



引文格式:李杰文,康朝贵.一种基于时空棱柱的乘车行程可拼性判断模型[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(9):1702-1711.DOI:10.13203/j.whugis20210633

Citation:LI Jiewen,KANG Chaogui.A Ridesharing Model Based on Space-Time Prism for Shared Mobility[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2024,49(9):1702-1711.DOI:10.13203/j.whugis20210633

一种基于时空棱柱的乘车行程可拼性判断模型

李杰文¹ 康朝贵^{1,2}

1 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079

2 中国地质大学(武汉)国家地理信息系统工程技术研究中心,湖北 武汉,430078

摘要:拼车是城市共享出行的重要组成部分,量化分析行程间的可拼性程度对推广拼车服务和提高乘客的出行效率具有重要意义。现有研究大多依据车辆在多个上、下车点间是否满足特定时空约束条件下的先后到达顺序来判断可否拼车,缺少有效建模行程可拼性强度的手段,在应对大规模拼车请求时无法快速全面地发现所有潜在可拼机会。提出了一种基于时空棱柱的乘车行程可拼性判断模型,首先基于时间地理学中的时空棱柱建模方法和乘客共乘意愿的时空表达,构建行程的潜在时空可达范围表达模型;然后,基于行程时空棱柱间的拓扑关系判断行程的可拼性,量化行程的可拼性强度;最后,提出两种拼车匹配策略,模拟真实出行环境下的拼车匹配结果。实验结果表明,所提模型能够准确和有效地发现潜在可拼行程。对美国纽约市曼哈顿岛内行程可拼性能力的可视化分析结果呈现出明显的时空分布规律,能为车辆资源调度和乘客拼车出行规划提供一定的决策支持。

关键词:共享出行;时空棱柱;道路网络;可拼性判断模型;拼车匹配策略

中图分类号:P208

文献标识码:A

收稿日期:2021-11-18

DOI:10.13203/j.whugis20210633

文章编号:1671-8860(2024)09-1702-10

A Ridesharing Model Based on Space-Time Prism for Shared Mobility

LI Jiewen¹ KANG Chaogui^{1,2}

1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 National Engineering Research Center of Geographic Information System, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China

Abstract: **Objectives:** Ridesharing is an essential part of shared mobility for improving passengers' travel efficiency in cities. The existing studies usually determine shareable trips based on whether the arrival sequence of vehicles in more than one pick-up and drop-off points can meet the predefined spatiotemporal constraints. Such a simple approach cannot quickly and comprehensively find all the potential shareable trips under scenarios involving large-scale car-sharing requests. **Methods:** Based on the modeling method of space-time prism and the spatial-temporal expression of passengers' sharing willing, we first propose a potential spatiotemporal path area model of travel. Then, we apply the topological relation between the space-time prisms of trips for ridesharing identification, and quantify the strength of ridesharing of trips. Finally, two ridesharing matching strategies are proposed to simulate the ridesharing matching process in real-world transport environment. **Results:** The proposed ridesharing identification model can accurately delineate the potential space-time accessibility of vehicular travel, which makes it easier to discover all potential shareable trips and to realize the accurate and effective ridesharing identification. **Conclusions:** This study can be helpful for vehicle dispatching and passengers' travel planning in shared urban mobility system.

Key words: shared mobility; space-time prism; road network; ridesharing model; matching strategy

出租车及网约车服务是城市交通出行的主要方式之一,具有比公共交通更高的灵活性和便

基金项目:国家自然科学基金(41601484,41830645);国家重点研发计划(2017YFB0503600,2019YFE0106500)。

第一作者:李杰文,硕士,主要从事交通大数据分析 with 挖掘。13672791068@163.com

通讯作者:康朝贵,博士,教授。kangchaogui@cug.edu.cn

利性^[1]。然而,出行成本更高以及空间不平等是这类出行方式的主要劣势^[2]。一车一用这种司机与乘客一对一的匹配模式容易导致车辆满座率低,增加乘客出行对空车的需求量,加剧城市的交通压力^[3]。随着共享经济的快速发展,共享车辆、共享出行等新的出行方式不断涌现,使城市环境中的乘客出行效率有望得到提高^[4]。其中,拼车作为重要的共享出行方式,能够提供解决城市出行需求带来的供需失衡、交通拥堵以及交通出行成本过高等问题^[5]。这种司机与乘客一对多甚至多对多的匹配模式可以实现一车多用,并有效分摊乘客的出行费用^[6],进而对城市环境保护、资源节约产生有利影响^[7-8]。

拼车服务的实现需要考虑多方面的因素^[9],如发现行程间的可拼性,满足乘客行程的容忍时间限制、车辆容量限制等出行规划需求^[10];实现最大化拼车带来的收益、最小化车辆需求量、最小化行驶总距离、最小化运营成本等出行目标^[11-14];提出最优的路线规划和资源调度方案,完善共乘系统中的信用和价格体系,提高乘客出行隐私及安全权益的保护程度等。现有研究大多数都是通过判断行程之间上、下车点的先后到达顺序是否满足时间和距离的约束条件,判断行程间的可拼性,以此规划最优的车辆接送路线。一段行程不仅必须与其他所有行程都进行上述判断才能发现行程的可拼行程集,而且不够充分的约束条件会在判断中产生冗余,并缺乏足够的准确性,难以全面发现所有的潜在可拼行程。部分学者通过对人类行为模式进行建模,利用乘客出行潜在目的地的可替代性来扩展判断行程间拼车的潜在可行性^[15-19]。相对于固定目的地的拼车方式,这种利用活动地点的灵活性的方案可以提高拼车的机会,但会对乘客活动要求增加限制条件。因此,如何更有效地发现一段行程的潜在可拼行程集,对提高拼车的成功率具有重要的实际意义。

从方法上来说,行程的潜在可达性(potential accessibility, PA)^[20]可以用行程在参与拼车时可偏离原本路线的潜在时空范围来描述。在这段时空范围中,如果搭载该行程的车辆满足另一段行程的乘车请求,则表明行程间具有可拼性。在拼车服务中,对行程的潜在可达区域进行建模具有两方面的意义:一是利用行程的弹性时间能够准确地刻画行程活动区域的时空范围^[21]。时间地理学提出了时空棱柱(space-time prisms, STP)概念^[22],提供了量化人类潜在活动空间的重要工

具^[23]。一段行程在满足一定的时空容忍条件下(即在规定的时间内到达目的地)的最大活动范围便可通过STP的时空区域来描述^[24-25]。二是利用准确的时空范围能快速实现行程间的可拼性判断,提高拼车的可实现性。如利用行程的STP来识别潜在的拼车伙伴,为拼车服务提供潜在的会面地点^[26]。因此,选取合适的模型对行程的潜在可达性进行建模,并将行程的潜在可达范围用于行程间的可拼性判断是解决拼车问题的可行手段。

