

室内定位方法综述

席 瑞 李玉军 侯孟书

(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 611731)

摘 要 近年来,随着情景感知、环境智能等应用需求不断增加,对用户位置信息精度的要求也在不断提高。因室内环境复杂、缺乏统一的基础性架构等因素,室内定位方法逐渐成为用户定位领域的研究热点。考虑到室内定位方法的基础架构、位置精度、方法普适性等因素,将现有的室内定位方法分成 3 大类:基于特定设备的定位方法、基于 WIFI 的定位方法和基于移动传感器的定位方法。针对具体定位算法及不同算法的性能、特点和优劣等进行探讨和分析,最后总结当前室内定位方法领域的研究现状,并简要介绍该领域未来的研究方向及发展趋势。

关键词 位置信息,室内定位,WIFI,移动传感器

中图分类号 TP3-0 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.4.001

Survey on Indoor Localization

XI Rui LI Yu-jun HOU Meng-shu

(School of Computer Science & Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract In recent years, with an increasing demand of context-aware applications and ambient intelligence applications, the accuracy requirements of user location information are rising. Due to the fact of complex indoor environment and the loss of unified infrastructure, indoor positioning technology has gradually become the focus field of user localization. Taking into account the infrastructure of indoor positioning technology, location accuracy, generality and other factors, the existing methods were divided into three categories, specific device-based localization, WIFI-based localization and mobile sensor-based localization. We discussed and analyzed specific localization technology and different methods, such as performance, features, advantages and disadvantages, etc. Finally, we summarized the current state of indoor localization technology field, and briefly described the direction of future research and development trends in the field.

Keywords Location information, Indoor localization, WIFI, Mobile sensor

1 引言

无线网络、移动计算、普适计算等技术的不断发展使得基于位置的服务和应用日益普及,而 GPS 定位系统在室内环境或者高层建筑密集的地区无法检测到卫星信号,已无法满足人们对定位精度的要求。因此,如何准确地获取用户在建筑内或建筑群中的位置信息,已成为实现室内基于位置服务(Indoor Location-based Services, ILBS)的核心问题。

定位即确定物体之间空间关系的一种机制。定位系统通过感知空间位置属性,利用相关算法计算物理实体的物理位置或逻辑位置信息,根据定位环境的不同,通常可分为室外定位和室内定位。虽然这两种定位技术在计算位置算法上具有一定的相似性,但是室内定位因特殊的环境因素与社会因素而具有一些特殊性,例如缺乏统一的基础性架构,室内定位技术难以取得一致性、普适性;室内环境变化具有严重的干扰作用;室内定位精度要求更高,甚至多维^[1-4]。室内定位的上述特点使得室外定位方法无法很好地应用在室内复杂的环境

中,室内定位技术逐渐成为定位导航领域的一个重要分支和研究热点。

针对室内定位特点,目前室内定位方法主要围绕降低定位服务成本、提高室内定位精度、适应复杂多变的室内环境等方面展开研究。本文根据定位方法所采用介质的不同,将室内定位技术分成 3 类:基于特定设备的定位方法、基于 WIFI 信号的定位方法和基于移动传感器的定位方法。

本文第 2—4 节分别详细介绍和总结基于特定设备的定位方法、基于 WIFI 信号的定位方法、基于移动传感器的定位方法;最后总结室内定位技术的特点,并指出室内定位技术现在面临的问题和未来研究趋势、发展方向。

2 基于特定设备的定位方法

特定设备是指研究人员为满足定位需求而专门设计的可以发送、接收特殊信号波并具有一定计算处理能力的设备,例如红外发射器、超声波发射器、RFID 设备等。

由于室内定位具有严苛的精度要求,且受室内环境影响

到稿日期:2015-04-21 返修日期:2015-07-16

席 瑞(1990—),男,博士生,主要研究领域为移动互联网、室内定位,E-mail: rryan_xi@163.com;李玉军(1975—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要研究领域为无线传感器网络;侯孟书(1971—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机网络。

较大,在初期阶段研究人员通常将特定硬件设备预先部署在室内环境中,并在环境中广播具有特殊标识信息的信号波(例如红外线、超声波、RFID等),待定位物体根据收集到的信号波计算已知设备的相对位置信息,进而推算出自己的绝对位置信息。现有的基于特定设备的定位系统有 Active Badge^[5]、Bat^[6]、Cricket^[7]和 LANDMARC^[8]等。

Active Badge 系统是由 Olivetti 研究实验室的 Roy Want、Andy Hopper 等人设计的利用红外线(Infrared Ray, IR)信号波定位的室内定位系统,该系统采用带有唯一 ID 信息的主动红外标签来标识该定位系统追踪的任意一个目标对象。Active Badge 的工作原理是:首先,红外标签主动地、周期性地向外界广播自身的 ID 信息;其次,广播的 ID 信息被预先部署在室内区域的红外接收器收集,并传递到中心服务器;最后,中心服务器根据已知的红外接收器位置信息估算出目标对象的位置信息。红外线由于具有光的特性,无法穿越室内墙壁等不透明物体造成的障碍,对定位目标对象所在的房间或者小型封闭的区域具有很高的测量精度。

