



绝对空间定位到相对空间感知的行人导航研究趋势

方志祥¹ 徐 虹² 萧世伦³ 李清泉⁴ 袁淑君¹ 李 灵¹

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

2 武汉科技大学城市建设学院,湖北 武汉,430065

3 美国田纳西大学地理系,田纳西州 诺克斯维尔市,37996-0925

4 深圳大学深圳市空间信息智能感知与服务重点实验室,广东 深圳,518060

摘要: 相对空间比绝对空间更易于被人理解。行人导航本质是以相对于人的导航环境视觉与空间等相对语义来动态引导行人的过程,即相对导航。目前,GIS 导航理论以绝对定位与空间建模为基础,没有充分理解人们对相对语义的认知差异,缺乏基于相对语义的导航理论模型。首先,总结了以绝对空间定位与表达为基础的行人导航研究,提出了相对空间感知的行人导航研究新方向。然后,剖析了相对导航研究的理论研究需求,如:行人相对导航数据采集与建模、行人导航环境相对语义的提取、行人导航行为的自动感知分析、行人导航的多感官交互机制、行人导航路径选择与确认机制等。最后,展望了未来行人导航研究与重要创新的3个阶段。

关键词: 行人导航;相对空间;绝对定位;地图导航;街景导航;空间感知

中图分类号:P237

文献标志码:A

2004年,李德仁^[1]提出了地球空间信息科学需要“实现自动化、智能化和实时化地回答何时(when)、何地(where)、何目标(what object)、发生了何种变化(what change),并且把这些时空信息(4W)随时随地地提供给每个人,服务到每件事(anyone, anything, anytime and anywhere, 4A 服务)”。围绕这个“4W4A”目标,许多研究者开展了时空信息获取、加工、管理与服务等方面的工作,促进了导航与位置服务的快速发展。导航与位置服务研究产生了几个重要的转变:从GPS导航到北斗导航、从专业应用走向大众服务、从地图导航到街景导航、从车载导航到行人导航等。这些服务技术与模式的创新和转变提升了地球空间信息服务对大众的服务水平,同时也带来了很多的导航理论研究挑战和技术瓶颈,亟待突破。

行人导航是导航与位置服务的一个重要应用领域,在大众领域是提供“最后一公里”路径服务的重要技术途径;在专业应用领域是构建空间位置与业务集成新模式的关键技术支撑,为城市综合体等室内外一体导航、江河湖海的巡查、环境与

生态督查、城市生命线的运维等行业应用提供了技术基础。

本文首先总结了以绝对空间定位与表达为基础的行人导航研究现状,然后分析了以相对空间感知的行人导航的理论难点与技术瓶颈,最后展望了未来行人导航研究的3个创新阶段。

1 行人导航与其他导航的差异性

行人导航与车辆导航、机器人导航等都是导航信息服务产业的重要组成部分。车载导航和手机行人导航是计算机通信技术与地理信息技术结合的重要应用,机器人导航是机器视觉的重要方向,在“中国制造 2025”中占有重要位置。三者之间虽然都需要传感器定位技术、GIS 地图技术、移动通信技术等,但它们存在如下的差异性。

1) 车辆导航必须依赖道路网络系统,其空间行走的自由度较低。所需的导航信息集中在道路信息、交通标志信息、交通拥堵实时信息等,其导航过程多表现为绝对信息的相对精确表达,比如

“前方48 m右转”，对距离感不强的被导航对象容易造成与现实道路环境映射的模糊性困惑，被导航对象的空间认知负担较大。

2) 机器人导航已不只是受限于道路网络系统，开放的空间都可以成为可能的导航区域，其空间行走的自由性适中。所需要的信息较为复杂，除了传统车辆导航信息之外，还需要精细化的导航环境数据，包括建筑平面图、静态障碍物、楼梯/电梯/扶梯、门等，以及动态障碍物体等。然而，机器人对导航环境的空间认知与理解能力有一定的局限性，受限于导航算法的鲁棒性，在快速、自适应、鲁棒地判别所遇情景与导航决策方面仍存在智能性能上的缺陷，机器的实时认知处理负担较大。

3) 行人导航不同于车辆导航和机器人导航，其空间行走的自由度非常高。既可以利用车辆导航、机器人导航等所有信息，还可以利用行人的空间经验知识和认知经历，在这方面与车辆导航和机器人导航具有较大的差异。也就是说，行人具有较为强大的自主空间认知能力，导航系统无需采用现有车辆导航逐秒更新导引信息的冗长导引模式，只需告知行人关键位置点即可，导航表达需要适应个体差异。因此，导航信息的显著性、易辨识性则显得比较重要。特别地，行人导航需要区分室外导航与室内导航两种情形，室外导航与室内导航的环境要素存在较大差异，室外大都在人行道、走廊、绿化与空旷区域等行走区域，室内主要是通道、走廊、楼梯/电梯/扶梯等易走区域，室外行走区域的空间尺度较大，结构复杂性较低，空间认知相对容易，行走转向次数较少；室内行走区域则空间尺度较小，结构复杂性较高，空间的同质化结构较多且辨别难，行走转向次数较多，空间认知难度较大。因此，相对于其他导航模式来讲，行人导航是较难体现智能性的导航模式。

2 以绝对空间定位为基础的行人导航研究

目前的行人导航理论与方法研究大都以绝对空间定位与表达为基础，偏重于行人导航过程中的精确定位与绝对信息导引，没有充分利用行人的相对导航寻路能力。其研究主要涉及行人室内外定位、数据采集与组织、路径规划与引导等方面^[2]。

