

文章编号:1005-0523(2017)02-0085-08

基于 WIFI 数据的城市轨道交通乘客出行时空轨迹推定

李思杰¹,朱 炜¹,黄兆东²

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804;2. 宁波大学海运学院,浙江 宁波 315211)

摘要:针对复杂轨道交通网络环境中乘客出行路径选择与站内走行行为的问题,传统方法由于缺乏时空维度的详细数据,所得结果与实际情况易存在偏差。城市轨道交通网络 WIFI 信号的逐渐覆盖和移动终端数量的持续增长,提供了大量无线定位信息资源。为实现乘客出行时空轨迹的精准化识别,利用轨道交通网络范围内的 WIFI 信号数据,建立基于乘客完整出行链的轨道交通超级网络,提出基于改进的接收信号强度指示(RSSI)定位算法的乘客出行轨迹推断模型。通过实验测试验证了该方法的可靠性,结果表明:该方法能更为准确地推断乘客在城市轨道交通网络及车站内的综合出行过程,可为城市轨道交通客流分析、票务清算等提供理论与技术支持。

关键词:城市轨道交通;出行时空轨迹;定位算法;WIFI 数据

中图分类号:U293.5 文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.02.012

行车组织方案主要取决于网络客流分布,而确定乘客出行路径是其中的关键与难点。现有的研究成果大多集中在两方面:一方面是借鉴道路交通流分配理论建立城市轨道交通客流分布模型,从路径效用函数建立、有效路径搜索算法、路径选择概率计算等方面进行了改进^[1-3];另一方面,有学者利用 AFC 记录的进出站刷卡数据、ATS 记录的列车运行数据等,构建乘客出行路径的反推模型^[4-5]。上述方法本质上是“先验”的,不能满足对已经发生的乘客出行情况准确还原的需要。车站客运组织的基础是车站客流,其关键在于掌握乘客在车站内部的走行轨迹。相关研究主要采用微观行人仿真方法来模拟乘客在站内的行为活动^[6-7],但是仿真方法同样不能完整描述乘客复杂的出行行为,致使所得结果与实际情况之间可能存在较大差别。

分析现有研究可以看出,由于缺乏时空维度上的详细数据,传统方法对乘客出行特征的研究受到限制。与此同时,信息通讯手段的进步与智能移动终端的普及为上述问题的解决提供了新的途径。面向公众开放的 WIFI 服务已开始接入城市轨道交通系统,并逐步向全网络覆盖的方向发展。基于 WIFI 信号的定位技术可以很好地解决室内定位的需求,具有使用成本低、无需额外硬件设备支持、受非视距影响小等诸多优势,为利用 WIFI 定位技术推定乘客出行轨迹提供了技术支持。本文尝试利用城市轨道交通网络范围内的 WIFI 信号数据,提出基于改进的无线定位技术的乘客网络出行时空轨迹推断模型及求解算法,为挖掘轨道交通客流特征奠定基础。

1 WIFI 定位技术

WIFI 定位是利用无线接入点(access point, AP)的位置作为参考,通过分析接收到的无线信号的特征参数,根据相应的定位算法得到待测目标的位置。WIFI 定位的实施过程包括两个阶段:第一阶段为“测距”,即测定接收节点相对于发射节点的距离,有基于到达角度信息(AOA)、信号到达时间(TOA)、到达时间差

收稿日期:2016-09-05

基金项目:国家自然科学基金(71271153);浙江省自然科学基金(LQ14E080002);中央高校基本科研业务项目(1600219249)

作者简介:李思杰(1991—),女,博士研究生,研究方向为轨道交通运营管理。

通讯作者:朱炜(1982—),男,副教授,博士,研究方向为运输系统规划与管理。

(TDOA)和信号强度指示(RSSI)等技术,其中,基于RSSI的测距方法根据信号的路径损耗与传播距离的关系模型进行距离的计算,易于实施,成本较低,是目前运用较多的方法;第二阶段为“定位”,一类方法是实时计算待测节点与三个发射节点的距离值,按照几何关系采用三边测量法求得待测节点的坐标,另一类方法是位置指纹定位,所需采样样本数量大,数据库的建立难度大^[8]。