Bat 系统是 Andy Hopper 等人利用无线信号和超声波(Ultrasonic, UT)方法,基于 Active Badge 系统架构设计的一套室内定位系统。该系统由 Bat 发射器、超声接收阵列和一个数据中心 3 部分组成,其中 Bat 发射器包括 4 个组成模块:无线接收器、超声波发射器、FPGA 模块和微处理器,超声接收阵列作为定位系统的接收单元则被预先部署在一些位置已知且通过有线网络链接的地方。与 Active Badge 不同,Bat 系统周期性地向外界环境广播具有唯一 ID 标识信息的无线信号波,同时会发射一段超声波脉冲。超声接收阵列中的接收单元记录无线信号及相应的超声波脉冲到达时间,且无线信号和超声波传播速度是已知的,利用到达时间差即可计算出 Bat 节点与相应接收单元的相对位置距离。最后根据三角定位原理,当不少于 3 个不共线的接收单元的相对位置距离已知时,即可确定 Bat 节点在三维空间中的唯一位置。Bat 系统虽然定位精度达到厘米级别,但其系统部署成本十分昂贵,难以得到大规模的推广应用。

Active Badge 和 Bat 系统采用集中式系统架构,系统部署和管理需要花费大量资金,普适性不高。MIT 计算机实验室的 Hari Balakrishna 等人从系统普适性、系统管理维护费用等因素考虑,利用 UT、RF 提出了分布式的室内定位系统 Cricket,它能够提提供房间粒度的定位信息服务。系统利用预先部署在房间内的信标节点来标识房间信息,Cricket 节点监听记录附近房间内信标节点广播无线信号和超声波信号的到达时间,将到达时间差作为超声波传输时间计算 Cricket 节点到相应信标节点的位置距离,Cricket 将位置距离最近的信标节点房间信息作为节点实际的空间位置信息。

LANDMARC 室内定位系统是基于 RFID 校验、参考标签辅助定位的动态定位识别系统。LANDMARC 系统由一个传感器网络、无线网络和一个液晶标签集中监视界面 3 个部分组成,其中传感器网络包括 RF 读写器和 RF 标签,无线网络为环境中的移动节点提供与 Internet 间的通信服务。LANDMARC 系统利用监测到的信号强弱信息,根据“最近邻居”算法估算节点空间位置的几何关系。

根据上述几种不同专用定位设备采用的定位方法,针对

各种方法的定位精度、抗多径、抗干扰、部署成本等方面进行比较分析,如表 1 所列。

表 1 几种专用设备定位方法的比较

定位方法	定位精度	抗多径	抗干扰	部署成本	数据通信
IR	5~10m	无	好	高	无
UT	1~10cm	无	好	高	无
RFID	5cm~5m	较好	较差	高	较差
UWB	6~15cm	好	好	极高	好

如表 1 所列,基于专用设备的定位方法采用特殊信号实现的室内定位精度很高(大多数可以达到 cm 级别的定位精度),但其一般需要预先在目标空间中部署特定硬件设备甚至特定的定位终端才能完成定位,导致定位费用过高,普适度过低,仅适用于某些特定领域,如煤炭矿井人员定位、设备定位、军事领域等。

3 基于 WIFI 信号的定位方法

相较于利用 IR、RFID、UT 等特殊信号定位的高费用、低普适度等缺点,WIFI 信号因在个人家庭、商场等室内环境中普遍存在,大大降低了定位系统的部署难度和建设成本。同时笔记本电脑、智能手机、平板电脑等设备都具备无线网卡,使得基于 WIFI 信号的定位方法具有广泛应用的可能。

基于 WIFI 信号的定位方法主要包括基于测距的定位方法和基于指纹定位方法。基于测距的定位方法利用无线信号在空间传输过程中的能量衰减特性计算出到多个已知位置的 AP 节点距离,进而通过相应的定位方法推算目标节点的位置信息。基于指纹的定位方法(Fingerprinting-based Localization)根据不同位置上无线信号的空间差异性,将空间中某一个无线信号特征作为指纹映射到特定空间位置,通过建立指纹数据库、匹配信号指纹方式估算目标节点的位置信息。受 WIFI 信号定位方法启发,研究人员利用室内环境中普遍存在的其他物理信息(如 GSM、FM、声音等)实现定位。

3.1 基于测距的定位方法

基于无线信号传输模型测距具有不同方法,如 ToA、TDoA、接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)等,基于 RSS 测距因其硬件成本和计算开销比较低而被广泛使用。

基于 RSS 测距的室内定位方法的基本原理是测量目标节点 WIFI 信号的 RSS,根据 WIFI 信号传输模型(例如对数-距离衰减模型、自由空间路径衰减模型及对数-正太阳影模型等)计算其到不同参考 AP 节点的距离,利用不同的定位算法和距离约束估算目标节点的位置。

根据 WIFI 信号在室内的传播模型,利用 RSS 值计算与参考 AP 的距离时,为尽量减少不必要的人工操作,通常会利用 AP 间的 RSS 关系动态自适应地估计模型参数。例如 Ravi 等人提出的三边插值(Triangular Interpolation and eXtrapolation, TIX)定位方法^[9],该方法根据每个 AP 的所有邻居 AP 的 RSS 值为该 AP 构建多个 RSS-距离映射关系,然后利用 RSS(RSSI in Signal Space)方法估算到参考 AP 的距离,最后选择 3 个 RSS 值最高的 AP 构造三角形区域,利用迭代三边插值的方法估计目标节点的物理坐标位置。除了 TIX 定位方法使用的线性插值技术,Lim 等人提出的定位方法根据 AP 间及目标节点与邻居 AP 间的 RSSI 值,利用截断奇异值分解(Truncated Singular Value Decomposition, SVD)技术创建 RSS 值-实际物理距离映射关系^[10];Ji 等人提出的 ARIADNE