2.1 行人室内外定位

行人导航应用一般分为室外和室内场景，在定位技术方面存在差异。在室外定位方面，全球卫星导航定位系统是行人导航室外定位的主要方

式。目前的智能手机能够接收到的卫星导航系统包括GPS、GLONASS和中国的北斗系统，利用移动基站无线通信网络辅助的A-GPS定位技术，在空旷区域能够较快地得到5 m以下的定位精度，结合智能手机惯性传感器以及行人导航地图的约束匹配，能够得到较为理想的行人导航定位精度^[3]。但是，卫星导航信号的传播会受到建筑物、高压电线等的遮挡和干扰，在城市环境中，受多路径传播的影响会产生较大偏差^[4-5]，在道路分支密集等复杂的行人导航区域，行人无法确定自身的位置；在室内环境中，更加无法提供导航定位服务^[6-8]。

行人导航室内定位技术可以分为基于广域无线网络、基于局域无线网络、基于自包含传感器和基于视觉信息的定位技术等^[9-11]。广域网络是指2G/3G移动通信网络、广播电视信号等，常用的是2G/3G移动通信网络，其定位原理是邻近法或三角测量法。三角测量法是利用接收基站信号的到达时间差计算导航设备到各基站的距离，再根据三角测量方法计算其当前的位置，需要能接收到至少3个基站的信号才能进行定位^[10-12]。这种定位方法能够覆盖大范围面积定位，但由于受非视距传播的影响以及基站间的时间差影响，其定位精度只有50~300 m^[13]，不能满足行人导航定位的精度要求。基于2G/3G移动通信网络的TC-OFDM(trellis-coded orthogonal frequency division multiplex)三维定位提高了广域网络定位的精度，可以达到米级平面定位精度以及亚米级的垂直定位精度^[13]。但是，TC-OFDM系统定位结果中的多路径效应、基站时间差仍有待校正，需要其他定位方法进行补充和融合定位，比如TC-OFDM与影像定位的融合^[13]。

用于行人导航的局域无线网络定位技术包括伪卫星定位^[14]、无线局域网(WiFi)定位^[15-17]、射频识别定位^[18]、蓝牙(blue tooth, BT)定位^[19-20]、超宽带定位^[21-22]、ZigBee定位^[23]等。其中，超宽带定位以及伪卫星定位系统因为成本高、定位范围小以及布网技术复杂等原因，实际应用较少^[13]；而WiFi、BT及ZigBee定位技术的应用较广泛。这几种信号的定位方法包括邻近法和指纹识别法^[23-24]。邻近法是一种模糊定位方法，一般用于短距离信号定位，如BT和ZigBee定位，在WiFi定位中精度只有10~20 m。指纹识别定位的精度可达到3~10 m，取决于传感器的布设以及指纹的采集密度^[24]，所需的时间和人力成本较高。为提高离散指纹识别的精度，需要与WiFi

信号、BT 信号和 ZigBee 信号等定位方法进行融合, 如智能手机自包含传感器的定位采用 WiFi 指纹识别与行人航迹推算、地磁等融合定位^[19, 25-29], 甚至与定位定向系统、激光扫描仪和惯性传感器、立体影像等融合定位^[30]。

基于视觉影像的定位技术不存在 WiFi、BT 等无线网络定位的信号衰减、环境干扰、多路径传播等问题^[13], 在兼顾成本的情况下能实现亚米级的定位精度, 很多智能手机可采用这种定位方法^[11, 31], 但这种定位方法对手机计算性能以及室内外场景图库的要求较高。基于视觉信息的定位系统可以分为绝对定位系统和相对定位系统两类。绝对定位的方式是把手机拍摄的照片与带有地理位置和标签的参考图片或三维模型进行匹配, 采用测量学的后方交会方法来解算行人的坐标位置^[32], 通常通过手机的惯性传感器或低精度的网络定位等技术来缩小图片检索范围^[1-2, 33-34]。如 Agarwal 等^[32]采用一段轨迹上的连续多张照片来检索 Google Map 全景街景图, 并采用测距方法得到街景的三维点云, 进而进行位置解算; Salarian 等^[35]利用 GPS 定位坐标以及手机惯性传感器的方向等信息缩小图库的检索范围; Jiao 等^[11]融合 TC-OFDM 广域定位系统和手机照片实现室内外无缝高精度定位。该类定位方法需要可推算特征点地理坐标的参考图像, 一般的街景图像无法满足要求。相对定位通过计算行人的方向、移动的速度和距离来获取行人相对参考位置的坐标, 从而进行行人的轨迹推算。如利用图像中的灭点位置来推算手机的姿态, 起到视觉陀螺仪的作用^[36-37], 通过与手机惯性传感器进行融合定位, 提高定位精度^[38-40]; 采用时序深度图像(RGB-D)计算行人的移动方向、距离、速度等, 实现连续的行人导航定位^[41-42]。RGB-D 影像的灭点以及深度等信息与辅助惯性传感器融合来进行行人轨迹推算, 可达到分米级的定位精度^[43]。

总之, 通过多传感器融合定位和视觉影像定位等实现室内外无缝导航定位和导航是目前行人导航中室内外定位的主要方向^[13, 44]。此外, 还有学者研究可见光^[4, 11]、地磁场等辅助定位, 以及使用室内 2D/3D 地图^[5, 45]、室内外定位的平滑切换与坐标融合^[46-48]来提高定位精度。虽然目前室内外定位可以达到米级定位精度, 但在行人导航中仍存在以下问题: 一是行人只能通过导航电子地图以及系统上的定位点来对自身位置进行判断, 缺乏位置的视觉语义及空间语义信息, 在导航区域较复杂的情况下, 定位精度误差可能会将行人

