

基于定点检测数据的城市干道车辆轨迹重构

唐克双, 徐天祥, 潘 昂, 李诗琪

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 针对我国城市干道实际交通数据条件,通过融合定点检测器和交通信号配时数据,基于交通波动理论和交通仿真的思想,开发了一种新的车辆轨迹重构方法,克服了现有方法依赖于高频率的浮动车数据以及未考虑车辆变道和路侧出入口进出车辆干扰的缺陷,并以青岛市一条信控干道的实证数据验证了该方法的有效性。

关键词: 城市干道; 信号控制交叉口; 轨迹重构; 交通波理论; 数据融合

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

Signal Timing and Detector Data-based Reconstruction of Vehicle Trajectories on Urban Arterials

TANG Keshuang, XU Tianxiang, PAN Ang, LI Shiqi

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on the shock-wave theory and traffic simulation concept, this paper presents a new reconstruction method of vehicle trajectories on urban arterials with detector data and signal timing data. Unlike the existing methods, the proposed method takes into consideration the impacts of lane change and roadside entrance and exit on vehicle maneuvers without relying on high-frequency floating car data. The proposed method has been validated at a signalized arterial in Qingdao City of China.

Key words: urban arterials; signalized intersection; trajectory reconstruction; shock-wave theory; data fusion

在交通工程领域,对于车辆运行轨迹重构的认知和理解存在两个层次:第一层次是车辆的行驶路径,指的是车辆的起讫点以及连接起讫点之间的路段和节点,常用于路网 OD(Origin Destination)矩阵的估计;第二层次是车辆的运行轨迹,指的是车辆在

行驶过程中的完整物理轨迹,可以体现车辆速度随时间和空间的变化规律.车辆运行轨迹是对交通流运行状态的最全面和完整的表达形式,不仅可以体现车辆在道路上的行驶路径,而且可以反映车辆运行速度随时间和空间的变化规律,蕴含非常丰富的交通流信息^[1].交通信息化水平的不断提高使得城市路网大范围、连续、自动的定点和移动检测数据的采集成为现实,进而使得车辆运行轨迹的获取成为可能.其中,定点检测设备,如线圈、地磁、微波雷达等,可以直接获取特定地点和时间间隔的速度、流量、占有率等路段和交叉口的交通流特征参数;移动检测设备,如浮动车、车辆自动识别(Automatic Vehicle Identification, AVI)设备等,可以直接估计部分车辆的起讫点、时空连续的行驶路径、点到点的行程时间等单个车辆的运行信息。

重构车辆运行轨迹可以全面、准确地再现城市路网交通状态的时空分布以及交通流的演化规律,从而提高交通状态参数(例如行程速度、行程时间、排队长度、延误等)估计和预测的精度以及交通信号控制的效率.同时,结合车辆排放和能源消耗模型,车辆运行轨迹信息还可以用于路网机动车交通产生的尾气和能源消耗的评估.因此,车辆运行轨迹的重构对于探索和开发交通信息化环境下的精细化交通控制与管理策略和系统,提升我国道路交通信息化、智能化水平,具有重要的现实意义。

传统意义上的路网 OD 矩阵估计是基于定点线圈采集的流量与 OD 之间存在的交通分配关系^[2].近年来,AVI 系统的广泛应用和数据可靠性的提高为 OD 估计的研究方法创造了新的可能性^[3],国内外众多学者进行了研究,如 Dixon 等^[4],Kwon 等^[5],Jaume 等^[6],魏静^[7],孙剑与冯羽^[8],王龙飞^[9],Teknomo 与 Fernandez^[10]和 Tang 等^[11].

冲击波理论可以描述道路交通流在时间上和空

间上变化的状态,是车辆运行轨迹估计的基础. Newell^[12-14]在整合累计曲线和冲击波理论的基础上,将传统的二维冲击波理论拓展为三维冲击波理论(在时空二维坐标系中增加路网节点的累计排队长度作为第三维).

基于三维冲击波理论的思想,Daganzo^[15-16]提出了一种基于变分理论(Variational Theory)和相对通行能力约束的路网交通流解析模型.基于此解析模型,Mehran等^[17]通过融合出租车浮动车数据、AVI数据以及信号控制参数,在国际上首次开发了一种可以估计城市道路路段车辆运行轨迹的方法,并利用日本东京一条路(包含5个交叉口的一条单行道)上的实测数据进行了方法验证和误差分析. Mehran等^[18]又基于交通波和变分理论,充分利用浮动车和固定检测器融合数据开发了一种车辆轨迹短期预测方法,并利用实际交通数据进行了方法验证和误差分析. Sun等^[19]也开发了类似的车辆运行轨迹估计方法,并利用美国一个交叉口的实测车辆轨迹数据进行了方法的验证;Sun等^[20]之后利用上述方法得到的交叉口重构轨迹,开发了一种信控交叉口范围内评估机动车能耗和排放的方法.