本文从行程的潜在可达区域建模出发,提出基于行程STP交互关系的拼车判断模型。首先,预估车辆在现实交通环境中的道路通行时间,并模拟乘客的共享意愿和可容忍时间条件,提供构建行程STP的基础信息;然后,针对复杂的城市道路环境,采用以路网等因素为限制的道路STP模型^[27-28],对行程的潜在时空可达范围进行建模,区别于传统无限制访问范围的STP模型^[23],该方法能更加精确地描述行程的潜在可达范围;最后,提出基于STP的行程间可拼性判断方法,并对美国纽约市曼哈顿岛内的出租车行程可拼性结果进行可视化分析。

1 研究方法

1.1 道路通行时间估计

准确估计道路通行时间是构建严密的行程STP以及从行程时空容忍条件到潜在可达时空范围映射的关键。本文基于行程的起始点(origin-destination, OD)信息而非载客车辆的实时GPS速度信息,对城市道路的通行时间进行估计。一方面,大量的OD流数据能很好地模拟车辆在转弯、拥堵等情况下的行驶时间以及司机和乘客在上、下车点的交互时间;另一方面,载客车辆的实时GPS数据存在一定的隐私保护问题,更加难以获取。

文献[19]提出的道路通行时间估计算法,从行程OD流数据中估计道路实时通行时间,流程如图1所示。输入数据包括城市道路网络 $G=(V, E)$ 和行程集 $\mathcal{T}=\{T_1, T_2, \dots, T_N\}$,其中 $V=(v_1, v_2, \dots, v_M)$ 表示道路交叉口, $E=(e_1, e_2, \dots, e_L)$ 表示路段, $T_i=(v_o, v_d, t_i)$ 表示单个行程, v_o, v_d 和 t_i 分别表示行程的起点、终点以及持续时间。参考城市道路长度,根据每个时间段内所有行程的行驶时间,对每条道路上的车辆平均行驶速度进行预估,生成道路上车辆的平均行驶通过时间。具体过程如下:

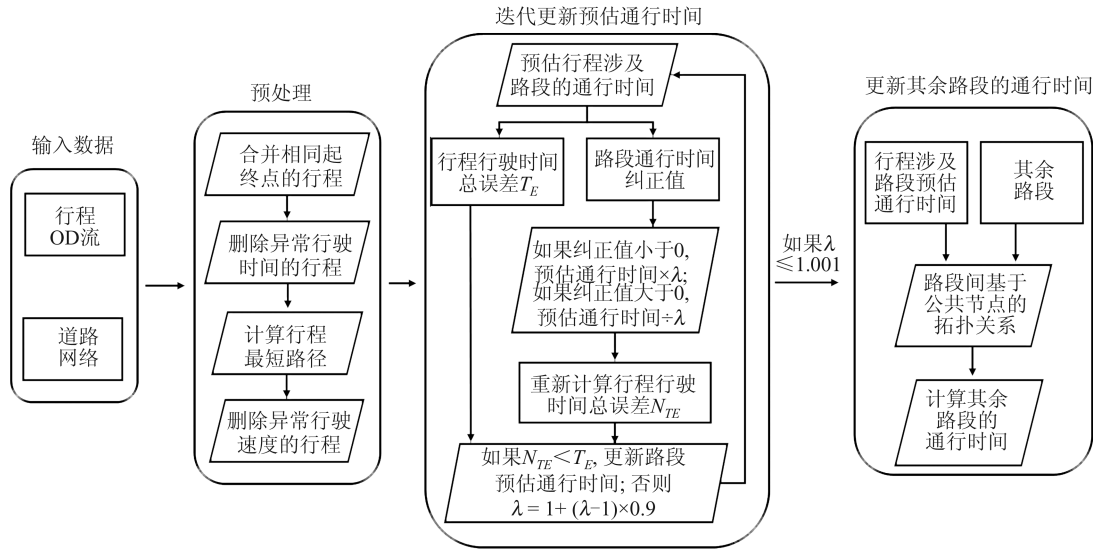


图1 道路通行时间的估计方法

Fig. 1 Estimation of Road Commuting Time

1) 将相同起点 o_i 和终点 d_i 的行程进行归并, 记为行程类 \mathcal{T}^{o_i, d_i} , 计算行程类的平均行驶时间 $\bar{t}_i = \sum_{t_j \in \mathcal{T}^{o_i, d_i}} t_j / |\mathcal{T}^{o_i, d_i}|$; 同时, 初始化每条道路的行驶速度 s^{init} , 可通过路网数据的交通流参数获取。利用最短路径算法计算每个行程类 \mathcal{T}^{o_i, d_i} 的最短路径 $R^{o_i, d_i} = (e_p, e_{p+1}, \dots, e_q)$ 和平均行驶速度 $s^{o_i, d_i} = \sum_{e_j \in R^{o_i, d_i}} \frac{e_j}{s^{\text{init}}} / |R^{o_i, d_i}|$, 其中 $R^{o_i, d_i} \in R_{\text{trip}}$, R_{trip} 表示行程集所覆盖的道路集合。为了筛选有效的行程, 可滤除行驶时间过短或过长的行程类 (即 $\bar{t}_i \leq 2 \text{ min}$ 或 $\bar{t}_i \geq 1 \text{ h}$) 以及平均行驶速度过低或过高的行程类 (即 $s^{o_i, d_i} \leq 0.5 \text{ m/s}$ 或 $s^{o_i, d_i} \geq 30 \text{ m/s}$)。这部分噪声数据通常是由某些特殊情况产生的 (如交通事故或极端天气导致的异常数据等), 容易对道路通行时间的估计产生影响。

2) 假设每段行程的路径都由起止点间的最短路径 R^{o_i, d_i} 确定, 将行程类的平均行驶时间 \bar{t}_i 分配至其行驶路径上每一段道路, 确定每条道路的通行时间。在具体实现中, 需通过迭代估计的方法不断更新每一段道路的估计通行时间, 并重新计算行程类的最短路径 R^{o_i, d_i} , 直到道路的估计时间接近分配的时间为止。在每次迭代过程中, 首先, 利用最短路径算法计算每个行程类的最短路径 R^{o_i, d_i} , 根据道路的行驶速度计算行程的预估行驶时间 $t_e^{o_i, d_i}$, 得到所有行程类的行驶时间与根据最短路径计算的行驶时间的总误差 $T_E = \sum |t_e^{o_i, d_i} - \bar{t}_i|$ 。然后, 对于所有行程最短路径所涉及

路段的纠正值, 并设置纠正系数 λ , 表示纠正估计时间的程度。如果纠正值小于 0, 则将路段的预估行驶时间乘以 λ , 否则除以 λ 。最后, 利用纠正后的路段预估时间重新计算行程类的新预估行驶时间 $t_{ne}^{o_i, d_i}$, 再次计算时间总误差 $N_{TE} = \sum |t_{ne}^{o_i, d_i} - \bar{t}_i|$ 。如果 $N_{TE} < T_E$, 则更新所有行程的预估行驶时间 $t_e^{o_i, d_i} = t_{ne}^{o_i, d_i}$, 同时令 $T_E = N_{TE}$, 进行下一步的迭代过程; 否则按一定比例缩减 λ 值, 直到 λ 小于一定的阈值 (即 $\lambda \leq 1.001$), 表示迭代过程接近饱和, 则退出, 得到行程集 \mathcal{T} 所涉及路段 R_{trip} 的预估通行时间。对于 R_{trip} 以外没有涉及的城市路段, 由于这些路段上几乎不会出现行程车辆, 则利用初始化的道路速度来估计通行时间或根据其相邻路段的估计通行时间进行近似估计。