定位到相邻的不连通导航区域, 使行人对自身的位置判断错误; 二是行人导航中包括行人地下通道、人行天桥等复杂三维导航区域, 目前使用导航地图的方式无法清晰地表示这些区域, 而三维导航地图的制作成本较高, 在这些区域中行人往往较难确定自身的位置。

2.2 行人导航数据采集与组织

行人导航数据采集来源于多种手段, 包括遥感影像的信息提取、服务于车载的导航电子地图转换、建筑与园区的设计图件、众包信息收集与制作以及街景采集设备等。遥感影像的信息提取可与传统的车载数据采集配合起来, 实现行人导航室外行走路网的采集; 设计图件和众包数据则可实现室内外行走路网的采集^[49-50]; 导航电子地图转换可实现行人导航兴趣点数据的制作; 便携式街景地图采集设备则为行人导航需要的视觉信息提供了便捷的采集手段和来源。

导航数据组织模型是描述导航过程中相关实体与导航实体间关系的模型, 它能够为导航过程提供数据组织、存储与管理的方法, 支持导航系统的地图显示、查询、定位、路径规划和引导等功能的实现, 支撑行人导航系统对运行效率的实时要求。

以 GDF (geographical data file)^[49-50]、Kiwi^[51-52]和 SDAL(shared data access library)等为代表的车载导航数据模型已经相当成熟, 涉及道路网络的表达、动态分段^[53-54]、非立体及复杂地物的表达^[55]、数据的高效存储、导航信息动态更新^[56-58]、多尺度地图显示^[59]、多模式交通集成^[60]等多个方面, 为行人导航数据模型的研究提供了基础。但是, 行人导航数据模型存在其特殊性, 即行人往往不受路网的强制约束, 应以可走区域替代车载导航路网的形式。

Fang 等从室内外空间地标角度提出了基于地标的行人导航数据模型^[61], 张华兵等基于地标显著性提出了行人导航数据模型^[62], 可充分服务于行人的自主空间认知与导航能力。

2.3 路径规划与引导

根据行人在导航过程的实际需求, 可以将路径规划算法分为两类, 即最短路径算法和认知最优算法。最短路径算法考虑路径的主要客观因素, 即道路长度, 将最短路径长度作为寻路目标, 主要包括标号算法、启发式算法、对偶图算法等。典型的标号算法是 Dijkstra 算法^[63], 在规模较大的网络中计算花费较大, 耗时较长; A* 算法^[64]、双向搜索法^[65]、分层算法^[66-67]等启发式搜索策略可加速计算过程; 对偶图算法^[68]的优势在于解决

道路交叉口转向限制等问题。认知最优路径算法考虑行人的主观因素,如行人的认知偏好、路径是否易于描述、最少转弯、最好景观等,更关注的是行人导航需求,从而实现最优认知路径的规划算法。文献[69-71]研究面向行人空间认知的最优路径,采用地标链的方式来替代传统基于路网的行人导航路径,把路径规划归为地标的多目标选择问题,采取蚁群算法、遗传算法、粒子群算法等求解地标链;Fang等^[72]根据行人导航的认知与心理需求,以晚间路径规划为例,构建基于蜂群智能的夜间行人导航路径方法。群体智能算法是求解该类多目标优化路径规划问题的基本手段。

在路径引导方面,通常是基于转向信息的路径引导方式,与车载导航系统中使用的当前位置到转向距离方法相同,缺乏对行人本身空间认知的考虑,其行动指令描述方式如“往前走50 m左转”,将这类信息以语音、文字或地图符号的形式展示给用户,这一类引导方式不太符合行人的寻路和认知习惯,在引导效率上存在不足^[73-75]。地标作为环境可辨识性的对象或区域,可作为人们的寻路线索,帮助减小行人认知负担,提高导航效率与安全性。直接利用地标生成导航引导描述,在复杂环境中表现乏力^[76]。而且,引导过程还需考虑环境突发/常规事件特性^[77]、行人的个人能力^[78-83]等因素,要与地标、路径、定位手段^[84-87]、环境动态^[88]等信息有机结合起来。

3 相对空间感知的行人导航理论研究需求

3.1 行人导航的行为本质

行人导航行为本质是以导航环境相对于人的视觉与空间等相对语义来动态引导行人过程,即相对导航。行人对空间参考、尺度、方位和距离等的理解存在较大差异,无法保证导航过程精确遵照距离、方位角度等绝对空间信息进行引导;而且行人对相对空间信息(如相对于地标的空间参考、相对通视、相对方向、相对远近等)的理解则较为容易,是行人寻路的基本空间能力。

行人导航已成为GIS理论研究的一个重要应用领域,定位技术、移动互联、新型地图等研究为行人导航提供了重要的理论支撑,以绝对空间表达为基础的行人导航理论不能有效支持相对导航理论研究,不太符合行人的相对导航行为本质,已成为GIS理论研究的瓶颈问题。因此,迫切需要发展出相对空间感知的行人导航理论与方法,

适应行人导航的行为本质与特点。

3.2 行人相对导航理论需求

行人相对导航是以人的空间行为与心理需求为中心的导航理论,与传统的行人导航理论相比,更需要理清导航环境、行人与导航系统在整个行人导航时空过程中的相互耦合与支撑关系,突破行人相对导航数据的采集与建模、行人导航环境相对语义的提取、行人导航行为的自动感知分析、行人导航的多感官交互机制、行人导航路径的选择与确认机制等方面的理论难题与技术难点。具体包括以下几个方面:

1)行人相对导航数据的采集与建模。行人导航数据采集大都采用相对度量方式,如相对距离、相对角度、相对视点等,但基本都采用绝对坐标为基础的记录形式与处理,在行人导航运用中还需要逆向运算求解这些相对关系,增大额外计算开销,因此急需发展以相对导航数据采集为基础的建模方法,构建相对导航数据模型,支撑相对导航的查询与计算需求。

2)行人导航环境相对语义的提取。相对导航除了需要基本的距离、方位、通视等关系,还需要依据环境设施与指纹特征,构建行人导航环境地图等。其相对语义的提取还需要分析空间可走性、时空可达性、行为便利性等,为不同空间行为约束的行人导航提供分析基础。

3)行人导航行为的自动感知分析。行人导航不同于车辆导航,需要根据行人各自的行为特性来设计导航模式。具体来讲,需要依据主被动的信号与信息分析手段,构建室内外行人导航环境的全时空感知能力,满足无缝室内外集成、连续感知能力、自适应隐私保护等技术要求,达到行人导航环境保障安全的目的。这些感知手段有助于准确分析各自行人的空间行为能力、空间认知能力以及空间偏好等,构建行人导航注意力理论、导航行为理论、导航决策理论等,为行人引导提供准确的感知手段和决策依据。

4)行人导航的多感官交互机制。传统行人导航的交互方式较为单调,没有发挥多感官的协同作用。行人导航需要发挥智能手机与行人导航环境的多传感器协作、多感官配合等机交互机制,充分理解面向行人的空间感知可表达性、空间认知可变换性、空间偏好可理解性等,为行人引导的精准性提供决策依据。

5)行人导航路径的选择与确认机制。行人导航的路径选择机理比较复杂,需要构建行人的理性时空选择理论、路径确认机制以及时空行为适

应性方法,形成满足行人导航路径的安全、自信等心理需求的分析技术基础;此外,还需要研究行人导航行为预测方法、行人导航负担度量与弱化理论、行为感知的行人引导方法,以保障行人导航的路径安全等心理暗示要求。

4 行人导航未来研究的 3 个阶段

未来的行人导航研究发展将会呈现智能化、智慧化、无形化等趋势,可以划分为如下 3 个阶段。

4.1 阶段 1: 智能交互的行人导航

目前的行人导航服务是基于智能手机等物理载体上的软件应用,其交互机制受限于智能手机的交互条件,无法做到视、听、触、味、嗅等多感官为一体的行人导航技术水平,室内外导航环境的地理信息等依然是行人导航的核心信息资源,其智能交互需要做到地理信息与交互手段的高度契合。未来理论研究会逐步突破行人导航的多感官载体理论与地理信息的时空契合技术瓶颈,形成智能交互的行人导航服务。

4.2 阶段 2: 智慧理解的行人导航

智能交互技术的发展为行人导航的智慧理解理论与方法研究奠定了基础条件,对行人个体、周边人群以及室内外导航环境的智慧理解是该阶段的核心任务。利用多感官的感知数据以及周边的相对动态数据,智慧地理解行人个体的行为能力、行为偏好、心理状态以及与周边的交互模式等,发展个体与环境动态间高度时空契合的导航应用,满足个体在不同导航环境的导航心理需求。

4.3 阶段 3: 无形无感的行人导航

行人导航的“有形”是由客观的信息载体依赖关系决定的,行人导航的“有感”是在缺乏对人的理解、需要人工干预等条件下形成的。在此阶段,行人导航将与室内外环境中各种物理与虚拟空间的载体与应用互联,自动感知和理解人的动态需求,构建环境及其动态自适应的行人导航模式,满足行人导航过程中心理空间的精确需求,从而做到无形无感。

5 结语

当前行人导航研究尚处于初步发展阶段,主要以地理信息科学、计算机科学等领域为主开展关键理论研究、核心技术研发与应用模式拓展,距离行人相对导航的理论要求还有较大的差距。本

文认为,相对导航研究将改变传统以绝对空间定位为核心的理论基础,更加贴近于行人的导航思维,在理论深度拓展与技术应用领域拓宽上都具有较大的发展潜力。

参 考 文 献

- [1] Li Deren. Opportunities for Geomatics[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(9): 753-756(李德仁. 地球空间信息学的机遇[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(9): 753-756)
- [2] Fang Z, Li Q, Shaw S L. What About People in Pedestrian Navigation? [J]. *Geo-spatial Information Science*, 2015, 18(4):135-150
- [3] Bi Jingxue, Zhen Jie, Guo Ying. Accuracy of GPS and A-GPS Positioning on Android Phone[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2016 (7):10-13 (毕京学,甄杰,郭英. Android 手机 GPS 和 A-GPS 定位精度分析[J]. 测绘通报, 2016(7):10-13)
- [4] Kuusniemi H, Chen Y, Chen L. Multi-sensor Multi-network Positioning [M]//Chen R. *Ubiquitous Positioning and Mobile Location-Based Services in Smart Phones*. Hershey, PA: IGI Global, 2012
- [5] Bojja J, Kirkko-Jaakkola M, Collin J, et al. Indoor Localization Methods Using Dead Reckoning and 3D Map Matching [J]. *Journal of Signal Processing Systems*, 2014, 76(3):301-312
- [6] Lauro O, Johann B. Non-GPS Navigation for Security Personnel and First Responders[J]. *Journal of Navigation*, 2007, 60(3):391-407
- [7] Saarinen J. A Sensor-Based Personal Navigation System and Its Application for Incorporating Humans into a Human-Robot Team[EB/OL]. <https://core.ac.uk/download/pdf/80703610.pdf>, 2009
- [8] Pei L, Liu J, Guinness R, et al. Using LS-SVM Based Motion Recognition for Smartphone Indoor Wireless Positioning [J]. *Sensors*, 2012, 12 (5): 6 155-6 175
- [9] Chen R, Pei L, Chen Y. A Smart Phone Based PDR Solution for Indoor Navigation[C]. The 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, USA, 2011
- [10] Gu Y, Lo A, Niemegeers I. A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2009, 11(1):13-32
- [11] Jiao J, Deng Z, Xu L, et al. A Hybrid of Smart-

