



结合轨迹数据的混合多特征道路网选取方法

马京振¹ 孙群¹ 温伯威¹ 周熠¹ 陆川伟¹ 吕峥¹ 孙士杰¹

1 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450001

摘要:道路网选取是制图综合的重要内容,针对现有方法仅考虑道路网静态特征等问题,提出了一种结合轨迹数据的混合多特征选取方法。首先以 stroke 为基本选取单元,构建对偶图来描述路网的结构关系,采用长度、连通度、接近度和中介度等指标对道路的静态特征进行评价;然后结合轨迹数据特点,采用车流量、车辆速度和道路交叉口附近的车辆密度等指标对道路的动态特征进行评价;最后利用基于相互关系准则的标准重要性方法计算得到各指标的权值及各道路的综合重要性值。同时引入线 Voronoi 图对道路进行划分,得到道路的密度特征值,并将其作为道路网选取的约束指标。实验结果表明,所提方法能够保持道路的整体结构,同时顾及道路的连通性和密度分布,而且结合了轨迹数据的动态交通特性,选取结果符合实际情况,具有一定的实用性。

关键词:道路网;选取;轨迹数据;Voronoi 图;stroke

中图分类号:P208 **文献标志码:**A

道路网作为一种重要的基础地理信息数据,与国家的政治、经济、军事以及人们的日常生活息息相关^[1]。道路网选取是制图综合的重要内容,对空间数据多尺度表达具有重要意义,一直是研究的热点和难点^[2-4]。现实世界中道路网等级繁多、关系复杂,道路选取的难点主要在于保持路网的整体结构、局部结构、空间形态和分布密度等^[5-6]。目前,道路网选取方法主要包括基于语义等级的方法^[7]、基于图论的方法^[8-9]、基于 stroke 的方法^[10]、基于道路密度的方法^[11-12]以及其他混合方法^[13-16]等。文献[10]引入视觉感知中的良好延续性原则,首次提出 stroke 的概念,将路段构成的 stroke 作为单元并依据长度指标进行选取;在此基础上,文献[2,17-18]结合图论的方法进行完善,利用连通度、接近度和中介度等指标来度量道路的重要性,进而完成道路网的选取;文献[11-12]利用网眼面积和 Voronoi 图对道路密度进行计算,能够有效保持道路网的空间分布特征;文献[14-16]结合道路网的线、面特征进行选取,可以顾及路网的几何特征和连通性。

总体而言,现有的选取方法能够在一定程度上保持道路网的整体结构、细节特征和分布密

度,但仅仅考虑了道路网固有的静态属性,不能反映其动态交通属性。在城市环境中,道路网络作为一种交通功能的媒介,与人类的活动密切相关。当前,随着通信技术的发展以及定位导航设备的普及,大量的车辆轨迹数据被生产,其中蕴含着丰富的道路信息,因此轨迹数据能够实时反馈道路网中的交通流信息,体现人们对道路的选择,进而反映道路的重要性^[19]。但目前针对轨迹数据的研究大多集中在道路信息提取与数据更新方面,将其应用于道路网选取的研究较少。

本文在传统基于 stroke 道路选取方法的基础上提出了一种结合轨迹数据的混合多特征道路网选取方法,通过计算道路的静态和动态属性特征进行重要性评价,并利用 Voronoi 图空间密度进行约束,进而得到最终的选取结果。该方法能够有效顾及道路的几何和拓扑特征,也能够保持道路网的空间分布密度和连通性,选取结果符合实际情况,具有一定的实用性。

