

基于 ACP 方法的平行手机信令数据分析系统

王迎春^{1,2} 韩双双^{1,2} 胡成云^{1,2,3} 宋瑞琦^{1,2,3} 要婷婷^{1,2,3} 曹东璞^{2,4} 王飞跃^{1,5}

摘要 随着交通拥堵和公共安全问题的日趋严重,传统方案在道路监测和区域监测方面不仅成本高,准确性和可靠性也无法保证,因此无法给用户提供更完整综合全面的出行路线规划及旅游目的地选择等方面的相关指导.本文提出基于 ACP 方法的平行手机信令数据分析系统,将解决上述问题.本文主要基于 ACP 方法,包括人工社会、计算实验和平行执行,构建基于手机信令的人工监控场景和实际监控场景.实际监控场景和人工监控场景平行执行,人工监控场景用来模拟和实验复杂的实际监控场景,通过大量计算实验,进行各种模型的训练与评估,通过平行执行不断地更新和优化,实时指导实际监控场景;同时实际监控场景将结果反馈给人工监控场景,对人工监控场景模型进行修正.通过实际监控场景和人工监控场景之间的不断优化,可有效提高手机信令系统的实时性、准确性和可靠性,并最终满足不断增长的实时用户需求,保证用户出行的舒适性及安全性.

关键词 平行方法,手机信令,道路监控,区域人流监控

引用格式 王迎春,韩双双,胡成云,宋瑞琦,要婷婷,曹东璞,王飞跃.基于 ACP 方法的平行手机信令数据分析系统.自动化学报,2019,45(5):866-876

DOI 10.16383/j.aas.2018.c170156

Mobile Phone Signaling Data Analysis System Based on ACP Approach

WANG Ying-Chun^{1,2} HAN Shuang-Shuang^{1,2} HU Cheng-Yun^{1,2,3} SONG Rui-Qi^{1,2,3}
YAO Ting-Ting^{1,2,3} CAO Dong-Pu^{2,4} WANG Fei-Yue^{1,5}

Abstract The issue of traffic congestion and public security is becoming more and more important. Traditional solutions are not only high cost in terms of road monitoring and regional monitoring, but also the accuracy and reliability can not be guaranteed. Thus, the traditional solutions can not provide users comprehensive guidance about the travel route planning and travel destination selection and other related guidance. This paper proposes a mobile phone signaling data analysis system based on the ACP approach to solve the aforementioned problems. The ACP approach includes artificial society, computational experiments and parallel execution which build artificial monitoring scene and actual monitoring scene based on mobile phone signaling. The actual monitoring scene and artificial monitoring scene are executed in parallel. Artificial monitoring scene is used to simulate and test the complex actual monitoring scene. Through a large number of computational experiments, various models are trained and evaluated; Artificial monitoring scene constantly updates, optimizes and guides the actual monitoring scene through parallel execution; The actual monitoring scene will feedback the results to the artificial monitoring scene, thus artificial monitoring scene model is continuously amended. The continuous optimization between the actual monitoring scene and artificial monitoring scene can effectively improve the real-time efficiency, accuracy and reliability of the mobile phone signaling system. The proposed system would meet the requirements of ever-increasing real-time, and ensure the comfort and safety for the travel of the users.

Key words ACP method, mobile phone signaling, road condition monitoring, regional flow monitoring

Citation Wang Ying-Chun, Han Shuang-Shuang, Hu Cheng-Yun, Song Rui-Qi, Yao Ting-Ting, Cao Dong-Pu, Wang Fei-Yue. Mobile phone signaling data analysis system based on ACP approach. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(5): 866-876

随着我国社会经济快速发展,实时掌握城市交

收稿日期 2017-03-23 录用日期 2017-11-06
Manuscript received March 23, 2017; accepted November 6, 2017

国家自然科学基金(61501461, 71232006, 61533019)资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61501461, 71232006, 61533019)

本文责任编辑 张敏灵

Recommended by Associate Editor ZHANG Min-Ling

1. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室 北京 100190 中国 2. 青岛智能产业技术研究院 青岛 266000 中国 3. 青岛慧拓智能机器有限公司 青岛 266000 中国 4. 英国克兰菲尔德大学驾驶员认知与自动驾驶实验室 克兰菲尔德 MK43 0AL 英国 5. 国防科学技术大学军事计算实验与平行系统技术研究中心 长沙 410073 中

国

1. The State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China 2. Qingdao Academy of Intelligent Industries, Qingdao 266000, China 3. Qingdao Huituo Intelligent Machine Company, Qingdao 266000, China 4. Driver Cognition and Automated Driving Laboratory, Cranfield University, Cranfield MK43 0AL, UK 5. Research Center for Computational Experiments and Parallel Systems Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

交通枢纽、各大旅游景点的人流量状况、道路交通状态、城市人口动态时空分布等对于保障出行舒适、安全具有重大意义,也成为当下众多研究的热点。

随着我国城市人口及城市交通流的增加,城市的交通问题成为焦点问题,城市道路交通拥挤堵塞问题已成为制约经济发展、降低人民生活质量、削弱经济活力的瓶颈之一;同时实时掌握城市交通枢纽、各大旅游景点的人流量状况,为城市交通规划、旅游景点人力资源配备提供数据支撑已越来越受到相关部门重视;通过居民活动的时空规律来反应城市的空间结构,为城市的公共中心体系规划、功能分区进行检测和评估的研究也成为众多研究的热点。

而针对城市交通枢纽、各大旅游景点的人流量状况、道路交通状态、城市人口动态时空分布等问题,手机信令因其优势得到了越来越多的关注。手机信令数据覆盖了每一个手机持有者,由于其自身覆盖范围广、数据稳定可靠、样本量大、建设成本低、部署方便、实时动态等特点及优势,成为本研究的重要数据来源。

1 基于手机信令数据应用的发展

1.1 道路监控

国内各城市采用的公路状态监控的方法可以分为固定式和移动式监控两大类^[1]。固定式主要包括地感线圈^[2]、超声波、红外线、测速摄像头、定点上报(固定的地方有专门的上报人员或者设备来实时上报路况)等,移动式方法包括浮动车技术、移动终端等。但是固定式的安装、运营和维护的费用高,另外,对没有安装的道路无法获得交通流量信息。现阶段最常用的方式是采用GPS浮动车进行交通流的监控^[3-4],浮动车主要是出租车公司提供,浮动车技术较固定式采集方法成本低、覆盖大、故障率小,可以实现对交通信息全天候、实时采集处理。其采用GPS定位技术、无线通信技术和信息处理技术,实现对浮动车的旅行时间、车载终端ID、车辆车牌号、经纬度与方向角、瞬时速度等交通数据的采集。数据中心对数据汇总后,应用地图匹配、路径推测等相关的模型和算法进行处理,与城市公路在时间维度、空间维度上互相关联,最终生成反映实时公路拥堵情况的交通信息,对外发布。浮动车信息系统由实时浮动车GPS信息采集与接入、GPS信息融合与处理和浮动车交通信息发布三部分组成。