研究表明,当对象路段的出入口位置布设有 AVI 设施且浮动车比例达到 5% 以上时,就有可能比较准确地估计出城市道路路段上所有车辆的运

行轨迹.

但是,目前车辆轨迹重构方法还存在一些缺陷:一是往往只能针对单车道、少量进出干扰的情况,二是算法精度取决于高质量的浮动车数据(即浮动车的占有率较高且上传频率较高),一旦浮动车质量降低,则算法精确度迅速降低.这种方法不适合我国城市主干道车道多、路侧出入口车辆进出量大、浮动车数据的上传频率(一般为 10 s 以上)以及占比低的情况,难以得到广泛的实际应用.

本文针对我国目前浮动车数据质量较低的情况,融合现有的定点检测器数据和交通信号数据,结合视频数据确定部分参数,依据交通特性和交通仿真的思想方法,开发了一种在单车道、有出入车辆干扰交通情况下的轨迹重构方法,并测试其准确性.

1 车辆轨迹重构方法

1.1 基本思想

中国城市干道一般都为信控交叉口,检测器典型布设方式如图 1 所示,部分交叉口配备视频检测器(AVI),在路段上游装有定点检测器, D_1, D_2, \dots, D_n ,具体类型如线圈检测器或微波检测器,同时因为浮动车数量少且上传频率低,导致浮动车数据质量不高.

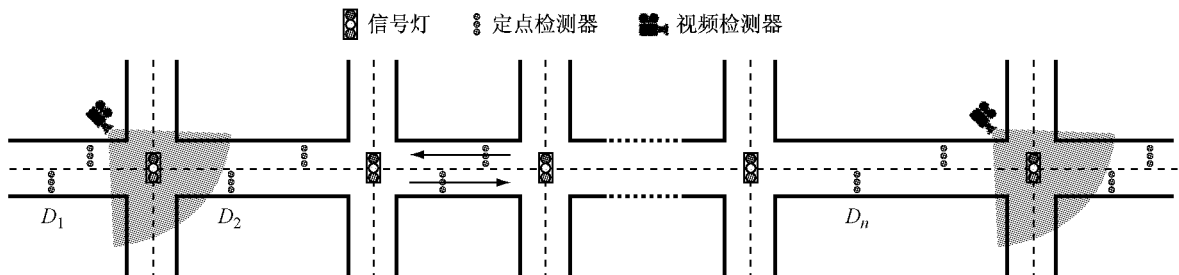


图 1 中国城市干道的检测器典型布设方式

Fig. 1 Typical traffic detector layout on urban arterials in China

从利用约束优化选择的层面入手并借鉴了交通仿真的车辆产生机制与运行机理,开发出了一种轨迹重构方法,基本思想如下:首先将一定数量的车辆在指定时间、指定路段或路口输入到系统中,如果没有约束条件会产生无数种可能的行驶轨迹.然后根据实际情况和交通理论引入一定的约束,从大量可能轨迹中筛选出少量的合理轨迹.最后参考实际交通运行情况,提取实际交通运行状况的一些参数作为选择标准,选择出最接近现实的最佳轨迹,完成轨迹重构.

在此过程中,单个车辆的轨迹重构表述如式

(1),即按一定的条件在研究路段某处生成车辆,此车辆的每一秒的行为都是根据当前时刻的总体状态按照一定的约束条件进行决策,从而产生连续轨迹,直至车辆驶出研究范围或者达到研究时间.

$$\text{生成车辆} + \int_0^t \text{车辆每一秒的行为}$$

$$\text{选择 } dt = \text{完整的车辆轨迹} \quad (1)$$

1.2 算法流程

如图 1 所示,算法针对的研究范围为城市的一条主干道,存在数个信控交叉口,且在选定的方向上,不要求研究范围内各路段车道数量相等;每个路

段的中上游位置处都有定点检测器,能够提供各车道的分时统计交通量 q_i ;同时存在一定数量的视频检测器.

根据上述算法思想,采用动态规划方法实现算

法功能,具体的算法流程如图 2 所示.整个算法程序分为两个模块,分别是道路占用情况模块和车辆行驶情况模块,两个模块相互读取、写入,从而实现算法功能.

