

室内定位数据分析与应用研究进展

舒 华^{1,2}, 宋 辞¹, 裴 韬^{1*}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:现代人文地理学的研究越来越多地关注人的时空行为,而获取个体在出行活动中的时空位置数据是研究人类时空行为的前提。受数据获取技术的限制,之前对时空行为的研究主要集中在室外空间。随着室内定位技术的出现和应用,这类研究由室外空间扩展至室内空间。室内定位技术和方法较多,但从数据的角度来看,根据数据获取中使用定位方法的不同,可将室内定位数据分为几何位置数据、指纹位置数据和符号位置数据3类。目前,基于室内定位数据的研究可以归结为以下4个方面,即:人在室内的时空分布、人在室内的移动模式、人在室内的行为习惯及属性推断、人与室内环境的交互作用。然而,总体上目前的研究还处于探索阶段,理论和方法体系尚未成熟。本文认为后续的研究中需要关注以下问题:①数据获取方面。相对于蓝牙、射频识别、红外等定位技术,“智能手机+WiFi”模式的定位系统具有覆盖范围广、成本低廉、无需专用设备支持、易与用户交互等优势,是一种最具应用前景的室内定位技术;②研究内容方面。时空行为特征的研究是基础,个体属性推断及个体与环境的相互作用形式和机理研究将是重点,多时空尺度数据融合分析是一种趋势;③科学伦理方面。室内定位涉及微观尺度人类活动的记录,隐私保护问题需要高度关注。

关键词:定位数据;室内定位;数据分析;时空行为;大数据;综述

1 引言

时空行为是人文地理学研究的重要内容,而获取个体在出行活动中的时空位置数据是研究人类时空行为的前提。传统的时空位置数据获取方式包括出行调查和出行日志等,这些数据在一定程度上满足了时空行为研究的需要,但也存在数据获取成本高、时空分辨率低及误差较大等问题。因此,数据获取成了制约时空行为研究进一步发展的主要因素。然而,随着信息和传感器技术的发展,空间定位服务的成本逐渐降低,普通居民也能轻松获得高精度的空间定位服务。尤其是以智能手机为代表的移动终端设备的大规模普及,使大范围、实

时、高效、高精度地获取用户的时空位置信息成为现实。基于大数据,研究个体或群体的行为,发现活动中蕴含的空间认知规律及空间行为和交互模式,建立以人为本的地理信息服务,进而支持个体或群体时空行为决策,已成为地理信息科学研究的前沿问题(刘瑜,康朝贵,王法辉,2014)。考虑到个体移动模式与时间和空间尺度密切相关,刘瑜等根据人类活动的具体特点,将人的活动范围分为城市间(Inter-City)、城市(Intra-City)和亚城市(Sub-City)3个空间尺度(刘瑜,康朝贵,2014),但这些尺度的研究都只关注人在城市室外空间的活动(Wolf et al, 2001; Zheng et al, 2008; Yalowitz et al, 2009; Yue et al, 2009),对于时间占城市中人类活动时间超过

收稿日期:2016-01;修订日期:2016-04。

基金项目:国家杰出青年科学基金项目(41525004);国家自然科学基金创新研究群体项目(41421001);航空旅客信息服务分类与编码研究(4700003334) [Foundation: National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China, No.41525004; Science Fund for Creative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China, No.41421001; Classification and Encoding on Aviation Passengers' Information Service, No.4700003334]。

作者简介:舒华(1989-),男,河南信阳人,博士研究生,主要从事时空数据挖掘研究,E-mail: shuh@lreis.ac.cn。

通讯作者:裴韬(1972-),男,江苏扬州人,博士,研究员,研究方向为空间分析及时空数据挖掘,E-mail: peit@lreis.ac.cn。

引用格式:舒华,宋辞,裴韬. 2016. 室内定位数据分析与应用研究进展[J]. 地理科学进展, 35(5): 580-588. [Shu H, Song C, Pei T. 2016. Progress of studies on indoor positioning data analysis and application[J]. Progress in Geography, 35(5): 580-588.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.05.005

70%的室内活动,却不曾涉及。因此,本文认为有必要在3个空间尺度的基础上再加上微城市(Micro-City)尺度,主要关注人在城市建筑物内部空间的活动,使人类时空行为的研究在空间尺度上达到全覆盖(周成虎, 2015)。与早期室外空间中时空行为研究遇到的问题一样,室内时空行为研究的主要制约因素依然是时空位置数据的获取。然而,随着室内定位技术的出现并日益成熟,已实现了个体在建筑物内部空间位置数据的获取,室内空间中人类时空行为研究引起了学界的关注。

位置数据的“大爆发”,为从行为的角度开展人文地理研究注入了新动力。但是,目前用于这类研究的数据多来自城市室外空间中居民通勤、出行及驻留等相关信息的记录,普遍存在非空间属性信息不足的问题,相关的研究多关注以群体行为模式为表象的人文与社会经济现象。相对于室外位置数据而言,室内定位数据由于抓住了人类活动的主要部分,更容易与人类日常活动的多元属性信息相结合,为从个体角度研究人的时空活动规律及属性甚至心理特征提供了必要条件,有助于深入研究人与城市空间的相互作用形式、特征及机理。另外,传统的人文地理学在研究城市中的人文与经济现象时,通常按功能区将城市进行划分,并将功能区看成均质的社会经济单元。而室内定位则突破了这一尺度限制,将地理现象的异质性研究拓展到微观的室内空间,进一步结合城市空间中不同尺度人类时空活动感知,将多尺度人类活动信息进行综合分析,以达到对城市空间运行状况的全方位“透视”,为以人为本的城市空间规划、城市公共管理和智慧城市建设等提供重要支撑。本文从利用室内定位数据进行微观尺度人类时空活动及人与环境交互作用研究的角度,对相关研究进行总结,主要从以下2个方面展开:一是室内定位方法及定位数据特征;二是室内定位数据分析与应用研究现状。

