

# 城市道路网主干道提取的形态分析方法

栾学晨<sup>1,2,3</sup> 范红超<sup>4</sup> 杨必胜<sup>1,2</sup> 李秋萍<sup>5</sup>

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

2 武汉大学时空数据智能获取技术与应用教育部工程研究中心,湖北 武汉,430079

3 广东瑞图万方科技股份有限公司,广东 佛山,528305

4 同济大学测量与地理信息学院,上海,200092

5 中山大学地理科学与规划学院,广东 广州,510275

**摘要:**基于多边形的形态分析提出一种城市主干道提取方法。首先根据点线数据生成多边形并计算多边形几何形态指标;然后使用支持向量机集成各项指标对生成的多边形进行形态分类,提取候选主干道多边形;最后根据格式塔理论使用区域增长算法连接候选主干道多边形,提取最终的道路网主干道。实验表明,通过本方法能够快速有效地提取道路网中的平行车道。与道路属性数据中的高等级道路比较发现,本文提取的主干道与道路网的建设等级趋于一致。

**关键词:**交通地理信息系统;主干道;道路网;格式塔;道路等级

中图分类号:P208

文献标志码:A

城市道路网的主干道体现了整个城市道路网的建设框架,吸引了城市的主要交通流。主干道的提取对于道路网多尺度表达、现代交通分析等具有重要作用<sup>[1,2]</sup>。在不涉及属性信息的情况下,大部分主干道提取研究通过计算道路的重要性划分道路等级,包括道路长度、度中心性、紧密中心性、中介中心性等<sup>[3-8]</sup>。这类方法通常只适用于低精度的小比例尺数据,要求道路以单线形式存储。文献<sup>[9,10]</sup>通过模式识别将道路等级划分扩展到高精度的大比例尺数据中。但是该方法依赖于数据质量,应用该方法会产生错误并使计算量明显增加。

在高精度城市路网数据中,主干道多表现为平行道路的组合,平行线之间构成细长的多边形,其形态明显区别于路网中其他多边形,具有特殊的形态特征。而且由于多边形的数目明显小于道路网中的线要素,使用多边形提取主干道也减少了处理的数据量。本文从城市道路网的多边形数据入手,对城市所有多边形进行形态分析,并根据形态指标对多边形进行分类,以及根据完形特征

连接。最终通过提取识别出的主干道多边形轮廓来提取主干道,实现高精度道路数据中的主干道提取,以丰富数据的语义信息。

## 1 主干道多边形的形态提取

### 1.1 多边形形态指标计算

道路网多边形的构建根据路段的最小闭合原则,使用 ArcGIS 完成。通过观察发现,由主干道构成的多边形多具有特殊的形态特征。如图 1 所示,主干道多边形主要分为长直型、长弯型和颗粒型 3 种<sup>[11]</sup>。其中颗粒型具有较小的面积,可以首先通过面积阈值提取;而长直型和长弯型多边形则具有较为复杂的形态特征,需要更多的形态指标描述。

本文使用 5 种形态指标,如多边形的面积、周长、紧凑度、平行度和延展度对其进行提取。下面主要对后 3 种形态指标进行解释。

1) 紧凑度。紧凑度与多边形的面积和周长的关系为:

收稿日期:2013-08-21

项目来源:国家 863 计划资助项目(2012AA12A211,2012AA12A204);国家自然科学基金资助项目(41101443);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(3103005,201161902020015);广东省战略性新兴产业发展专项资金资助项目(2011168036);教育部博士研究生学术新人奖资助项目(5052011619019);武汉大学博士研究生短期出国(境)研修资助项目。

第一作者:栾学晨,博士生,主要研究方向为城市道路网数据分析、建模和多尺度表达。E-mail: xuechen.luan@whu.edu.cn

通信作者:范红超,博士。E-mail: hongchao@tongji.edu.cn

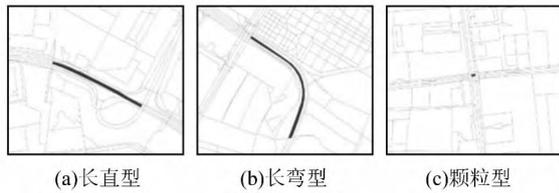


图1 主干道多边形分类

Fig. 1 Arterial-road Polygons Classification

$$\text{compactness} = 4\pi \times \frac{\text{area}(\text{polygon})}{\text{perimeter}^2(\text{polygon})} \quad (1)$$