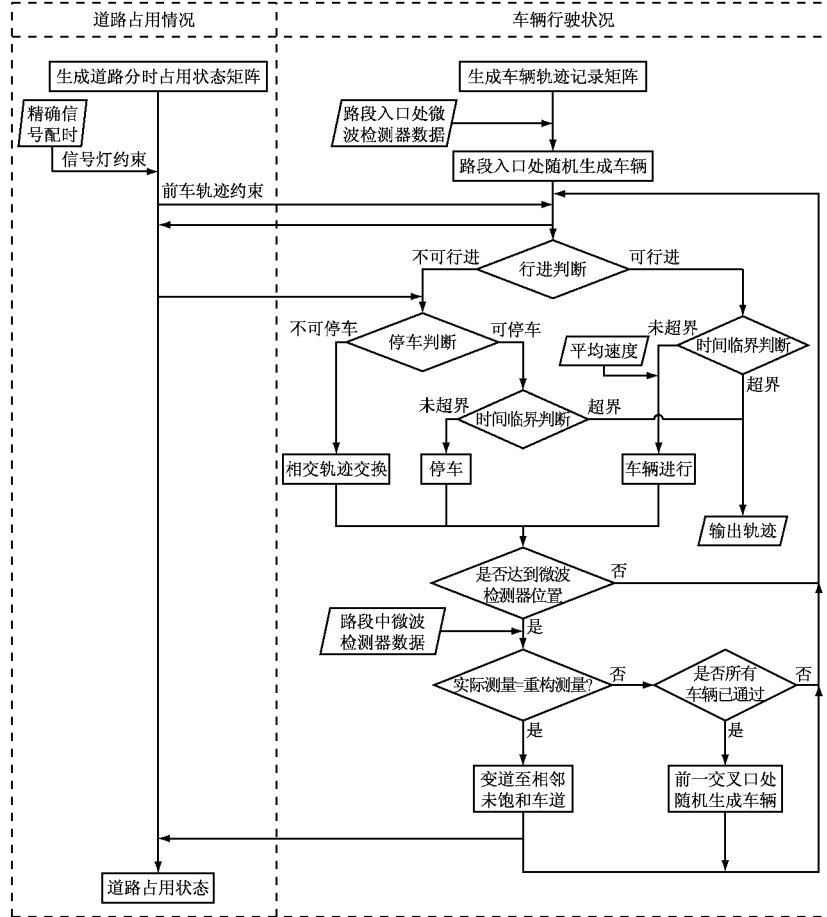


图 2 轨迹重构算法流程图

Fig. 2 Trajectory reconstruction algorithm flowchart

由于现实的车辆运行情况较为复杂,而现有的交通检测器无法给出完整的车辆运行状态信息,重构算法对现实情况进行了四项简化:①车辆按流量数据在 1 min 内随机生成;②车辆在路段中均按该车道的车辆平均速度前进;③车辆在定点微波检测器到停车线间不存在变道情况;④车辆在起步与停车时的怠速过程均为理想的匀加/减速过程.

1.2.1 建立基础矩阵

为了表达道路的时空占用情况,建立三维的道路分时占用矩阵 $P_{\text{oint}}[n, \text{distance}, t]$ (n 表示车道, distance 表示该点离研究路段起点的距离, t 表示研究时刻). 该矩阵的功能是反映当前时刻的实时路况如 30 s 时刻,有一长 5 m 车辆存在于 1 车道 20 m 处,则 $[1, 15, 30]$ 至 $[1, 20, 30]$ 设置为占用,并作为约束条件对下一秒车辆生成和运行形成约束.

为了表达车辆运行情况,建立二维的车辆运行

矩阵 $C_{\text{ar}}[\text{vehicle}, t]$ (vehicle 表示车辆的编号, t 表示研究时刻),每一矩阵元素为二维向量,包括所处车道以及离研究路段起点距离. 该矩阵的功能是反应已生成车辆的运行状况,并用于更新道路的时空占用情况.

轨迹重构算法的过程就是通过 t 时刻车辆运行矩阵 $C_{\text{ar}}[\text{vehicle}, t]$ 决定该时刻的道路占用情况矩阵 $P_{\text{oint}}[n, \text{distance}, t]$,再根据道路占用情况矩阵 $P_{\text{oint}}[n, \text{distance}, t]$ 计算出 $t+t_0$ 时刻车辆最或然运行状态,从而生成 $C_{\text{ar}}[\text{vehicle}, t+t_0]$ 的不断迭代过程.

1.2.2 车辆生成

在研究路段第一个定点检测器(即为图 1 中的 D_1)处形成初始车辆,每个分时时段 T_n 内的车辆生成数量设定为定点检测器获得的各车道分时统计交通量 q_i (如图 3 所示,横轴下方不同时刻中间的数字

如 4, 2, 6 和 1 等表示该分时段 T_n 内的交通量), 具体生成时刻为此分时段内的随机时刻 t_{n-j} , 用 $\text{Random.Next}(0, T)$ 函数分配每辆车的生成时刻. 将车辆轨迹向前反推至研究路段起点, 并往下游延伸.

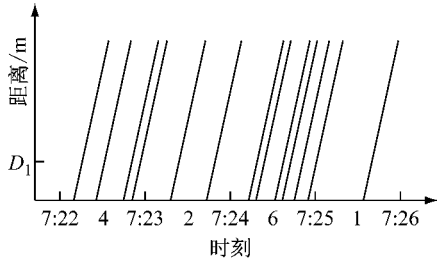


图 3 车辆生成时空示意图

Fig.3 Illustration of generating vehicle time and space

1.2.3 车辆行为决策

已生成的车辆在每一秒都根据路网的时空占用状态进行行为决策, 决策符合一定的约束条件, 包括以下四种约束:

(1) 基本约束: 车辆轨迹需要遵守时间和空间上的合理性, 不能重合、相切或者相交; 车队轨迹需要符合交通流冲击波形状特征.