定位系统利用基本图像处理技术、射线追踪(Ray Tracking, RT)技术,根据二维建筑平面图及一个实际信号强度测量值生成无线信号强度分布图,并利用模拟退火方法估计无线传播模型参数^[11]。

上述几种利用 RSS 值计算距离的方法或需要修改 AP 协议栈,或需要已知 AP 实际位置,或需要参考节点,使得定位方法的应用受到一定限制。Krishna 等人提出的 EZ 定位方法无需先验知识、无需用户或额外设备参与亦能完成定位^[12],其思想是当 AP 与移动终端之间的距离约束足够多时即可估算 AP 与移动终端的相对位置关系,已知 3 个不共线移动设备的绝对位置即能得到其他移动终端的绝对位置信息。EZ 定位方法利用对数-距离路径衰减(Log-Distance Path Loss, LDPL)模型,根据移动终端与各个 AP 之间的 RSS 值构建相应的信号-距离约束关系模型,同时将移动手机在室内环境中偶尔获取的多个不共线的 GPS 位置信息作为绝对位置信息,利用遗传算法求解信号-距离约束关系模型,估计所有移动终端的绝对位置信息。

3.2 基于指纹的定位方法

基于指纹的定位方法利用 WIFI 信号空间位置差异性,通过位置指纹关系数据库及匹配算法查找目标节点的位置指纹对应的物理位置信息,以估计节点位置。常用的匹配算法有最近邻(NN)算法、神经网络算法、向量机算法、KNN 算法等。基于 WIFI 信号的指纹定位方法主要包括基于 RSS 指纹的定位方法、基于 CIR 指纹的定位方法等。

(1) 基于 RSS 指纹的定位方法

传统的基于 RSS 指纹的定位方法大致分为两个阶段:训练阶段和服务阶段。在训练阶段,通过人工方式对定位区域不同位置的无线信号特征采样并存入位置指纹数据库。在服务阶段,服务器端将目标节点所在位置的无线信号指纹与指纹数据库匹配,查找相似度最大指纹对应的位置信息作为目标节点位置。例如微软研究院提出的 RADAR 系统^[13]、Youssef 等人提出的 Horus 系统^[14]等均采用人工方式收集信号指纹。Horus 系统在训练阶段利用统计方法中的概率技术对采样位置上的 AP 信号强度特征进行建模,包括参数化分布模型和非参数化的分布模型,在服务阶段,利用最大似然估计的方法对用户采集到的 AP 信号强度向量进行匹配查找,同时利用连续空间估计技术、增量三角(Incremental Triangulation)聚类的方法来提高定位精度、降低计算量。

传统的基于 RSS 的定位方法由于需要人工收集指纹特征,且需定期更新指纹特征库,不仅代价高昂而且耗时,不利于大范围的推广使用。使用自动化方式构建指纹特征库的方法减少了人为参与,更易于部署和广泛使用,如 WILL^[15]、UnLoc^[16]等。

WILL 定位方法将用户移动性与无线信号穿墙衰减效应结合推测空间连通关系,实现了房间级别定位。利用无线信号衰减效应对不同虚拟空间的无线信号指纹特征聚类,通过人在不同虚拟空间之间的移动构建逻辑平面图,建立与不同物理房间的映射关系。

UnLoc 通过挖掘用户移动数据对基于惯性导航计算得到的位置进行修正,UnLoc 将室内环境中具有独特物理环境特征(例如在电梯中加速度传感器采样值表现出一种独特模型,在走廊角落监听到一组独特的无线接入点等)的位置作为参考地标(landmarks),挖掘用户移动过程中收集的运动数据

判断参考节点。类似地,利用移动数据挖掘的方法有 Zheng Yang 等人提出的 LiFs^[17]、Rai 等人提出的 Zee^[18]等。

(2) 基于 CIR 指纹的定位方法

由于多径、衰减及室内环境变化等因素干扰,导致室内 RSS 指纹会发生变化,且 RSS 指纹空间区分能力有限,易造成相邻位置的 RSS 指纹混淆,降低了基于 RSS 指纹的方法的定位精度。而信道冲激响应(Channel Impulse Response, CIR)信息相较于 RSS 具有更好的空间区分性和时间稳定性,利用 CIR 作为指纹特征定位可取得更高的定位精度。已有的基于 CIR 指纹的定位方法有 PinLoc^[19]、SpinLoc^[20]等。

PinLoc 定位系统利用多个正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)子载波的信道响应作为指纹特征,实现了 1m×1m 区域定位。无线信号通过 OFDM 技术发射,不同子载波的波道频率响应(Channel Frequency Response, CFR)作用以不同的相位和大小到达某一个相同位置叠加形成了接收信号,在每个位置的 CFRs 是随机的,具有一定的统计结构,且不受时间和环境变化影响。PinLoc 定义了一个 spot 大小为 1m×1m 的矩形区域,在指纹收集阶段利用 k-means 聚类算法和变分贝叶斯推理技术形成 spot 的特征指纹——CFR 集,根据用户监听到的信号序列利用机器学习方法估计其所属的 spot。