WIFI定位技术目前应用于多个领域,例如隧道工人的安全风险^[9],建筑工地的人员跟踪^[10],停车场的管理^[11]。然而,还没有在城市轨道交通运营管理领域的应用案例。考虑到WIFI信号的强稳定性和WIFI定位在室内环境的高精度,本文将在此基础上研究推定乘客出行轨迹的模型。

2 乘客出行时空轨迹推定

2.1 基于乘客出行链的城市轨道交通超级网络

城市轨道交通乘客的完整出行链是一系列进站、乘车、换乘、出站等过程组成的序列(如图1),包括乘客在车站内的行走活动与网络上的出行路径选择,涉及乘客行为、列车运行和网络环境三因素相结合的复杂问题。

为了描述乘客的完整出行过程,城市轨道交通网络构建既要反映轨道交通物理结构和有效的出行路径,又要体现车站的空间结构和设施设备布局。本文构建了一种三层结构的超级网络,如图2所示,依次为网络层、路径层和车站层,从整体到细部完整描述乘客出行的网络环境。

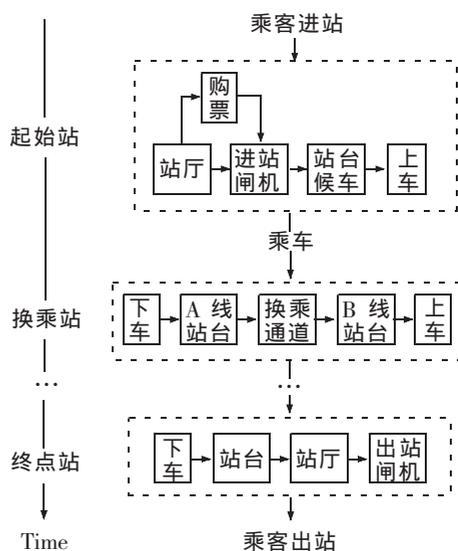


图1 城市轨道交通乘客出行链
Fig.1 Trip-chain for URT passengers

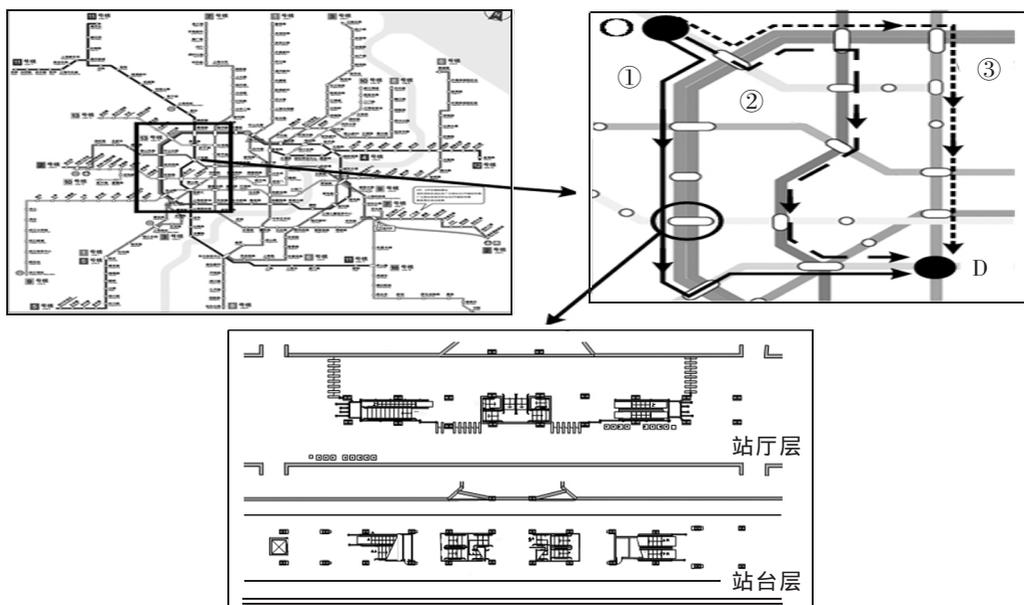


图2 超级网络示意图
Fig.2 Schematic diagram of super network

1) 网络层。网络层的功能是存储、维护整个轨道交通网络的拓扑结构,采用数学图论中的有向连通图来描述网络拓扑关系,其形式化定义为:令有序三重集合 $G=(L,S,E)$ 表示轨道交通物理网络的抽象,其中 $L=\{l_1,l_2,\dots,l_m\}$ 为网络轨道线路集合,其元素 l_i 表示线路 i ; $S=\{s_{11},s_{12},\dots,s_{ij},\dots,s_{mm}\}$ 