紧凑度的值域是 $[0, 1]$ ,圆形的紧凑度最高。相较于其他多边形,大部分主干道多边形具有较小的面积、周长和紧凑度。

2) 平行度。平行度定义为多边形轮廓中主方向边长度与周长的比值,其中主方向定义为多边形最小外包矩形(minimum boundary rectangular, MBR)的长边方向。计算公式如下:

$$\text{parallelism} = \frac{\text{length}(\text{main\_direction})}{\text{perimeter}(\text{polygon})} \quad (2)$$

平行度的值域是 $(0, 1)$ 。多边形的平行度越高,则属于主干道多边形的可能性越大。可以通过设置夹角阈值调整属于主方向边的数目,以适应道路的弯曲变化。该指标主要提取长直型道路,当道路弯曲变化过大时,还需结合其他指标加以区分。

3) 延展度。延展度定义为多边形中心线长度的平方与多边形面积的比值:

$$\text{elongation} = \frac{\text{length}^2(\text{centerline})}{\text{area}(\text{polygon})} \quad (3)$$

延展度的值域是 $(0, \infty)$ 。在指标集成过程中,根据实际计算延展度的最大和最小值将其标准化为 $(0, 1]$ 。而式中多边形中心线由内三角网生成<sup>[12]</sup>。首先生成多边形的约束 Delaunay 三角形,然后根据邻接三角形的个数将其分为3类。如图2所示, I至III型三角形的邻接三角形数分别为1至3,而邻接数为0的孤立三角形规定为I型。然后对每种三角形分别生成不同的中心线: I型三角形连接孤立顶点A与对边的中点 $P_1$ ; II型三角形连接两条公共边的中点 $P_1$ 、 $P_2$ , III类三角形分别连接重心O与3条边的中点 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 。

最后统计每个多边形内的中心线最短路径长度。图3是实验操作的三角形剖分示意图,灰色粗线表示道路网,灰色虚线表示道路网多边形内的约束 Delaunay 三角形。通过三角网提取的最短中心线由黑色实线表示,而灰色实线是剔除的

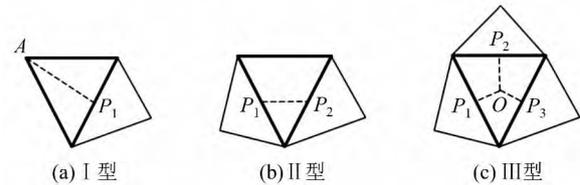
图2 三角形分类<sup>[12]</sup>

Fig. 2 Triangles Classification

中轴线。这种中心线能够较好地表达长弯型多边形的延展度,克服了平行度在表达上的不足。

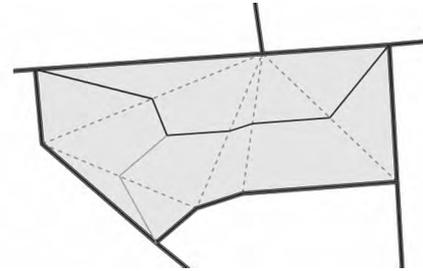


图3 中轴线提取示意图

Fig. 3 Example of Central Line Extraction

## 1.2 基于支持向量机的主干道多边形提取

上述5个指标分别从不同侧面反映主干道多边形的特点,但是由于道路网的复杂性,某一指标的阈值可能随另一指标的变化而变化,难以对每个指标设置单一阈值,需要自动综合多个指标对多边形进行分类。本文使用支持向量机(SVM)来提取主干道多边形。输入数据为形态指标构成的5维向量。SVM首先需要人工选取部分主干道多边形作为训练数据,根据训练数据构建分类模型,对全数据进行分类。

SVM分类模型的定义为,对于训练数据集中的“特征-分类”二值配对 $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, l$ ,其中 $x_i$ 表示特征向量, $y_i \in \{-1, 1\}$ 表示对象 $i$ 的分类,SVM需要求下列最优解<sup>[13]</sup>:

$$\min_{w, b, \xi} \left( \frac{1}{2} w^T w + C \sum_{i=1}^l \xi_i \right) \quad (4)$$

满足:  $y_i(w^T \varphi(x_i) + b) \geq 1 - \xi_i, \xi_i \geq 0$   
其中, $C > 0$ 控制对错分样本惩罚的程度。采用Lagrange系数法可得该优化目标对偶问题并求解得到最优分类函数为:

$$f(x) = \text{sgn} \left\{ \sum_{i=1}^l \alpha_i^* y_i K(x_i, x) + b^* \right\} \quad (5)$$