1 道路网重要性评价方法

1.1 基于 stroke 的道路网静态特征评价

道路 stroke 是指一条自然延伸的不被割断的

收稿日期:2020-12-30

项目资助:国家自然科学基金(41771487,41901397,42101454);河南省创新型科技人才队伍建设工程(202101510001)。

第一作者:马京振,博士,讲师,主要从事多源数据融合与处理研究。zb50mjz@163.com

通讯作者:孙群,博士,教授。sunqun@371.net

道路,以其为单元进行选取能够保持路网的整体结构和连通性,具有一定的优势。本文采用方向和语义一致性作为判断标准将路段连接成

stroke,采用对偶拓扑法对道路网结构进行描述,将每条道路 stroke 抽象为一个结点,道路之间的连接关系作为边,构建道路网的对偶图(图1)。

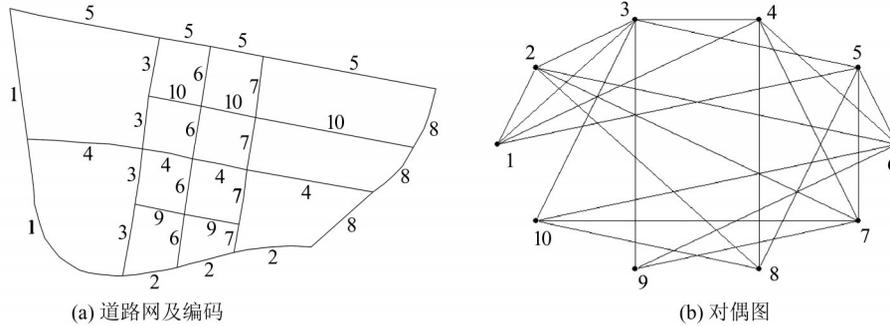


图1 构建道路网对偶图

Fig.1 Construction of Road Network Dual Graph

道路的重要性主要体现于其在路网中的功能,在对偶图的基础上,能深入地分析路网结构及其对路网功能的影响,进而对 stroke 重要性进行评价。本文采用长度、连通度、接近度和中介度等指标对道路网进行计算,假设道路网 $R = G(V, E)$,其中 V 是 stroke 抽象的结点集合, $V = \{v_1, v_2 \dots v_n\}$, E 是边的集合, $E = \{v_i v_j | v_i, v_j \in V\}$, 对偶图可通过邻接矩阵表示。

1) 长度:组成该条 stroke 的各个路段长度之和。通常来说,道路长度越长,其所跨越的空间范围越大,发挥的作用越大。令每条 stroke 的长度为 $L(v_i)$,则 $L = \{L(v_1), L(v_2) \dots L(v_n)\}$ 即为道路 stroke 长度的集合。

2) 连通度:道路网中与 stroke 结点 v_i 直接相连的结点数量,描述了某条道路 stroke 与周围道路的连通能力。连通度 $D(v_i)$ 的计算公式为:

$$D(v_i) = \sum_{j=1}^n \delta_{ij} \quad (1)$$

式中, δ_{ij} 表示 v_i 与 v_j 是否直接相连,如果相连,则 $\delta_{ij} = 1$, 否则为 0。连通度值越大,表明该条 stroke 连接的街道越多,连通性越强,在整个道路网中所起的重要度越高。

3) 接近度:stroke 结点 v_i 到其他结点最短路径之和的倒数,描述了与其非直接相连 stroke 的接近程度。接近度 $C(v_i)$ 的计算公式为:

$$C(v_i) = \frac{n-1}{\sum_{j=1}^n d(v_i, v_j)} \quad (2)$$

式中, $d(v_i, v_j)$ 表示结点 v_i 与 v_j 的最短距离。接近度值越大,表明该条 stroke 的影响及服务范围越广,道路重要程度越高。

4) 中介度:stroke 结点 v_i 位于道路网中其他

任意两个结点之间最短路径的概率,用来描述某条 stroke 在整个路网中的桥梁和枢纽特性。中介度 $B(v_i)$ 的计算公式为:

$$B(v_i) = \frac{1}{(n-1)(n-2)} \times \sum_{j,k \in \{1,2 \dots n\}} \frac{\epsilon_{jk}(v_i)}{\epsilon_{jk}} \quad (j \neq k; j, k \neq i) \quad (3)$$

式中, ϵ_{jk} 表示结点 v_j 和 v_k 之间最短路径的数量; $\epsilon_{jk}(v_i)$ 表示 v_j 和 v_k 的最短路径中经过结点 v_i 的数量。中介度值越大,表明经过 stroke 结点 v_i 的最短路径数量越多,该条道路的枢纽和控制作用越强,道路越重要。

1.2 结合轨迹数据的道路网动态特征评价

传统基于 stroke 的选取方法利用道路的网络结构特征对其重要性进行评价,仅仅考虑了道路的静态几何特征,不能保证交通的实时性,无法满足多样化、多层次的应用需求。为了弥补这一不足,本文充分结合道路上行驶的车辆轨迹数据,将交通信息作为道路的动态属性特征,并以此来计算道路的重要性。

车辆轨迹数据是车辆行驶路径的完整记录,蕴含了海量、精确、实时的道路几何、拓扑和属性信息,能够客观地反映车辆在一定时间内通过道路时的动态信息,隐含了司机出行时的道路选择,因此轨迹数据可作为道路重要性判断的评价指标。图2为道路及轨迹数据情况,本文采用车流量、车辆速度和道路交叉口附近的车辆密度作为评价指标,对道路的动态特征进行评价。