为网络结点集合,其元素 s_{ij} 表示线路 i 上的车站 j ; $E=\{e_1,e_2,\dots,e_w\}$ 为网络边集合,其元素 e_i 表示相邻车站 $(s_{i,j},s_{i,j+1})$ 间的轨道区间;令 $S^T\{s_{i1},j1,\dots\}$ 表示换乘站,则网络上所有换乘站的集合可表示为 $S^T=\{S_1^T\{s_{i1},j1,s_{i2},j2,\dots\},S_2^T\{s_{i3},j3,s_{i4},j4,\dots\},\dots\}$ 。

2) 路径层。路径层是对乘客出行路径的描述。在网络拓扑结构的基础上,利用基于深度优先的删除路径搜索算法^[2]获取 OD 之间的 K 条渐短路径。 $R_{OD}=\{R_1,R_2,\dots,R_k,\dots,R_K\}$ 为一对 OD 间的有效路径集合,其中 R_k 表示第 k 条有效路径经过的车站序列集合 $R_k(Line, Station)$ 。

3) 车站层。车站层是对车站内部的微观描述。轨道交通车站为多层立体结构,乘客在不同层之间实现进站上车、下车出站、换乘等出行行为。以车站 CAD 平面图为基础建模构建,描述车站环境和闸机、楼扶梯等设施设备的布局。

2.2 乘客出行时空轨迹推定模型及算法

城市轨道交通网络的客流分布是乘客个体出行叠加的结果,现以一个乘客的出行过程为例,阐述在轨道交通超级网络的基础上利用 WIFI 信号数据推定乘客网络出行轨迹的步骤,算法流程图见图 3,具体步骤如下。

1) 数据采集。利用 WIFI 数据识别乘客出行轨迹需要收集车站内部署的 AP 基础信息和移动终端的 WIFI 信号强度数据。AP 的基础信息包括每个 AP 的 MAC 地址,横、纵坐标,所在线路、车站以及位置标识,如表 1 所示。