其中, $\alpha^*$ 、 $b^*$ 为确定最优划分超平面的参数。由于一般分类面为非线性函数,需要通过核函数 $K(x_i, x) = (x_i)^T(x)$ 将 $x$ 映射到更高维度空间中,并在此空间中寻找具有最大边界值的线性超平面。本文使用径向基核函数(RBF)进行转化。RBF核函数常用于输入向量中各个特征之间具

有非线性关系的情况,而且参数较少,减少了模型计算的复杂性。整个 SVM 分类过程由 SVM 模式识别与回归软件包 libsvm 完成<sup>[14]</sup>。

## 2 主干道多边形的空间补全

SVM 分类提取的主干道多边形考虑了形态特征,但未涉及多边形的空间关系,易造成提取的主干道产生破碎,因此还需要根据空间关系补全主干道。本文基于格式塔理论<sup>[15]</sup>,使用区域增长方法对已提取的主干道多边形进行连接。本文将 SVM 识别的多边形作为种子多边形,算法的关键步骤描述如下。

1) 遍历种子多边形,对于任一种子多边形  $P_i$ ,查找邻近的候选多边形  $P_j$  和公共边  $B_{ij}$ 。

2) 多边形排列方向分析。令  $Angle_{ij}$  表示多边形  $P_i$  和  $P_j$  主方向的锐角夹角,  $Angle_{iB}$  表示公共边  $B_{ij}$  与多边形  $P_i$  主方向的锐角夹角。通过计算两个角  $Angle_{ij}$  和  $Angle_{iB}$  判断两个多边形  $P_i$  和  $P_j$  的排列关系。多边形的排列关系分 3 种类型,分别为横向连接、纵向连接、转向连接。对每种排列关系,分别计算  $P_i$  和  $P_j$  合并后的长度和宽度。如图 4 所示,定义公共边  $B_{ij}$  的长度为  $L_{boundary}$ ,多边形  $P_i$  和  $P_j$  的长度和宽度分别为  $L_i, W_i$  和  $L_j, W_j$ 。其中长度定义为通过 Delaunay 三角形提取的中轴线,宽度为多边形的面积与长度的比值。判别和更新规则如下:

横向连接:如果夹角  $Angle_{ij}$  和  $Angle_{iB}$  都小于  $45^\circ$ ,如图 4(a),则两个多边形为横向连接。更新的多边形长度计算如下:

$$L_{new} = L_i + L_j - L_{boundary} \quad (6)$$

纵向连接:如果只有  $Angle_{ij}$  小于  $45^\circ$ ,如图 4(b),则两个多边形为纵向连接。更新的多边形长度计算如下:

$$L_{new} = L_i + L_j \quad (7)$$

转向连接:如果  $Angle_{ij}$  大于  $45^\circ$ ,则两个多边形为转向连接。此时如果  $Angle_{iB}$  小于  $45^\circ$ ,如图 4(c),则更新的多边形长度计算如下:

$$L_{new} = L_i + W_i + L_j - L_{boundary} \quad (8)$$

如果  $Angle_{iB}$  大于  $45^\circ$ ,如图 4(d),则更新的多边形长度计算如下:

$$L_{new} = L_i + W_j + L_j - L_{boundary} \quad (9)$$

对于上述所有情况,更新的多边形宽度为:

$$W_{new} = (area_i + area_j) / L_{new} \quad (10)$$

3) 道路长度和宽度更新。道路宽度阈值设置为 30 m,如果更新后的道路宽度  $W_{new}$  小于阈

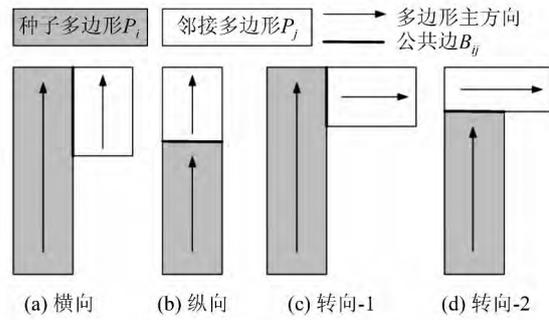


图 4 多边形排列方式

Fig. 4 Arrangement of Polygons

值,则将多边形  $P_i$  和  $P_j$  连接成新的主干道多边形并加入需要遍历的种子多边形;否则,选取多边形  $P_i$  的下一个邻接多边形进行判断。