2 室内定位方法及定位数据特征

20世纪90年代中后期,有学者提出了将无线信号用于室内空间定位的基本思想和技术路线(Pahlavan et al, 1998),相关的定位系统也陆续被设计出来(Werb et al, 1998; Estrin et al, 1999)。由于应用前景广阔,室内定位迅速引起了广泛关注,许多研究人员开始进行室内定位理论、传感器技术及定位系统实现方面的研究。经过近20年的发展,室内

定位在理论和技术方面都已十分成熟。尤其是随着传感器技术的发展,许多无线传感器技术被用于室内定位,从目前来看主要包括蓝牙(Bluetooth)(Feldmann et al, 2003)、射频识别(RFID)(Bekkali et al, 2007)、无线局域网(WLAN)(Li et al, 2006)、红外线(IR)(Aitenbichler et al, 2003)、超声波(Ultrasonic)(Hazas et al, 2006)、紫蜂(ZigBee)(Larranaga et al, 2010)、超宽带(UWB)(Gigl et al, 2007)、灯光(LED)(Hann et al, 2010)和地磁感应(Geomagnetism)(Kim et al, 2012)等。虽然用于室内定位的传感器技术较多,但从原理上来看,可将室内定位方法分为3种:三角测量法(Triangulation)、场景分析法(Scene Analysis)和邻近法(Proximity)(Hightower et al, 2001)。

2.1 三角测量法

三角测量法指根据待测点和参考点之间组成三角形的几何特征,计算待测点的坐标。具体实现方法又可以分为2种:边测量法和角测量法(Liu et al, 2007)。其中,边测量法事先测定参考点(A、B和C)的位置坐标,再根据信号特征参数测量待测点(O)到多个参考点的直线距离(r_1 、 r_2 、 r_3 等),然后利用三角形边的几何特性计算待测点的坐标(图1a);角测量法基于这样一个简单的几何原理:在一个三角形中,如果已知两个角(θ_1 和 θ_2)的大小和一条边(边AB)的长度,可以唯一确定三角形第3个顶点(O)的位置(图1b)。

三角测量法测得的定位数据称为几何位置数据。从定位理论上来说,几何位置数据可表征测量信号覆盖范围内任意点的空间坐标,具有定位精度高,能记录用户运动过程中的细节信息等优势,多用于研究用户在室内的运动轨迹特征。但由于几何位置数据在采集过程中对信号稳定性要求较高,在实际应用过程中,受复杂室内环境及设备稳定性的影响,容易因信号遮挡、反射及信号异常波动等而产生定位失真(即位置“漂移”)。

2.2 场景分析法

场景分析法利用在场景中观测到的用户所在

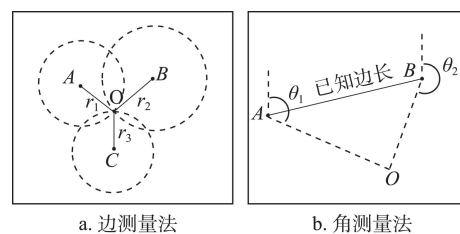


图1 二维空间三角定位法原理示意图

Fig.1 Triangulation in 2D space

位置的信号参数来确定用户的位置。通常情况下,需要事先采集场景中不同位置处的信号特征参数(位置指纹),绘制指纹地图。当用户进入场景中时,传感器采集用户接收到信号的特征参数(例如,从不同信号源接收到信号的强度),通过与数据库中事先存储的不同位置处信号特征参数进行对比,估算用户所在位置。早期地学工作者在进行野外调查时,以视野范围内固定的标志性地物作为参照,利用地质罗盘的方位角测量功能,通过后向交汇法对自己所处的观察位置进行描述,以备日后重访时进行定位,就是运用了这一定位思想。

场景分析法测得的定位数据称为指纹位置数据。定位过程中特征参数的匹配本质上是一种模式识别或机器学习的过程,常用的算法有概率法、k-最邻近法(kNN)、人工神经网络法(ANN)、支持向量机法(SVM)和M-顶点多边形法(SMP)等。定位原理决定了指纹位置数据在获取过程中存在不确定性,但这种不确定性并不会导致定位的精度下降,反而由于定位过程中考虑了信号不稳定的特点,充分利用信号包含的信息而使得定位效果较好。由于位置采用离散的采样点表示,这类数据在用于轨迹记录时会存在一些不足。例如,相对于几何位置数据来说,指纹位置数据在采集过程中丢失了更多的轨迹细节信息。