1.2 基于时空棱柱的行程潜在可达区域建模方法

在拼车情境中, 车辆连续搭载多批乘客, 司机和乘客虽然均能获得更高的经济收益, 但需要在原本行程时间的基础上承担车辆绕路、相互等待等额外时间成本。因此, 研究中通常需要考虑乘客的最大可容忍时间, 拓展定义行程潜在可达区域的时空范围。本研究所采用的历史行程数据包括乘客现实出行中的上、下车时间。其中, 下车时间是不考虑拼车等因素, 乘客在当时交通状况下的真实行程时间, 因此可视为乘客的最早到达时间。在给定乘客的最大可容忍时间条件下, 行程的潜在可达时空范围只取决于该最大可容忍时间和根据最早到达时间计算的出行时间, 且建立的时空棱柱是严密的。

行程时空棱柱的具体建模方法如下: 在道路网络 $G = (V, E)$ 中, 将 E 的权值定义为由上文估

算得到的车辆平均通行时间 $w_{e_s}^t \in W^t$ 。因此,一段行程可表示为 $T_i = \{(t_{o_i}, v_{o_i}), (t_{d_i}, v_{d_i}), \theta_i^d, \theta_i^w\}$, 其中 (t_{o_i}, v_{o_i}) 表示出发时空点, t_{o_i} 表示出发时间, v_{o_i} 表示出发位置; (t_{d_i}, v_{d_i}) 表示在正常行程中(即不参与拼车)的到达时空点, t_{d_i} 表示到达时间, v_{d_i} 表示到达位置, $t_{d_i} = t_{o_i} + D(v_{o_i}, v_{d_i}, W^t)$, 其中 $D(v_{o_i}, v_{d_i}, W^t)$ 表示行程在对应上、下车点之间的行驶时间;行程的最大可容忍时间包括最大额外行驶时间 θ_i^d 和最大额外等待时间 θ_i^w , 表示乘客愿意接受在参与拼车时产生的额外时间成本。通常,默认乘客最大可容忍时间与原本行程时间存在关系,用参数 α^d 、 α^w 表示容忍时间与行程时间存在的线性关系。同时,拟定参数 α^d 、 α^w 的上限值 β^d 、 β^w , 即乘客最大可容忍时间不会超过该上限值,计算式为:

$$\begin{cases} \theta_i^d = \max(\alpha^d(t_{d_i} - t_{o_i}), \beta^d) \\ \theta_i^w = \max(\alpha^w(t_{d_i} - t_{o_i}), \beta^w) \end{cases} \quad (1)$$

在道路网络中,一段行程 T_i 的时空棱柱范围可表示为 $STP_i = f_{\text{stp}}((t_{o_i}, v_{o_i}), (t_{d_i}, v_{d_i}), \theta_i^d)$, f_{stp} 表示由上、下车时空点和最大额外行驶时间映射构成的可达时空点集 S_i , 任意时空点 $(t_m, v_m) \in S_i$ 满足以下条件:

$$D(v_{o_i}, v_m, W^t) + D(v_m, v_{d_i}, W^t) \leq t_{d_i} - t_{o_i} + \theta_i^d \quad (2)$$

对于行程 T_i , 一个潜在可达的时空点应该保证乘客能在容忍时间内到达目的地,其时空范围可表示为 (t_m^p, t_m^q, v_m) ($1 \leq m \leq Q$, Q 表示时空点集 S_i 的大小), 包括行程 T_i 到达该节点 v_m 的最早到达时间 t_m^p 和最晚到达时间 t_m^q , 约束条件如下:

$$\begin{cases} t_{o_i} \leq t_m^p \leq t_m^q \leq t_{d_i} + \theta_i^d \\ t_m^p = t_{o_i} + D(v_{o_i}, v_m, W^t) \\ t_m^q = t_{d_i} + \theta_i^d - D(v_m, v_{d_i}, W^t) \end{cases} \quad (3)$$

因此,一段行程 T_i 的时空棱柱可表示为路网中所有潜在可达时空点的时空范围组合, $STP_i = \{(t_{s_1}^p, t_{s_1}^q, v_{s_1}), \dots, (t_{s_m}^p, t_{s_m}^q, v_{s_m}), \dots, (t_{s_Q}^p, t_{s_Q}^q, v_{s_Q})\}$ 。由于每一段行程均要计算所有节点的时空范围,在给定路网中任意节点之间的行驶时间下,构建所有行程时空棱柱的计算复杂度为 $O(NM)$, N 表示行程数量, M 表示路网节点数量。

1.3 拼车模式分析

理论上,拼车具有复杂的情形,一般使用参与拼车的行程数量 k ($k \geq 2$)、拼车时车辆同时搭载的最大行程数量 c ($c \geq 2$)、行程进行拼车时所

使用的最大车辆数 v ($v \geq 1$) 3 个参数来刻画。不同参数值下的拼车模式如图 2 所示,其中灰色箭头表示车辆的行驶时间,不同颜色的线段表示不同行程 T_1 、 T_2 、 T_3 的持续时间,不同行程线段的重叠部分表示对应乘客在参与车辆上的共乘时段。基于上述参数,一次拼车行为可定义为:对于多段行程参与的拼车行程,必须保证其参与的每一段行程在出行中存在 $c \geq 2$ 的时段(即存在部分行程时段与其他人共乘),另外,参与的行程数量需满足 $k \geq 2$, 且不存在车辆空载的情况。从时间地理的角度来看,时空棱柱准确描述了行程在满足给定额外时空容忍条件下(即在规定的时间内到达目的地)的最大时空活动范围,若存在多段行程时空棱柱都涉及的时空区域,即表明相应的行程间存在拼车的可能。

1.3.1 拼车的可行性判断

由于涉及多个行程、多个车辆的复杂拼车模式在现实生活中并不常见,分析的价值不高,因此,本小节主要分析只涉及 2 个行程占主导且容易实现的拼车模式,即 $k=2, c=2, v=1$ 。

