

## 基于知识图谱的 Wi-Fi 室内定位技术研究

李建东<sup>1</sup>, 杨晶晶<sup>1</sup>, 黄铭<sup>1,2</sup>

(1. 云南大学信息学院, 云南 昆明 650504; 2. 云南大学无线创新实验室, 云南 昆明 650091)

**摘要:** 在常见的 Wi-Fi 室内定位方法中, 大部分研究聚焦于定位算法的精度, 但是对于已有室内数据如何进行高效组织和处理, 以实现室内位置服务的应用系统研究并不多。针对此类问题, 将知识图谱与传统室内定位技术结合, 并利用多种软件开发技术完整开发出实用的定位系统。融合了物理空间和信息空间, 信息空间包含室内信息获取、云端服务、信息存储及计算部分, 物理空间表达了室内空间结构及其数据关系。最后, 通过 WEBGL (web graphics library) 技术进行直观的定位展示, 以实现室内信号数据和定位结果的可视化。系统拥有完备的数据存储和使用机制, 对室内物联网设备的已有数据信息整合后便可以为用户提供房间级位置服务, 并且系统的分步定位功能有助于减少系统运算耗时。

**关键词:** 知识图谱; Wi-Fi 定位; 三维可视化; 位置指纹; 异步采集

**中图分类号:** TN911.23

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2022.00265

## Research on Wi-Fi indoor positioning technology based on knowledge graph

LI Jiandong<sup>1</sup>, YANG Jingjing<sup>1</sup>, HUANG Ming<sup>1,2</sup>

1. School of Information Science and Engineering, Yunnan University, Kunming 650504, China

2. Wireless Innovation Laboratory of Yunnan University, Kunming 650091, China

**Abstract:** Among the common Wi-Fi indoor positioning methods, most of the research focuses on the positioning accuracy, a little is on the application system to organize and process the existing indoor data efficiently in order to realize the indoor location service. To deal with these issues, the knowledge graph with the traditional indoor positioning technology was combined, and a practical positioning system was built with a variety of software development technologies. The system integrates the physical space and the information space. The information space includes indoor information acquisition, cloud services, information storage and computing parts. The physical space expresses the structure of the indoor space and data relationships. Finally, the WEBGL technology was used to display intuitive positioning and realize the visualization of indoor signal data and positioning results. The system has a complete data storage and use mechanism. After integrating the existing data information of the indoor internet of things equipment, it can provide users with room-level location services. The step-by-step positioning function of the system helps to reduce the time consumption of the system.

**Key words:** knowledge graph, Wi-Fi positioning, three-dimensional visualization, location fingerprint, asynchronous detection

### 0 引言

随着信息通信技术的发展, 基于位置服务的技

术需求也越来越多<sup>[1]</sup>, 而 GPS 在室内应用具有一定局限性。室内复杂环境布局带来的非视距、信号衰减和多径部署等方面的影响<sup>[2]</sup>, 使室内位置

收稿日期: 2021-09-14; 修回日期: 2022-02-21

通信作者: 黄铭, huangming@ynu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61963037, No.61863035)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61963037, No.61863035)

服务技术在发展中遇到诸多难题。目前常用的室内定位方法包括基于蓝牙<sup>[3]</sup>、RFID<sup>[4-5]</sup>、红外<sup>[6]</sup>、Wi-Fi<sup>[7-8]</sup>等技术的方法,其中 Wi-Fi 室内定位因无线局域网发展迅速且无线访问接入点(WAP, wireless access point)部署率高、设备价格低廉且稳定可靠,逐渐成为主流<sup>[9]</sup>。通常根据不同的室内定位方法选择不同的观测量,常用观测量包括基于信号传播时间的到达时间差(TDOA, time difference of arrival)、基于入射角度的到达角(AOA, angle-of-arrival)<sup>[10-11]</sup>和接收信号强度(RSS, received signal strength)等,由于 TDOA/AOA 测量成本高、终端设备复杂等因素,以及考虑定位系统的成本、功耗和普遍适用性等问题,借鉴文献[12]提出的基于知识图谱的节点边缘模式结合感知信息建立的室内定位方案后,本文做了知识图谱与传统室内定位技术的结合,并将其开发为完整系统。本系统仅使用简单终端采集室内公共区域已有 RSS 数据,无须使用其他任何专用设备<sup>[13]</sup>就能实现室内房间级定位,可为校园、工业园区等大型应用场景提供有效的室内位置服务。