1) 车流量:某一时段内通过该条道路的车辆数。一般来说,在一定的时间内道路上行驶的车辆越多,道路的重要性就越高。以 stroke 为单元,以 r 为半径进行线缓冲区分析,缓冲区内的轨迹

点数量即为该条道路的车流量,记为 $T = \{T(v_1), T(v_2) \cdots T(v_n)\}$ 。



图 2 轨迹数据分布情况

Fig.2 Distribution of Trajectory Data

2) 车辆速度:某一时段内该条道路上车辆的平均速度,是衡量道路畅通程度的重要指标。通常来说,司机会优先选择车速高的道路行驶,平均车速高说明道路的畅通程度好,能够在一定程度上反映道路的重要性,如高速公路上的平均车速很高,而且道路的重要程度也高。以 stroke 为单元,分别统计缓冲区内各轨迹点的车速,取其平均值作为该道路的平均速度,记为 $S = \{S(v_1), S(v_2) \cdots S(v_n)\}$ 。

3) 道路交叉口的车辆密度。道路交叉口是道路的重要组成部分,通常情况下,在交叉口遇到红灯车辆一般不会熄火,因此可以从车辆轨迹数据中筛选出交叉口附近停车车辆的信息,交叉口等待红灯和绿灯的车辆越多,表明该交叉口的重要性越高,则该条道路的重要性越高。图 2 为车辆轨迹数据分布情况,可以看出,不同的交叉路口处车辆密度具有一定的差异性。首先从道路数据中提取交叉点,以 r 为半径进行点缓冲区分析,将缓冲区内的轨迹点数量作为该交叉口的车辆密度,统计 stroke 所包含的各交叉口车辆密度的均值,记为 $J = \{J(v_1), J(v_2) \cdots J(v_n)\}$ 。

1.3 采用 CRITIC 方法确定重要性权值

上述指标能够分别从静态和动态特征方面对道路的某种指标进行度量评价,由于各评价指标的性质不同,具有不同的量纲和数量级,需要首先进行归一化处理,本文采用 min-max 标准化处理方法,计算公式为:

$$x_i^* = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4)$$

式中, x_i^* 是归一化之后的指标值; x_i 为各评价指标(如长度、车流量等)的原值; x_{\max} 、 x_{\min} 分别代表

x_i 的最大值、最小值。

在标准化处理的基础上,分别建立各分析指标与道路重要性的关联模型,全面评价道路的重要性特征,计算公式为:

$$I = \sum_{i=1}^t w_i x_i \quad (5)$$

式中, I 表示道路的综合重要性特征值;对静态重要性特征, $t=4$, x_i 分别表示标准化的长度、连通度、接近度和中介度值;对动态重要性特征, $t=3$, x_i 分别表示标准化的车流量、车辆速度和道路交叉口的车辆密度值; x_i 的取值范围均为 $[0, 1]$ 。

对于 w_i 权重值,本文采用基于相互关系准则的标准重要性方法(criteria importance through intercriteria correlation, CRITIC)进行确定^[20],该方法不仅考虑评价指标本身的内部差异,而且顾及各指标之间的相关性。设 Q_i 为第 i 个指标的信息量,计算公式为:

$$Q_i = \sigma_i \times \sum_{j=1}^t (1 - r_{ij}) \quad (6)$$

式中, σ_i 为各评价指标的标准差; r_{ij} 表示指标 i 和 j 的线性相关系数。 Q_i 值越大,该指标所包含的信息量越大,则其相对越重要。因此,第 i 个指标的权值 w_i 计算公式为:

$$w_i = \frac{Q_i}{\sum_{k=1}^t Q_k} \quad (7)$$

利用上述方法计算各 w_i 值,分别得到道路的静态和动态特征重要性值,对两者加权平均,可得到最终的综合特征重要性值。

2 顾及密度约束的道路网选取

2.1 基于线 Voronoi 图的道路密度计算

密度也是道路网的重要结构特征之一,在地图上,道路密度通常是存在差异的,因此在道路选取的过程中要充分考虑到道路网的密度特征,以保持路网的整体结构不被破坏。传统基于 stroke 的道路选取方法虽然考虑了路网的几何和拓扑结构,但往往忽略了整体的密度约束,破坏了路网的整体空间结构,导致道路选取结果不合理。为了保持正确的空间结构,必须通过划分路网来计算道路密度,针对现有方法的不足,本文引入线 Voronoi 图来描述道路的密度特征。