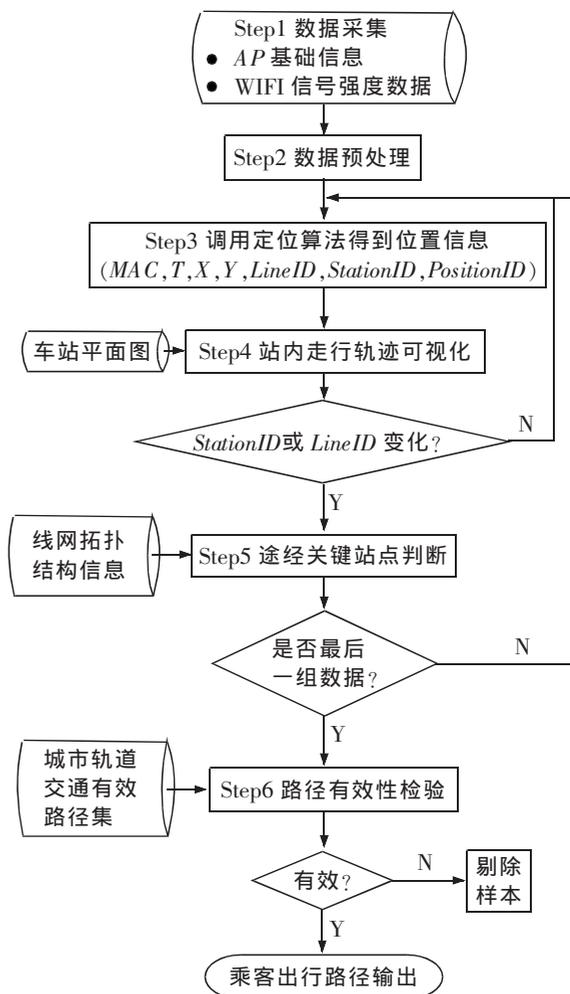


图 3 乘客出行轨迹生成步骤
Fig.3 Passenger travel trajectory generation procedure

表 1 AP 基础信息数据字段
Tab.1 Basic information of access points

字段	类型	描述
AP_MAC	VARCHAR	AP 的 MAC 地址,唯一标识
AP_X	NUMBER	AP 的横坐标
AP_Y	NUMBER	AP 的纵坐标
AP_LineID	NUMBER	AP 所处的线路编码
AP_StationID	NUMBER	AP 所处的车站编码
AP_PositionID	NUMBER	AP 所处的位置标识,1 为站厅,2 为站台

信号强度数据需要从数据库服务器中提取,包括 AP 的 MAC 地址、终端的 MAC 地址、终端发送数据包的时间戳和 AP 接收到的信号强度,如表 2 所示,其中,终端的 MAC 地址作为区分不同终端设备的标识,代表唯一乘客。

表 2 WIFI 信号强度数据字段
Tab.2 WIFI signal strength data

字段	类型	描述
AP_MAC	VARCHAR	AP 的 MAC 地址
TERMINAL_MAC	VARCHAR	终端的 MAC 地址
TIMESTAMP	DATETIME	终端发送数据包的时间戳
RSSI	NUMBER	AP 接收到的信号强度指示

2) 数据预处理。为了提高运算效率,对乘客位置数据进行预处理。联立查询表 1 与表 2 便可得到终端 M 在 T 时刻对应的一组定位基础数据 $D_M^T\{(AP_1, RSSI_1, AP_X_1, AP_Y_1), (AP_2, RSSI_2, AP_X_2, AP_Y_2) \dots (AP_n, RSSI_n, AP_X_n, AP_Y_n)\}$,若 $n \leq 2$,则视为无效数据剔除。然后,将终端 M 对应的所有定位基础数据按照时间 T 的先后顺序排序。

3) 乘客定位算法。本文采用对硬件要求较低的基于 RSSI 的测距算法与三边测量定位算法,并在其基础上进行优化。首先根据信号强度与距离的映射关系,计算终端与 AP 间的距离。对数距离路径损耗模型^[12]的公式如下

$$P_r(d) = P_r(d_0) - 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (1)$$

式中: d_0 为参考距离,一般取 1 m; d 为待测点到 AP 节点的距离; $P_r(d)$ 和 $P_r(d_0)$ 分别表示距离 d 和 d_0 处的信号强度; γ 为路径传播损耗指数,根据不同环境其取值范围为 2~5。

将式(1)变形为式(2)就可以计算出移动终端到相应 AP 的距离

$$d = d_0 10^{\frac{P_r(d_0) - P_r(d)}{10\gamma}} \quad (2)$$

然后,选择同一终端同一时间对应的信号强度最强的三个 RSSI 值,分别计算出终端与三个 AP 之间的距离,通过三边定位算法计算待测点位置。如图 4 所示,在理想情况下,待测节点 D 的位置由三个圆的交点唯一确定,可由下面的方程组解得

$$\begin{cases} (x-x_a)^2 + (y-y_a)^2 = d_a^2 \\ (x-x_b)^2 + (y-y_b)^2 = d_b^2 \\ (x-x_c)^2 + (y-y_c)^2 = d_c^2 \end{cases} \quad (3)$$