知识图谱是一种通过数据挖掘、信息处理、知识度量和图形绘制显示等多学科融合而成的复杂知识领域,是现代知识实体相互关联的整体网络架构,被广泛应用于搜索、推荐、问答等智能领域,并且实际应用已取得良好的效果。知识图谱还具有良好的灵活性和扩展性,通过获取其他相关信息增强数据间关系结构,进而丰富室内位置服务<sup>[14]</sup>。基于室内 Wi-Fi 的指纹位置定位方法,通过简单终端获得在线数据,再将其匹配离线指纹库计算预测位置,克服了室内场景的多径传播、非视距传播等局限,此方法优势显著,获得商业公司以及研究人员的青睐且研究方向侧重点各异<sup>[15-16]</sup>。

综上,本文在传统室内定位技术的基础上结合了知识图谱,并研发出完整室内定位系统。该系统在手机端和计算机端均有室内信息数据采集功能,将采集到的信息数据整合存储后,再通过系统分步定位功能处理计算,最后以直观可视的显示方式为室内用户提供位置服务。本系统同时保障了覆盖面积和可靠性,成本复杂度低且设备部署固定,扩展到其他建筑内也较为方便,希望此系统的开发能为室内定位方法拓宽思路,为室内定位技术提供丰富应用。

## 1 系统设计

本系统集成室内环境中的基本元素及关系,可分为信息空间和物理空间两部分。定位系统架构如图 1 所示。其中,信息空间包括空间模型信息、WAP 信息以及云服务部分,在数据获取阶段,用户使用系统的手机端在室内锚点(圆圈)位置获取 Wi-Fi RSS 数据信息,数据通过网络传输到云服务器端和知识图谱指纹库中进行信息实体的组织和存储。在云计算阶段,获取到的数据通过服务器中部署的知识图谱相似度算法进行数据关系的判断和筛选,实现初步定位判断后,由加权  $K$  近邻(WKNN, weighted  $K$  nearest neighbor)算法进一步估算用户坐标位置。在可视化阶段,首先按照实际物理空间创建三维模型,再使用前后端技术搭建 WEBGL<sup>[17]</sup> 显示平台,最终实现用户预测位置在三维模型中的直观显示。本系统的图数据模型结构稳定,可以在不同情况的室内环境中提供更可靠的定位服务。

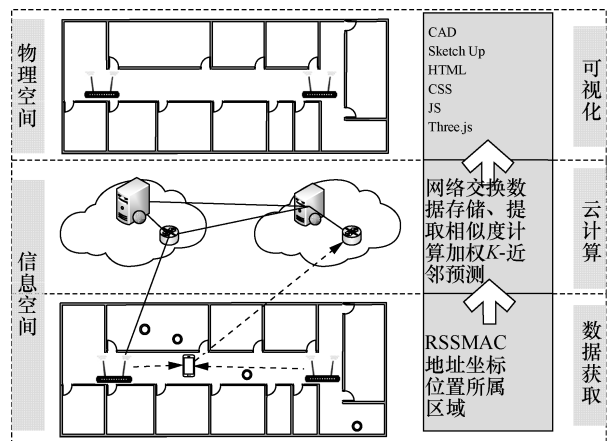


图 1 定位系统架构

### 1.1 场景规划与数据采集

本文基于云南大学信息学院 4 楼室内环境实现,信息学院大楼已全面部署室内 Wi-Fi,使用笔记本电脑或智能手机采集信息也较为便捷,可依次采集规定位置上 WAP 的 RSS 信息与 MAC 地址信息。根据数据采集点和室内场景分布图构建信息学院 4 楼平面模型并设计彩平图展示实体间联系,云南大学信息学院 4 楼彩平图如图 2 所示, M1~M21 表示 4 楼的 21 个 WAP,在各 WAP 以及其他 344 个坐标指纹点共采集到 20 034 条 RSS 和 MAC 信息数据,其中指纹数据点在此公共区域内 WAP 周围的走廊、楼梯口、洗手间等开放区域进行采集,开放区域采集信息方便后续工作中定位服务扩展到其