- phone Camera and Basestation Wide-Area Indoor Positioning Method[J]. *Ksii Transactions on Internet & Information Systems*, 2016,10(2):723-743
- [12] Shu Hua, Song Ci, Pei Tao. Progress of Studies on Indoor Positioning Data Analysis and Application [J]. *Progress in Geography*, 2016, 35(5):580-588 (舒华,宋辞,裴韬. 室内定位数据分析与应用研究进展[J]. 地理科学进展,2016,35(5):580-588)
- [13] Deng Z, Yu Y, Xie Y, et al. Situation and Development Tendency of Indoor Positioning [J]. *China Communications*, 2013, 10(3):42-55
- [14] Barnes J, Rizos C, Wang J, et al. Locata: A New Positioning Technology for High Precision Indoor and Outdoor Positioning[J]. *Journal of Chemical Physics*, 2004,118(15):6 717-6 719
- [15] Mok E, Yuen K Y. A Study on the Use of Wi-Fi Positioning Technology for Wayfinding in Large Shopping Centers[J]. *Asian Geographer*, 2013, 30 (1):55-64
- [16] Chang Y J, Wang T Y. Indoor Wayfinding Based on Wireless Sensor Networks for Individuals with Multiple Special Needs[J]. *Journal of Cybernetics*, 2010,41(4):317-333
- [17] Liu J, Chen R, Ling P, et al. A Hybrid Smartphone Indoor Positioning Solution for Mobile LBS [J]. *Sensors*, 2012, 12(12):17 208-17 233
- [18] Bekkali A, Sanson H, Matsumoto M. RFID Indoor Positioning Based on Probabilistic RFID Map and Kalman Filtering[C]. 3rd IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob 2007), New York, USA, 2007
- [19] Pei L, Chen R, Liu J, et al. Using Inquiry-Based Bluetooth RSSI Probability Distributions for Indoor Positioning[J]. *Journal of Global Positioning Systems*, 2010, 9(2):122-130
- [20] Muñoz-Organero M, Muñoz-Merino P J, Kloos C D. Using Bluetooth to Implement a Pervasive Indoor Positioning System with Minimal Requirements at the Application Level[J]. *Mobile Information Systems*, 2012, 8(1):73-82
- [21] Chóliz J, Hernández-Solana Á, Valdovinos A. Strategies for Optimizing Latency and Resource Utilization in Multiple Target UWB-Based Tracking [C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Cancun, Mexico, 2011
- [22] Kuhn M J, Mahfouz M R, Rowe N, et al. Ultra Wideband 3-D Tracking of Multiple Tags for Indoor Positioning in Medical Applications Requiring Millimeter Accuracy[C]. IEEE Topical Conference on Biomedical Wireless Technologies Networks & Sensing Systems, Santa Clara, CA, USA, 2012
- [23] Liu Xiaokang, Guo Hang. Fingerprint Database Optimization Algorithm Based on ZigBee Indoor Positioning System [J]. *Computer Engineering*, 2014, 40(2):193-198(刘小康,郭杭. 基于 ZigBee 室内定位系统的指纹库优化算法[J]. 计算机工程, 2014,40(2):193-198)
- [24] Kaemarungsi K, Krishnamurthy P. Properties of Indoor Received Signal Strength for WLAN Location Fingerprinting[C]. The 1st Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services, New York, USA, 2004
- [25] Zhou Rui, Yuan Xingzhong, Huang Yiming. WiFi-PDR Fused Indoor Positioning Based on Kalman Filtering [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2016,45(3):399-404 (周瑞,袁兴中,黄一鸣. 基于卡尔曼滤波的 WiFi-PDR 融合室内定位[J]. 电子科技大学学报, 2016,45(3):399-404)
- [26] Zhang Peng, Zhao Qile, Li You, et al. PDR/WiFi Fingerprinting/Magnetic Matching-Based Indoor Navigation Method for Smartphones [J]. *Journal of Geomatics*, 2016,41(3):29-32 (张鹏,赵齐乐,李由,等. 基于 PDR、WiFi 指纹识别、磁场匹配组合的室内行人导航定位[J]. 测绘地理信息,2016,41(3): 29-32)
- [27] Cheng J, Yang L, Li Y, et al. Seamless Outdoor/Indoor Navigation with WiFi/GPS Aided Low Cost Inertial Navigation System[J]. *Physical Communication*, 2014, 13(PA):31-43
- [28] Li Y, Zhuang Y, Zhang P, et al. An Improved Inertial/WiFi/Magnetic Fusion Structure for Indoor Navigation[J]. *Information Fusion*, 2017,34(C): 101-119
- [29] Chen L H, Wu H K, Jin M H, et al. Intelligent Fusion of Wi-Fi and Inertial Sensor-Based Positioning Systems for Indoor Pedestrian Navigation[J]. *Sensors Journal IEEE*, 2014,14(11):4 034-4 042
- [30] Rigelsford J. Panoramic Vision: Sensors, Theory and Applications[M]. New York: Springer-Verlag, 2001
- [31] Chen L, Kuusniemi H, Chen Y, et al. Constraint Kalman Filter for Indoor Bluetooth Localization[C]. Signal Processing Conference, 23rd European,