2.3 邻近法

邻近法定位的原理为:当用户设备的信号被位置固定的传感器检测到时,可确定用户设备位于传感器位置附近,这样就可以用传感器所在位置来表征用户所在的空间位置。邻近法定位一般不涉及信号特征参数的计算,只有当用户设备同时被2个或更多传感器检测到时,才需要对比用户接收到不同传感器的信号强度,以确定用户离哪个传感器距离更近。所以,在室内这种空间范围较小的应用场景中使用邻近法进行定位时,为了保证定位的精度,最好选择信号传播范围和强度较小的无线发射技术,如蓝牙、射频识别等。

邻近法测得的定位数据称为符号位置数据。符号位置数据以定位目标所在位置的属性来表征目标的空间位置,是一种相对位置数据。例如,商场中的某间商铺内、博物馆内的某件展品前及写字楼里某间办公室中等。符号位置数据的优点是实现技术门槛低,无需复杂定位算法的参与;不足之处为只能记录个体到访某些重要节点的信息,移动过程中的细节信息被忽略。从定位的空间精度来

说,符号位置数据的精度一般低于几何位置数据和指纹位置数据,但并非绝对,当数据采集过程中信号的覆盖范围足够小时,符号位置数据的空间精度甚至可以超过前两者。例如,地铁刷卡数据可看作一种符号位置数据,由于智能卡必须与传感器直接接触才能读取信息,使得这种定位的精度非常高。

在上述3种定位方法得到的定位数据中,几何位置数据和指纹位置数据通常定位精度较高,常用于记录个体在室内活动中的轨迹信息;而符号位置数据一般定位精度相对较低,通常只记录个体与室内重要节点的交互情况而忽略个体活动中的轨迹信息(表1)。

3 室内定位数据分析与应用研究现状

室内定位技术弥补了GPS因信号受建筑物遮挡而无法用于室内环境定位的不足,将定位服务从城市室外空间扩展至建筑物内部空间。然而,从目前来看,虽然室内定位技术及已实现的定位系统很多,但大多数系统在数据采集过程中需要专门的设备和参与人员的配合,数据采集成本较高,在实际应用中很难大规模开展。在这种情况下,有学者利用在实验环境中获取的室内定位数据,在数据分析及应用方面进行了一些探索,为研究室内定位数据在不同场景中的应用及分析人类在微观尺度上的时空行为特征提供了参考(李清泉等,2015)。目前基于室内定位数据开展的研究主要有下4个方面,即:人在室内的时空分布、人在室内的移动模式、人在室内的行为习惯及属性推断、人与室内环境的交互作用。其中,时空分布主要研究群体在室内的基本分布情况及时空参数的统计特征;移动模式主要关注大量个体在空间移动中隐含规律的发现和总结,与时空分布研究相比,更侧重时空分布格局产生的过程;行为习惯及属性推断是在移动模式基础上,结合周围环境属性对个体特征进行抽象总结;人与室内环境交互作用的研究则关注人与室内环境的相互作用形式、结果及交互作用产生的机理。

3.1 人在室内的时空分布

时空分布特征反映了人群对室内空间的利用状况。在进行相关研究时,传统的数据获取方式通常是观察记录和调查问卷。由于这类数据在获取时一般需受访者事后通过主观回忆完成,往往存在数据偏差大、时效性差及缺乏准确时空信息等不足,研究结果很难反映人在室内的真实分布和活动

情况。而室内定位技术解决了数据获取的时效性和空间定位精度问题,为准确、实时感知人群在室内的时空分布,发现人群在室内活动的规律,进而为实现人流的科学管理、促进空间合理利用和进行突发事件预警等提供依据。目前针对人群在室内时空分布特征的研究主要集中在以下3个方面:

(1) 人群分布的时空参数统计。通过室内定位数据,对人群在室内分布的时空参数进行统计和分析,有助于科学认识人群在室内活动的总体特征,发现其中隐含的规律。例如,Yoshimura等(2012)将室内定位数据应用于博物馆内参观者行为的研究。在卢浮宫内不同展品附近安装蓝牙传感器,根据游客手机蓝牙和传感器的配对情况,获取游客在卢浮宫内的参观序列数据,并据此对游客不同参观序列的数量、参观时间及对不同空间位置的利用情况等进行分析,总结参观者在卢浮宫内时空分布和活动的基本特征。在商业活动中,室内定位数据统计分析的结果也被证明能在精细化管理方面起到积极的作用。例如,Fukuhara等(2013)获取了日本一家餐馆内服务人员工作时的时空轨迹数据,即服务人员在餐厅及休息区停留的时长和轨迹长度信息,通过将这些信息与餐馆的订单数据进行相关分析,发现餐馆获得额外订单的数量与服务人员在餐厅停留的时长呈显著正相关,而与工作人员在餐厅中行走的路径长度无关。这一结论可从员工

管理方面为餐饮业提高服务效率和增加营业收入等提供理论支撑。

(2) 人群分布的感知与推断。在实际应用场景中,受成本投入及用户参与意愿的影响,几乎不可能获取人群在室内活动的全样本数据,如何在有限样本情况下了解人群整体的时空分布,是研究者必须面对的问题。Liebig等(2014)提出了一种利用贝叶斯网络方法解决这类问题的思路,并通过蓝牙定位技术获取了法国一场足球比赛中553名观众在体育馆内的位置数据,利用空间贝叶斯网络方法,对观众在整个体育场内不同空间位置出现的可能性及分布情况进行推断和三维可视化。