(2) 信号控制约束: 车辆在信控交叉口需要遵守信号条件.

(3) 交通流参数约束: 车辆在路段中行驶时按照路段平均车速前进; 轨迹重构导致的每车道重构交通量需要遵守实测交通量数据, 否则进行合理变道或者补充车辆.

(4) 决策优先级约束: 决策的选择思路是在不违反上述三个约束的前提下, 进行优先级更高的状态转移即在车辆行驶时: 前进 > 停车; 停车时: 起步 > 停止. 这种决策规则是由现实情况决定的, 因为路段中正常行驶的车辆驾驶员受到安全、交通规则和心理的影响, 会倾向于保持原速行驶; 同样, 因为红灯、前车停车等因素停车的车辆, 也会在第一时间选择起步.

在上述几种约束的限制下, 根据现实中车辆在路段上的实际行为, 车辆的行为决策结果分别是前进、停车与起步、驶出主干道、合理变道和驶入主干道, 同时需要对轨迹矛盾进行处理.

(1) 前进

对于每一辆生成车辆, 当前方道路的时空占用矩阵显示未被占用时, 车辆以路段平均车速 v (研究路段检测器测出的路段平均点速度) 行驶.

(2) 停止与起步

当遇到红灯或者前方车辆停车情况时, 车辆选

择停车; 在信号灯转为绿色或者前方车辆起步后, 车辆选择起步.

交通流状态转移如图 4a 所示, 图中: A, J 和 C 分别表示车辆在路段行驶、在交叉口排队和在绿灯时间三种状态, v, k 和 w 分别代表车流速度、车流密度和发生交通状态转移的交通波速度. 根据图 4b, 通行车辆的停车与起步符合交通波的冲击波特征, 形成一个时空坐标轴上的三角影响区域, 影响区域内车辆进行停车与起步, 影响区域外车辆正常前进. 其中, 三角影响区域的外围即为交通波, 是由于交通状态发生转移而产生的, 波速 w 的计算方法如式(2), Q 和 k 分别为交通流量和车辆密度. 交通波分为形成波和消散波, 如图 4b 所示: 形成波 w_{AJ} 是由于为交通状态从 A 转为 J, 消散波 w_{JC} 是由于交通状态从 J 变为 C, 两种波速的计算方法分别如式(3)和式(4).

$$w = (Q_1 - Q_2) / (k_1 - k_2) \quad (2)$$

$$w_{AJ} = Q_A / (Q_A / v - 1 / s) \quad (3)$$

$$w_{JC} = -Q_C / (1 / s - 1 / h) \quad (4)$$

式中, 对于形成波 w_{AJ} : Q_A 为信号灯前区域的交通流量, $\text{veh} \cdot \text{s}^{-1}$; v 表示路段上车辆正常行驶的平均车速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; s 为停车时的平均车头空距, m ; 对于消

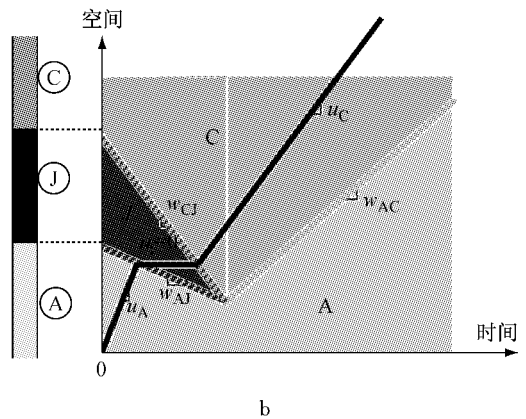
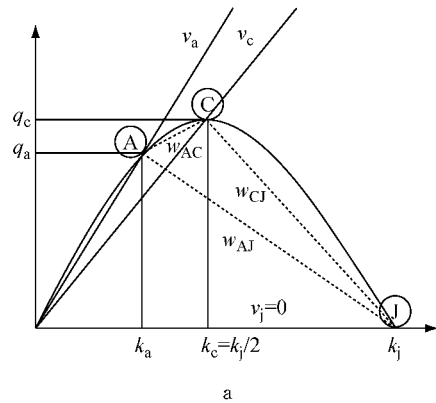


图 4 信控交叉口交通状态转移与交通波影响区域示意图
Fig.4 Signalized intersection traffic state transfer and traffic wave affected area schematic diagram

散波 w_{JC} ; Q_C 为驶离信号灯的交通流量, $veh \cdot s^{-1}$; h 为起步时的平均车头时距, s .