Voronoi 图是一种关于空间剖分的基础几何结构,是地理信息科学领域空间建模与分析的有力工具,本文采用栅格距离变换生成算法构建道

路网 Voronoi 图^[21]。图 3 为利用线 Voronoi 图划分的道路结构图,可以看出,每个 Voronoi 多边形都可以看作是对应路段所拥有的空间,可以充分表达道路的密度特征并保持区域间密度差的整体格局。

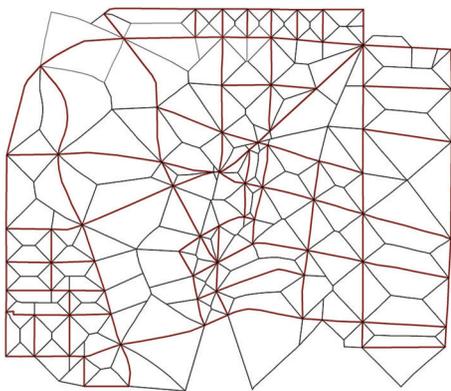


图3 道路网 Voronoi 图

Fig.3 Voronoi Diagram of Road Network

在道路网 Voronoi 图的基础上,定义道路密度为路段长度与对应路段所占 Voronoi 多边形面积的比值。由于以 stroke 为选取单元,则道路的密度为 stroke 的长度与其对应的 Voronoi 图总面积的比值,计算公式为:

$$F = \frac{L}{A} \quad (8)$$

式中, F 为第 i 条 stroke 的密度; L 、 A 为对应 stroke 的长度和 Voronoi 图多边形总面积。

对于一定比例尺的地图,利用基于道路密度的方法选取时,必须有一个道路密度阈值,即为最大允许密度值,在此阈值以上的道路不能被选择。根据文献[22]提出的最小可视单元的概念,道路密度阈值 E_T 的计算公式为:

$$E_T = \frac{4}{S_i L_m (1 - S_s / S_i)} \quad (9)$$

式中, S_s 、 S_i 分别表示源地图和目标地图的比例尺因子; L_m 为图上视觉可分辨的最小距离,根据文献[14],可取 0.5 mm。

2.2 道路网连通性保持方法

传统基于 stroke 的道路选取方法容易出现孤立道路和悬挂道路的情况^[17],为了保持道路网的拓扑连通性,本文通过增加最小节点数的方法来连通路网。设第 i 条 stroke 为 k_i ,与其起始端相连的其他道路条数为 $\varphi_1(k_i)$,与其终端相连的其他道路条数为 $\varphi_2(k_i)$,将所选道路分为 3 类:

1) I 类道路: $\varphi_1(k_i)=0$ 且 $\varphi_2(k_i)=0$,该类道路为孤立道路,不与其他任何道路相连;

2) II 类道路: $\varphi_1(k_i)>1$ 且 $\varphi_2(k_i)=0$; 或 $\varphi_1(k_i)=0$ 且 $\varphi_2(k_i)>1$,该类道路为悬挂道路,有一端不与道路网相连;

3) III 类道路: $\varphi_1(k_i)>1$ 且 $\varphi_2(k_i)>1$,该类道路能保持路网的拓扑连通。

对 3 类道路的处理方法如下:

1) 针对第 I 类道路,基于对偶图寻找与 k_i 最近的道路 k_j ,将两者之间最短路径上的道路节点添加到道路网中;

2) 针对第 II 类道路,由于此类道路在原始道路中也可能存在,因此将该类道路与原始道路作对比,如果两者一致则不作处理,否则根据原始数据将 k_i 重新连接道路网,寻找最短连接路径并将道路节点添加到道路网中;

3) 针对第 III 类道路,不作处理即可。

2.3 道路网选取流程

本文提出的道路网选取方法流程如下:

1) 对道路网数据和轨迹数据进行预处理,并利用方向和语义一致性原则将路段连接成 stroke。

2) 分别计算道路网静态和动态特征的指标值,利用 CRITIC 方法确定各权值,计算得到综合特征重要性值,并进行排序。

3) 利用线 Voronoi 图对道路网进行划分,计算道路 stroke 的密度值并确定阈值大小,同时利用开方根法则计算所需要选取的道路长度 L_T 。

4) 以 stroke 为选取单元,基于重要性值和密度值约束对道路网进行选取。根据 stroke 重要性值从高到低依次进行选取,如果该 stroke 的密度值低于 E_T ,则选取该条 stroke,反之则舍弃,继续进行下一条 stroke 选取。如果所选 stroke 的总长度小于 L_T ,则根据重要性值对剩下的道路依次进行选取,直到满足选取条件为止。