1.2 重点区域人流监控

对于重点区域人流监控,尤其是景区和火车站等公共区域,在节假日以及黄金周期间,很容易发生景区人数爆满等情况,轻者游客无法享受到应有的服务,重者发生踩踏、塌陷等安全事故。因此,景区、

车站等公共区域的人流监控非常重要。传统的公共区域人流监控系统采用的方法主要包括:1) 基于视频的人流监控系统^[5-6],该方案主要是利用监控点的视频数据进行行人检测及统计来进行人工分流等决策,系统主要设备包括:主控机房电视墙、分布在不同监控点的视频采集设备、视频处理服务器以及辅助的电路设备等;2) 分流门,即通过设置迂回的引导路线来延迟进入公共区域的时间,需要设置路障、栅栏等材料来实现;3) 入口闸机统计人数^[7],该方案主要是基于位于入口处和出口处的计数器感应器返回的数据来决策是否限制人流,系统主要设备包括:区域入口和出口处的计数器、传感器、继电器和信号传输设备、中央处理器以及显示人流分布的显示屏、电路设备等。

1.3 当前系统的不足

1) 主要公路状态监控—浮动车技术

虽然浮动车技术得到了较为广泛的应用,但也存在相应的局限性^[8]。其主要的问题在于由于车辆数目或者类型较少,容易造成上报数据不足,进而影响公路状况检测的准确性和可靠性。例如,在某个时间段内,仅有一辆或少数几辆浮动车提供了运行特征数据,则据此估计的交通流状态将会有较低的可靠性。相反,如果在某个时间段内能够获得全部车辆的运行特征数据,则估计出的交通流状态具有较高的可靠性。这种不稳定性会大大降低检测系统的准确性与鲁棒性。

2) 重点区域人流监控

目前广泛使用的区域人流监控方法存在以下问题:1) 成本高:购买、安装以及维护视频设备等需要花费大量的人力和财力;2) 操作复杂:为了统计实时人流量,需要进行图像存储、过滤、处理等操作,需要配备专业人士来执行;3) 覆盖面有限:基于此方法,只能统计当前公共区域内的人数,不能反映附近相关公路的拥堵程度,也不能直观显示城市内其他区域的人口密度,不利于人们出行决策;4) 受众少:当前公共区域的监控设施,比如景区,往往只有景区经营者才能看到,景区内游客以及准备出游的游客无法获取相关信息。

1.4 平行手机信令数据分析系统

随着我国互联网与移动通信技术的发展,出行人群中手机持有者的数量日益上升,这使研究人员意识到手机信令数据可以作为出行分析的数据来源。利用手机信令数据进行人流移动分析、实时人流量统计以及居民出行时空分布等^[9-11]。同时国内外智能交通领域提出了手机探测技术^[12-17],用来监控道路交通状况,手机信令数据具有覆盖范围广、数据稳定可靠、样本量大、建设成本低等特点^[14-16],使得

基于手机信令数据的道路交通信息提取方法具有非常广泛的应用前景. 利用手机信令数据在人流移动分析、实时人流量统计、居民出行时空分布及交通领域取得了许多成果. 文献 [10] 基于重庆联通手机信令数据, 分析重庆主城区与区县及各区县之间的人流交换, 定量地评价城市间联系度及城市区位优势, 可作为优化城镇体系结构、调整区域发展战略, 规划布局铁路与公路网的依据. 文献 [18] 将手机信令应用于交通流量监测以及出行信息服务中, 其系统可在全国路网监测系统建设中发挥很大的作用. 文献 [19] 通过对长时间的手机信令数据进行跟踪, 研究手机用户活动轨迹的识别方法, 分析手机用户有规律的空间分布和出行特征, 并以上海临空经济园区和徐家汇地区为例, 介绍在特定区域内基于手机信令数据调查人员出行特征的技术方法和主要成果. 国内研究的应用多集中在人流量统计、居民出行时空分布领域, 实时道路状态监控方面的应用因精度等问题还未得到广泛应用.

综上, 目前道路状态与重点区域人流的传统监控系统仍然存在很多亟需解决的问题. 此外, 虽然手机信令数据已经得到了研究人员的关注, 但因其数据量大, 精度没有 GPS 数据精准无法将道路状态监控以及人流分析实时结合在一起等原因, 无法为用户提供一整套的出行路线规划、旅游目的地选择等综合而全面的指导. 本文针对如何基于手机信令数据对道路状态、区域人流等进行实时的监控, 并同时可对系统进行优化和反馈, 达到实时监控、实时反馈、实时调度的问题. 以为用户的交通出行、旅游景区的选择以及交管部门公路交通调度与管控、公路建设及改造提供相应的决策信息为目标. 引入平行系统^[20-22], 结合平行理论, 提出一种基于手机信令数据的分析系统, 通过相应的人工系统、计算实验、平行执行, 可以有效地解决现阶段利用手机信令数据进行人流分析和道路状态等存在的问题.

2 平行手机信令数据分析系统

平行系统在人流、交通状态监控中的应用包括实际监控场景和人工监控场景, 以平行系统理论为指导, 建立基于手机信令数据的重点区域人流和道路监控系统的人工监控场景, 通过计算实验方法不断地优化、指导和管理实际系统, 对人流和道路状态达到实时监控、实时反馈、实时调度.

2.1 基于 ACP 方法的平行系统

平行系统是指由某一个自然的现实系统和对应的一个或多个虚拟或理想的人工系统所组成的共同系统^[20-22]. 当前的人工系统可能更偏于数学模型、计算机等实验的形式上^[23], 当随着系统越来越复杂,

数据越来越多, 人工系统就无法满足复杂多变的系统, 此时应充分发挥平行系统中人工系统的作用, 使其成为实际系统的一种可能代替形式或另一种可能的实现方式. 从而使人工系统在平行系统中发挥其真正的作用.

基于 ACP 方法的平行系统是实际系统与人工系统并行互动的复杂系统. 人工监控系统通过计算实验与评估做出的决策方案与实际系统状态相比较, 评估其之间的误差, 对人工监控系统进行滚动修正, 逼近真实系统. 两个系统之间, 互相支撑, 滚动优化, 良性循环. ACP 方法是平行系统的基础. 所谓 ACP, 是指人工社会 (Artificial societies)、计算实验 (Computational experiments)、平行执行 (Parallel execution) 之间的有机组合^[22-25].