(3) 驶出主干道

根据车辆交叉口停车线前所处车道的功能, 进行行为决策, 决定其是否驶出研究路段. ①若处于直行车道, 则继续驶入下一路段; ②若处于左转或者右转车道, 则驶出研究路段, 进入相交路段.

(4) 合理变道

生成的车辆根据车道功能, 经过交叉口进入下一路段. 在 D_1 下游的各检测器 ($D_2 \sim D_n$) 处检测车道 i 每个分时段 T_n 的现状重构交通量 q_{r-i} , 与检测器测出的车道 i 实际交通量 q_i 进行对比, 如图 5a 所示.

如果 $q_{r-i} > q_i$, 则 $q_{out-i} = q_{r-i} - q_i$ (q_{r-i} 为当前状态下车道 i 的重构交通量) 车辆从车道 i 向两侧的相邻车道进行合理变道, 变道结果如图 5b 所示.

(5) 驶入主干道

上文如果 $q_{r-i} < q_i$, 则说明该车道的通过的车辆数小于实际交通量, 需要在车道 i 中该检测器上游的交叉口位置补充相应的车辆 $q_{in-i} = q_i - q_{r-i}$. 这些车辆相从相交路段驶入主干道, 且每辆车的进入并到达检测器位置的时刻为该分时段 T_n 内的随机时刻 t_{n-j} , 补充过程如图 5c 所示.

(6) 车辆轨迹矛盾处理

当车辆在进行行为决策时, 若在符合所有约束且不进行变道的基础上, 车辆轨迹无法继续延伸, 即必然与其他轨迹相交, 从而产生轨迹矛盾. 产生这一

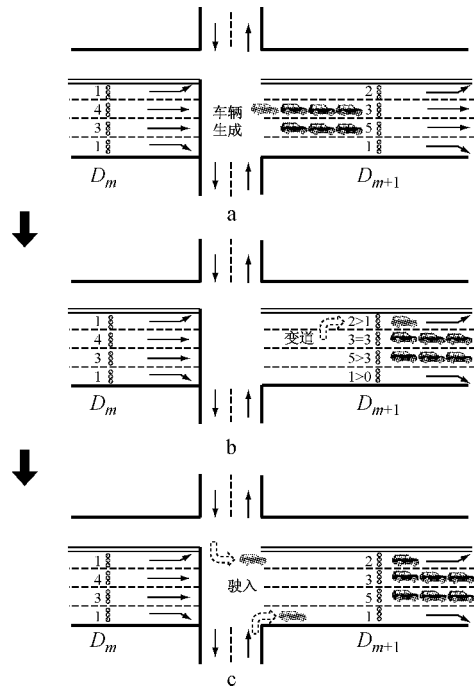


图 5 判断转入车辆数
Fig.5 Estimation of turn-in vehicles

矛盾的原因是本算法并非完全按照车辆驶入顺序生成车辆, 某些路段车辆驶入与驶出的先后顺序有少量变化.

解决轨迹矛盾的步骤如图 6 所示: ①判断出现相交的相关轨迹; ②将相交轨迹的交点之后的错误部分删除; ③按照轨迹的时间次序重构被删除的轨迹, 直至没有轨迹矛盾存在.

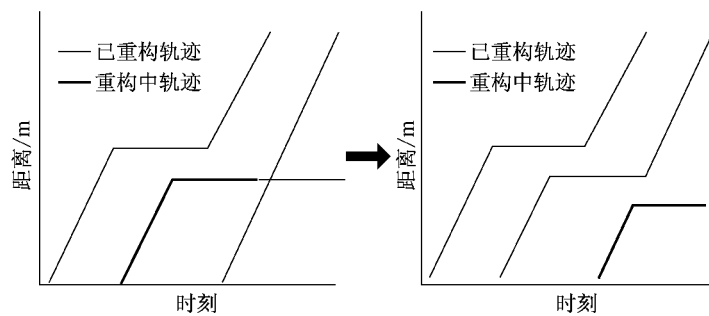


图 6 轨迹矛盾处理示意图
Fig.6 Trajectory contradictory process schematic diagram

1.2.4 判断轨迹重构是否完毕

当车辆处于以下 3 种状态时会认为此车的轨迹已重构完毕: ①重构时间超过了所研究的时间范围 (针对任意车辆); ②车辆位于转向车道且已通过交叉口停车线 (针对转弯车辆); ③车辆位于直行车道且驶出所研究的路段 (针对直行车辆).

该算法的特点在于在我国的不包含高质量浮动

车的数据源条件下, 利用数学方法 (动态规划法以及对分时统计流量的处理) 和交通工程的分析方法 (交通流相关理论、车辆跟驰模型) 的融合, 通过各种约束条件重构出车辆轨迹, 并基于路段的总体状态对车辆的瞬时行为进行决策, 使得重构轨迹更符合实际状况, 提高轨迹重构准确性.