在实际应用中,受信号传播环境影响距离测量存在误差,可能出现表 3 中所列的情况,导致方程(3)无解。采用质心算法优化定位模型,根据三圆之间的相交关系不同,以多边形的质心近似作为待测点的坐标。

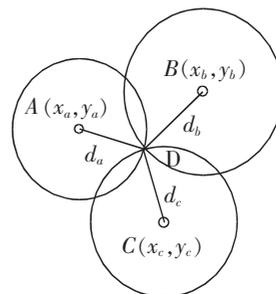


图 4 三角定位算法原理图

Fig.4 Schematic diagram of triangulation algorithm

表 3 待测点坐标计算公式
Tab.3 Coordinate calculation formulas for measuring point

情况	坐标计算公式
	$\left(\frac{x_e+x_f+x_g+x_h+x_i+x_j}{6}, \frac{y_e+y_f+y_g+y_h+y_i+y_j}{6} \right)$
	$\left(\frac{x_e+x_f+x_g+x_h}{4}, \frac{y_e+y_f+y_g+y_h}{4} \right)$
	$\left(\frac{x_e+x_f+x_g+x_h+x_i}{5}, \frac{y_e+y_f+y_g+y_h+y_i}{5} \right)$
	$\left(\frac{x_e+x_f+x_g}{3}, \frac{y_e+y_f+y_g}{3} \right)$

通过以上定位算法将得到乘客在 T 时刻的位置坐标点 $P_T(X, Y, LineID, StationID, PositionID)$, 按表 4 所示的格式存储, 作为轨迹推定的数据源。

表 4 乘客位置坐标点字段
Tab.4 Coordinate point information of passenger position

字段	类型	描述
MAC	VARCHAR	终端的 MAC 地址
T	DATETIME	终端位置更新时间
X	NUMBER	终端的横坐标, 初始值为 0
Y	NUMBER	终端的纵坐标, 初始值为 0
LineID	NUMBER	终端所处的线路编码
StationID	NUMBER	终端所处的车站编码
PositionID	NUMBER	终端所处的位置编码, 1 为站厅, 2 为站台

4) 站内行走轨迹可视化。根据乘客位置点 $P_T(LineID, StationID, PositionID)$ 调用相应的车站平面图, 将乘客 T_i 时刻的坐标 $P_{T_i}(X_i, Y_i)$ 画在车站平面图相应位置, 并与前一个位置点连接。如此循环, 得到乘客在车站按时间顺序的行走轨迹。

5) 途经关键站点判断。确定乘客出行路径的重点是判断乘客途经的关键车站。定义乘客在时刻 t 的位

置信息为 $P_t(L_t, S_t)$, 其中 L_t, S_t 分别是 t 时刻乘客所处位置的线路编码、车站编码。将乘客位置信息与轨道交通拓扑结构信息比对 $G(L, S)$, 当首次出现 $P_t(L_t, S_t) \in G(L, S)$, 则该位置信息为进站点, 记为 $PS_1(L_1, S_1)$; 当 S_t 或 L_t 发生变化时, 乘客进入下一个车站, 记为 $PS_2(L_2, S_2)$ 。如此类推, 得到乘客经过的车站集合 $PS\{(L_1, S_1), (L_2, S_2) \cdots (L_n, S_n)\}$ 。

6) 路径有效性检验。根据 Step5 中得到的起点车站 $PS_1(L_1, S_1)$ 与终点车站 $PS_n(L_n, S_n)$, 在有效路径集中找出该起、终点之间的 K 条有效路径。若第 k 条有效路径 $R_k(\text{Line}, \text{Station})$ 完全包含 $PS\{(L_1, S_1), (L_2, S_2) \cdots (L_n, S_n)\}$ 中的站点, 则匹配成功, 认为 $PS_1 \rightarrow PS_2 \rightarrow \cdots \rightarrow PS_n$ 为乘客的实际出行路径; 当 k 达到一定阈值时, 仍然无法找到能够匹配的路径, 则认为此次匹配失败, 删除样本。