4) 连接算法继续遍历后续的种子多边形,直至结束。

由于主干道多互相连通,最后通过多边形之间的连通性进行聚类,删除不与其他主干道路连接的小面积多边形,剩下的即为最终的主干道提取结果。

## 3 实验结果与分析

使用德国慕尼黑、法兰克福和斯图加特的开放街道地图 (OSM) 数据进行实验。由于缺少数据质量控制,许多道路被数字化多次,导致基于线要素的主干道提取方法复杂和低效。本文采用基于多边形形态分析的方法提取主干道。由于使用了 SVM,不需要对道路网多边形的每个形态指标设定阈值选取策略。主干道提取结果如图 5 所示,其中深色部分是最终提取的主干道多边形,浅色表示的是通过面积阈值滤除的多边形。使用本文方法提取出的主干道与依据目视判别人工选取的平行车道进行比较,发现本文方法对于 3 个城市提取主干道的正确率分别达到了 93.79%、89.44% 和 91.14%。

图 6 所示的是本文方法提取的主干道与官方发布的路网建设等级属性数据进行比较分析的结果。可以看出,本文方法提取的主干道与道路网中的一级道路基本一致,能够反映道路网中的主干道信息。但是也有部分二三级道路被识别为主干道,因为这些道路在 OSM 数据中同样被数字化为平行车道的形式,这也反映了道路网的几何结构与属性信息的差异性。

实验表明,本文方法能够计算出主干道路所具有的形态特征,并区分道路网中的主干道多边

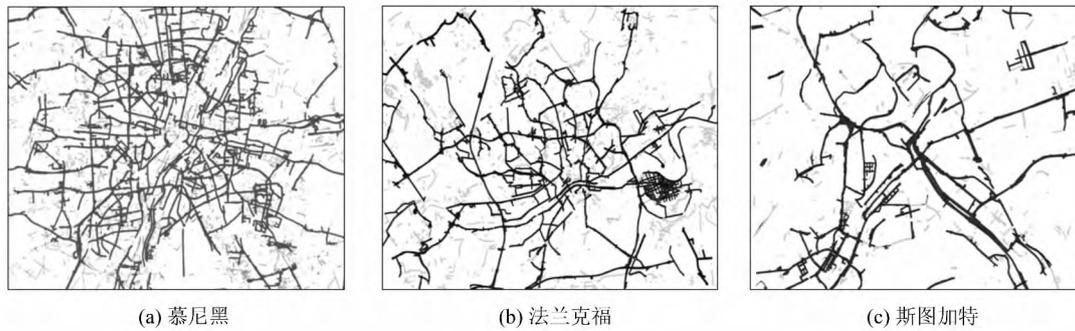


图5 主干道提取结果

Fig. 5 Arterial-road Extraction Result

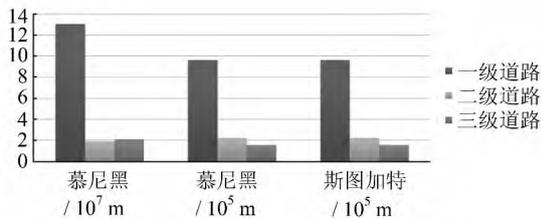


图6 本文方法与路网建设等级比较统计结果

Fig. 6 Statistical Result of Comparison Between Our Method and Constructed Road Levels

形,较好地反映道路现有的建设等级,且具有较好的正确率。但是由于数据的复杂性,一些具有长条形状但是不属于主干道的多边形有可能被错误提取。如何利用语义信息对错误的识别结果进行区别是后续的研究方向之一。另外,将实时交通流信息与道路网主干道一起对道路网进行综合的时空分析是后续研究工作的重点。