(3) 人群分布的热点探测。人类活动时空分布中的热点,反映了人群由于对特定空间区域的偏好或受热点事件吸引而表现出的空间集聚现象。通过室内定位技术采集个体在室内活动的时空位置数据,利用空间分析和可视化等手段,可以探测人群在室内活动的热点分布及变化情况。例如,Petrenko等(2014)利用iEpi手机应用(Hashemian et al, 2012)和SaskEPS算法(Bell et al, 2010),提出了一种在现有条件下获取用户室内时空位置及在此基础上了解人在室内活动和空间行为的理论框架,并根据实测得到的萨斯喀彻温(Saskatchewan)大学37名学生41天的室内活动位置数据,结合GIS空间分析和可视化方法,探测这些学生在不同时间和不同楼

表1 不同定位方法比较
Tab.1 Comparison of different positioning methods

定位方法	基本原理	系统示例(无线技术)	优缺点	应用场景	复杂度	代表性研究
三角测量法	根据待测点和坐标已知参考点之间连接形成三角形的几何特性计算待测点的坐标	RADAR(WLAN) Active Bat (Ultrasound) Ubisense(UWEB)	优点:定位精度高,理论上可实现对信号覆盖区域任意空间位置的定位; 缺点:对信号传播范围和稳定性要求较高;信号遮挡、反射和波动等会造成位置“漂移”	较空旷的室内场景(如机场、火车站大厅等)	适中	Bahl et al, 2000; Harter et al, 2002; Steggles et al, 2005
场景分析法	事先获取指定位置的信号特征参数,通过对比待测点接收到信号的参数与数据库中存储的各指定位置的信号特征参数,确定待测点位置	Horus(WLAN) MotionStar (Magnetic) LifeTag(WLAN)	优点:无需事先测量参考点位置坐标,定位精度高,稳定性好; 缺点:前期位置指纹数据采集工作量较大	应用场景较广泛,可用于环境复杂的室内场景	高	Youssef et al, 2004; Poulin et al, 2002; Li et al, 2006
邻近法	根据传感器信号作用范围有限的特点,确定待测点是否在参考点附近	BIPS(Bluetooth) LANDMARC (RFID) PAN(ZigBee)	优点:对传感器信号稳定性要求低,定位算法简单,实现方便; 缺点:一般需要用用户主动参与,且无法记录用户空间活动轨迹的细节信息	廊道型室内场景或功能区划明确的室内场景(廊道型博物馆、商铺彼此独立的商场等)	低	Anastasi et al, 2003; Ni et al, 2003; Huang et al, 2009

层活动热点的分布情况,分析学术活动和考试等事件对学生分布热点的影响。

3.2 人在室内的移动模式

移动模式是个体在认知、经验、心理因素及周边环境影响下,时空行为决策的外在表现。宏观尺度(城市间、城市和亚城市尺度)上个体或群体移动模式的研究,可从精细尺度上对城市空间结构和城市动态过程进行刻画,包括城市土地利用分类(Pei et al, 2014)、城市交通状况感知(Liu et al, 2012)、疾病在空间上的扩散(Bian, 2004)等。类似地,微观尺度(微城市尺度)上个体或群体移动模式的研究也可为室内路径规划、室内陈设布局等提供一种新的理论和解决方案。目前,这方面的研究可分为2类:

(1) 人群移动的轨迹模式。大量个体在室内空间活动时,受共同心理基础或者环境约束的影响,往往表现出以某一轨迹模式为主导的情况。聚类分析用于根据集合中不同元素之间的空间距离远近或属性相似程度,将集合划分成多个子集以发现其中隐含的丛聚模式,可用于轨迹主导模式的发现。例如,美国Sorensen公司通过安装在购物车底部的射频识别标签(RFID Tags)和安装在超市内的固定接收装置,获取顾客在超市内购物过程中的行进轨迹。Larson等(2005)以该公司Path Tracker®(Sorensen, 2003)系统获取的某超市27000条顾客轨迹作为数据源,用K-medoids方法进行聚类,发现了该超市中顾客购物路径的主导模式,纠正了一些对顾客购物行为模式错误的直观印象。

(2) 人群移动的流模式。流模式主要关注人群在室内不同兴趣点之间的切换情况,而忽略个体移动过程中的详细轨迹信息。流模式的研究对于发现人群流动的频繁模式,认识室内人群流动的空间结构及兴趣点之间的相互作用情况具有重要意义。这类研究所用的定位数据通常只需记录个体到访室内兴趣点的时间及在不同兴趣点的停留时长即可,属于前文提及的符号位置数据。例如,Delafontaine等(2012)根据比利时根特酒店展(Horeca Expo in Ghent, Belgium)上获取的蓝牙定位数据,得到参观者在607个展台的参观序列,并利用序列对比方法,对参观者在不同展台之间的流模式进行分析。Yoshimura等(2014)根据从卢浮宫获取的游客参观序列数据,分析得到了游客参观的主导序列,并认为连接这一序列的路径是在最短时间内参观完卢浮宫所有展品的最优路径。