由于 PinLoc 定位方法在指纹收集阶段需要进行大量工作(与 RADAR、Horus 相当),Sen 等人对其进行改进,提出了 Spinloc。室内环境中无线信号衰减模型与人体如何阻碍信号相关,通过用户旋转信号衰减变化可以得到附近 AP 的方向,进而可估算出用户的室内位置。SpinLoc 首先通过 Intel 5300 提供的子载波 CFR 利用快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)得到功率延迟分布(Power Delay Profile, PDP),并获取相应的直接路径能量(Energy of the Direct Path, EDP);然后在用户旋转过程中通过 EDP 变化,取 EDP 值最小时手机罗盘的值作为 AP 与用户的方向,最后选择 3 个不共线的 APs,结合角度差值和 RSSI 利用三角定位技术估算得到用户的位置。

除上述介绍的方法之外,一些研究人员将 CIR 指纹技术与其他技术相结合,提出室内定位方法,例如,Zouari 等人结合前馈神经网络和 CIR 指纹技术实现了室内定位^[21];Jin Yun-ye 等人将非参数回归模型与 CIR 指纹结合,提出了室内定位方法^[22];Khanbashi 等人利用简单的神经网络模式识别技术和 RT 技术实现了基于 CIR 指纹的定位方法^[23]等。基于 CIR 指纹的定位方法虽然具有很好的定位精度,但目前的研究方法只能通过 Intel 5300 网卡获得 CIR 信息进行定位。

为弥补 RSS 指纹在室内定位中的缺陷,一些研究人员试图通过一些其他手段来提高 RSS 指纹定位的精度,例如 Sen 等人结合 RSSI 和直线路径角度实现定位方法 CPUID^[24],Liu 等人利用声音辅助信息实现定位^[25]等。

由于直线路径传播的无线信号的传播距离最短,在同一无线信号所有传播路径的信号中其最早被接收,且无线信号的 EDP 不受环境及多径等影响,CPUID 利用 IFFT 技术获取信号的 PDP,以捕获直线传播信号能量 EDP,结合线性拟合技术算出用户与 AP 的距离。同时通过用户移动角度的变化,利用 MUSIC 算法和 Dead Reckoning 技术得到 AP 与用

户的直线路径角度。最后结合 AP 与用户的距离和角度,采用一定的定位手段实现定位和移动追踪。

除了采用一定手段来弥补 WIFI 信号定位的缺陷外,研究人员试图利用实际物理环境中已经存在的一些物理信息替代 WIFI 信号完成定位。通过分析基于指纹定位方法中的 WIFI 信号,发现物理信息只要满足以下 3 个条件就能用于指纹定位:(1)空间差异性;(2)时间稳定性;(3)信号抗噪性。目前已实现的可用于定位的物理信息有:FM^[26,27]、声波^[29-31]、磁场^[32,33]、身体无线电^[34]、手机数据网络^[35,36]等。

本文从不同的性能因素考虑,对上文介绍的多种基于不同信号的定位方法进行分析比较,如表 2 所列。基于 WIFI 等信号的定位方法的定位精度已达到 m 级别,基本满足在部署有无线热点的公共室内场所行人、设备等物理实体定位的要求。基于 WIFI 信号的室内定位技术已成为目前室内定位技术的主流方法。

表 2 基于 WIFI 信号的定位方法的比较

系统	无线技术	定位算法	精度	准确度	花费
RADAR	WLAN RSS fingerprints	k-NN, Viterbi-like 算法	3~5m	90% within 5.9m	低
Horus	WLAN RSS fingerprints	概率学方法	2m	90% within 2.1m	低
PinLoc	WLAN CIR fingerprints	Variational Bayesian inference, Clustering	1m ²	N/A	低
CPUID	WLAN RSSI	IFFT, Dead reckoning, 线性拟合	4~10m	N/A	低
文献[28]	Magnetic fingerprints	NN with least RMS	4.7m	90% within 1.64m	中
GSM fingerprinting	GSM Cellular network	Weighted k-NN	5m	80% within 10m	中

4 基于移动传感器的定位方法

移动智能手机不断发展,种类多样的传感器使得用户可以收集到更加丰富的数据,同时较强的计算通信能力以及其与人类日常行为生活的密切联系,不仅为室内定位提供了位置相关的信息资源,而且还能随时获取用户的行为、动作、轨迹等数据,拓展了室内定位应用的范畴,使得利用移动智能进行室内定位的方法在面对复杂多变的室内环境时能够具有比较稳定的定位效果。目前常用的移动传感器有加速度传感器、重力传感器、陀螺仪、指南针等,根据定位原理的不同,基于移动传感器的定位方法可分为基于行人航位推算的定位技术、基于指纹的定位技术、基于 CrowdSourced 的定位技术和基于摄像测量的定位技术。

4.1 基于行人航位推算的定位技术

行人航位推算(Pedestrian Dead Reckoning, PDR)定位是一种基于传感器信息计算相对位置的定位方法,首先通过加速度传感器检测行人的步数并计算出步长,然后通过磁阻传感器和陀螺仪计算出行人的航向角,最后获取人体移动的相对位置,从而实现定位。

Li Fan^[37]等人依据 PDR 定位系统原理,利用手机传感器

采集数据进行 step 检测、行走方向估测并提出自适应的步长模型,实现了一种能够在无须部署辅助基础设施的情况下定位精度达到 m 级别的定位方法,且该方法能够用于手机间的端到端定位。通过观察加速度传感器来监测行走的动作,并利用启发式约束和动态时间规整(Dynamic Time Warping, DTW)验证消除加速度传感器虚假震荡干扰,从而得到真正的 step。通过假设手机方向与行走方向是相对稳定的,利用初始对应关系及传感器得到的手机地理方向即可估算出行走方向,同时利用粒子滤波方法消除室内磁场干扰等因素的影响。