- Nice, France, 2015
- [32] Agarwal P, Burgard W, Spinello L. Metric Localization Using Google Street View[C]. 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Hamburg, Germany, 2015
- [33] Lowe D G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2):91-110
- [34] Majdik A L, Albers-Schoenberg Y, Scaramuzza D. MAV Urban Localization from Google Street View Data[C]. 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Tokyo, Japan, 2013
- [35] Salarian M, Manavella A, Ansari R. Accurate Localization in Dense Urban Area Using Google Street View Images [C]. SAI Intelligent Systems Conference (Intelli Sys), London, UK, 2014
- [36] Sonka M, Hlavac V, Ceng R B D M. Image Processing, Analysis and Machine Vision[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2014, 19(82):685-686
- [37] Klein G S W, Drummond T. A Single-Frame Visual Gyroscope[C]. The British Machine Vision Conference, Oxford, UK, 2005
- [38] Ruotsalainen L, Kuusniemi H, Chen R. Visual-Aided Two-Dimensional Pedestrian Indoor Navigation with a Smartphone[J]. *Journal of Global Positioning Systems*, 2011, 10(1):11-18
- [39] Hong D, Lee H, Cho H, et al. Visual Gyroscope: Integration of Visual Information with Gyroscope for Attitude Measurement of Mobile Platform[C]. International Conference on Control, Automation and Systems, Seoul, South Korea, 2008
- [40] Ruotsalainen L, Bancroft J, Kuusniemi H, et al. Utilizing Visual Measurements for Obtaining Robust Attitude and Positioning for Pedestrians[C]. ION GNSS12 Conference, Nashville, TN, USA, 2012
- [41] Kerl C, Sturm J, Cremers D. Robust Odometry Estimation for RGB-D Cameras [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Karlsruhe, Germany, 2013
- [42] Newcombe R A, Izadi S, Hilliges O, et al. Kinect-Fusion: Real-Time Dense Surface Mapping and Tracking[C]. IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), Basel, Switzerland, 2012
- [43] Chen C, Chai W, Zhang Y, et al. A RGB and D Vision Aided Multi-sensor System for Indoor Mobile Robot and Pedestrian Seamless Navigation[C]. Position, Location and Navigation Symposium-PLANS2014, 2014 IEEE/ION, Monterey, CA, USA, 2014
- [44] Pei L, Chen R, Chen Y, et al. Indoor/Outdoor Seamless Positioning Technologies Integrated on Smart Phone[C]. 1st International Conference on Advances in Satellite and Space Communications, Colmar, France, 2009
- [45] Puyol M G, Robertson P, Heirich O. Complexity-Reduced Foot SLAM for Indoor Pedestrian Navigation Using a Geographic Tree-Based Data Structure [J]. *Journal of Location Based Services*, 2013, 7(3):182-208
- [46] Bi Jingxue, Wang Yunjia, Zhen Jie. A Method of Indoor and Outdoor Scene Recognition Based on Mobile Phone and Its Preliminary Experiment[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2017, 33(3): 48-51 (毕京学, 汪云甲,甄杰.一种基于手机端的室内外场景识别方法及其初步实验[J].地理与地理信息科学,2017,33(3):48-51)
- [47] Tian Hui, Xia Linyuan, Mo Zhiming, et al. Signals of Opportunity Assisted Ubiquitous Positioning and Its Key Elements for Outdoor/Indoor Environment [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(11):1 372-1 376 (田辉,夏林元,莫志明,等.泛在无线信号辅助的室内外无缝定位方法与关键技术[J].武汉大学学报·信息科学版,2009,34(11):1 372-1 376)
- [48] Hu Xuke, Shang Jian'ga, Gu Fuqiang, et al. Development of Indoor/Outdoor Seamless Positioning Prototype System Fusing GPS and Wi-Fi[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2014, 35(2):428-432 (胡旭科,尚建嘎,古富强,等.融合GPS与Wi-Fi的室内外无缝定位原型系统研制[J].小型微型计算机系统,2014,35(2):428-432)
- [49] Liu T, Zhang X, Li Q, et al. A Visual-Based Approach for Indoor Radio Map Construction Using Smartphone[J]. *Sensors*, 2017, 17(8):1 790
- [50] Han Q, Curtin K M, Rice M T. Pedestrian Network Repair with Spatial Optimization Models and Geocrowdsourced Data[J]. *GeoJournal*, 2018, 83(2):347-364
- [51] Van Essen R, Hiestermann V. "X-GDF"—The ISO Model of Geographic Information for ITS[C]. ISPRS Workshop on Service and Application of Spatial Data Infrastructure, Hangzhou, China, 2005
- [52] ISO/TC204/WG3. ISO14825-2004. Intelligent Transportation Systems-Geographic Data Files