3.3 人在室内的行为习惯及属性推断

从时空行为研究的角度来说,行为习惯可理解为在个体移动模式的基础上,结合环境属性信息对个体行为特征和偏好的抽象总结。通过空间定位数据,发现个体在室内的空间移动模式,根据移动模式可对个体或群体的行为习惯进行总结,并进一步建立行为习惯与个体属性之间的对应规则,以达到对个体或群体属性进行推断的目的。掌握个体在室内活动中表现出的行为习惯和属性信息,有助于优化空间配置以实现室内各项事务的有序运行,或者提供基于个体偏好和属性的个性化服务。相关的研究可分为2类:

(1) 个体行为习惯的挖掘。行为习惯是个体在活动中表现出的一种惯常行为模式,根据顾客在室内的空间活动及与室内不同属性兴趣点之间的交互情况,可以对个体的行为习惯进行挖掘。例如,Hui等(2009)提出了一个研究顾客购物行为的概率模型,并利用顾客在美国东部某超市内的购物轨迹和消费数据,验证了购买行为中的3个假设:①随着顾客在商店内停留时间的增加,他们闲逛的可能性会减小,购物的可能性则会增加,即购物的目的性随着在商店内停留时间的增加而增强;②顾客在购买实用类别的商品之后,更可能去有奢侈品类别的区域购物;③其他消费者的存在会将消费者吸引到商店的某个区域,但会降低消费者在那个区域内购物的意向。Kholod等(2010)利用射频识别(RFID)记录到日本某超市6997名顾客的购物轨迹数据,并对其购买行为和室内陈设间关系进行定量评价。

(2) 个体属性的推断。根据先验知识,确定行为习惯与个体属性之间的对应关系,进一步建立决策模型,将利用室内定位数据得到的行为习惯分析结果作为模型输入,可对个体的属性进行推断。例如,Noh等(2012)提出了一种推断用户行为习惯和相关属性的理论,该理论利用决策树方法,以移动设备连接的无线局域网(WLAN)信号强度(Signal Strength)和服务设定识别符(Service Set Identifier)作为数据源,推断用户在室内的空间位置信息,再进一步结合用户所在的环境信息,利用贝叶斯网络方法对用户的行为习惯和属性进行推断。Kanda等(2007)利用射频识别技术,获取参观者在博物馆内的空间位置采样数据,根据参观者在参观活动中表现出的行为习惯,结合展品的属性特征,判断参观者是否为儿童或者参观团体中是否包含儿童。

3.4 人与室内环境的交互作用

行为地理学发展的一个趋势是通过广泛的多学科融合更全面地解答人—环境互动关系问题。从最初回答“行为在哪里发生”的区位论套路,发展到关注人文现象与环境互动关系,最终能够回归到日常生活空间和社会中(柴彦威等, 2008, 柴彦威等, 2014)。室内空间中个体时空行为与环境的交互作用,是这一研究思想在微观环境下的扩展,有助于深入了解人与环境的相互作用形式及作用机理,为在实际应用中创造更优质的、“以人为本”的室内环境提供依据。

借助室内定位技术和穿戴设备,记录个体在室内空间活动中的位置数据及对应的生理指标数据,可在一定程度上揭示室内环境对人的行为特征及生理和心理活动的影响。例如,Tröndle等提出了一套综合的方法论来研究参观者在博物馆参观中的行为特征及影响因素(Tröndle, Tschacher, 2012; Tröndle, Greenwood, Kirchberg, 2012)。研究人员选择瑞士一家美术博物馆的576名参观者作为测试对象,通过调查问卷、佩戴数据手套和室内定位传感器,获取参观者的社会和人口学特征、参观过程中的轨迹、心率(Heart Rate)、皮肤电传导(Skin Conductance)及对参观体验的评价等数据。通过可视化方法,直观展示个体在博物馆参观过程中的行进轨迹和生理指标变化,并分析了这一现象产生的社会学背景和现场环境因素,在利用室内定位数据研究人与室内环境的交互作用方面进行了尝试。

从数据分析的角度来看,由于室内定位技术在实际应用中尚处于探索阶段,专门针对室内定位数据展开的分析研究十分有限。根据目前的研究,室内定位数据分析常用的方法有:用于分析研究对象在室内时空分布和移动特征的基本统计方法,用于空间和非空间属性推断的贝叶斯网络和决策树方法,用于模式发现的序列对比和频繁模式挖掘方法以及用于空间可视化、地图匹配、热点探测的GIS可视化和空间分析方法等。然而,这些分析方法都来源于传统的数据挖掘和空间数据分析等领域,与室外空间中定位数据分析方法无本质区别,这也意味着室内定位数据分析特有方法和理论体系的建立可能是相关研究中面临的重要挑战。

4 结论与展望

通过个体日常活动中的位置数据研究人的时

空行为,是认识人类在地理空间中活动特征及人与生存环境交互作用的有效途径。时空行为研究的空间尺度可分为宏观(城市间、城市和亚城市)和微观(微城市)尺度,本文主要对基于室内定位数据展开的微观尺度时空行为相关的研究进行了总结。根据获取和表达方式的不同,可将室内定位数据分为几何位置数据、指纹位置数据和符号位置数据。其中,几何位置数据的优势在于能记录用户运动过程中轨迹的细节信息;不足之处在于定位稳定性较差,容易出现位置“漂移”。指纹位置数据的优势是考虑了定位过程中信号不稳定性的特点,因而定位精度和稳定性相对较高;不足之处为前期位置指纹采集工作量较大,系统更新成本高。符号位置数据具有实现简单及成本低廉的优点,但是采样的空间间隔通常较大,无法记录用户移动过程中的细节信息。在数据分析与应用方面,当前研究可分为以下4类:①人在室内的时空分布,包括对群体活动时间和空间特征的基本统计与可视化分析及热点探测等;②人在室内的移动模式,主要研究群体在室内活动的轨迹特征及在不同兴趣点之间的流动情况;③人在室内的行为习惯及属性推断,包括对群体和个体室内空间行为模式的发现以及在此基础上个体属性的推断;④人与室内环境的交互作用,主要探索人在室内活动中表现出的行为、生理和心理特征及这些现象产生的环境和社会学因素。