2 数据采集与处理

2.1 地点描述

选取青岛市市南区香港中路山东路到福州南路

这一路段作为研究路段. 研究路段全长 1.38 km, 为双向 8 车道, 包含 5 个信控交叉口, 分别为: 山东路路口、新浦路路口、南京路路口、云霄路路口和福州路路口. 路段几何形式、信号灯、固定微波检测器位置如图 7 所示.

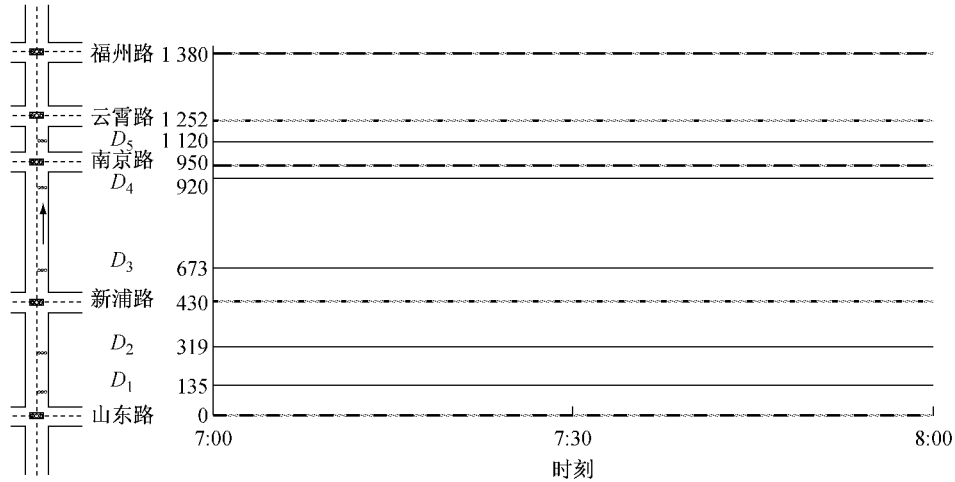


图 7 青岛市香港中路(山东路至福州南路)路段示意图

Fig.7 Hong Kong Road Qingdao (Shandong Road, Fuzhou Road) section schematic

2.2 数据采集

选取 2014 年 11 月 1 日早高峰 7:00~8:00 为研究时段, 选取香港中路自山东路交叉口到福州路交叉口自西向东方向的路段为研究路段.

采集的数据包括交通信号数据、固定微波检测器数据和视频检测器数据. 信号灯配时方案为 excel 表格(.xlsx)形式的分时间段数据; 视频数据是各交叉口的监控摄像, 格式为海康威视监控 DVR 视频文件(.h264), 共有 1753 份记录数据, 总时长 292.17 h, 提取其中 336GB 的视频数据; 微波检测器数据为数据库形式(.sql), 包括 465 719 条记录, 提取其中 660 条微波检测器数据, 数据内容为研究时间段内按分钟统计的各检测器处检测出的流量(veh·min⁻¹)、平均速度(km·h⁻¹)和占有率.

中路名右侧的数字和检测器右侧的数字分别表示出交叉口和固定微波检测器相对于研究起点的距离. 对路段的各截面交通量进行提取的方法是融合处理视频数据和微波检测器数据: 首先利用视频数据统计路段进出口每分钟的交通量(即山东路交叉口的驶入流量以及福州路交叉口的驶出流量); 并提取微波检测器数据库得到微波检测器每分钟的交通量. 将两类数据相结合, 可以得到香港中路的山东路至福州路之间 5 个路段截面研究时段内的分时流量.

对机动车平均速度、停车与起步时间等车辆参数进行提取. 车辆停车与起步定义如图 8 所示, 根据视频数据读取车辆参数, 样本数为 30 辆. 经过统计得到研究路段机动车平均速度为 11.32 m·s⁻¹, 平均停车时间为 4.1 s, 起步时间为 2.0 s.

利用视频数据对交通信号灯进行精确标定, 图 7

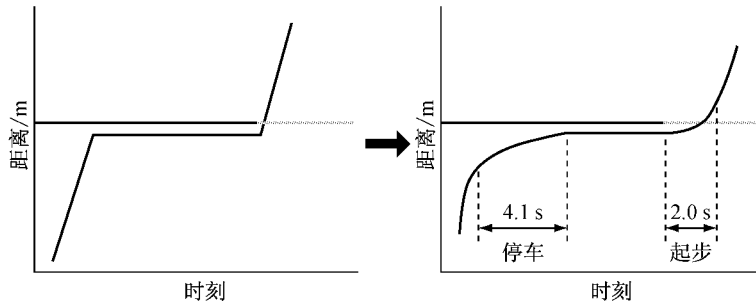


图 8 车辆停车、起步定义示意图

Fig.8 Vehicle parking, starting define schematic

2.3 数据处理

经过对微波检测器数据的数据质量分析,发现微波检测器所得的交通量略低于通过视频统计得到的交通量,这是由于固定微波检测器存在一定得误差,准确率为 90%~95%,采用阈值法对交通流量和速度的原始数据进行清洗。