3 实验案例

本文选取上海地铁 13 号线金沙江西路站进行现场实验, 对提出的模型及算法的合理性及实用性进行检验。

3.1 路径传播损耗指数 γ 测定

由于路径传播损耗指数 γ 的取值与环境有关, 为了保证定位的精度, 首先测定 γ 的取值。以一固定位置的路由器作为 AP, 在距离其 0~8 m 的范围内, 选取不同的采样点, 测量出采样点到该 AP 的距离, 并记录相应位置的信号强度数据。将距离的对数值 $\lg d$ 与相应的 RSSI 值进行线性拟合, 如图 5 所示, 通过拟合直线的斜率和纵坐标截距即可得到该环境下 $\gamma=2.8454$, $P_r(1)=-36.017$ dbm。

3.2 算法精度测试

在进行乘客走行轨迹的定位实验时, 在车站内随机布置多个路由器作为 AP 节点, 构建 WIFI 信号覆盖的环境, 并选取两堵垂直相交的墙面作为 x 轴和 y 轴, 建立直角坐标系, 以测量 AP 的位置坐标。然后, 乘客携带具有检测 WIFI 信号强度功能的设备进站至乘车离开, 或下车并走行出站, 在走行过程中每隔 30 s 测量其位于不同位置时检测到的周围 WIFI 的信号强度, 并记录其自身的实际坐标。最后, 根据 2.2 节中的定位算法计算出乘客经过的一系列位置坐标点, 并采用如下定位误差公式来评价算法的定位精度

$$d_{\text{err}} = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2} \quad (4)$$

式中: d_{err} 为定位精度; (x, y) 为真实坐标; (x', y') 为计算坐标。

图 6 为本次实验样本的定位误差。可以看出, 本次实验的最大误差是 6.313 8 m, 最小误差是 0.030 4 m, 平均误差为 1.524 7 m, 基本满足对于城市轨道交通乘客定位的精度要求。

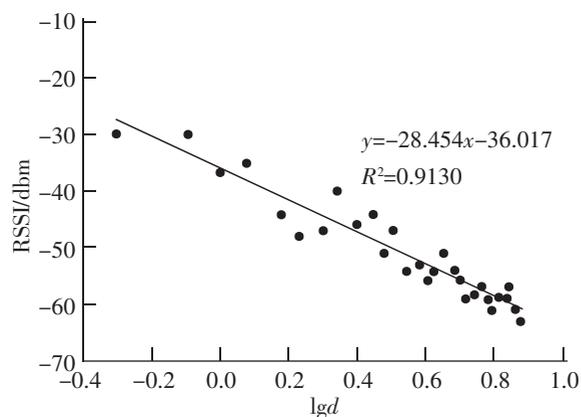


图 5 “RSSI— $\lg d$ ”拟合图
Fig.5 “RSSI— $\lg d$ ” fitting chart

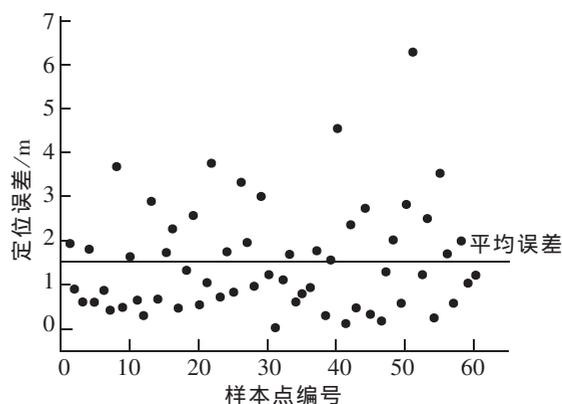


图 6 实验定位误差
Fig.6 Experiment location errors

以一位乘客的走行轨迹为例,根据其经过的位置点,在车站平面图上绘制出该乘客在车站内的实际轨迹与定位轨迹,如图 7 所示。可以看出,虽然乘客的位置点受到定位误差的影响有所波动,但从整体上看,本文的方法能有效还原出乘客的走行轨迹,描绘出乘客进、出站的整个过程,其中,数据点较密集的地方体现了乘客购票、通过闸机、站台候车等行为。