室内定位突破了传统定位技术的限制,将人类时空行为的研究由室外空间扩展至室内空间,具有重要的学术和应用价值,但从目前来看,仍然存在一些亟待解决的问题。一是,室内环境十分复杂,定位传感器信号容易受反射、遮挡、衰减的影响出现精度不足、记录不完整和定位错误等问题。开发出稳定可靠、精度满足需求的应用级定位系统,是室内定位技术未来发展的关键。二是,目前室内定位数据分析的方法主要是基本的统计、可视化、聚类及GIS空间分析等,数据分析理论和方法有待拓展和创新。三是,室内定位需要找到大范围应用的突破口,在实际应用中产生价值是解决数据来源问题的关键。四是,室内定位涉及到微观空间尺度人类日常活动的记录,因此对用户的隐私保护问题不容忽视。

我们处在一个“大数据”时代,传感器无处不在,各种数据源源不断地产生。在这一背景下,室内定位的发展和普及离不开泛在传感器网络的支持。从定位技术来看,相对于蓝牙、射频识别、红外

线等,“智能手机+WiFi”(Rekimoto et al, 2007)这种定位模式由于具有覆盖范围广、成本低廉、无需专门设备支持并易与用户交互等优点,是一种最具应用前景的室内定位技术。从应用层面来看,泛在传感器网络支持下的室内定位及相关服务应成为基于位置的服务(LBS)领域下一个有力的增长点。同时,室内定位为智慧城市建设提供必要的技术支撑和数据保障。数据分析方面,时空行为特征的研究是基础,在此基础上的个体属性推断及人与室内环境的相互作用形式和机理是重点;多时空尺度数据融合,以达到对城市空间中人文与社会经济活动全方位的感知是一种趋势。

参考文献(References)

- 柴彦威,等. 2014. 空间行为与行为空间[M]. 南京: 东南大学出版社. [Chai Y W, et al. 2014. Spatial behavior and behavioral space[M]. Nanjing, China: Southeast University Press.]
- 柴彦威, 颜亚宁, 冈本耕平. 2008. 西方行为地理学的研究历程及最新进展[J]. 人文地理, 23(6): 1-6, 59. [Chai Y W, Yan Y N, Okamoto K. 2008. Development of behavioral geographic research in western countries and its recent progress[J]. Human Geography, 23(6): 1-6, 59.]
- 李清泉, 周宝定. 2015. 基于智能手机的个体室内时空行为分析[J]. 地理科学进展, 34(4): 457-465. [Li Q Q, Zhou B D. 2015. Smartphone-based individual indoor spatiotemporal behavior analysis[J]. Progress in Geography, 34(4): 457-465.]
- 刘瑜, 康朝贵. 2014. 人类移动模式的多尺度分析方法探索[M]//柴彦威. 时空行为研究前沿. 南京: 东南大学出版社: 110-121. [Liu Y, Kang C G. 2014. Renlei yidong moshi de duochidu fenxi fangfa tansuo[M]//Chai Y W. The frontiers of space-time behavior research. Nanjing, China: Southeast University Press: 110-121.]
- 刘瑜, 康朝贵, 王法辉. 2014. 大数据驱动的人类移动模式和模型研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 39(6): 660-666. [Liu Y, Kang C G, Wang F H. 2014. Towards big data-driven human mobility patterns and models[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 39(6): 660-666.]
- 周成虎. 2015. 全空间地理信息系统展望[J]. 地理科学进展, 34(2): 129-131. [Zhou C H. 2015. Prospects on pan-spatial information system[J]. Progress in Geography, 34(2): 129-131.]
- Aitenbichler E, Mühlhäuser M. 2003. An IR local positioning system for smart items and devices[C]//Proceedings of the 23rd international conference on distributed computing systems workshops. Providence, RI: IEEE: 334-339.
- Anastasi G, Bandelloni R, Conti M, et al. 2003. Experimenting an indoor bluetooth-based positioning service[C]//Proceedings of the 23rd international conference on distributed computing systems workshops. Providence, RI: IEEE: 480-483.
- Bahl P, Padmanabhan V N. 2000. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system[C]//Proceedings of the 19th annual joint conference of the IEEE computer and communications societies. Tel Aviv, Israel: IEEE: 2: 775-784.
- Bekkali A, Sanson H, Matsumoto M. 2007. RFID indoor positioning based on probabilistic RFID map and Kalman filtering[C]//Proceedings of the 3rd IEEE international conference on wireless and mobile computing, networking and communications. White Plains, NY: IEEE: 21.
- Bell S, Jung W R, Krishnakumar V. 2010. WiFi-based enhanced positioning systems: Accuracy through mapping, calibration, and classification[C]//Proceedings of the 2nd ACM SIGSPATIAL international workshop on indoor spatial awareness. New York: ACM: 3-9.
- Bian L. 2004. A conceptual framework for an individual-based spatially explicit epidemiological model[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 31(3): 381-395.
- Delafontaine M, Versichele M, Neutens T, et al. 2012. Analysing spatiotemporal sequences in Bluetooth tracking data [J]. Applied Geography, 34: 659-668.
- Estrin D, Govindan R, Heidemann J, et al. 1999. Next century challenges: Scalable coordination in sensor networks[C]//Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking. New York: ACM: 263-270.
- Feldmann S, Kyamakya K, Zapater A, et al. 2003. An indoor bluetooth-based positioning system: Concept, implementation and experimental evaluation[C]//Proceedings of international conference on wireless networks. Las Vegas, NE: DBLP: 109-113.
- Fukuhara T, Tenmoku R, Okuma T, et al. 2013. Measuring and evaluating real service operations with human-behavior sensing: A case study in a Japanese cuisine restaurant[C]//Proceedings of the 19th Korea-Japan joint workshop on frontiers of computer vision. Incheon, Korea: IEEE: 113-116.
- Gigl T, Janssen G J M, Dizdarević V, et al. 2007. Analysis of a UWB indoor positioning system based on received signal strength[C]//Proceedings of the 4th workshop on positioning, navigation and communication. Hannover, Germany: IEEE: 97-101.
- Hann S, Kim J H, Jung S Y, et al. 2010. White LED ceiling lights positioning systems for optical wireless indoor applications[C]//Proceedings of the 36th European conference and exhibition on optical communication. Torino, Italy: IEEE: 1-3.