3 方法验证

图 9a,9b 分别为研究时段中研究路段 4 根车道中两根直行车道的车辆轨迹重构图。以图 9b 即研究路段左第 3 根车道(直行车道)为例,图中可以看出较为明显的交通冲击波的特征;并非所有轨迹都是完整连续的,这是因为存在车辆变道以及路段中交叉口车辆转入或者转出的行为。

行程时间反映了车辆在研究路段行驶的总快慢程度,能够一定程度上反映该车辆在研究路段的行驶特性,当车辆行驶轨迹接近时,则行程时间接近,所以行程时间可以作为衡量轨迹相似性的一种参数。为了验证该算法的效果,采用对比实际行程时间与轨迹重构行程时间作为衡量算法有效性的方法。针对行驶完全程的车辆,采用模拟 AVI 的方式,利用人工统计共获得 25 组观察行程时间;利用重构轨迹结果共获得在 364 组轨迹重构行程时间。

用均方根误差(R_{RMSE})即标准误差用来衡量观测值同真值之间的偏差如下:

$$R_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}} \quad (5)$$

式中, d_i 为行程时间测量值与真值的差值。

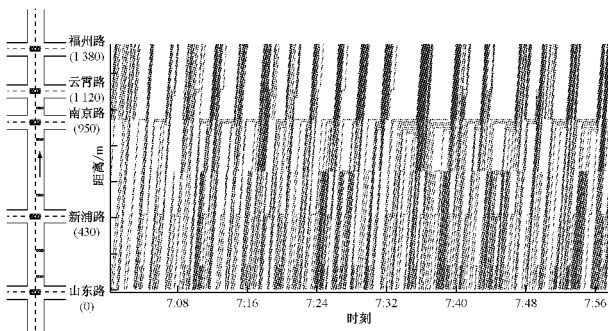
从所有样本中对应选取了 20 组数据计算均方根误差,其中重构轨迹行程时间作为测量值,观测行程时间作为真值,得到 $R_{RMSE} = 23.05$ s。存在 23.05 s 的均方根误差的主要原因为:①重构数据是基于大量车辆数据所得的平均数据,而观测数据仅有少量车辆,存在一定偶然性。②观测数据的读取存在一定误差,具体为停车起步时间判断的误差、车辆通过时间的读取误差等。③轨迹重构中的车辆模型均为小车,实际交通流中有一定比例的大车。

表 1 为该算法与传统算法在有无高质量浮动车数据下的比较。可以看出,在传统算法含高质量浮动车数据时,该算法的精确度与传统算法较为接近;当传统算法不含有高质量浮动车数据时,该算法的精确度远远高于传统算法。这说明该研究算法适合于我国缺少高质量浮动车数据的数据源条件,具有很高的应用价值。

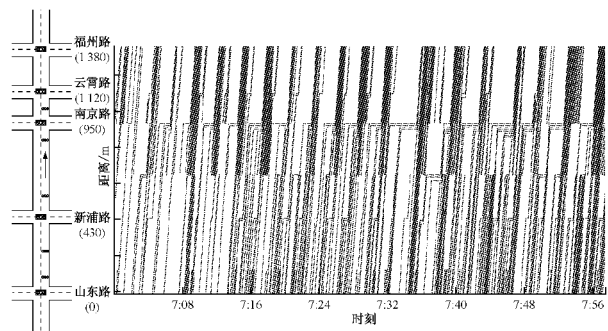
表 1 本文算法与 Mehran 等^[18]比较

Tab. 1 Comparison of the proposed method with the previous method developed by Mehran *et al*^[18]

	平均行程时间 T_{mean}/s	$R_{RMSE}/$ s	$R_{RMSE}/$ T_{mean}
Mehran 等算法(含大量浮动车)	328.2	27.3	8.32%
Mehran 等算法(不含浮动车)	328.2	181	55.15%
本文算法(不含浮动车)	224.2	23	10.26%



a 左第 2 根车道(直行车道)



b 左第 3 根车道(直行车道)

图 9 研究路段重构轨迹效果

Fig. 9 Trajectory reconstruction renderings

4 结论与展望

针对我国的数据源条件,在缺少高质量浮动车数据的情况下,通过融合定点检测器数据和交通信号数据,开发了一种城市主干道车辆轨迹重构方法,并验证了其准确性。该方法的优点在于所需要的数据源符合我国现有的数据条件,尤其是不依赖于高质量的浮动车数据(即浮动车的占有率较高且上传频率较高),具有实际应用价值;适用于多车道、大量出入车辆干扰的情况,具有更强的应用性;利用微波检测器的实时数据,结合实时交通信号数据,使得重构的轨迹更符合实时的实际情况。该车辆重构轨迹,能够适用于环境评估、信号控制协调、行程时间估计、拥堵状态预警等多种用途。