5) 对道路网的连通性进行检查,按照 §2.2 方法使选取的道路网保持拓扑连通。

3 道路网选取实验与分析

选取中国河南省郑州市 1:5 万道路数据进行实验,共包含 1 528 条路段,经 stroke 连接,共得到 226 条道路 stroke,如图 4(a)所示。以 stroke 为单位,构建道路网对偶图,共得到 226 个结点,883 条边,如图 4(b)所示。车辆轨迹数据为郑州市 2016-11-15T14:00—15:00 的出租车轨迹,包括车辆 ID、车辆位置、时间、速度等信息,数量约 100 万个点(见图 4(c))。

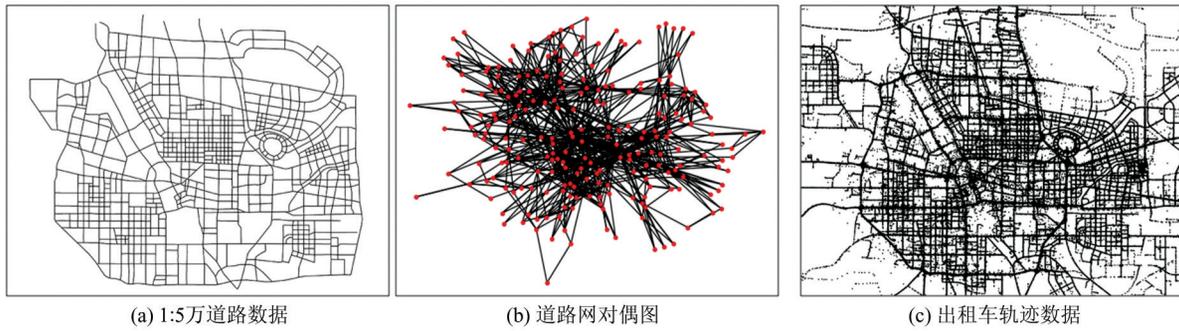


图 4 郑州市道路网与轨迹数据

Fig.4 Road Network and Trajectory Data in Zhengzhou

结合道路网和出租车轨迹数据,首先按§1方法对道路的静态和动态特征指标值分别进行统计,其中缓冲区阈值 r 设置为 100 m,然后利用 CRITIC 方法计算各特征重要性权值和道路的重要性值,结果见表 1、表 2。

表 2 中, I_1 表示仅利用道路静态特征计算得到的重要性值, I_2 表示结合轨迹数据动态特征计算得到的综合重要性值。由表 2 可知,结合轨迹数据的动态特征对道路重要性影响较大,主要体现在车流量上,更加符合人的空间认知。 I_1 与 I_2 的相关系数为 0.952,说明道路的静态特征与动

态特征整体上相吻合,但个别道路存在差异。

表 1 特征重要性权值

Tab.1 Weight of Properties Importance

特征	属性	权值
静态特征	长度	0.302
	连通度	0.273
	接近度	0.160
	中介度	0.265
动态特征	车流量	0.398
	车辆速度	0.238
	交叉口的车辆密度	0.364

表 2 道路重要性值

Tab.2 Importance of Road Network

道路 ID	长度 /km	连通度	接近度	中介度	车流量/ (辆·h ⁻¹)	车辆速度/ (km·h ⁻¹)	交叉口密度	I_1	I_2
1	1.92	4	0.350	0.000 8	569	36.55	119.00	0.142	0.165
2	4.11	10	0.383	0.008 3	4 851	29.01	278.00	0.208	0.218
3	9.22	17	0.403	0.021 3	14 797	21.49	558.35	0.303	0.314
4	2.29	5	0.358	0.002 6	1 089	19.74	97.00	0.154	0.141
5	6.27	14	0.391	0.017 8	6 240	24.12	307.14	0.259	0.246
6	0.92	3	0.328	0.000 0	1 203	21.55	303.00	0.122	0.148
7	3.39	11	0.398	0.005 0	4 076	24.68	315.64	0.209	0.213
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
226	0.25	2	0.246	0.000 0	912	24.19	435.50	0.087	0.145

图 5 为道路选取实例,其中 ID 为 187、194、195 的 3 条道路,其静态特征重要性值基本一致,分别为 0.156、0.161、0.161,但是加入轨迹数据后,综合特征重要性值分别为 0.149、0.229、0.234,差别较大。分析发现 187 道路附近有两条主干道路可代替其作用,而 194、195 在局部范围内连通作用较强,因此重要程度更高。同样,尽管道路 ID 为 45 的静态特征重要性值 0.139 高于 159 道路的 0.130,但综合特征重要性值分别为 0.149、0.209,分析发现局部范围内 159 道路的连通作用更强,计算结果符合实际情况。