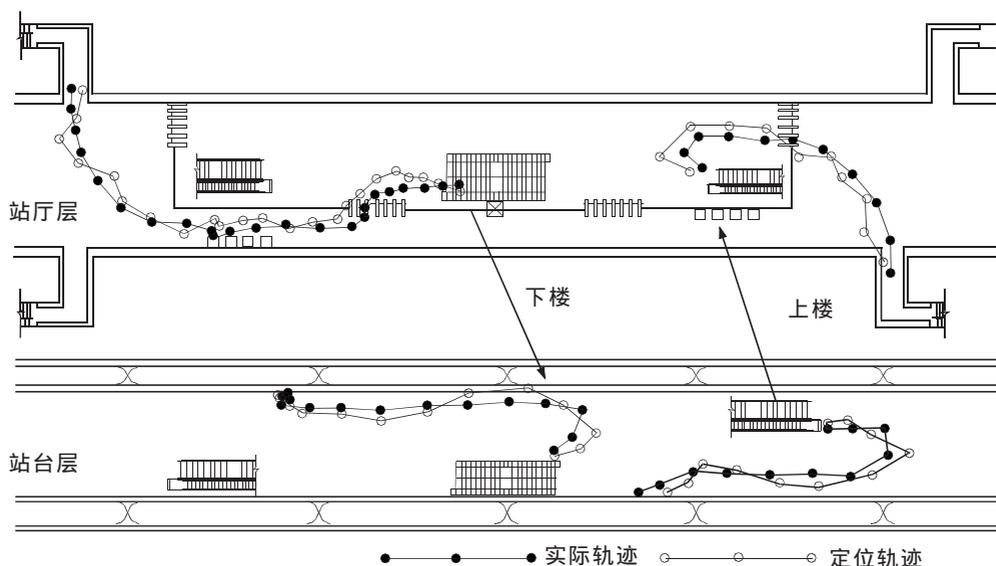


图 7 实际轨迹与定位轨迹对比图

Fig.7 Comparison of actual trajectory and localization trajectory

3.3 讨论

本文设计了如上所述实验,以乘客个体为研究对象,验证了利用 WIFI 数据推定乘客在车站内的走行轨迹具有较好的可行性与准确性。同时,乘客在网络上的出行路径主要通过换乘站点进行识别,其精度要求低于站内走行轨迹的推定,因而本文提出的模型也同样满足网络出行路径推断的要求,从而实现对乘客出行时空轨迹的完整推定。

需要指出的是,当对单个乘客采集的样本点数量增加后,将描绘出更为平滑的走行轨迹,对不符合车站平面图结构的异常位置点予以剔除,减弱定位误差对轨迹生成的影响。并且,该方法若以海量乘客出行产生的实际 WIFI 数据作为数据源,能取得更为理想的结果:首先,结合路网车站集合对乘客数据进行过滤,若终端对应的数据只包含一个车站,说明为过街行人,提前清除以减少计算工作量;然后,采用本文的推定模型分析一段时间内地铁出行用户数据,叠加各个乘客的走行轨迹,可还原车站乘客实时分布情况,统计站内聚集人数,为车站实时预警提供有效支持;最后,随着 WIFI 服务在城市轨道交通网络的全面覆盖,通过串联乘客途经的关键车站即可得到乘客选择的出行路径,当采集的乘客数据足够多时,近似计算为起讫车站之间乘客对不同路径的选择比例,从而为客流分布模型验证、模型参数标定等奠定基础。