2.2 基于 ACP 方法的平行手机信令数据分析系统

本文提出基于 ACP 方法的平行手机信令数据分析系统, 是以平行理论为指导, 基于手机信令数据将人流分析以及道路状态监控有机地结合在一起, 为用户的出行以及交管部门的管控提供指导和建议. 图 1 是基于 ACP 方法的平行手机信令数据分析系统的框架图, 主要包括人工监控场景和实际监控场景. 根据基于 ACP 方法的平行系统内容^[21, 24, 26-27], 人工监控场景主要是被用来进行计算实验以及作为一个学习和训练分析及管理复杂系统的中心. 作为计算实验时, 分析了解各种不同的系统的行为和反应, 并对不同的解决方案的效果进行评估, 作为选择和支持分析与管理决策的依据. 作为学习和训练分析及管理复杂系统的中心时, 通过将实际与人工监控场景利用网络^[28-29] 连接组合, 可以使分析与管理实际复杂系统的有关人员迅速地掌握系统的各种状况以及对应的行动. 同时, 人工监控场景的分析与管理系统也可以作为实际监控场景的备用系统, 增加其运行的可靠性和应变能力.

人工监控场景试图尽可能地模拟实际监控场景, 对其行为进行预估, 从而为寻找对实际监控场景有效的解决方案或当前方案的改进提供依据. 进一步, 通过观察实际监控场景与人工监控场景评估的状态之间的不同, 产生误差反馈信号, 对人工监控场景的评估方式或参数进行修正, 减少差别, 并开始分析新一轮的优化和评估, 达到学习和培训的目的.

基于 ACP 方法的平行手机信令数据分析系统, 主要分如下几步: 1) 在实际手机信令人流及交通监控分析系统中, 对交通流相关信息进行准确的采集与预处理. 采集到的用户手机信令数据及路网信息数据上传到云端服务器, 通过数据预处理, 为系统提供充足有效的数据保证. 2) 参考文献 [30] 框架, 采用机器学习、统计学习、神经网络以及深度学习等

算法结合手机信令数据特点, 设计道路监控预测方法、区域人流监控方法以及时空动态分布方法构建实时公路交通分析模型. 3) 采用云计算, 大数据等技术手段, 对上述所有模型进行具体实施. 4) 在人工监控场景与实际监控场景的平行执行过程中, 依据计算实验统计分析的结果, 建立展示系统, 为用户提供整套的出行指导.

2.2.1 人工监控场景

基于 ACP 方法的平行手机信令数据分析系统的人工监控场景主要分为数据层、数据存储层、算法层以及应用层, 其框架如图 2 所示.

1) 数据层

数据层的数据主要有手机信令数据、路网信息、人工系统生成的数据、以及社会信号等数据, 手机信

令数据如表 1 所示: 分为标识号、时间戳、位置区编号、经度、纬度、事件类型、号码归属地、基站类型. 其中经纬度数据只是用户所在基站的位置信息; 路网数据主要依托相关部门信息检测平台, 采集公路通行信息、气象信息、施工作业信息、交通事故信息、公路、公路桥梁等公路设施严重受损信息以及其他突发性事件等信息.

2) 数据存储层

数据存储层存储的数据主要包含数据采集层的手机信令数据、路网信息社会信号等数据, 基础数据以及结果数据. 基础数据包含道路与基站的标定数据、道路 GPS 数据、归属地等数据; 结果数据包含区域人流密度数据、归属地人员统计数据、道路速度数据等.

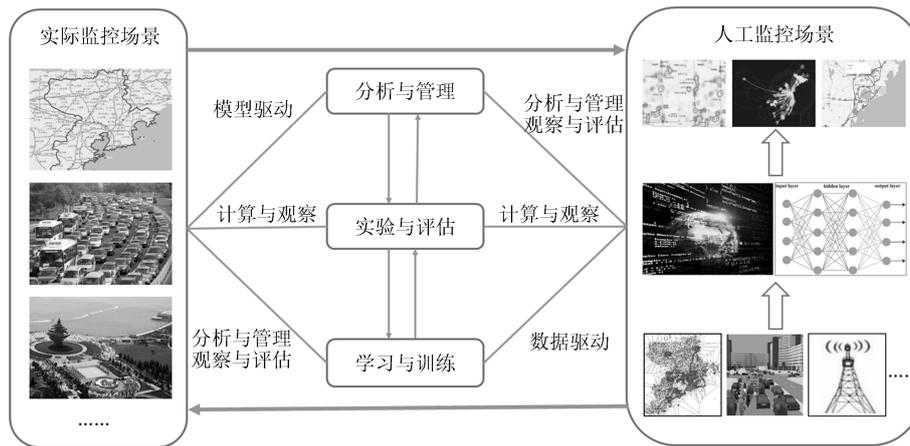


图 1 基于 ACP 方法的平行手机信令数据分析系统的框架

Fig. 1 The framework of mobile phone signaling data analysis system based on ACP approach