- Harter A, Hopper A, Steggles P, et al. 2002. The anatomy of a context-aware application[J]. *Wireless Networks*, 8(2-3): 187-197.
- Hashemian M S, Stanley K G, Knowles D L, et al. 2012. Human network data collection in the wild: the epidemiological utility of micro-contact and location data[C]//Proceedings of the 2nd ACM SIGHIT international health informatics symposium. New York: ACM: 255-264.
- Hazas M, Hopper A. 2006. Broadband ultrasonic location systems for improved indoor positioning[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 5(5): 536-547.
- Hightower J, Borriello G. 2001. A survey and taxonomy of location systems for ubiquitous computing[J]. *Computer*, 34(8): 57-66.
- Huang M L, Park S C. 2009. A WLAN and ZigBee coexistence mechanism for wearable health monitoring system [C]//Proceedings of the 9th international symposium on communications and information technology. Icheon, Korea: IEEE: 555-559.
- Hui S K, Bradlow E T, Fader P S. 2009. Testing behavioral hypotheses using an integrated model of grocery store shopping path and purchase behavior[J]. *Journal of Consumer Research*, 36(3): 478-493.
- Kanda T, Shiomi M, Perrin L, et al. 2007. Analysis of people trajectories with ubiquitous sensors in a science museum [C]//Proceedings of 2007 IEEE international conference on robotics and automation. Roma, Italy: IEEE, 4846-4853.
- Kholod M, Nakahara T, Azuma H, et al. 2010. The influence of shopping path length on purchase behavior in grocery store[M]//Setchi R, Jordanov I, Howlett R J, et al. Knowledge-based and intelligent information and engineering systems. Berlin & Heidelberg, Germany: Springer: 273-280.
- Kim S E, Kim Y, Yoon J, et al. 2012. Indoor positioning system using geomagnetic anomalies for smartphones[C]//Proceedings of international conference on indoor positioning and indoor navigation. Sydney, Australia: IEEE: 1-5.
- Larranaga J, Muguiru L, Lopez-Garde J M, et al. 2010. An environment adaptive ZigBee-based indoor positioning algorithm[C]//Proceedings of 2010 international conference on indoor positioning and indoor navigation. Zurich, Switzerland: IEEE: 1-8.
- Larson J S, Bradlow E T, Fader P S. 2005. An exploratory look at supermarket shopping paths[J]. *International Journal of Research in Marketing*, 22(4): 395-414.
- Li B H, Salter J, Dempster A G, et al. 2006. Indoor positioning techniques based on wireless LAN[C]//Proceedings of the 1st IEEE international conference on wireless broadband and ultra wideband communications. Sydney, Australia: IEEE: 13-16.
- Liebig T, Andrienko G, Andrienko N. 2014. Methods for analysis of spatio-temporal bluetooth tracking data[J]. *Journal of Urban Technology*, 21(2): 27-37.
- Liu H, Darabi H, Banerjee P, et al. 2007. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 37(6): 1067-1080.
- Liu Y, Wang F H, Xiao Y, et al. 2012. Urban land uses and traffic 'source-sink areas': Evidence from GPS-enabled taxi data in Shanghai[J]. *Landscape and Urban Planning*, 106(1): 73-87.
- Ni L M, Liu Y H, Lau Y C, et al. 2003. LANDMARC: Indoor location sensing using active RFID[C]//Proceedings of the 1st IEEE international conference on pervasive computing and communications. Fort Worth, TX: IEEE: 407-418.
- Noh H Y, Lee J H, Oh S W, et al. 2012. Exploiting indoor location and mobile information for context-awareness service [J]. *Information Processing & Management*, 48(1): 1-12.
- Pahlavan K, Krishnamurthy P, Beneat J. 1998. Wideband radio propagation modeling for indoor geolocation applications [J]. *IEEE Communications Magazine*, 36(4): 60-65.
- Pei T, Sobolevsky S, Ratti C, et al. 2014. A new insight into land use classification based on aggregated mobile phone data[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 28(9): 1988-2007.
- Petrenko A, Sizo A, Qian W, et al. 2014. Exploring mobility indoors: An application of sensor-based and GIS systems [J]. *Transactions in GIS*, 18(3): 351-369.
- Poulin F, Amiot L P. 2002. Interference during the use of an electromagnetic tracking system under OR conditions[J]. *Journal of Biomechanics*, 35(6): 733-737.
- Rekimoto J, Miyaki T, Ishizawa T. 2007. LifeTag: WiFi-based continuous location logging for life pattern analysis[C]//Proceedings of the 3rd international symposium conference on location- and context- awareness. Oberpfaffenhofen, Germany: Springer: 35-49.
- Sorensen H. 2003. The science of shopping[J]. *Marketing Research*, 15(3): 30-35.
- Steggles P, Gschwind S. 2005. The Ubisense smart space platform[M]//Adjunct proceedings of the 3rd international conference on pervasive computing. Berlin, Germany: Springer.
- Tröndle M, Greenwood S, Kirchberg V, et al. 2012. An integrative and comprehensive methodology for studying aesthetic experience in the field: Merging movement tracking, physiology, and psychological data[J]. *Environment and Behavior*, 46(1): 102-135.
- Tröndle M, Tschacher W. 2012. The physiology of phenomenology: The effects of artworks[J]. *Empirical Studies of*