### 参 考 文 献

- [1] Yang Bisheng, Sun Li. Adaptive Multi-scale Visualizations of Road Network for Navigation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(4): 363-366(杨必胜, 孙丽. 导航电子地图的自适应多尺度表达[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(4): 37-41)
- [2] Li Deren, Li Qiguan, Yang Bisheng, et al. Techniques of GIS, GPS and RS for the Development of Intelligent Transportation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(4): 331-336(李德仁, 李清泉, 杨必胜, 等. 3S技术与智能交通[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(4): 37-41)
- [3] Li Qingquan, Zeng Zhe, Yang Bisheng, et al. Betweenness Centrality Analysis for Urban Road Networks[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(1): 37-41(李清泉, 曾喆, 杨必胜, 等. 城市道路网络的中介中心性分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(1): 37-41)
- [4] Luan Xuechen, Yang Bisheng, Zhang Yunfei. Structural Hierarchy Analysis of Streets Based on Complex Network Theory[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(6): 729-732(栾学晨, 杨必胜, 张云菲. 城市道路复杂网络结构化等级分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(6): 729-732)
- [5] Porta S, Crucitti P, Latora V. The Network Analysis of Urban Streets: a Dual Approach[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2006, 369(2): 853-866
- [6] Jiang B, Claramunt C. A Structural Approach to the Model Generalization of an Urban Street Network[J]. *GeoInformatica*, 2002, 8(2): 157-171
- [7] Tomko M, Winter S, Claramunt C. Experiential Hierarchies of Streets[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2008, 32(1): 41-52
- [8] Deng Yajuan, Yang Yunfeng, Ma Rongguo. Highway Network Structure Characteristics Based on Complex Network Theory[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2010, 23(1): 98-104(邓亚娟, 杨云峰, 马荣国. 基于复杂网络理论的公路网络结构特征[J]. 中国公路学报, 2010, 23(1): 98-104)
- [9] Luan Xuechen, Yang Bisheng. Generating Strokes from City Road Networks[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2009, 25(1): 49-52(栾学晨, 杨必胜. 城市复杂道路网的 Stroke 生成方法[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(1): 49-52)
- [10] Yang B S, Luan X C, Li Q Q. Generating Hierarchical Strokes from Urban Street Networks Based on Spatial Pattern Recognition[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2011, 25(12): 2 025-2 050
- [11] Touya G. A Road Network Selection Process Based on Data Enrichment and Structure Detection[J].

- Transactions in GIS*, 2010, 14 (5): 595-614
- [12] Ai Tinghua, Guo Renzhong. A Constrained Delaunay Partitioning of Areal Objects to Support Map Generalization[J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 2000, 25 (1): 35-41(艾廷华, 郭仁忠. 支持地图综合的面状目标约束 Delaunay 三角网剖分[J]. *武汉测绘科技大学学报*, 2000, 25(1): 35-41)
- [13] Cortes C, Vapnik V. Support-vector Network[J]. *Machine Learning*, 1995, 20: 273-297
- [14] Chang C C, Lin C J. LIBSVM: A Library for Support Vector Machines [J]. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2011, 2(3): 1-27
- [15] Ellis W. A Source Book of Gestalt Psychology[M]. London: Routledge & Kegan Paul, 1938

## Arterial Roads Extraction in Urban Road Networks Based on Shape Analysis

LUAN Xuechen<sup>1,2,3</sup> FAN Hongchao<sup>4</sup> YANG Bisheng<sup>1,2</sup> LI Qiuping<sup>5</sup>

- 1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China
- 2 Engineering Research Center for Spatio-temporal Data Smart Acquisition and Application, Wuhan University, Wuhan 430079, China
- 3 Guangdong Ruitu Information Systems Co, Ltd., Foshan 528305, China
- 4 College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China
- 5 School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

**Abstract:** This paper presents a shape-based approach to extract arterial roads from urban road networks is appropriate to the high level-of-detail found in volunteered geographic information (VGI) datasets. Firstly, the method calculates several shape descriptors of each polygon surrounded by roads. Secondly, some candidate arterial-road polygons are classified as seeds from all polygons with shape descriptors using support vector machine (SVM). Finally, based on seed polygons, a regional growing method is proposed to connect the arterial-road features according to the Gestalt concept. An experiment shows that this method achieves good and effective arterial road extraction results, reflecting the constructed skeleton in urban network. Furthermore, a comparison analysis of high-level roads attributes was also carried out to confirm the consistency between constructed road levels and our detected arterial roads.

**Key words:** GIS-T; arterial roads; road networks; Gestalt; road hierarchies

**First author:** LUAN Xuechen, PhD candidate, specializes in data analysis, modeling and LoD representation in urban road networks. E-mail: xuechen.luan@whu.edu.cn

**Corresponding author:** FAN Hongchao, PhD. E-mail: hongchao@tongji.edu.cn

**Foundation support:** The National 863 Program of China, Nos. 2012AA12A211, 2012AA12A204; the National Natural Science Foundation of China, No. 41101443; the Fundamental Research Funds for the Central Universities, Nos. 3103005, 201161902020015; the Guangdong Special Fund for Strategic Emerging Industrial Development (High-end New Electronic Information) Project, No. 2011168036; the Scholarship Award for Excellent Doctoral Student Granted by Ministry of Education, No. 5052011619019; Wuhan University PhD Student Short-term Abroad Research Projects.