以 1:5 万缩编 1:10 万的道路选取为例,利用式(9)计算得到密度阈值 E_T 为 1.6 km/km²,本文方法与传统 stroke 选取方法的结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出,本文方法的选取结果能够保持道路的整体结构和局部关键结构,同时顾及道路的连通性和密度分布,而且结合了轨迹数据的动态交通特征,更加符合道路的实际通行情况,而传统的 stroke 选取结果中道路密度分布不均,产生的悬挂道路较多,道路的连通性不好。经统计,本文方法和传统 stroke 选取方法得到的道路网总连通度分别为 378 和 357,悬挂道路数量分别

为6条和23条,说明本文选取的道路stroke连通性更好,产生的悬挂道路更少,道路之间关联更紧密。

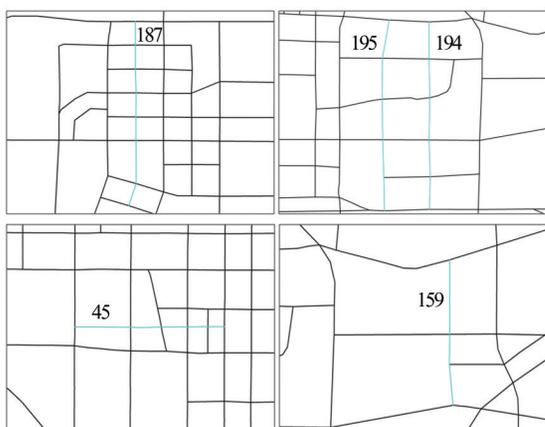
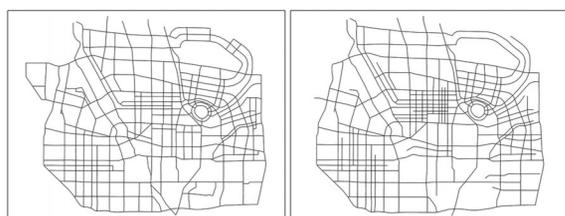


图5 道路实际位置

Fig.5 Actual Location of Road

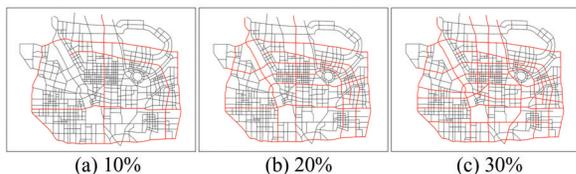


(a) 本文方法 (b) 传统stroke选取方法

图6 道路网选取结果对比

Fig.6 Comparison of Road Network Selection Results

在不同选取比例下进行道路选取实验,比例分别为10%、20%、30%时的道路选取结果如图7所示。从图7中可以看出:(1)本文以stroke为选取单位,能够保持道路网的整体连通性;(2)当选取比例较小时,选取的主要是骨架道路,能反映道路网的整体分布结构,如图7(a)中所选的4条stroke分别为三环路、陇海路、东风路和紫荆山路,均是郑州市的骨架道路;(3)结合图6(a)可知,当增大选取比例时,增选的道路比较合理,能够体现道路网的层次性,并保持道路密度分布特征。



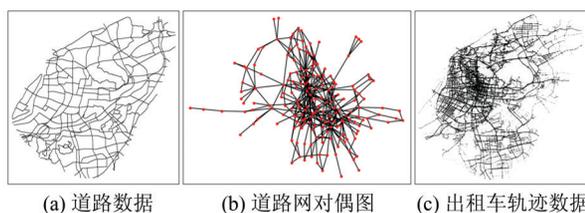
(a) 10% (b) 20% (c) 30%

图7 郑州市不同比例的道路网选取结果

Fig.7 Road Network Selection Results of Different Proportions in Zhengzhou

另外,选取中国江苏省南京市数据进行实验,其中道路数据包含639条路段,共生成186条

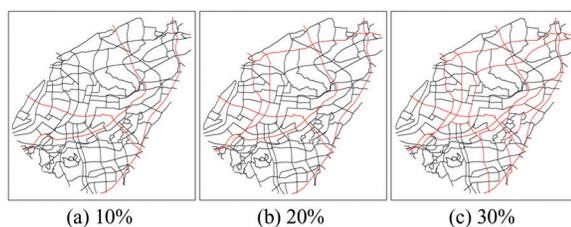
stroke,构建对偶图后共得到398条边,轨迹数据为2015-09-02的出租车轨迹,共约158.8万个点,数据情况如图8所示。按照10%、20%、30%的比例分别进行道路网选取,结果如图9所示,可以看出,本文的选取结果能够保持道路的连通性和密度分布特征,而且结合了动态交通信息,与车辆轨迹信息相吻合,选取结果符合实际情况。