- the Arts, 30(1): 75-113.
- Werb J, Lanzl C. 1998. Designing a positioning system for finding things and people indoors[J]. IEEE Spectrum, 35(9): 71-78.
- Wolf J, Guensler R, Bachman W. 2001. Elimination of the travel diary: Experiment to derive trip purpose from global positioning system travel data[J]. Transportation Data and Information Technology: Planning and Administration, 1768(1): 125-134.
- Yalowitz S S, Bronnenkant K. 2009. Timing and tracking: Unlocking visitor behavior[J]. Visitor Studies, 12(1): 47-64.
- Yoshimura Y, Girardin F, Carrascal J P, et al. 2012. New tools for studying visitor behaviours in museums: A case study at the Louvre[C]//Proceedings of the international conference on information and communication technologies in tourism 2012. Helsingborg, Sweden: Springer: 391-402.
- Yoshimura Y, Sobolevsky S, Ratti C, et al. 2014. An analysis of visitors' behavior in the Louvre Museum: A study using Bluetooth data[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 41(6): 1113-1131.
- Youssef M, Agrawala A. 2004. Handling samples correlation in the Horus system[C]//Proceedings of the 23rd annual joint conference of the IEEE computer and communications societies. Hong Kong, China: IEEE: 1023-1031.
- Yue Y, Zhuang Y, Li Q Q, et al. 2009. Mining time-dependent attractive areas and movement patterns from taxi trajectory data[C]//Proceedings of the 17th international conference on geoinformatics. Fairfax, VA: IEEE: 689-694.
- Zheng Y, Li Q N, Chen Y K, et al. 2008. Understanding mobility based on GPS data[C]//Proceedings of the 10th international conference on ubiquitous computing. Seoul, Korea: ACM: 312-321.

Progress of studies on indoor positioning data analysis and application

SHU Hua^{1,2}, SONG Ci¹, PEI Tao^{1*}

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Human spatiotemporal behavior increasingly draws attention in modern human geography, and obtaining individuals' spatiotemporal location data in travel activities is the precondition to study the spatiotemporal behavior of people. Limited by data acquisition technology, previous studies about behavior in space and time mostly focused on behavior in the outdoor space of a city. With the occurrence of technology for indoor positioning, the spatial scale of this type of study has been extended to the indoor space. Although there is a wide range of technologies and methods for indoor positioning, according to the manner that these data are acquired, indoor positioning data can be divided into three categories, that is, geometric location data, fingerprinting location data, and symbolic location data. Currently, studies based on indoor positioning data can be divided into the following categories: (1) spatiotemporal distribution of people in indoor space; (2) movement pattern of people in indoor space; (3) behavioral habit and attribute inference of people in indoor space; and (4) interaction between people and indoor surroundings. However, most of these studies are still at a primary stage and there are no commonly accepted theories and methodologies at present. We believe that studies in the future may pay attention to the following issues: (1) with regard to data acquisition, the positioning system accomplished through "smart phone plus WiFi" that has wider coverage and lower cost, requires no special equipment, and interacts easily compared with Bluetooth, Radio Frequency Identification (RFID), and Infrared Ray (IR), and so on, is the most promising indoor positioning technology; (2) with regard to research contents, behavioral characteristics in space and time will be the basis, individuals' attribute inference and interaction between individuals and indoor surroundings will be the focus, and analysis of multiscale fused spatiotemporal location data will be the trend of future development; (3) in terms of scientific ethics, privacy issues must be highlighted concerning the recording of individuals' travel activity data at the micro scale.

Key words: positioning data; indoor positioning; data analysis; spatiotemporal behavior; big data; review