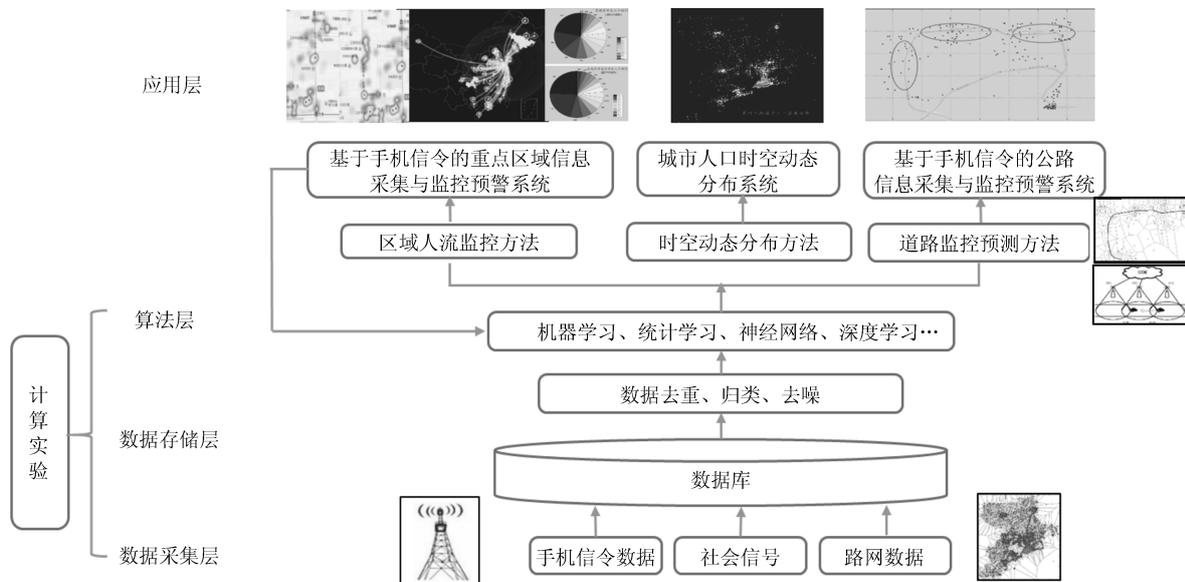


图 2 人工监控场景框架

Fig. 2 The framework of manual monitoring scene

3) 算法层

机器学习、统计学习、神经网络及深度学习^[31]等技术为基于 ACP 方法的平行手机信令数据分析系统提供基础支撑。设计道路监控预测方法、区域人流监控方法以及时空动态分布方法构建实时公路交通分析和预测模型、重点区域人流覆盖统计模型以及重点区域时空动态分布模型。以实时公路交通分析和预测模型为例,首先获取所需的手机信令数据、路网信息以及气象等网上的各种信息,手机信令数据及路网信息由可以有其他方提供,网上的数据采用爬虫算法进行抓取。通过对数据预处理后,采用泰森多边形的算法及最长公共子序列算法对用户手机信令轨迹与道路匹配,计算用户的行驶速度。利用历史数据采用神经网络建立速度预测模型,对未来速度进行预测,同时对可能出现的拥堵进行预警处理,通知相关部门进行交通疏导等工作,缓解拥堵情况。系统针对出行路线情况利用 A* (A-star) 算法进行路径规划,同时保存路径的规划记录,当有新的用户再次检索相同的路径时,可以提供快速的检索能力,从而保证系统能够实时、有效地给出用户所需的出行路线。

表 1 手机信令数据格式

Table 1 The structure of mobile phone signaling data

字段名称	描述	类型
标识号	唯一标识, 随机生成	TEXT, 加密
TimeStamp	时间戳	UINT32 类型数字
LAC	位置区编号	UINT32 类型数字
E	经度	UINT32 类型数字
N	纬度	UINT32 类型数字
EventID	事件类型	UINT8 类型数字
号码归属地编码	号码归属地信息 (省 + 市) 字符串数据类型 (省 - 市)	
Type	基站类型 0, 1	UINT32 类型数字

4) 应用层

在人工监控场景与实际监控场景的平行执行过程中,依据计算实验统计分析的结果,建立展示系统。包括基于手机信令的公路监控与预警系统、基于手机信令的重点区域信息监控与预警系统以及城市人口时空动态分布系统。这些系统为用户的交通出行、旅游景区的选择以及交管部门公路交通调度与管控、公路建设及改造提供相应的决策信息。信息发布方式主要是基于 Web 页面、手机 App、车载设备、广播等。

2.2.2 计算实验方法

基于 ACP 方法的平行手机信令数据分析系统的计算方法主要分为如下三个。

区域人流监控方法。首先确定重点区域的基站范围,其基站能覆盖整个重点区域,利用统计算法,统计重点区域的人口密度,进出人数量以及归属地等信息。系统同时采用 BP 神经网络^[32]对未来状态进行预测,未来 20 min 人流可能超过某个阈值,进行预警处理。

时空动态分布方法。时空动态分布主要采用统计的方法统计某一时间段内一个城市的人口密度的分布,主要分两步:1) 计算定义单元内所有用户的连接数量;2) 核密度估计方法计算密度。从而用来分析城市商业区和住宅区等结构。同时可以监测一个城市人流的走向。

道路监控预测方法。道路状态预测分以下几步:

1) 离线匹配道路与基站;用泰森多边形描述每个基站的覆盖范围,其道路周围的基站如图 3 所示,从图 3 中可以看出覆盖道路的基站点,将覆盖道路上的基站点按照顺序提取出来作为道路周围基站,这样一条道路和一个基站序列已经匹配,且基站信号范围完全可以覆盖道路。意味着每条道路都可由其周围有序的基站序列表示,暂定义某一道路的基站序列为

$$Roadpoint = \{(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)\}$$

2) 提取用户行驶的基站路径。首先根据道路范围提取可能经过的用户的所有基站数据,然后提取每个用户的行驶基站路径(同时再次进行去重,去噪等预处理)。定义用户经历的基站路径

$$Usertrajectory = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$$

3) 用户行驶的基站与道路基站匹配。针对定义每个道路的 link,用户行驶的基站路径与道路 link 的基站采用最长公共子序列的方法进行匹配。以 link4 为例,如表 2 所示。可以看出在道路的第 4 个 link 上有 4 个基站与用户的行驶的基站匹配。计算 4 个基站点的距离以及用户经过的时间,计算出此用户经过 link4 的速度。每个道路 link 的速度等于匹配到此 link 中所有用户的平均速度。某个 link 速度的计算公式如下:

$$v_{link-j} = \frac{\sum v_i}{N}, v_i = \frac{\Delta s}{\Delta t}, i \in u_j$$

其中, u_j 代表经过 $link-j$ 的所有用户, N 是属于经过 $link-j$ 的某时间段所有用户的数量。

4) 利用历史速度采用 BP 神经网络的方法,预测未来 20 min 中内道路的状态,若存在交通严重拥堵,系统进行预警。

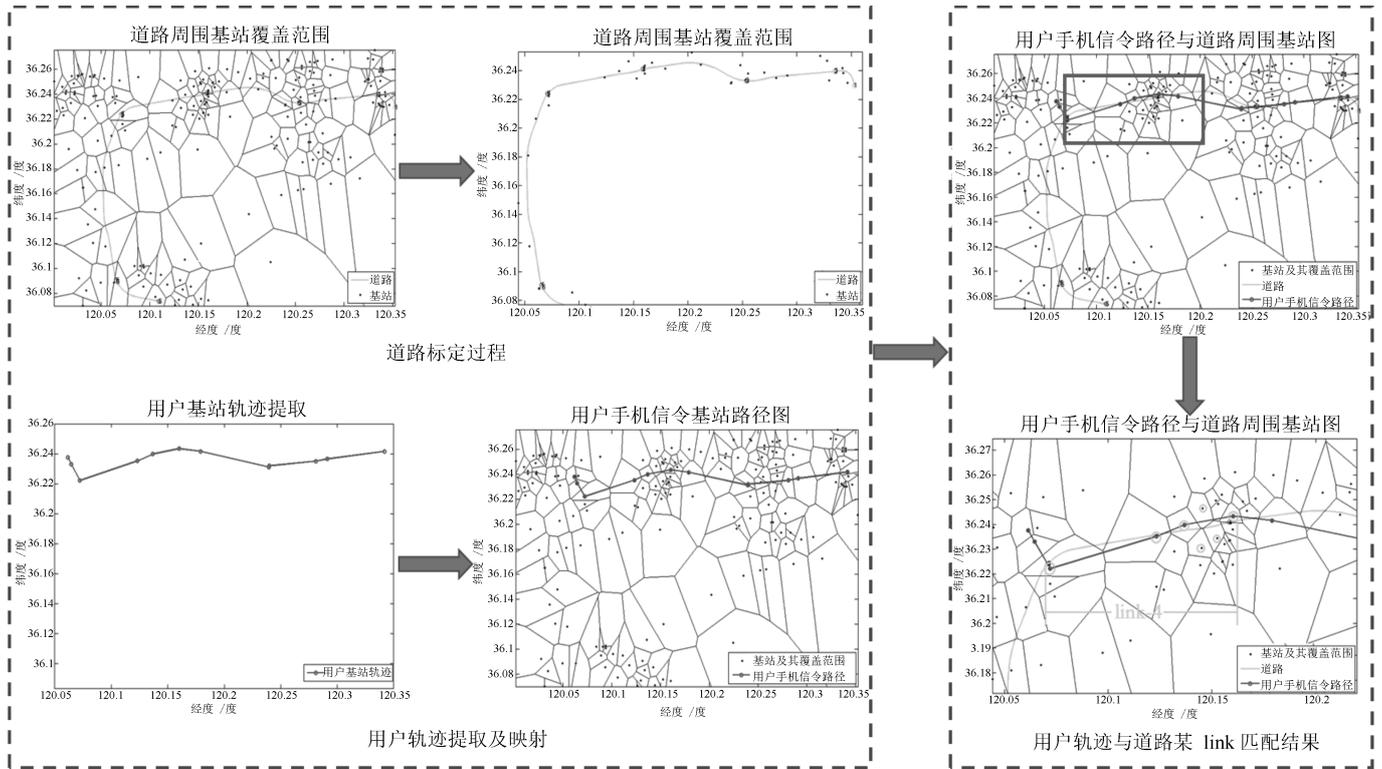


图3 道路监控预测方法

Fig. 3 The method of road monitoring and forecasting

表2 道路基站与用户路径基站匹配表

Table 2 Macthing between base stations of road and user

Linkname	Roadpoint	Usertrajectory	Match
link-01	(120.346277, 36.231411)	(120.341874, 36.241635)	link-01
...	...	(120.291309, 36.236508)	link-02
	(120.160276, 36.243413)	(120.280959, 36.235056)	link-02
	(120.152630, 36.234506)	(120.239843, 36.231848)	link-03
	(120.145490, 36.246401)	(120.239456, 36.231008)	link-03
	(120.136701, 36.239830)	(120.178939, 36.241566)	link-03
	(120.123239, 36.235142)	(120.160276, 36.243413)	link-04
	(120.072134, 36.222112)	(120.136701, 36.239830)	link-04
link-05	(120.072091, 36.215935)	(120.123239, 36.235142)	link-04
...	...	(120.072134, 36.222112)	link-04
...	...	(120.064562, 36.232949)	no
link-06	(120.105853, 36.076972)	(120.061622, 36.237668)	no

2.2.3 平行执行

人工监控场景和实际监控场景平行执行. 通过平行执行, 实际监控场景的反馈可以修正人工系统, 同时人工监控场景的计算结果可以指导实际监控场景. 当系统运行时, 人工监控场景将从实际监控场景获取手机信令数据、路网数据、网上数据、天气数据等海量数据来进行虚拟场景的建立, 同时“在线”模拟各种实际场景, 此人工系统并不是一味地复制实

际监控场景, 而是在符合实际监控场景的情况下, 建立更多情况下的人工监控场景, 这样某个实际监控场景将有多个对应的人工监控系统, 也可以多个实际监控系统共享多个人工监控场景. 人工监控场景可以提供“无限”的在线数据, 可以用来在线训练和评估监控模型, 指导实际监控场景实现更好的系统优化. 而手机信令数据, 实时监测数据和以及实时动态等由实际监控场景反馈给人工监控场景, 人工监

控场景可以针对其结果进行优化并在此基础上进行调整,最终提高人工监控场景和实际监控场景性能。在实际的监控系统中,无法模拟极端情况。但在人工监控场景中,不同的人工监控场景可以以不同的目标构建。例如正常情况、早晚高峰、节假日、紧急和预警情况,甚至一些极端情况。当天气、修路等因素影响道路交通时,必须通过人工监控场景的计算实验,进行模型的调节和优化,在不断的学习和训练下使模型自动适应实际场景的最新变化。实际监控系统与人工监控系统通过平行执行及交互,人工监控场景可以对各种情况下的策略进行评估和分析,最终选择最佳的控制和管理决定。在人工监控场景与实际监控场景的平行执行过程中,依据计算实验统计分析的结果,建立展示系统,为用户提供整套的出行指导。

2.3 应用案例

道路状态准确的监控和预测是一项比较困难的问题。若能准确知道此时道路状况和未来道路状况,可提前采取疏导、限流等一系列措施,从而提高交通出行的效率。基于 ACP 方法的平行手机信令数据分析系统的人工监控场景将人的信号、社会信号、物理信号有机结合,不仅对交通状况进行监控,而且将人流监控和预测与交通信息结合,综合分析交通状态本身受到周围区域的影响,例如景区、交通枢纽中心等,现阶段的系统没有将这些信息融入到系统中,从而无法准确地监控和预测道路交通状况。基于 ACP 方法的平行手机信令数据分析系统收集天气、历史数据、信令数据、路网数据、网上数据等数据,并结合计算实验出的周围重点区域的人流情况,通过计算实验方法有效地对道路状态进行实时监控指导以及未来状态预测,从而提高预测的准确性,通过平行执行,引导实际监控场景。

2.4 系统实现

基于 ACP 方法的平行手机信令数据分析系统是一个复杂的系统,其应用领域广泛,针对应用案例进行系统实现。本系统采用数据由青岛联通提供,一天数据量大概 12 GB 左右,数据每 5 min 传输一次。系统部署在青岛市交通警察大队,系统覆盖了青岛市 G20、G15 等高速道路以及山东路、阿里山路等市内道路共 43 条道路。以及对青岛火车站、八大关、崂山等 16 个重点区域的人流监控。青岛市交管部门通过该系统对青岛市内相关道路进行拥堵与畅通的信息发布以及区域人流监控,指导市民出行避开拥堵路段。通过与交通警察大队实际测速对比,该系统取得了良好的道路拥堵预测效果。系统的登录界面如图 4 所示,其主要实现以下几个功能。