(a) 道路数据 (b) 道路网对偶图 (c) 出租车轨迹数据

图8 南京市道路网

Fig.8 Road Network of Nanjing



(a) 10% (b) 20% (c) 30%

图9 南京市不同比例的道路网选取结果

Fig.9 Road Network Selection Results of Different Proportions in Nanjing

4 结 语

本文提出了一种结合轨迹数据的混合多特征道路网选取方法,该方法以stroke为基本选取单元,结合道路数据和轨迹数据的混合特征,计算得到综合特征重要性值,同时引入线Voronoi图,得到道路的密度特征并作为约束应用到道路网选取中。实验结果表明,本文的选取方法能够保持道路的整体结构,同时顾及道路的连通性和密度分布,而且结合了轨迹数据的交通特性。相较于传统的道路选取方法,选取结果更加合理,更加符合人类的空间认知。在下一步工作中,需深入研究基于区域特征的自适应阈值计算方法,同时结合其他多源数据(如行人数据、兴趣点数据等)并应用到道路网选取中。

参 考 文 献

- [1] Wang Peng. Road Network Matching Based on Stable Hierarchical Spatial Morphology [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2017 (王鹏. 基于稳定层次空间形态的道路网匹配[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2017)

- [2] Cao Weiwei, Zhang Hong, He Jing, et al. Road Selection Considering Structural and Geometric Properties[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(4): 520-524 (曹伟威, 张红, 何晶, 等. 顾及结构和几何特征的道路自动选取方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(4): 520-524)
- [3] Šuba R, Meijers M, Oosterom P. Continuous Road Network Generalization Throughout All Scales[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2016, 5(8): 145-165
- [4] Zhou Luyao, Liu Yanfang, Liu Yaolin, et al. Analysis of the Spatial Relationships Between Road Network and Economic Activities from the Polycentric Perspective in Wuhan [J]. *Journal of Geomatics*, 2020, 45(2): 8-14 (周璐瑶, 刘艳芳, 刘耀林, 等. 多中心视角下的武汉市路网与经济活动空间关系分析[J]. 测绘地理信息, 2020, 45(2): 8-14)
- [5] Ma Chao, Sun Qun, Chen Huanxin, et al. Application of Weighted PageRank Algorithm in Road Network Auto-Selection [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(8): 1159-1165 (马超, 孙群, 陈焕新, 等. 加权网页排序算法在道路网自动选取中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(8): 1159-1165)
- [6] Cheng Feng, Xiang Longgang, Shao Xiaotian. Trajectory - Network Dynamic Topological Process Model and Its Application in Traffic Information Analysis[J]. *Journal of Geomatics*, 2019, 44(5): 39-43 (成烽, 向隆刚, 邵晓天. 轨迹-路网动态拓扑过程模型及其交通信息查询分析[J]. 测绘地理信息, 2019, 44(5): 39-43)
- [7] Jiang B, Claramunt C. A Structural Approach to the Model Generalization of an Urban Street Network [J]. *GeoInformatica*, 2004, 8(2): 157-171
- [8] Mackaness W A, Beard K M. Use of Graph Theory to Support Map Generalization [J]. *Cartography and Geographic Information Systems*, 1993, 20(4): 210-221
- [9] Chen Bo, Wu Fang, Qian Haizhong. Study on Road Network' Auto-selection Algorithms[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(12): 2388-2393 (陈波, 武芳, 钱海忠. 道路网自动选取方法研究[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(12): 2388-2393)
- [10] Thomson R C, Richardson D E. The Good Continuation Principle of Perceptual Organization Applied to the Generalization of Road Networks[C]//The 19th International Cartographic Conference, Ottawa, Canada, 1999
- [11] Chen J, Hu Y G, Li Z L, et al. Selective Omission of Road Features Based on Mesh Density for Automatic Map Generalization[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2009, 23(8): 1013-1032
- [12] Liu X J, Zhan F B, Ai T H. Road Selection Based on Voronoi Diagrams and "Strokes" in Map Generalization[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2010, 12(S): 194-202
- [13] Hu Bo, Yue Yang, Li Qingquan. With the Analysis of Structural Form of Network Evaluation Index Based on Complex Network[J]. *Journal of Geomatics*, 2013, 38(3): 5-8 (胡波, 乐阳, 李清泉. 基于复杂网络指标的路网结构形态评价与分析[J]. 测绘地理信息, 2013, 38(3): 5-8)
- [14] Li Z L, Zhou Q. Integration of Linear and Areal Hierarchies for Continuous Multi-scale Representation of Road Networks[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2012, 26(5): 855-880
- [15] Benz S A, Weibel R. Road Network Selection for Medium Scales Using an Extended Stroke-Mesh Combination Algorithm[J]. *Cartography and Geographic Information Science*, 2014, 41(4): 323-339
- [16] Zhang J C, Wang Y H, Zhao W J. An Improved Hybrid Method for Enhanced Road Feature Selection in Map Generalization[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2017, 6(7): 196-217
- [17] Weiss R, Weibel R. Road Network Selection for Small-Scale Maps Using an Improved Centrality-Based Algorithm[J]. *Journal of Spatial Information Science*, 2014(9): 71-99
- [18] Tian Jing, Luo Yun, Lin Liupeng, et al. A Comparative Study of Two Strategies of Road Network Selection[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(2): 310-316 (田晶, 罗云, 林缪鹏, 等. 两种道路选取策略的比较研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(2): 310-316)
- [19] Li Wenjing, Yang Chenxi, Lin Zhiyong. A Rough Set Weight Model of Road Set Theory Attribute Based on Vehicle Trajectory Information[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, 44(4): 87-94 (李雯静, 杨晨曦, 林志勇. 车辆轨迹信息的道路属性粗糙集定权模型[J]. 测绘科学, 2019, 44(4): 87-94)
- [20] 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): 728-732 (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): 728-732)
- [21] Li Jiatian, Yang Qili, Luo Fuli, et al. A Decomposition and Combination Algorithm for Voronoi Diagrams of Polylines and Polygons[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(11): 1545-1550 (李佳田, 杨琪莉, 罗富丽, 等. 线/面 Voronoi 图的分解合并生成算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(11): 1545-1550)
- [22] Li Z L, Openshaw S. Algorithms for Automated Line Generalization Based on a Natural Principle of Objective Generalization [J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1992, 6(5): 373-389