- (GDF)-Overall Data Specification[S]. EN: International Standards Organization, 2005
- [53] Kiwi-w Consortium. Input for ISO Physical Storage Format[EB/OL]. http://kiwi-w.mapmaster.co.jp/format_english/format_kihon.html, 2006
- [54] Kiwi-w Consortium. Kiwi Format, Version 1.22 [EB/OL]. http://www.kiwi-w.mapmaster.co.jp/documents_eng.html, 2017
- [55] Li Qingquan, Zuo Xiaoqing, Xie Zhiying. Progress and Trend of Research on GIS-T Linear Data Model [J]. *Geography and Geo-information Science*, 2004, 20(3):31-35 (李清泉,左小清,谢智颖. GIS-T线性数据模型研究现状与趋势[J].地理与地理信息科学,2004,20(3):31-35)
- [56] Li Qingquan, Xu Jinghai, Li Mingfeng. Progress and Trend of Research on Navigable Digital Map Data Model [J]. *Journal of Geomatics*, 2007, 32(6):22-25(李清泉,徐敬海,李明峰.导航地图数据模型研究现状与趋势[J].测绘地理信息,2007,32(6):22-25)
- [57] Lu Feng, Zhou Chenghu, Wan Qing. A Feature-Based Non-planar Data Model for Urban Traffic Networks [J]. *Acta Geodaetica et Cartographic Sinica*, 2000, 29(4):334-341(陆锋,周成虎,万庆.基于特征的城市交通网络非平面数据模型[J].测绘学报,2000,29(4):334-341)
- [58] Liu Y, Zheng J, Lei Y, et al. Study on the Real Time Navigation Data Model for Dynamic Navigation[C]. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'05), Seoul, South Korea, 2005
- [59] Xia K, Wei C. Study on Real-Time Navigation Data Model Based on ESRI Shapefile[C]. International Conference on Embedded Software & Systems Symposia, New York, USA, 2008
- [60] Wang Zhao. Autonomous Incremental Updating of Vehicle Navigation Digital Map[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012(王钊.车辆导航电子地图的自增量更新[D].北京:清华大学,2012)
- [61] Fang Z, Li Q, Zhang X, et al. A GIS Data Model for Landmark-Based Pedestrian Navigation[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2012, 26(5): 817-838
- [62] Zhang Huabing, Fang Zhixiang, Guo Yihan, et al. A Saliency-Based Pedestrian Navigation Data Model [J]. *Journal of Geomatics*, 2015, 40(3): 57-59(张华兵,方志祥,郭翌寒,等.基于实景显著性的行人导航数据模型[J].,测绘地理信息,2015, 40(3): 57-59)
- [63] Dijkstra E W. A Note on Two Problems in Connection with Graphs [J]. *Numerische Mathematik*, 1959, 1(1): 269-271
- [64] Hart P E, Nilsson N J, Raphael B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths[J]. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 1968, 4(2):100-107
- [65] Li Yinzheng, Guo Yaohuang. Bound Searching Algorithm for Shortest Path in a Network[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2004, 39(5): 561-564(李引珍,郭耀煌.网络最短路径定界搜索算法[J].西南交通大学学报,2004,39(5):561-564)
- [66] Delling D, Goldberg A V, Pajor T, et al. Customizable Route Planning in Road Networks[J]. *Transportation Science*, 2017, 51(2): 566-591
- [67] Zheng Nianbo, Li Qingquan, Xu Jinghai, et al. A Bidirectional Heuristic Shortest Path Algorithm with Turn Prohibitions and Delays[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(3): 256-259(郑年波,李清泉,徐敬海,等.基于转向限制和延误的双向启发式最短路径算法[J].武汉大学学报·信息科学版,2006, 31(3): 256-259)
- [68] Tomko M, Winter S, Claramunt C. Experiential Hierarchies of Streets[J]. *Computers Environment and Urban Systems*, 2008, 32(1): 41-52
- [69] Zhang Xing, Li Qingquan, Fang Zhixiang, et al. Landmark and Branch-Based Pedestrian Route Complexity and Selection Algorithm[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(10): 1239-1242(张星,李清泉,方志祥,等.顾及地标与道路分支的行人导航路径选择算法[J].武汉大学学报·信息科学版,2013,38(10):1 239-1 242)
- [70] Liu Tao, Zhang Xing, Li Qingquan, et al. An Indoor Pedestrian Route Planning Algorithm Based Landmark Visibility[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(1): 43-48 (刘涛,张星,李清泉,等.顾及地标可视性的室内导航路径优化算法[J].武汉大学学报·信息科学版,2017,42(1):43-48)
- [71] Fang Z, Li Q, Zhang X. A Multiobjective Model for Generating Optimal Landmark Sequences in Pedestrian Navigation Applications[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2011, 25(5): 785-805
- [72] Fang Z, Li L, Li B, et al. An Artificial Bee Colony-