公路交通的拥堵预测与预警。基于 ACP 方法

结合机器学习以及深度学习算法通过对手机信令数据分析,对公路实时速度进行预测。此速度可以准确反映公路实时及未来一段时间内的拥堵状况并由此可以发布实时拥堵预警。当用户有出行需求时,可以通过 Web 页面和手机 App 查看相应公路的拥堵情况,获取到更准确的交通出行信息。从而做出更正确的决策。具体结果如图 5 所示,不同速度采用不同颜色表示,其每个颜色定义的阈值可以根据历史数据进行预测定义,并且在页面可以查询到每条路 link 的平均速度。

重点区域人流量覆盖预测与预警。基于 ACP 方法结合机器学习、统计学习以及深度学习算法通过对手机信令数据分析,对重点区域实时人流量及归属地进行预测。可以准确反映重点区域人流量并由此可以发布实时人流高峰预警。在用户选择旅游景点的时候,可以通过 Web 页面和手机 App 查看相应重点区域人流量情况。从而可以有效地避开人流高峰,选择更加合适的景区,获得更好的旅游体验。具体结果如图 6~8 所示,分别为重点区域人流密度,进出重点区域的人数以及用户的归属地分析的结果。根据重点区域人流密度的情况可以进行人流的疏导工作,避免踩踏事件的发生;根据进出重点区域人数可采取限流的措施,防止区域内人数过多;用户归属地分析可以对进入本市的外来人员进行统计并给旅游业给予指导。



图 4 登录界面

Fig. 4 System login interface

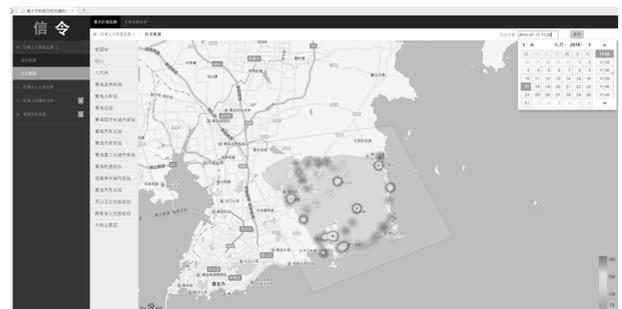


图 5 交通流监控

Fig. 5 The traffic flow monitoring



图6 重点区域人流密度

Fig.6 The distribution of population flow in focused area

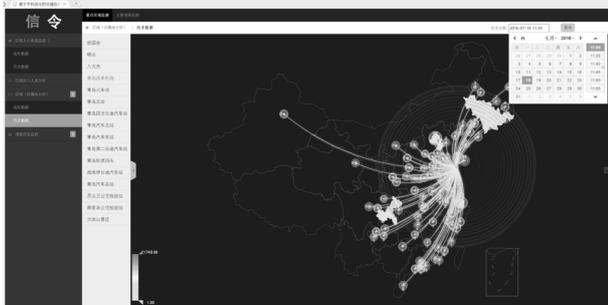


图7 用户的归属地分析

Fig.7 The attribution of population flow in focused area



图8 进出重点区域人数

Fig.8 The in/out number of population in focused area

重点区域时空动态分布预测. 通过统计和机器学习等方法可以对城市重点区域时空动态分布进行统计. 可以辅助相关部门进行城市的公共中心体系规划、功能分区检测和评估以及交通基础设施建设指导.

城市交管部门作为城市交通的指挥者, 可以充分利用道路拥堵、重点区域监控以及重点区域时空动态分布等信息实现对整个城市更加“智慧”的管理与控制体系. 针对道路的拥堵预测与预警功能, 交管部门可以以交通网络或交通线路为对象, 对运行的车和参与交通活动的所有人员(管理者、出行者等)进行管理和控制, 实现交通系统的安全、高效的运行. 利用重点区域人流覆盖和时空动态分布相关信息, 交管部门可以预测评估人流涌现情况可能出现的时间、地点以及涌现程度等, 从而制定相应的管理措施, 防止意外状况的发生.

平行与非平行手机信令数据分析系统. 本文提出基于 ACP 方法的平行手机信令数据分析系统. 区别于其他的仿真系统, 所建立的系统具有自我学习及更新等特点. 人工监控场景将从实际监控场景获取手机信令数据、路网数据、网上数据、天气数据等海量数据来进行虚拟场景的建立, 同时“在线”模拟各种实际场景. 通过大量数据和实验, 系统不断完善和改进, 平行执行手段将实际监控场景和人工监控场景结合, 虚实互动, 从而解决其他人流与交通监测解决方案中无法解决的难题, 得到更为科学合理有效的方案. 以道路监控为例, 传统的非平行手机信令系统对于数据量少的情况, 无法判断是手机用户少(即畅通)亦或者严重拥堵(用户在不打电话、发短信、开关机和不换基站情况下, 无信令数据). 针对此情况, 平行手机信令数据系统以实时速度数量越多, 可信度越大为原则, 当实时速度少时, 系统会尽

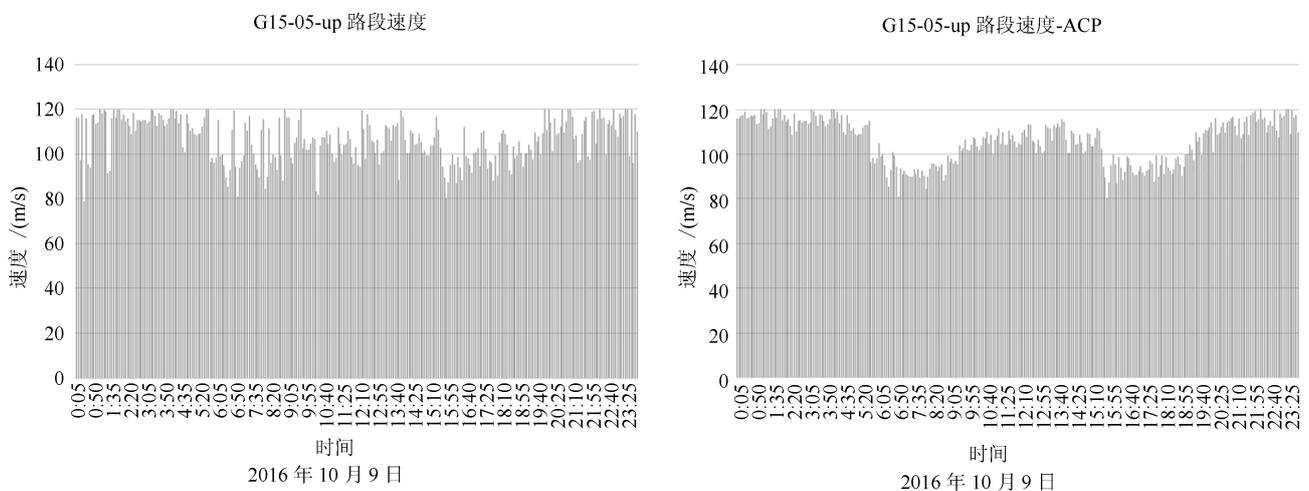


图9 平行与非平行手机信令数据系统定量分析结果

Fig.9 Quantitative analysis of parallel and general parallel mobile signaling data system

量搜集网上数据以及结合历史速度数据, 确定是否发生拥堵, 若无拥堵的相关报道或消息. 此输出为畅通状态, 同时将此情况记录和统计, 随着信令速度数据及网上数据越来越多, 系统会统计每天每个 link 的速度状态, 建立模型库, 为后续速度计算准确与否提供指导. 针对青岛某一高速路段, 平行与非平行手机信令数据系统定量分析结果如图 9, 平行手机信令数据分析系统比非平行的速度更加平滑, 不会受手机信令数据噪声及数据量的影响. 同时从速度的整体趋势, 更符合实际情况.