4 结论

为了更为准确地描述城市轨道交通乘客的完整出行过程,本文提出了一种基于 WIFI 数据的乘客网络出行时空轨迹推断模型及算法。首先,建立了轨道交通超级网络,包括乘客在车站内的走行轨迹与网络上的出行路径。然后,改进了基于接收信号强度指示(RSSI)的定位算法,并阐述其应用于推定乘客出行轨迹的流程。最后,通过算例实验初步验证了该方法的可靠性与可行性,结果表明:基于 WIFI 数据定位的平均误差约 1.5 m,满足定位精度要求,能有效还原乘客的走行轨迹。随着 WIFI 服务覆盖地铁网络进程的推进,本文的研究成果在城市轨道交通运营管理领域具有良好的应用前景,将为客流分析、票务清算以及出行诱导等提供理论与技术支持。

参考文献:

- [1] 四兵锋,毛保华,刘智丽. 无缝换乘条件下城市轨道交通网络客流分配模型及算法[J]. 铁道学报,2007,29(6):12-18.
- [2] 徐瑞华,罗钦,高鹏. 基于多路径的城市轨道交通网络客流分布模型及算法研究[J]. 铁道学报,2009,31(2):110-114.
- [3] 陶宇,吴中. 优化蚁群算法在最短路径诱导中的应用[J]. 华东交通大学学报,2013,30(6):30-34.
- [4] SI B F,ZHONG M,LIU J F,et al. Development of a transfer-cost-based logit assignment model for the Beijing rail transit network using automated fare collection data[J]. Journal of Advanced Transportation,2013,47(3):297-318.
- [5] ZHOU F,XU R H. Model of Passenger Flow Assignment for urban rail transit based on entry and exit time constraints[J]. Transportation Research Record,2012,2284:57-61.
- [6] LIAO M J,LIU G. Modeling passenger behaviors in non-payment areas at rail transit station[C]//Transportation Research Board 94th Annual Meeting, Washington DC, USA, 2015.
- [7] KING D,SRIKUKENTHIRAN S,SHALABY A. Using simulation to analyze crowd congestion and mitigation at canadian subway Interchanges:case of vloor-yonge station[J]. Transportation Research Record,2014,2417:27-36.
- [8] 李飞. WiFi 网络中基于测距的定位算法研究[D]. 成都:电子科技大学,2013.
- [9] LIN P,LI Q B,FAN Q X,et al. A real-time location-based services system using WIFI fingerprinting algorithm for safety risk assessment of workers in tunnels[J]. Mathematical Problems in Engineering,2014(4):1-10.
- [10] WOO S,JEONG S,MOK E,et al. Application of WIFI-based indoor positioning system for labor tracking at construction sites:A case study in Guangzhou MTR[J]. Automation in Construction,2011,20(1):3-13.
- [11] 任成华,刘杰. WIFI 定位技术在库存车辆管理系统中的应用[J]. 电脑知识与技术,2014(19):4583-4585.
- [12] ERCEG V,GREENSTEIN L J,TJANDRA S Y,et al. An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,1999,17(7):1205-1211.

Travel Time-space Trajectory Characterization of Urban Rail Transit Network Based on WIFI Data

Li Sijie¹,Zhu Wei¹,Huang Zhaodong²

(1. The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education,Tongji University, Shanghai 201804,China;2. College of Maritime and Transportation,Ningbo University,Ningbo 315211,China)

Abstract: For the problem of passenger travel route choice and walking within stations in complex urban rail transit (URT) network environment, there are errors with traditional method for the lack of detailed data of time-space dimension. The gradual covering of WIFI and continuous growth of mobile terminal provide a lot of information resources of wireless location. In order to characterize passengers' time-space trajectories precisely, this study, according to WIFI signal data in URT network environment, established a super network based on passenger trip-chain and proposed an inference model based on modified Received Signal Strength Indicator (RSSI) positioning algorithm for passenger travel space-time trajectory. Initial experiments are conducted to test the reliability of the proposed methodology. The results showed that it can accurately infer passengers' comprehensive travel process both in network and stations, providing a basis for URT passenger flow analysis and fare clearing, etc.

Key words: urban rail transit;travel time-space trajectory;positioning algorithm;WIFI data

(责任编辑 姜红贵)