- Based Multi-objective Route Planning Algorithm for Use in Pedestrian Navigation at Night[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2017, 31(10): 2 020-2 044
- [73] Zhao Weifeng, Li Qingquan, Li Bijun. Spatial Cognition Driven Context-Adaptive Route Directions [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(6): 1 171-1 188(赵卫锋,李清泉,李必军. 空间认知驱动的自适应路径引导[J]. 遥感学报,2011,15(6): 1 171-1 188)
- [74] Zhu Haihong, Wen Ya, Mao Kai, et al. A Quantitative POI Salience Model for Indoor Landmark Extraction[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(3): 336-341(朱海红,温雅,毛凯,等. 室内地标提取的POI显著度定量评价模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2018,43(3): 336-341)
- [75] Yang Jie, Yang Nai, Huang Ting, et al. Cognitive Rules of People Choosing Routes in Large Stores [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(3): 414-420(杨洁,杨乃,黄婷,等. 大型商场内人群择路行为认知规律的研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2017, 42(3): 414-420)
- [76] Li Lin, Mao Kai, Tan Yongbin. Hierarchy Landmarks Multi-granularity Description Method for Route Guidance [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014 43(1):105-110(李霖,毛凯,谭永滨. 地标分层多粒度路径导引描述方法[J]. 测绘学报,2014, 43(1):105-110)
- [77] Bernardini G, Santarelli S, Quagliarini E, et al. Dynamic Guidance Tool for a Safer Earthquake Pedestrian Evacuation in Urban Systems[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2017, 65:150-161
- [78] Chaudary B, Paajala I, Keino E, et al. Tele-guidance Based Navigation System for the Visually Impaired and Blind Persons[C]. International Summit on eHealth (eHealth360), Budapest, Hungary, 2016
- [79] Vanclooster A, van de Weghe N, de Maeyer P. Integrating Indoor and Outdoor Spaces for Pedestrian Navigation Guidance: A Review[J]. *Transactions in GIS*, 2016, 20(4): 491-525
- [80] Albrech R, Vaananen R, Lokki T. Guided by Music: Pedestrian and Cyclist Navigation with Route and Beacon Guidance[J]. *Personal and Ubiquitous Computing*, 2016, 20(1):121-145
- [81] Balata J, Mikovec Z, Bures P, et al. Automatically Generated Landmark-Enhanced Navigation Instruc-
- tions for Blind Pedestrians[C]. Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS), Gdansk, Poland, 2016
- [82] Gonnot T, Sanie J. Integrated Machine Vision and Communication System for Blind Navigation and Guidance[C]. IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT), Univ N Dakota, Grand Forks, ND, 2016
- [83] Spiers A J, Dollar A M. Outdoor Pedestrian Navigation Assistance with a Shape-Changing Haptic Interface and Comparison with a Vibrotactile Device[C]. 24th IEEE Haptics Symposium, Philadelphia, PA, 2016
- [84] Zhao Wenye, Gao Jingxiang, Li Zengke, et al. An Indoor Positioning System Based on Map-Aided KF-PF Module[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(5): 806-812(赵文晔,高井祥,李增科,等. 地图匹配辅助的KF-PF室内定位算法模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2018, 43(5): 806-812)
- [85] Wan Wenhui, Li Yu, Hu Wenmin, et al. Mobile Platform Localization by Integration of Stereo Cameras, IMU and Wheel Qdometer Based on Federated Filter[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(1): 101-106(万文辉,李宇,胡文敏,等. 基于联邦滤波进行立体相机/IMU/里程计运动平台组合导航定位[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2018, 43(1): 101-106)
- [86] Zhou Baoding, Li Qingquan, Mao Qingzhou, et al. User Activity Awareness Assisted Indoor Pedestrian Localization [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(6): 719-723(周宝定,李清泉,毛庆洲,等. 用户行为感知辅助的室内行人定位[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2014, 39(6): 719-723)
- [87] Huang Zhiyong, Zhao Dongqing, Zhang Shuangna, et al. A-GNSS Indoor Positioning Based on Coarse-Time Navigation and RAIM Algorithm[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(3): 321-327(黄志勇,赵冬青,张爽娜,等. 基于粗时段导航与RAIM算法的A-GNSS室内定位[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2017, 42(3): 321-327)
- [88] Hu Xuemin, Zheng Hong, Guo Lin, et al. Crowd Motion Estimation Using a Fisheye Camera[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(4): 537-542(胡学敏,郑宏,郭琳,等. 利用鱼眼相机对人群进行运动估计[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2017, 42(4): 537-542)

Pedestrian Navigation Research Trend: From Absolute Space to Relative Space-Based Approach

FANG Zhixiang¹ XU Hong² SHAW Shih-Lung³ LI Qingquan⁴ YUAN Shujun¹ LI Ling¹

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China

3 Department of Geography, The University of Tennessee, Knoxville, TN 37996-0925, USA

4 Shenzhen Key Laboratory of Spatial Smart Sensing and Services, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

Abstract: Relative space is easier to be understood and used in navigation service by pedestrians. The basic characteristic of pedestrian navigation process is the relative space-based guidance by visual and spatial semantics within outdoor and indoor environment. It could be called relative pedestrian navigation. Current pedestrian navigation theory and technique are built upon the locating and modeling within the absolute space. It could not understand the difference of recognition ability of different pedestrians, especially on the relative visual and spatial semantics. The research community of pedestrian navigation doesn't have a relative space-based pedestrian navigation theory framework and technology, which makes the pedestrian services not friendly. This paper reviews the related studies on pedestrian navigation, such as the outdoor/indoor positioning, data collecting and organizing, route planning and guiding. Then, this paper concludes the potential research problems of pedestrian navigation, for example, the relative data collecting and modeling, relative semantic attracting, pedestrian navigation behavior sensing, multisensory interaction, and route choice and confirming mechanism. Finally, this paper introduces a three-stage divisions for the future pedestrian navigation studies.

Key words: pedestrian navigation; relative space; absolute locating; map-based navigation; scene-based navigation; spatial sensing

First author: FANG Zhixiang, professor, specializes in space-time GIS, spatio-temporal modeling of urban big data and pedestrian navigation. E-mail: zxfang@whu.edu.cn

Corresponding author: XU Hong, associate professor. E-mail: xuhong@wust.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41771473; the National Key Research and Development Program of China, Nos. 2017YFC1405302, 2017YFB0503802; the Fundamental Research Funds for the Central Universities.