给定两段行程 T_1 和 T_2 , 其时空棱柱分别为 STP_1 和 STP_2 , $T_1 = \{(t_{o_1}, v_{o_1}), (t_{d_1}, v_{d_1}), \theta_1^d, \theta_1^w\}$, $T_2 = \{(t_{o_2}, v_{o_2}), (t_{d_2}, v_{d_2}), \theta_2^d, \theta_2^w\}$, 拼车的可行性表现为司机在乘客的最大可容忍时间范围内完成 4 个上、下车点的接送任务。假设行程 T_1 的下单时间在 T_2 之前,其具体的组合方式可分为两种情形:第一种是先完成行程 T_1 , 即 $v_{o_1} \rightarrow v_{o_2} \rightarrow v_{d_1} \rightarrow v_{d_2}$; 第二种是先完成行程 T_2 , 即 $v_{o_1} \rightarrow v_{o_2} \rightarrow v_{d_2} \rightarrow v_{d_1}$ 。图 3(a) 和 3(b) 在一维空间中分别描述了上述两种拼车组合方式。对于第一种拼车组合方式,司机首先必须在 T_1 行程的可达时空范围内前往 T_2 行程的上车点 v_{o_2} , 并且能顺利到达 T_1 行程的终点 v_{d_1} , 以完成 T_1 行程。对应的时空棱柱拓扑判断表示为 T_2 行程的上车时空点 (t_{o_2}, v_{o_2}) 存在于 T_1 行程的时空棱柱 STP_1 内。此外,司机必须在 T_2 行程的可达时空范围内前往 T_1 行程的下车点 v_{d_1} , 并且能顺利到达 T_2 行程的终点 v_{d_2} , 以完成 T_2 行程。对应的时空棱柱拓扑判断表示为 T_1 行程的下车时空点 (t_{d_1}, v_{d_1}) 存在于 T_2 行程的时空棱柱 STP_2 内,其形式化的表达式为:

$$\begin{cases} STP_1(t_{o_2}^p, t_{o_2}^q, v_{o_2}) \cap STP_2(t_{o_2}^p, t_{o_2}^q, v_{o_2}) \neq \emptyset \\ STP_1(t_{d_1}^p, t_{d_1}^q, v_{d_1}) \cap STP_2(t_{d_1}^p, t_{d_1}^q, v_{d_1}) \neq \emptyset \end{cases} \quad (4)$$

对于第二种拼车组合方式,首先需要满足司机在 T_1 行程的可达时空范围能同时前往 T_2 行程

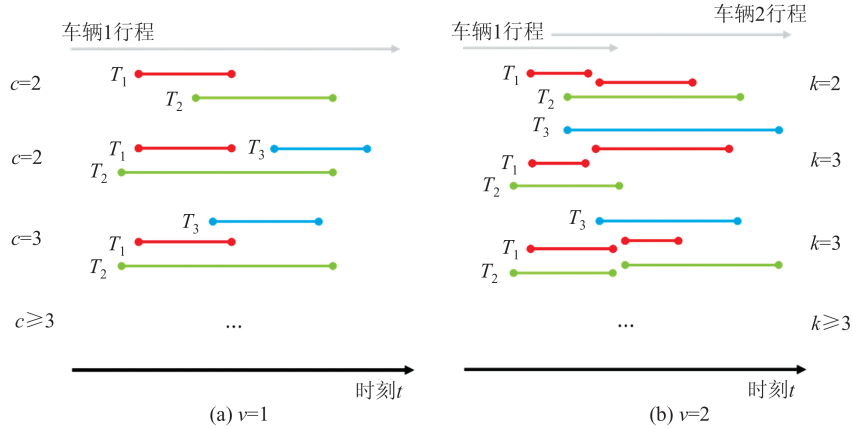


图2 不同参数值下的拼车模式

Fig. 2 Ridesharing Patterns with Different Parameter Values

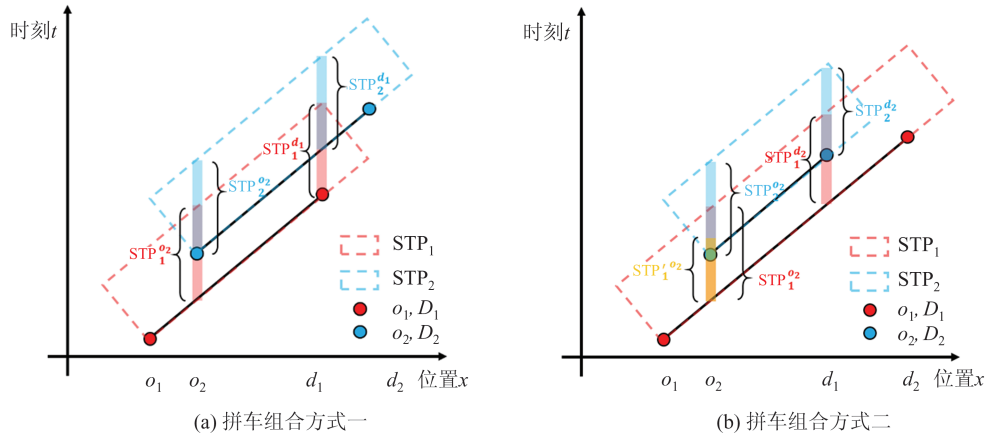


图3 一维空间下的时空棱柱可拼性判断模型

Fig. 3 STP Ridesharing Identification Model in One-Dimensional Space

的上车点 v_{o_2} 和下车点 v_{d_2} 。对应的时空棱柱拓扑判断表示为 T_2 行程的上车时空点 (t_{o_2}, v_{o_2}) 和上车时空点 (t_{d_2}, v_{d_2}) 均存在于 T_1 行程的时空棱柱 STP_1 内。由于 T_1 行程的时空棱柱 STP_1 范围只能判断单个节点是否潜在可达,并不能保证对两个节点的依次可达。因此,点 v_{o_2} 的时空范围需满足在 STP_1 时空范围内可到达 v_{d_2} 点的限制,在完成节点 v_{o_2} 的可达判断后需将 STP_1 的范围更新为 $t_{o_2}^{pq} = t_{o_2}^q - D(v_{o_2}, v_{d_2}, W^t)$,再判断 T_2 行程的上车时空点 (t_{o_2}, v_{o_2}) 是否处于更新后的时空范围内,其形式化的表达式为:

$$\begin{cases} STP_1(t_{o_2}^p, t_{o_2}^q, v_{o_2}) \cap STP_2(t_{d_2}^p, t_{d_2}^q, v_{d_2}) \neq \emptyset \\ STP_1(t_{d_2}^p, t_{d_2}^q, v_{d_2}) \cap STP_2(t_{o_2}^p, t_{o_2}^q, v_{o_2}) \neq \emptyset \\ t_{o_2}^{pq} = t_{o_2}^q - D(v_{o_2}, v_{d_2}, W^t) \\ STP_1(t_{o_2}^p, t_{o_2}^{pq}, v_{o_2}) \cap STP_2(t_{d_2}^p, t_{d_2}^q, v_{d_2}) \neq \emptyset \end{cases} \quad (5)$$

在现实中,由于行程的实际出发时间存在不确定性,乘客和司机难以准时到达指定的上、下车位置,可能存在第一批乘客和司机与第二批乘

客互相等待的情况,即司机不能无缝地在 v_{o_2} 接上第二批乘客。因此,司机和乘客在 v_{o_2} 上车点的相互等待时间长短表示为 t_i^w ,如下所示:

$$\begin{cases} t_1^w = \max(0, t_{o_2} - t_{o_1} - D(v_{o_1}, v_{o_2}, W^t)) \\ t_2^w = \max(0, t_{o_1} + D(v_{o_1}, v_{o_2}, W^t) - t_{o_2}) \\ t_1^w \leq \theta_1^w \\ t_2^w \leq \theta_2^w \end{cases} \quad (6)$$