上述定位方法虽然能够实现 m 级别的定位,但是其在定位之前需要已知手机与行人的相对位置关系,且传感器采样频率比较大,还需要对收集到的数据进行预处理,增加了算法计算量,对手机电量消耗比较大。因此 Qian Jiuchao 等^[38]利用传感器加速度的和与手机的位置方向无关的特性对行人进行 step 检测,同时利用主成分分析技术将加速度传感器收集的数据映射到地理水平方向以得到行人的行走方向,无须知道手机与行人的初始相对位置即可获取行走方向。

基于 PDR 的室内定位技术虽避免了基础设施构建,但漂移误差的累积会导致定位结果不可靠。常用的消除漂移误差的方法主要有两种:第一种是利用零速度更新(Zero Velocity Update)技术对每一步操作结果进行校正,如 Li Fan 等人提出的定位方法、Qian Jiuchao 等人提出的定位方法、Attila Török 等人^[39]提出的 DREDR 室内定位方法、Lan Kun chan 等人^[40]提出的室内位置追踪方法等;第二种方法是利用室内地图消除 PDR 过程中漂移错误累积的影响,如 Dang Congwei 等人^[41]提出的 DECL 定位方法、Liu Yang 等人^[42]提出的定位方法。

基于 PDR 的定位技术不易受外界环境影响,定位精度较高,但其只能获取相对位置信息,且需额外校正操作来降低漂移误差累积的影响,增加了定位计算量和能量消耗。

4.2 基于指纹的定位技术

基于指纹的定位技术是将室内环境中不同区域的信号特征作为区域指纹保存在指纹库中,通过手机的多个传感器收集信号数据,匹配查找相应的位置信息。现有的基于指纹的定位技术有 Martin Azizyan 等人提出的 SurroundSense^[43]、Kalyan Pathapati Subbu 等人提出的 LocateMe^[44]等。

Martin Azizyan 等人提出的 SurroundSense 利用周围环境指纹实现了逻辑定位,假设声音、光线、颜色等环境因素的混合效应足够标识一个区域。SurroundSense 利用摄像头、麦克风、加速度传感器、WIFI 接收器收集周围环境中的声音指纹、光线指纹、颜色指纹、WIFI 信号等,对其预处理后发送到远程服务器端提取指纹匹配查找可能的逻辑地理位置。

基于指纹定位技术需要定期对室内不同位置的特征指纹进行更新,会花费大量时间、人力和财力,且对动态环境的适应能力较差,当室内环境变化时其精度将会大大降低。

4.3 基于 CrowdSourced 的定位方法

基于 CrowdSourced 的定位方法即依据群智感知的思想,利用众多行人的手机收集周围环境信息并聚集在数据中心,通过数据挖掘、机器学习等方法取得定位所需的基本信息。目前已有的基于 CrowdSourced 的室内定位技术有 SignalSLAM^[45]、Walkie-Markie^[46]、Jigsaw^[47]等等。

Piotr Mirowski 等人利用 CrowdSourced 技术和多种 RF 信号提出了一种可同时定位与构建地图的方法——Sig-

nalSLAM。该定位方法根据即时定位与地图构建(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)方法解决在不知道观察者地理位置的前提下构建观测地图这一难题,利用智能手机获取室内建筑特殊地标位置的带有时间戳标志的 WIFI RSS、Bluetooth RSS、磁场信号强度等数据信息,并利用 PDR 技术生成室内信号地图,根据用户手机采集到的信号强度集合估测地理位置。

利用 PDR 技术生成室内地图由于需要估测行人的步数、步长、行走方向等,受手机传感器偏移误差影响容易产生误差积累,影响地图的准确性。因此 Patrick Robertson 等人利用手机传感器收集的里程计数数据获取室内转角、门、墙等特征信息以构建行走区域的平面框图^[48],结合 CrowdSourced 思想与 Bayesian 估计方法提出了一种同时定位和构建地图的方法。即使只在某一特定区域行走 10 分钟,利用该方法也能收敛到一个与真实布局近似的 2D 平面图。

基于 CrowdSourced 的定位方法能在没有先验知识及基础架构支撑等条件下取得较高的定位精度。当手机获取的行走轨迹、周围环境信息等数据较多时,用户位置的估算也愈发精准;反之,若数据较少,其定位结果也难以让用户满意,甚至无法定位,同时该方法还需考虑用户隐私数据安全问题。

4.4 基于摄像测量的定位方法

LED 发出一定频率的光信号,利用摄像头接收、检测该光信号,通过计算即可定位,用户不需要将手机摄像头对准特定方向也可接收到反射的光信号。该技术的定位精度达到 1m 之内,例如 Kuo Ye sheng 等人^[49]利用手机摄像头与修改后的商业 LED 照明设备实现了基于可见光线的室内定位方法——Luxapose。Ifthekhar M S 等人^[50]利用 LED 发出独特地理位置信息,提出基于光线的室内定位方法,但该定位技术使用特殊芯片,并特别定制 LED 灯具,其成本较高,不利于大范围推广应用。

除了上述 4 种类型的利用传感器定位的方法外,还存一些其他的定位方法,例如针对在行走过程中受手臂摆动及周围地磁干扰导致的行人前行方向误差, Niu Xiaoguang 等人^[51]提出的 WTrack 方法利用隐式马尔科夫模型(Hidden Markov Model)对室内行人的行走模型进行建模。Ayman Naguib 等人^[52]提出了一种无需任何先验知识的手机室内定位方法,利用 WIFI 接入点、手机传感器和室内地图信息互补融合估测位置。Huang Wenchao 等人^[53]根据手机移动会导致接收端声音信号发生 Dopple 效应的现象提出了一种手机定向或室内定位的方法——Swadloon。

