,2007,32(6):7-9

[28] Karamanou A, Papazissi K, Paradissis D, et al. Precise Estimation of Road Horizontal and Vertical Geometric Features Using Mobile Mapping Techniques[J]. Boletim de Ciencias Geodesicas,2010,15(5):762-775

[29] Li Z,Chitturi M V,Bill A R,et al. Automated Identification and Extraction of Horizontal Curve Information from Geographic Information System Roadway Maps[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board,2012,2291(1):80-92

[30] Cheng B, Tsai Y, James Y. Automatic Horizontal Curve Identification and Measurement Method Using GPS Data[J]. Journal of Transportation Engineering,2015,141(2):1-9

[31] 郝雨时,徐爱功,章红平,等. 车载POS公路线形特征识别与参数计算[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2018,43(8):1249-1255

[32] 智能网联汽车道路基础地理数据规范:DB33/T 2391-2021[S].