3 总结

基于 ACP 方法的平行手机信令数据分析系统为了达到数学模型尽可能真实准确地逼近实际情况的目的, 本文依托平行思想建立合理、动态、在线的人工监控场景, 从而对实际监控场景情况进行“借鉴”和“预估”, 提供动态、适用、有效的解决方案. 基于 ACP 方法的平行手机信令数据分析系统的所有功能的实现, 都依托于大量的计算实验, 并且是一个动态的复杂系统, 所有系统功能将会不断优化. 该系统在人口流量监测和交通流量监控的应用实现已在公众应用中发挥着重要作用.

References

- 1 Yang Zhao-Sheng. *Basic Traffic Information Fusion Technology and Its Application*. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.
(杨兆升. 基础交通信息融合技术及其应用. 北京: 中国铁道出版社, 2005.)
- 2 Xia M, Chen Y H, Huang H C, Wang X Y, Chen Y F. Environment-adaptive road traffic measurement with single wireless geomagnetic sensor node. In: Proceedings of the International Conference on Wireless Communication and Sensor Network (WCSN 2015). Changsha, China: World Scientific, 2016. 720–727
- 3 He Zhao-Cheng, Lu Rui-Qi, Nie Pei-Lin. Estimation on freeway segment average speed based on probe vehicle data. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2011, **28**(6): 128–135
(何兆成, 卢瑞琪, 聂佩林. 基于浮动车定位数据的高速公路区间平均速度估计. 公路交通科技, 2011, **28**(6): 128–135)
- 4 Liu Qiao. Studies on the condition of urban road networks based on floating car technology [Master dissertation], Wuhan University of Technology, China, 2013.
(刘俏. 基于浮动车技术的城市道路网状况研究 [硕士学位论文], 武汉理工大学, 中国, 2013.)
- 5 Cao Yi-Hua. The large-scale crowd analysis in video surveillance [Master dissertation], Shanghai Jiao Tong University, China, 2013.
(曹艺华. 面向视频监控的大尺度人群行为分析 [硕士学位论文], 上海交通大学, 中国, 2013.)
- 6 Xiao Tan, Yang Xu, Li Huang-Huang. Railway passenger station crowd density estimation algorithm based video surveillance. *Railway Signalling & Communication*, 2010, **46**(8): 80–82
(肖坦, 杨旭, 李黄煌. 基于视频监控的铁路客运站人群密度分析算法. 铁道通信信号, 2010, **46**(8): 80–82)
- 7 Casas O, López M, Quilez M, Martinez-Farre X, Hornero G, Rovira C, Pinilla M R, Ramos P M, Borges B, Marques H, Girão S. Wireless sensor network for smart composting monitoring and control. *Measurement*, 2014, **47**: 483–495
- 8 Zheng Jian-Hu, Wang Ming-Hua. Comparative analysis of collection technologies for dynamic traffic information. *Transport Standardization*, 2009, (4): 42–47
(郑建湖, 王明华. 动态交通信息采集技术比较分析. 交通标准化, 2009, (4): 42–47)
- 9 Li Zu-Fen, Yu Lei, Gao Yong, Wu Yi-Zheng, Gong Da-Peng, Song Guo-Hua. Extraction method of temporal and spatial characteristics of residents' trips based on cellular signaling data. *Transportation Standardization*, 2016, **2**(1): 51–57
(李祖芬, 于雷, 高永, 吴亦政, 龚大鹏, 宋国华. 基于手机信令定位数据的居民出行时空分布特征提取方法. 交通运输研究, 2016, **2**(1): 51–57)
- 10 Tang Xiao-Yong, Zhou Tao, Lu Bai-Chuan. Analysis of wide range population flow analysis based on mobile phone signaling. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2017, **36**(1): 82–87, 109
(唐小勇, 周涛, 陆百川. 基于手机信令的大范围人流移动分析. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2017, **36**(1): 82–87, 109)
- 11 Wu Song, Luo Jiang-Tao, Zhou Yun-Feng, Lin Ju-Ting, Shu Zhong-Ling. Method of real-time traffic statistics using mobile network signaling. *Application Research of Computers*, 2014, **31**(3): 776–779
(吴松, 雒江涛, 周云峰, 林举厅, 舒忠玲. 基于移动网络信令数据的实时人流量统计方法. 计算机应用研究, 2014, **31**(3): 776–779)
- 12 Hellinga B, Fu L P, Takada H. Obtaining traveller information via mobile phone location referencing-challenges and opportunities. In: Proceedings of the Annual Conference of the Transportation Association of Canada. St. John's, Canada: National Academy of Sciences, 2003. 21–24
- 13 White J, Quick J, Philippou P. The use of mobile phone location data for traffic information. In: Proceedings of the 12th IEE International Conference on Road Transport Information and Control. London, UK: IEEE, 2004. 321–325
- 14 Rose G. Mobile phones as traffic probes: practices, prospects and issues. *Transport Reviews*, 2006, **26**(3): 275–291
- 15 Qiu Z J, Cheng P. State of the art and practice: cellular probe technology applied in advanced traveler information system. In: Transportation Research Board 86th Annual Meeting (TRB2007). Washington DC, USA: Transportation Research Board. 2007.
- 16 Caceres N, Wideberg J P, Benitez F G. Review of traffic data estimations extracted from cellular networks. *IET Intelligent Transport Systems*, 2008, **2**(3): 179–192
- 17 Valerio D. Road Traffic Information from Cellular Network Signaling, Technical Report FTW-TR-2009-003, Telecommunications Research Center Vienna, Austria, 2009.