针对上面介绍的多种基于移动传感器的定位方法,从不同的性能因素进行分析比较,如表 3 所列。

表 3 基于移动传感器的定位方法的比较

System	Sensors	Accuracy (%)	Average error(m)
文献[37]	加速度传感器、罗盘、陀螺仪	N/A	1.5~2
DECL	加速度传感器、陀螺仪	N/A	1.1~1.5
SurroundSense	加速度传感器、耳麦、camera、WIFI	87	N/A
LocateMe	地磁仪	90	4.5
Jigsaw	Camera	90	1~2
Luxapose	Camera	N/A	~0.1
Swadloon	Microphone	90	0.5

由表 3 可看出,基于移动传感器的定位方法不仅能实现很高的定位精度,同时其定位准确度也令人满意。因移动智能终端普遍存在于人们日常生活中,基于移动传感器的定位方法具有非常广阔的应用前景以及较高的研究价值。

结束语 室内定位技术作为定位与导航研究领域的一个重要分支,影响着智能化应用、服务的发展。通过对已有的室内定位技术的分析总结,把室内定位方法分为 3 种:基于特定设备的定位方法、基于 WIFI 信号的定位方法和基于移动传感器的定位方法。这 3 种定位技术使用的方法各不相同,且在性能表现上也各有侧重,基于特定设备的定位方法主要侧重是提高定位精度,基于移动传感器的定位方法主要是提高方法的普适性及信息的丰富性。从上述分析可知,室内定位技术在定位精度、系统部署费用和难度、方法普适性、抗干扰性等方面做了大量工作,但鲜有定位方法能在实际环境中得到广泛应用,因此室内定位技术依然是定位与导航领域的研究热点。

人们对室内定位的需求不再是简单的高精度,而是能与智能应用、智能服务更好地融合。通过对室内定位技术的深入研究和学习,总结出室内定位技术研究将来包括如下几个热点。

(1) 普通的定位方法。目前室内定位方法虽然种类繁多、精度比较高,但由于方法实现的一些前提或假设在现实环境中无法满足,例如假设室内平面结构图是已知的、行走方向已知等,导致其尚未得到广泛的普及应用。如何在实际环境限制下提出更加普适方便的定位方法是具有一定实际意义的研究工作。

(2) 基于语义信息的定位技术研究。不同于现有的定位方法得到具体位置坐标信息,基于语义信息的定位技术能够根据具体坐标信息得到对人们更有实际意义、更加直观的信息,满足日益丰富的智能应用、服务需求。

(3) 用户情景信息获取。随着应用逐渐依据用户情景信息提供智能服务,室内定位技术不仅要能够获取用户的位置信息,同时要知道与位置相关的情境信息如位置情景、行为情景等等。在获取大量用户数据的同时,还需要考虑用户隐私安全、电量消耗等问题。

参 考 文 献

- [1] Hazas M, Scott J, Krumm J. Location-aware computing comes of age [J]. IEEE Computer Magazine, 2004, 37(2): 95-97
- [2] Liang Yun-ji, Zhou Xing-she, Yu Zhi-wen, et al. Analysis of the Indoor Positioning Systems in Pervasive Environment [J]. Computer Science, 2010, 37(3): 112-116(in Chinese)
- [3] 梁韵基, 周兴社, 於志文, 等. 普适环境室内定位系统研究[J]. 计算机科学, 2010, 37(3): 112-116
- [4] Zhang Ming-hua, Zhang Shen-sheng, Cao Jian. Received-Signal Strength-Based Indoor Location in Wireless LANs [J]. Computer Science, 2007, 34(6): 68-71(in Chinese)
- [5] 张明华, 张申生, 曹健. 无线局域网中基于信号强度的室内定位[J]. 计算机科学, 2007, 34(6): 68-71
- [6] Yang Zheng, Wu Chen-shu, Liu Yun-hao. Location-based Computing: Localization and Localizability of Wireless Networks [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014: 111-128(in Chinese)