其中,行程 T_1 、 T_2 的实际等待时间表示为车辆到达 v_{o_2} 的时刻与行程 T_2 开始等待时刻的差值,必须满足小于最大额外等待时间 θ_1^w 、 θ_2^w 的约束条件。由于时空棱柱的具体范围仅取决于最大额外行驶时间 θ_i^d ,等待时间的长短并不会改变时空棱柱的具体结构。在拼车判断中,可根据等待时间将时空棱柱 STP_1 、 STP_2 进行相应的上、下平移操作,再加入到行程时空棱柱的可拼性判断模型当中。

图4展示了对于行程集 \mathcal{T} 中所有行程之间的可拼性进行判断的流程。由于需要对两两行程的上、下车点和时空棱柱范围进行拓扑相交判

断,因此可拼性判断算法的最大复杂度为 $O(N^2)$, N 表示行程数量。在实际应用中,与每个行程的上、下车点时空范围存在拓扑相交的行程

时空棱柱数量远小于 N , 即筛选后参与行程可拼性判断的行程数量远小于 N 。因此,算法的实际开销会远小于 $O(N^2)$ 。

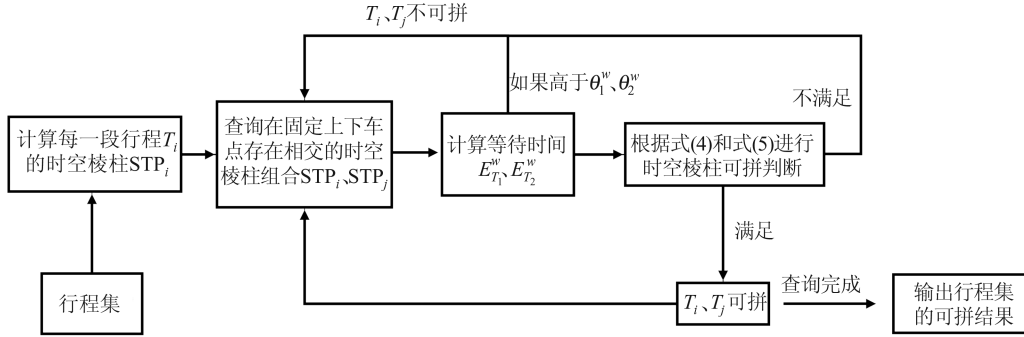


图4 行程可拼性判断流程图

Fig. 4 Flowchart of Ridesharing Identification

1.3.2 复杂拼车形式分析

由于篇幅限制,本小节仅对参数为 $k \geq 3$ 、 $c \geq 3$ 、 $v \geq 2$ 等复杂情况下的拼车形式进行简略阐述。在后续工作中,将补充对复杂情况下拼车模式的自动化分析方法及其效率的探究。

对于更多行程依次参与的情况 ($k \geq 3$), 可将时空棱柱不断进行更新来简化复杂的可拼性判断过程。给定连续参与拼车的行程集 $\{T_1, T_2, \dots, T_{i+2}\}$, 假设 $\{T_1, T_2, \dots, T_{i+1}\}$ 满足拼

车条件,则行程 T_{i+2} 的可拼性可根据式(4)和式(5)对 $STP_{\cup i+1}$ 和 STP_{i+2} 进行判断。其中, $STP_{\cup i} = f_{stp}((t_{i_a}, v_{i_a}), (t_{i_b}, v_{i_b}), \theta_{\cup i}^d)$ 表示对行程集合 $\{T_1, T_2, \dots, T_i\}$ 进行可拼性判断后产生的新时空棱柱范围,参数分别表示前 i 个行程构成的拼车行程中最后两个时空节点和额外行驶时间总和; STP_{i+1} 表示行程 T_{i+1} 的时空棱柱范围。两段时空棱柱范围通过 f_u 函数更新,得到时空棱柱范围 $STP_{\cup i+1} = f_u(STP_{\cup i}, STP_{i+1})$, 具体计算式为:

$$f_u(STP_{\cup i}, STP_{i+1}) = \begin{cases} v_{(i+1)_a} = v_{i_b} \\ v_{(i+1)_b} = v_{d_{i+1}} \\ t_{(i+1)_a} = t_{i_a} + D(v_{i_a}, v_{o_{i+1}}, W^t) + D(v_{o_{i+1}}, v_{i_b}, W^t) \\ t_{(i+1)_b} = t_{(i+1)_a} + D(v_{i_b}, v_{d_{i+1}}, W^t) \\ \theta_{\cup i+1}^d = \max(t_{i_b} + \theta_{\cup i}^d, t_{d_{i+1}} + \theta_{i+1}^d) - t_{(i+1)_b} \end{cases} \quad (7)$$

当同乘行程数量增加时 ($c \geq 3$), 在给定的时空点上需要考虑 c 段时空棱柱的相交关系判断。尽管情况更为复杂,基于多段行程 $\{T_1, T_2, \dots\}$ 及其对应的时空棱柱 $\{STP_1, STP_2, \dots\}$, 可构造与式(4)和式(5)类似的可拼性判断方法。

当所搭乘的最大车辆数增加时 ($v \geq 2$), 某些参与拼车的行程会依次搭载不同的车辆前往目的地。因此,为了使车辆资源的更优分配以及拼车行程的更优实现,往往涉及车辆的最优调度决策。在这种情况下,可将某一行程 T_i 拆分成多段行程 $\{T_i^1, T_i^2, \dots\}$, 分别参与不同车辆的可拼性判断过程,同时需要解决车辆资源优化配置等调度问题。

1.4 拼车匹配策略

行程间的可拼性结果反映了行程间的所有潜在可拼车机会,但由于每一段行程只能参与一

次拼车,需要按照一定的匹配规则筛选出合适的拼车匹配结果。

首先,对行程集 $\mathcal{T} = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ 的可拼性结果 $S_T = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 进行筛选,其中 $s_i = \{T_p, T_{p+1}, \dots, T_q\}$ 表示行程 T_i 的可拼行程集。由于拼车的共乘路程长短能直观描述拼车产生的出行成本节约程度,因此选用 $s_{r_{i,j}}$ 表示行程 T_i 和 T_j 拼车匹配的共享收益,计算式为:

$$s_{r_{i,j}} = \frac{D_{i,j}^s}{D_{i,j}^c} \geq \tau \quad (8)$$

式中, $D_{i,j}^s$ 表示乘客 i 和 j 共乘的路程; $D_{i,j}^c$ 表示整个拼车行程路程; τ 表示设定的最低共享收益值。 $s_{r_{i,j}}$ 反映了拼车行程中共乘路程所占的比例,更高的共乘路段比例表明参与的行程路径重合度更高,产生更高的共享收益。本文在后续实验中最低共享收益值 τ 设定为 0.2, 去除拼车收益较低