A Hybrid Multi-feature Road Network Selection Method Based on Trajectory Data

MA Jingzhen¹ SUN Qun¹ WEN Bowei¹ ZHOU Zhao¹ LU Chuanwei¹
LÜ Zheng¹ SUN Shijie¹

¹ Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

Abstract: Objectives: Road network selection is an important part of cartographic generalization and the existing selection methods only consider the static characteristics of road network. A hybrid multi-feature selection method based on trajectory data is proposed to solve these problems. **Methods:** The proposed method takes stroke as the basic selection unit. Firstly, a dual graph is constructed to describe the structural relationship of the road network. The static characteristics of the road network are evaluated using such indicators as length, degree, betweenness and closeness. Secondly, based on the characteristics of the trajectory data, the dynamic characteristics of the road network are evaluated using such indicators as vehicle flow, vehicle speed and vehicle density near the road intersection. Finally, the weight of each indicator and the comprehensive importance value of each road are calculated by the method of criteria importance through intercriteria correlation. At the same time, the Voronoi diagram is introduced to divide the road network, and the density characteristics are obtained, which are taken as the constraint indicator of road network selection. **Results:** The experimental results show that this method can maintain the overall structure, taking into account the connectivity and density distribution, and can combine the traffic characteristics of the trajectory data. **Conclusions:** The selection results are in accordance with the actual situation and have certain practicality.

Key words: road network; selection; trajectory data; Voronoi diagram; stroke

First author: MA Jingzhen, PhD, lecturer, specializes in multi-source data fusion and processing. E-mail: zb50mjz@163.com

Corresponding author: SUN Qun, PhD, professor. E-mail: sunqun@371.net

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China(41771487, 41901397, 42101454); Innovation Scientists and Technicians Troop Construction Projects of Henan Province(202101510001).

引文格式: MA Jingzhen, SUN Qun, WEN Bowei, et al. A Hybrid Multi-feature Road Network Selection Method Based on Trajectory Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(7):1009-1016. DOI:10.13203/j.whugis20190480 (马京振, 孙群, 温伯威, 等. 结合轨迹数据的混合多特征道路网选取方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(7):1009-1016. DOI:10.13203/j.whugis20190480)