- 杨峥, 吴陈沐, 刘云浩. 位置计算: 无线网络定位与可定位性 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2014: 111-128
- [5] Want R, Hopper A, Falcao V, et al. The Active Badge Location System [J]. *ACM Transactions on Information Systems*, 1992, 10(1): 91-102
- [6] Harter A, Hopper A, Steggle P, et al. The Anatomy of a Context-Aware Application [J]. *Wireless Networks*, 2002, 8(2): 187-197
- [7] Priyantha N B, Chakraborty A, Balakrishnan H. The Cricket Location-Support System [C] // *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. ACM, 2000: 32-43
- [8] Ni L M, Liu Y, Lau Y C, et al. LANDMARC: Indoor Location Sensing Using Active RFID [J]. *Wireless Networks*, 2004, 10(6): 701-710
- [9] Gown Y, Jain R. Error Characteristics and Calibration-free Techniques for Wireless LAN-based Location Estimation [C] // *Proceedings of the Second International Workshop on Mobility Management & Wireless Access Protocols*. ACM, 2004: 2-9
- [10] Lim H, Kung L C, Hou J C, et al. Zero-Configuration Indoor Localization over IEEE 802.11 Wireless Infrastructure [J]. *Wireless Networks*, 2010, 16(2): 405-420
- [11] Ji Y, Biaz S, Pandey S, et al. ARIADNE: a Dynamic Indoor Signal Map Construction and Localization System [C] // *Proceedings of the 4th International Conference on Mobile Systems, Applications and Services*. ACM, 2006: 151-164
- [12] Chintalapudi K, Iyer A P, Padmanabha V N. Indoor Localization without the Pain [C] // *Proceedings of the Sixteenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. ACM, 2010: 173-184
- [13] Bahl P, Padmanabhan V N. RADAR: An In-building RF-based User Location and Tracking System [C] // *Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. IEEE, 2000: 775-784
- [14] Youssef M, Agrawala A. The Horus WLAN Location Determination System [C] // *Proceedings of the 3rd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*. ACM, 2005: 205-218
- [15] Wu C, Yang Z, Liu Y, et al. WILL: Wireless Indoor Localization Without Site Survey [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2013, 24(4): 839-848
- [16] Wang H, Sen S, Elgohary A, et al. No Need to War-drive: Unsupervised Indoor Localization [C] // *Proceedings of the 10th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*. ACM, 2012: 197-210
- [17] Yang Z, Wu C, Liu Y. Locating in Fingerprint Space: Wireless Indoor Localization with Little Human Intervention [C] // *Proceedings of the 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. ACM, 2012: 269-280
- [18] Rai A, Chintalapudi K K, Padmanabhan V N, et al. Zee: Zero-Effort Crowdsourcing for Indoor Localization [C] // *Proceedings of the 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. ACM, 2012: 293-304
- [19] Sen S, Radunovic B, Choudhury R R, et al. You are facing the mona lisa: spot localization using PHY layer information [C] // *Proceedings of the 10th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*. ACM, 2012: 183-196
- [20] Sen S, Choudhury R R, Nelakuditi S. SpinLoc: Spin Once to Know Your Location [C] // *Proceedings of the Twelfth Workshop on Mobile Computing Systems & Applications*. ACM, 2012: 12
- [21] Zouari R, Zayani R, Bouallegue R. Indoor Localization based on feed-forward Neural Networks and CIR fingerprinting Techniques [C] // *Radio and Wireless Symposium (RWS)*, 2014 IEEE. IEEE, 2014: 271-273
- [22] Jin Y, Soh W, Wong W. Indoor Localization with Channel Impulse Response Based Fingerprint and Nonparametric Regression [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(3): 1120-1127
- [23] Khanbashi N A, Alaindi N, Al-Araji S, et al. Performance Evaluation of CIR Based Location Fingerprinting [C] // *IEEE 23rd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. IEEE, 2012: 2466-2471
- [24] Sen S, Lee J, Congdon P, et al. Avoiding Multipath to Receive Inbuilding WiFi Localization [C] // *Proceeding of the 11th Annual International Conference on Mobile Systems Applications, and Services*. ACM, 2013: 249-262
- [25] Liu Hong-bo, Gan Yu, Yang Jie, et al. Push the Limit of WiFi based Localization for Smartphones [C] // *Proceedings of the 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. ACM, 2012: 305-316
- [26] Chen Y, Lymberopoulos D, Liu J, et al. FM-based Indoor Localization [C] // *Proceedings of the 10th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*. ACM, 2012: 169-182
- [27] Yoon S, Lee K, Rhee I. FM-based Indoor Localization via Automatic Fingerprint DB Construction and Matching [C] // *Proceeding of the 11th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*. ACM, 2013: 207-220
- [28] Nandakumar R, Chintalapudi K K, Padmanabhan V N. Centaur: Locating Devices in an office Environment [C] // *Proceedings of the 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. ACM, 2012: 281-292
- [29] Nakamura M, Sugimoto M, Akiyama T, et al. 3D FDM-PAM Rapid and Precise Indoor 3D Localization using Acoustic Signal for Smartphone [C] // *Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*. Adjunct Publication. ACM, 2014: 123-126
- [30] Tarzia S P, Dinda P A, Dick R P, et al. Indoor Localization without Infrastructure using the Acoustic Background Spectrum [C] // *Proceedings of the 9th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*. ACM, 2011: 155-168
- [31] Peng C H, Shen G, Zhang Y. BeepBeep: A High-Accuracy Acoustic-Based System for Ranging and Localization Using COTS Devices [J]. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*, 2012, 11(1): 4
- [32] Chung J, Donahoe M, Schmandt C, et al. Indoor Location Sensing Using Geo-Magnetism [C] // *Proceedings of the 9th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*. ACM, 2011: 141-154