的可拼行程。现实中,这部分被筛选的拼车行程的实现价值不高,同时过多的可拼行程会增加匹配优化的复杂度。

筛选完成后,拼车匹配过程可表示为:在某一时间段中,存在着正在服务于一趟行程的司机队列 $D=\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ 以及待参与拼车的乘客队列 $P=\{p_1, p_2, \dots, p_m\}$, 利用一定的匹配策略进行组合, 得到相应的拼车匹配结果 $M_R=\{(d_1, p_1), \dots, (d_i, p_i), \dots\} (d_i \in D, p_i \in P)$ 。本文提出两种拼车匹配策略, 具体如下:

1) 先叫先安排成本最小的拼车匹配策略 (first call and minimum cost, FCMC)。对于先请求的乘客订单 p_i , 优先在司机队列中寻找拼车成本最小的司机 d_j 构成匹配 m_{p_i, d_j} , 对应的行程分别为 T_i, T_j , 相应的拼车成本记为 c_{p_i, d_j} , 计算式为:

$$c_{i,j} = \left(\frac{t_i^w}{t_{d_i} - t_{o_i}} + \frac{t_j^w}{t_{d_j} - t_{o_j}} \right) + \left(\frac{t_i^d}{D(v_{o_i}, v_{d_i}, W^t)} + \frac{t_j^d}{D(v_{o_j}, v_{d_j}, W^t)} \right) \quad (9)$$

$$\text{FCMC:} \begin{cases} m_{p_i, d_j} = 1, c_{p_i, d_j} = \min(c_{p_i, d_1}, c_{p_i, d_2}, \dots, c_{p_i, d_n}) \\ m_{p_i, d_k} = 0, \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

式中, t_i^w, t_j^w 表示等待时间; t_i^d, t_j^d 表示额外行程时间。在 FCMC 拼车组合形式中, $t_i^d = D(v_{o_i}, v_{o_j}, W^t) + D(v_{o_j}, v_{d_i}, W^t) - D(v_{o_i}, v_{d_i}, W^t)$ 。

2) 先叫先服务的拼车匹配策略 (first call and first service, FCFS)。对于先请求的乘客订单 p_i , 优先在司机队列中寻找能最早到达订单 p_i 位置的司机 d_j 构成匹配, 相应的到达时间记为 t_{p_i, d_j} , 计算式为:

$$t_{p_i, d_j} = t_{o_i} + D(v_{o_i}, v_{o_j}, W^t) \quad (11)$$

$$\text{FCFS:} \begin{cases} m_{p_i, d_j} = 1, t_{p_i, d_j} = \min(t_{p_i, d_1}, t_{p_i, d_2}, \dots, t_{p_i, d_n}) \\ m_{p_i, d_k} = 0, \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

此外, 本文采用无拼车匹配策略 (no policy, NP) 情形作为分析基准, 即对于先请求的乘客订单 p_i , 优先分配司机队列中的第一个满足可拼车要求的司机 d_j 构成匹配。

2 实验分析

本文采用美国纽约市曼哈顿岛区域内一周的黄色出租车历史订单数据进行模拟实验。该

订单数据包含行程上、下车点位置和时间等相关属性。同时, 根据 OpenStreetMap 获取的路网数据提取了曼哈顿的主要道路和交叉口, 构建城市路网 $G=(V, E)$, 共计 3 537 个节点和 6 856 条边。结合行程时空棱柱可拼性判断方法得到的研究区内每小时的行程拼车可选行程集 $S_{T_h}=\{s_{t_1}, s_{t_2}, \dots, s_{t_n}\} (h=1, 2, \dots, 24)$ 和具体的拼车匹配策略 $p=\{\text{FCMC}, \text{FCFS}, \text{NP}\}$, 得到不同策略支持下的最优拼车匹配结果 $\text{ST}_h^p=\{T_1^p, T_2^p, \dots, T_n^p\}$ 。

在此基础上, 采用拼车匹配率 (percentage of shared travel, PS) 和平均可选行程数 (average shared travel options, ASO) 来描述曼哈顿区域的拼车结果, PS 表示某时间段内能够参与拼车的行程数与总行程数之间的比例, ASO 表示某时间段内行程的平均可选拼车数量, 具体的计算式为:

$$\text{PS}(\alpha^d, \alpha^w, \beta^d, \beta^w, h) = \frac{1}{n_h} \sum_{i=1}^{n_h} P_i, \quad P_i = \begin{cases} 1, T_i^p \neq \emptyset \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{ASO}(\alpha^d, \alpha^w, \beta^d, \beta^w, h) = \frac{\sum_{i \in h} |st_i|}{2h} \quad (14)$$

图 5 展示了在 FCMC 策略支持下的最优拼车匹配结果和行程拼车可选行程集, 揭示了不同乘客容忍参数 $\alpha^d, \alpha^w, \beta^d, \beta^w$ 对 PS 和 ASO 的影响程度。在乘客均愿意参与拼车的理想情况下, 更低的行程容忍时间参数表明更苛刻的拼车实现条件, 导致更低的 PS 和 ASO。结合现实的乘客共享意愿和实际的匹配情况, 本研究设定容忍参数的上限为 $\alpha^d \leq 0.3, \alpha^w \leq 0.2, \beta^d \leq 300 \text{ s}, \beta^w \leq 300 \text{ s}$, 即假设行程的最大额外行驶时间和最大额外等待时间不超过原本行程时间的 30% 和 20%, 上限均为 300 s。在出行需求高发的曼哈顿区域, 额外行程容忍时间 θ^d 对于 PS 的影响更为明显。该区域内存在一部分拼车行程的路线规划能够实现无额外行程距离的连接, 即最理想的拼车行程, 因此在 $\theta^d = 0$ 的情况下, 仍有一定数量的拼车行程满足条件。相反, 最大额外等待时间 θ^w 的变化对 PS 的影响并不大。曼哈顿的实时出行需求量高, 主要的节点都存在一定的订单请求, 乘客和司机并不需要过多的时间等候即能够匹配合适的行程。但是, 相应的拼车匹配方案并不能保证满足低额外行驶时间的约束条件。综上, 研究区内拼车的可实现程度主要受到最大额外行驶时间 θ^d 的影响。