研究仍存在部分问题:未考虑拥挤状态下,当排队长度接近或者到达定点检测器位置时检测器数据不能反映实际的情况.对于车辆变道和交叉口处补充车辆的处理还比较简单,可采用概率估计推断等方法提高精度.主线采用统一自由流车速,将来可将主线自由流车速处理为一个分布;目前采用的评价指标为行程时间,并不能深刻反映出算法的准确性,建议采用真实的车辆轨迹(例如浮动车轨迹或者通过视频提取的真实轨迹等)与重构轨迹进行对比来评价算法.同时,如何利用相交道路或者路段上游的流量、交通信号情况优化下游路段的轨迹重构结果以及将研究范围从主干道路段扩大到城市干线网络也是未来研究方向.

参考文献:

- [1] Daganzo C F. Fundamentals of transportation and traffic operations [M]. Oxford: Pergamon, 1997.
- [2] Van Zuylen H, Willumsen L G. The most likely trip matrix estimated from traffic counts [J]. *Transportation Research Part B*, 1980, 14(3): 281.
- [3] Oliveira-Neto F M, Han L D, Jeong M K. Online license plate matching procedures using license-plate recognition machines and new weighted edit distance [J]. *Transportation Research Part C*, 2012, 21C(1): 306.
- [4] Dixon M P, Rilett L R. Population origin-destination estimation using automatic vehicle identification and volume data [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2005, 131(2): 75.
- [5] Kwon J, Varaiya P. Real-time estimation of origin-destination matrices with partial trajectories from electronic toll collection tag data [J]. *Transportation Research Record*, 2005, 14(1923): 119.
- [6] Jaume B, Lidin M, Laura M, *et al.* Travel time forecasting and dynamic origin-destination estimation for freeways based on bluetooth traffic monitoring [J]. *Transportation Research Record*, 2010, 3123: 19.
- [7] 魏静. 基于视频牌照检测的动态 OD 矩阵获取方法研究 [D]. 上海: 同济大学, 2008.
WEI Jing. Research of dynamic OD matrix estimation based on video vehicle license plate recognition [D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [8] 孙剑, 冯羽. 自动识别环境下车辆的出行矩阵估计新方法 [J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2011, 39(12): 1800.
- SUN Jian, FENG Yu. A new method of OD estimation based on automatic vehicle identification data [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2011, 39(12): 1800.
- [9] 王龙飞. 基于车牌照的车辆出行轨迹分析方法与实践研究 [D]. 西安: 长安大学, 2011.
WANG Longfei. Analysis and practice of vehicle travel trajectory based on vehicle license plate [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [10] Teknomo K, Fernandez, P. A theoretical foundation for the relationship between generalized origin-destination matrix and flow matrix based on ordinal graph trajectories [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2012, 48(6): 608.
- [11] MEI Yu, TANG Keshuang, LI Keping. Real-time identification of probe vehicle trajectories in the mixed road network [C]// *Proceedings of the 93th Annual Meeting of Transportation Research Board*. Washington D C: TRB, 2014: 14-2790.
- [12] Newell G F. A simplified theory on kinematic wave in highway traffic, part I: general theory [J]. *Transportation Research Part B*, 1993a, 27(4): 281.
- [13] Newell G F. A simplified theory on kinematic wave in highway traffic, part II: queuing at freeway bottlenecks [J]. *Transportation Research Part B*, 1993B, 27(4): 289.
- [14] Newell G F. A simplified theory on kinematic wave in highway traffic, part III: multi-destination flows [J]. *Transportation Research Part B*, 1993c, 27(4): 305.
- [15] Daganzo C F. A variational formulation of kinematic waves: basic theory and complex boundary conditions [J]. *Transportation Research Part B*, 2005A, 39(2): 187.
- [16] Daganzo C F. A variational formulation of kinematic waves: solution methods [J]. *Transportation Research Part B*, 2005b, 39(10): 934.
- [17] Mehran B, Kuwahara M, Naznin F. Implementing kinematic wave theory to reconstruct vehicle trajectories from fixed and probe sensor data [J]. *Transportation Research Part C*, 2011, 20(1): 144.
- [18] Mehran B, Kuwahara M. Fusion of probe and fixed sensor data for short-term traffic prediction in urban signalized arterials [J]. *International Journal of Urban Sciences*, 2013, 17(2): 163.
- [19] Sun Z, Ban X. Vehicle trajectory reconstruction for signalized intersections using mobile traffic sensors [J]. *Transportation Research Part C*, 2013, 36(11): 268.
- [20] Sun Z, Hao P, Ban X J, *et al.* Trajectory-based vehicle energy/emissions estimation for signalized arterials using mobile sensing data [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2015, 34(34): 27.