- [J]. Journal of Computer Applications, 2011, 32(12): 3184-3214 (in Chinese)
- 张北伟, 朱云龙, 胡琨元. 基于粒子群算法的认知无线电频谱分配算法[J]. 计算机应用, 2011, 32(12): 3184-3214
- [10] Wu Jing, Li Yi, Liu Gang, et al. Joint power and spectrum allocation in multi-hop cognitive radio networks [J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2014, 21(2): 9-14
- [11] Tian Xiao-mei, Gong Jing. On Overview of Real-Coded Genetic Algorithm[J]. Journal of Hunan Environment-Biological Polytechnic, 2005, 11(1): 25-31 (in Chinese)
- 田小梅, 龚静. 实数编码遗传算法的评述[J]. 湖南环境生物职业技术学院学报, 2005, 11(1): 25-31
- [12] Yang Tie-jun, Lin Pei-pei. Spectrum Allocation Based on Improved Genetic Algorithm in Cognitive Radio System[J]. Computer Simulation, 2014, 31(2): 250-254 (in Chinese)
- 杨铁军, 林培培. 改进遗传算法的认知无线电频谱分配[J]. 计算机仿真, 2014, 31(2): 250-254
- [13] Zhuo Zhi-hong. Spectrum Allocation of Cognitive Radio System Based on Catfish Effect Particle Swarm Optimization Algorithm [J]. Video Engineering, 2014, 38(7): 145-189 (in Chinese)
- 卓志宏. 基于鲶鱼粒子群算法的认知无线电频谱分配[J]. 电视技术, 2014, 38(7): 145-189
- [14] Zhang Li-ying, Zeng Zhi-wen, Chen Zhi-gang, et al. Spectrum Allocation Algorithm Based on Constraint Operator of Binary Particle Swarm in the Cognitive Wireless Networks [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2013, 6(6): 1226-1229
- [15] Wang Bei-bei, Liu K, Ray J. Advances in Cognitive Radio Networks; A Survey[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2013, 5(1): 5-23
-
- (上接第 6 页)
- [33] Xie Hong-wei, Gu Tao, Tao Xian-ping, et al. MaLoc: A practical Magnetic Fingerprinting Approach to Indoor Localization using Smartphones [C]//Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing. ACM, 2014: 243-253
- [34] Adib F, Kabelac Z, Katabi D, et al. 3D Tracking via Body Radio Reflections [C]//Proceedings of the 11th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation. USENIX, 2014: 317-329
- [35] Rehman W U, Lara E D, Saroiu S. CILoS: A CDMA Indoor Localization System [C]//Proceedings of the 10th International Conference on Ubiquitous Computing. ACM, 2008: 104-113
- [36] Qiang Xu, Gerber A, Pang J, et al. AccuLoc: Practical Localization of Performance Measurements in 3G Networks [C]//Proceedings of the 9th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. ACM, 2011: 183-196
- [37] Li Fan, Zhao Chun-shui, Ding Guan-zhong, et al. A Reliable and Accurate Indoor Localization Method Using Phone Inertial Sensors [C]//Proceedings of the 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing. ACM, 2012: 421-430
- [38] Qian J, Ma J, Ying R, et al. An improved indoor localization method using smartphone inertial sensors [C]//2013 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). IEEE, 2013: 1-7
- [39] Török A, Nagy A, Kováts L, et al. DREAR – Towards Infrastructure-free Indoor Localization via Dead-Reckoning Enhanced with Activity Recognition [C]//2014 Eighth International Conference on Generation Mobile Applications, Services and Technologies. IEEE, 2014: 106-111
- [40] Lan K C, Shih W Y. Using Smart-Phones and Floor Plans for Indoor Location Tracking [J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2014, 44(2): 211-221
- [41] Dang C, Sezaki K, Iwai M. DECL: A circular inference method for indoor pedestrian localization using phone inertial sensors [C]//2014 Seventh International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU). IEEE, 2014: 117-122
- [42] Liu Y, Dashti M, Zhang J. Indoor localization on mobile phone platforms using embedded inertial sensors [C]//2013 10th Workshop on Positioning Navigation and Communication (WPNC). IEEE, 2013: 1-5
- [43] Azizyan M, Constandache I, Choudhury R R. SurroundSense: mobile phone localization via ambience fingerprinting [C]//Proceedings of the 15th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. ACM, 2009: 261-272
- [44] Subbu K P, Gozick B, Dantu R. LocateMe: Magnetic-fields-based Indoor localization using smartphones [J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST), 2013, 4(4): 99-103
- [45] Mirowski P, Ho T K, Yi S, et al. SignalSLAM: simultaneous localization and mapping with mixed wifi, bluetooth, LTE and magnetic signals [C]//2013 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). IEEE, 2013: 1-10
- [46] Shen G, Chen Z, Zhang P, et al. Walkie-markie: indoor pathway mapping made easy [C]//Proceedings of the 10th USENIX conference on Networked Systems Design and Implementation. USENIX Association, 2013: 85-98
- [47] Gao R, Zhao M, Ye T, et al. Jigsaw: Indoor floor plan reconstruction via mobile crowdsensing [C]//Proceedings of the 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. ACM, 2014: 249-260
- [48] Robertson P, Angermann M, Krach B. Simultaneous localization and mapping for pedestrians using only foot-mounted inertial sensors [C]//Proceedings of the 11th International Conference on Ubiquitous Computing. ACM, 2009: 93-96
- [49] Kuo Y S, Pannuto P, Hsiao K J, et al. Luxapose: Indoor positioning with mobile phones and visible light [C]//Proceedings of the 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. ACM, 2014: 447-458
- [50] Iftekhar M S, Mondal R K, Le N T, et al. Simple method for indoor localization in OCC using smart phone image sensor [C]//2014 Sixth International Conf on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). IEEE, 2014: 55-58
- [51] Niu X, Li M, Cui X, et al. WTrack: HMM-based walk pattern recognition and indoor pedestrian tracking using phone inertial sensors [J]. Personal and Ubiquitous Computing, 2014, 18(8): 1901-1915
- [52] Naguib A, Pakzad P, Palanki R, et al. Scalable and accurate indoor positioning on mobile devices [C]//2013 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). IEEE, 2013: 1-10
- [53] Huang W Ch, Xiong Y, Li X Y, et al. Shake and walk: Acoustic direction finding and fine-grained indoor localization using smartphones [C]//2014 Proceedings IEEE INFOCOM. IEEE, 2014: 370-378