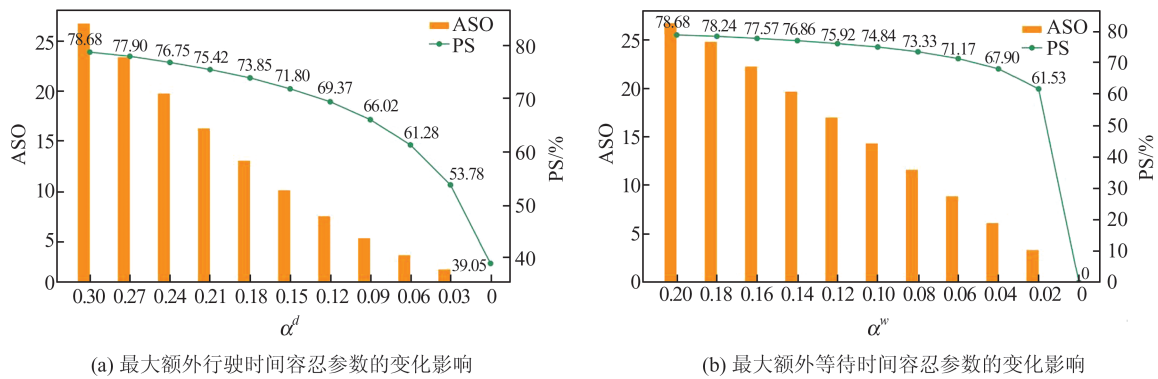


图 5 不同参数设置下的匹配率及平均可拼选择数

Fig. 5 PS and ASO with Different Parameter Settings

此外,通过设置固定参数($\alpha^d=0.3$, $\alpha^w=0.2$),分析不同拼车匹配策略对不同时段内的拼车匹配率PS和平均额外拼车成本(averaged shared travel cost, ASC)的影响程度,结果如图6所示。PS的变化具有明显时间节律性,其与实时变化的行程需求量相关,且存在特定的高峰时段。虽然,在曼哈顿区域内不同的拼车匹配策略对PS影响程度区别不大,但对行程参与拼车产生的ASC变化却有所区别。受早高峰期(8时—9时)以及下午时段(14时—17时)中的规律性出行模式影响,如早高峰期从居住区前往办公区等固定的出行模式,城市出行往往存在大量相似的上、

下车区域,而相似的出行需求会降低拼车的实现成本;而在凌晨期间,受到低出行需求量的影响,拼车的实现成本会达到峰值。值得注意的是,在中午或晚高峰期间,乘客的出行目的更加多样化,使得实现拼车时需要承担更长的绕路时间和等待时间,产生更高的拼车成本。因此,在这些时间段内,高的出行需求量、高的拼车匹配率并不会实现更低的拼车成本。此外,采用不同拼车匹配策略使得行程选择了各自认为更优的匹配行程,如与注重成本的最小化注重成本的最小化的FCMC策略相比,FCFS策略为了满足乘客优先上车利益,导致了更大的拼车成本消耗。

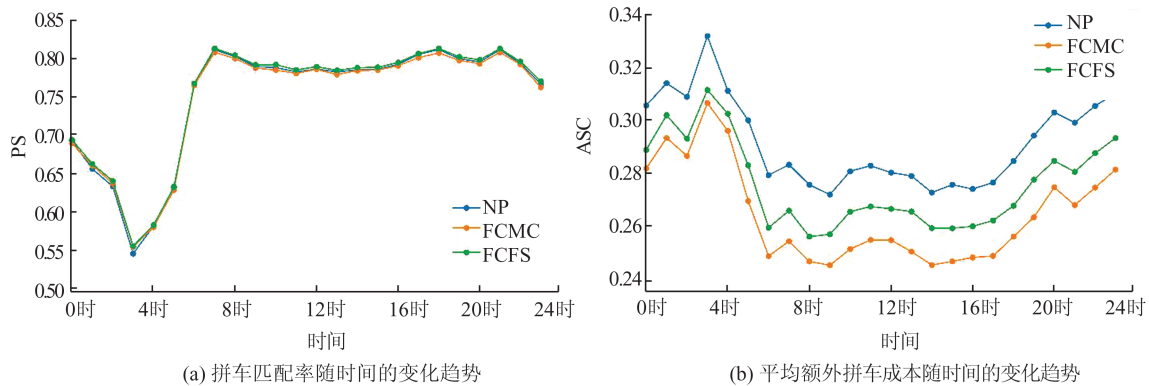


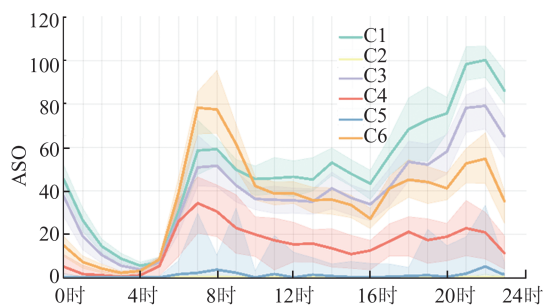
图 6 不同时间段下不同拼车匹配策略的匹配率及平均额外拼车成本

Fig. 6 PS and ASC with Different Matching Strategies at Different Time

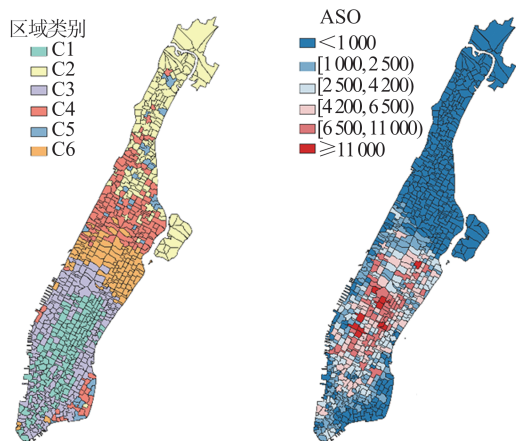
图7通过分析从不同地点出发的行程ASO指标在一天中的变化情况,描述了研究区内行程可拼性强度的时空分布特征,揭示了不同区域中行程的可拼性能力。按不同的ASO变化模式可将曼哈顿区域的节点分成6类,每类区域中行程可选拼车数量的变化趋势如图7(a)所示,空间分布如图7(b)所示。不同类型的区域内行程可拼性强度的时间变化趋势具有较为明显的差异,例如,C6类区域具有明显的住宅区特性,其早高峰

时期出发的行程具有更多的可拼行程选择;而C1类区域具有明显的办公区和商业区特性,其ASO指标白天稳定,晚上高。图7(c)描述了ASO的空间分布图,每个区域的值表示行程的日平均可选拼车数量。与现实情况相符合,ASO高的地区大多位于曼哈顿的中城区。从这些中心区域出发的行程的路径通常覆盖高乘客出行需求量高的区域,而且具有相似的路线规划,因此具有更高的可拼性能力。如ASO最高的区域主要位于车

站(如纽约宾夕法尼亚车站、大中央总站)、时代广场、市中心公园出口、时代华纳中心等,现实中车辆在 these 区域接送乘客也会更容易实现拼车。



(a) 不同类别区域内ASO随时间的变化趋势



(b) 不同类别区域的空间分布

(c) ASO的空间分布

图7 曼哈顿区域内ASO的时空分布特征及差异

Fig. 7 Temporal-Spatial Features and Difference of ASO Ability in Manhattan

3 结 语

本文采用道路时空棱柱建模方法刻画城市出行行程的潜在时空可达范围,进而提出了基于时空棱柱间拓扑关系的拼车匹配判断模型,支撑城市共享出行中的拼车实现。区别于利用上、下车节点之间到达顺序的可拼性判断方法,本文证明了通过对行程时空棱柱中的潜在相遇点的时空范围进行拓扑判断,能快速、有效地发现行程间的潜在可拼性,并且行程时空棱柱的时空范围可以随着乘客的共享意愿程度和额外可容忍时间条件方便地进行变化。换言之,本文所提出的方法能方便地生成行程在实时交通状况下符合容忍时间要求的时空棱柱模型,提升了行程可拼性判断及匹配模型的表达性和准确性。此外,对于复杂情况下的拼车模式,本文也提出基于时空棱柱进行分析和判断的构想,为未来研究复杂交通情境下的拼车实现形式提供一定的理论支持。