- 18 Guo Xiao-Ni. Traffic flow monitoring and travel information service system based on mobile phone signaling. *Telecom World*, 2017, (14): 157
(郭晓妮. 基于手机信令的交通流监测与出行信息服务系统. 通讯世界, 2017, (14): 157)
- 19 Chen Huan. Survey of pedestrian travel characteristics based on mobile phone signaling data. *Traffic & Transportation*, 2017, (S1): 92–94, 98
(陈欢. 基于手机信令数据的人员出行特征跟踪调查. 交通与运输, 2017, (S1): 92–94, 98)
- 20 Wang F Y. Parallel control and management for intelligent transportation systems: concepts, architectures, and applications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, 11(3): 630–638
- 21 Wang Fei-Yue. Parallel system methods for management and control of complex systems. *Control and Decision*, 2004, 19(5): 485–489, 514
(王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制. 控制与决策, 2004, 19(5): 485–489, 514)
- 22 Wang Fei-Yue. Artificial societies, computational experiments, and parallel systems: a discussion on computational theory of complex social-economic systems. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, 1(4): 25–35
(王飞跃. 人工社会、计算实验、平行系统——关于复杂社会经济系统计算研究的讨论. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(4): 25–35)
- 23 Wang Fei-Yue. Computational experiments for behavior analysis and decision evaluation of complex systems. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(5): 893–897
(王飞跃. 计算实验方法与复杂系统行为分析和决策评估. 系统仿真学报, 2004, 16(5): 893–897)
- 24 Wang Fei-Yue. Computational theory and method on complex system. *China Basic Science*, 2004, 6(5): 3–10
(王飞跃. 关于复杂系统研究的计算理论与方法. 中国基础科学, 2004, 6(5): 3–10)
- 25 Zhang N, Wang F Y, Zhu F H, Zhao D B, Tang S M. DynaCAS: computational experiments and decision support for ITS. *IEEE Intelligent Systems*, 2008, 23(6): 19–23
- 26 Wang Fei-Yue, Liu De-Rong, Xiong Gong, Cheng Chang-Jian, Zhao Dong-Bin. Parallel control theory of complex systems and applications. *Complex Systems and Complexity Science*, 2012, 9(3): 1–12
(王飞跃, 刘德荣, 熊刚, 程长建, 赵冬斌. 复杂系统的平行控制理论及应用. 复杂系统与复杂性科学, 2012, 9(3): 1–12)
- 27 Wang F Y, Wang X, Li L X, Li L. Steps toward parallel intelligence. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2016, 3(4): 345–348
- 28 Wang F Y, Yang L Q, Cheng X, Han S S, Yang J. Network softwarization and parallel networks: beyond software-defined networks. *IEEE Network*, 2016, 30(4): 60–65
- 29 Wang Fei-Yue, Yang Liu-Qing, Hu Xiao-Ya, Cheng Xiang, Han Shuang-Shuang, Yang Jian. Parallel networks and network softwarization: a novel network architecture. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2017, 47(7): 811–831
(王飞跃, 杨柳青, 胡晓娅, 程翔, 韩双双, 杨坚. 平行网络与网络软件化: 一种新颖的网络架构. 中国科学: 信息科学, 2017, 47(7): 811–831)
- 30 Li Li, Lin Yi-Lun, Cao Dong-Pu, Zheng Nan-Ning, Wang Fei-Yue. Parallel learning — a new framework for machine learning. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(1): 1–8
(李力, 林懿伦, 曹东璞, 郑南宁, 王飞跃. 平行学习——机器学习的一个新型理论框架. 自动化学报, 2017, 43(1): 1–8)
- 31 Lv Y S, Duan Y J, Kang W W, Li Z X, Wang F Y. Traffic flow prediction with big data: a deep learning approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(2): 865–873
- 32 Wen J, Zhao J L, Luo S W, Han Z. The improvements of BP neural network learning algorithm. In: Proceedings of the 5th International Conference on Signal Processing. Beijing, China: IEEE, 2000, 3: 1647–1649



王迎春 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室工程师。2015 年获得北京大学智能科学与技术硕士学位。主要研究方向为平行驾驶, 数据挖掘, 机器学习。

E-mail: yingchun.wang@ia.ac.cn

(**WANG Ying-Chun** Engineer at the State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. She received her master degree in intelligent science and technology from Peking University in 2015. Her research interest covers parallel driving, data mining, and machine learning.)



韩双双 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室助理研究员。2013 年获得加拿大阿尔伯塔大学博士学位。主要研究方向为平行网络, 物联网, 智能交通, 无线通信关键技术。本文通信作者。

E-mail: shuangshuang.han@ia.ac.cn

(**HAN Shuang-Shuang** Assistant professor at the State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. She received her Ph.D. degree from University of Alberta, Canada in 2013. Her research interest covers parallel networks, internet of things, intelligent transportation system and wireless communications. Corresponding author of this paper.)



胡成云 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室工程师。2016 年获得北京大学电子与通信工程硕士学位。主要研究方向为自动驾驶, 平行测试。E-mail: chengyun.hu@ia.ac.cn

(**HU Cheng-Yun** Engineer at the State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. He received his master degree in electronics and communication

engineering from Peking University in 2016. His research interest covers automated driving and parallel testing.)



宋瑞琦 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室工程师. 2016 年获得北京航空航天大学电子科学与技术工学硕士学位. 主要研究方向为平行驾驶, 目标识别与语义分割.

E-mail: ruiqi.song@ia.ac.cn

(**SONG Rui-Qi** Engineer at the State Key Laboratory for Management

and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. He received his master degree in electronic science and technology from Beihang University in 2016. His research interest covers automated driving, target recognition, and semantic segmentation.)



要婷婷 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室工程师. 2015 年、2016 年分别获得英国伯明翰大学、北京交通大学硕士学位. 主要研究方向为平行驾驶与数据挖掘.

E-mail: tingting.yao@ia.ac.cn

(**YAO Ting-Ting** Engineer at the State Key Laboratory for Management

and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. She received her master degrees from University of Birmingham and Beijing Jiaotong University in 2015 and 2016, respectively. Her research in-

terest covers parallel driving and data mining.)



曹东璞 英国克兰菲尔德大学驾驶员认知与自动驾驶实验室主任. 中科院自动化所客座研究员. 主要研究方向为自动驾驶, 人车协同, 与平行驾驶.

E-mail: d.cao@cranfield.ac.uk

(**CAO Dong-Pu** Director of Driver Cognition and Automated Driving Laboratory, Cranfield University, UK. Vis-

iting professor at Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers automated driving, driver-automation collaboration, and parallel driving.)



王飞跃 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室研究员. 国防科学技术大学军事计算实验与平行系统技术研究中心教授. 主要研究方向为智能系统和复杂系统的建模、分析与控制. E-mail: feiyue.wang@ia.ac.cn

(**WANG Fei-Yue** Professor at the State Key Laboratory for Management

and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. Professor at the Research Center for Computational Experiments and Parallel Systems Technology, National University of Defense Technology. His research interest covers modeling, analysis, and control of intelligent systems and complex systems.)