此外,应用所构建的行程间的可拼性判断模

型,本文还通过具体的可视化分析呈现了美国纽约市曼哈顿区域内出租车行程的可拼性强度,并按照两种拼车匹配策略模拟了现实情况下的拼车匹配结果。所分析的行程的拼车匹配率和平均可拼选择数等指标揭示了城市行程可拼性能力的时空分布特征,分析的结果在城市实时车辆调度决策和共享出行规划中具有一定的指导意义。同时,本文对于推广城市拼车服务具有前瞻意义,有助于提高乘客的共享意愿、增加共享利益,一定程度上验证了通过大规模拼车策略的优化实现可缓解道路压力,降低交通出行成本。

参 考 文 献

- [1] Vuchic V R. Urban Transit: Operations, Planning and Economics[M]. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2005.
- [2] Ji Hangyu, Cai Zhongliang, Jiang Lili, et al. Analysis of Spatial Inequality in Taxi Ride and Its Relationship with Population Structure[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(5): 766-776. (季航宇, 蔡忠亮, 姜莉莉, 等. 出租车出行的空间不平等及其与人口结构的关联[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(5): 766-776.)
- [3] Mitchell W J, Borroni-Bird C, Burns L D. Reinventing the Automobile: Personal Urban Mobility for the 21st Century[M]. Cambridge: MIT Press, 2010.
- [4] Botsman R, Rogers R. What's Mine Is Yours: The Rise of Collaborative Consumption[M]. New York: Harper Business, 2010.
- [5] d'Orey P M, Fernandes R, Ferreira M. Reducing the Environmental Impact of Taxi Operation: The Taxi-Sharing Use Case[C]//The 12th International Conference on ITS Telecommunications, Taipei, Taiwan, China, 2012.
- [6] Ardekani S, Jamei B, Herman R. A Taxicab Fare Policy Formula Based on Fuel Consumption Observations[J]. *Transportation Research Record*, 1986, 1103: 33-39.
- [7] Clewlow R R. Carsharing and Sustainable Travel Behavior: Results from the San Francisco Bay Area[J]. *Transport Policy*, 2016, 51: 158-164.
- [8] Chen Dongsheng, Li Qingquan, Tu Wei, et al. Hierarchical Spatial Recognition Method for Urban Villages by Integrating Multi-source Geospatial Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(5): 784-792. (陈栋胜, 李清泉, 涂伟, 等. 利用多源空间数据的城中村空间层

- 次化识别方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(5): 784-792.)
- [9] Xu Yi, Tong Yongxin, Li Wei. Recent Progress in Large-Scale Ridesharing Algorithms[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2020, 57(1): 32-52. (徐毅, 童咏昕, 李未. 大规模拼车算法研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2020, 57(1): 32-52.)
- [10] Ho S C, Szeto W Y, Kuo Y H, et al. A Survey of Dial-a-Ride Problems: Literature Review and Recent Developments [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018, 111: 395-421.
- [11] Vazifeh M M, Santi P, Resta G, et al. Addressing the Minimum Fleet Problem in On-Demand Urban Mobility[J]. *Nature*, 2018, 557: 534-538.
- [12] Wang X, Agatz N, Erera A. Stable Matching for Dynamic Ride-Sharing Systems[J]. *Transportation Science*, 2018, 52(4): 850-867.
- [13] Ma S, Zheng Y, Wolfson O. T-share: A Large-scale Dynamic Taxi Ridesharing Service[C]//IEEE 29th International Conference on Data Engineering (ICDE), Brisbane, Australia, 2013.
- [14] Hosni H, Naoum-Sawaya J, Artail H. The Shared-Taxi Problem: Formulation and Solution Methods [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2014, 70: 303-318.
- [15] Li Y F, Chen R, Chen L, et al. Towards Social-Aware Ridesharing Group Query Services [J]. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2017, 10(4): 646-659.
- [16] Chen X, Kwan M P. Choice Set Formation with Multiple Flexible Activities Under Space-Time Constraints [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2012, 26(5): 941-961.
- [17] Timmermans H, Arentze T, Joh C H. Analysing Space-Time Behaviour: New Approaches to Old Problems[J]. *Progress in Human Geography*, 2002, 26(2): 175-190.
- [18] Wang Y L, Kutadinata R, Winter S. Activity-based Ridesharing: Increasing Flexibility by Time Geography[C]//The 24th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems, Burlingame, California, 2016.
- [19] Santi P, Resta G, Szell M, et al. Quantifying the Benefits of Vehicle Pooling with Shareability Networks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(37): 13290-13294.
- [20] Hansen W G. How Accessibility Shapes Land Use [J]. *Journal of the American Institute of Planners*, 1959, 25(2): 73-76.
- [21] Miller H J. Modelling Accessibility Using Space-Time Prism Concepts Within Geographical Information Systems[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1991, 5(3): 287-301.
- [22] Hägerstrand T. Reflections on "What About People in Regional Science?" [J]. *Papers of the Regional Science Association*, 1989, 66(1): 1-6.
- [23] Yu H B, Shaw S L. Exploring Potential Human Activities in Physical and Virtual Spaces: A Spatio-Temporal GIS Approach[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2008, 22(4): 409-430.
- [24] Fang Zhixiang, Li Qingquan, Xiao Shilun. Representation of Location-Specific Space-Time Accessibility Based on Time Geography Framework[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(9): 1091-1095. (方志祥, 李清泉, 萧世伦. 利用时间地理进行位置相关的时空可达性表达[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(9): 1091-1095.)
- [25] Wang Yafei, Yuan Hui, Chen Biyu, et al. Measuring Place-based Accessibility Under Travel Time Uncertainty [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(11): 1723-1729. (王亚飞, 袁辉, 陈碧宇, 等. 行程时间不确定环境下地点可达性研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(11): 1723-1729.)
- [26] Kuijpers B, Miller H J, Neutens T, et al. Anchor Uncertainty and Space-Time Prisms on Road Networks[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(8): 1223-1248.
- [27] Neutens T, van de Weghe N, Witlox F, et al. A Three-Dimensional Network-Based Space-Time Prism [J]. *Journal of Geographical Systems*, 2008, 10(1): 89-107.
- [28] Kuijpers B, Othman W. Modeling Uncertainty of Moving Objects on Road Networks via Space-Time Prisms [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2009, 23(9): 1095-1117.