他楼层，R1~R36 为各实验室和教室，C1~C6 所示紫色边框区域为 4 楼公共区域。

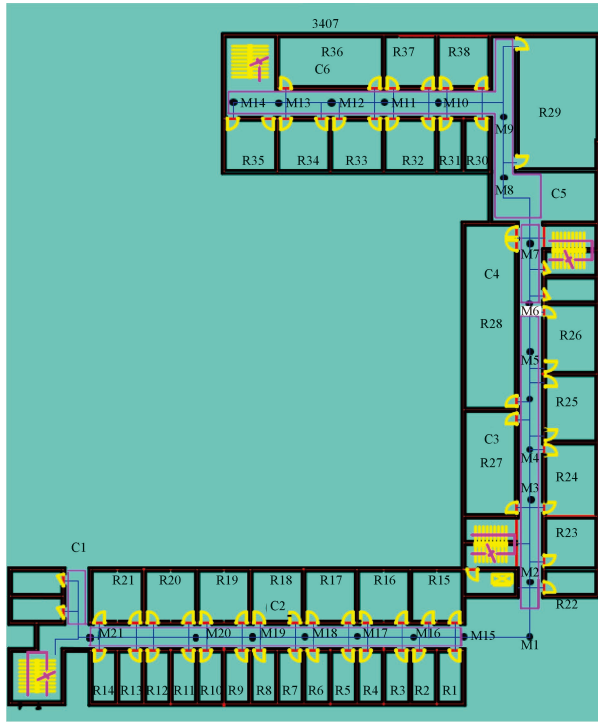


图 2 云南大学信息学院 4 楼彩平图

### 1.2 构建知识图谱指纹库

当前技术社区以及商用市场上构建知识图谱最主流的数据库是 Neo4j 图数据库，其提供面向图分析的 Cypher 查询语言，采用原生图存储、处理数据，具有可用性高、数据冗余低和吞吐量大等特点<sup>[18-19]</sup>，在管理半结构化数据方面有突出优势，这

使得 Neo4j 图数据库成为此次构建室内知识图谱的理想选择。

构建知识图谱时，首先根据室内实际环境规定坐标并划分坐标所属区域，其次采集数据并将采集的原始指纹库转换成算法适用的数据格式，然后使用 Cypher 语法将数据存入 Neo4j 图数据库。本文实体节点包括室内环境中的坐标所属区域节点、坐标节点和 MAC 地址节点，共建节点 1 871 个、节点关系 394 855 条，每个区域节点关联多个坐标节点，坐标节点又分为 WAP 坐标节点与指纹坐标节点两类，每个各坐标节点分别对应若干 MAC 节点，其中 WAP 对应关系 975 条，指纹坐标节点对应关系 393 880 条。由于电子指纹库无法全部展示数据关系，电子指纹库部分数据关系如图 3 所示，绿色小点为坐标所属区域节点，红色小点为规定的坐标节点，灰色小点为此坐标下检测采集到的 MAC 地址节点，定义 RSS 值为坐标节点和 MAC 地址节点之间的关系。

### 1.3 建立三维模型

系统实现考虑用户使用的直观性，以及位置服务的准确展示，需要创建云南大学信息学院 4 楼的三维模型。三维模型创建过程中用到两款软件工具，第一款是 AutoCAD 设计软件，这款软件因其强大的二维制图和基本三维设计功能被各行各业广泛应用；第二款是易于使用的 3D 设计软件 SketchUp，是一款三维建筑设计师可以直观构思与创作的优秀工具。建立三维模型模时，首先需

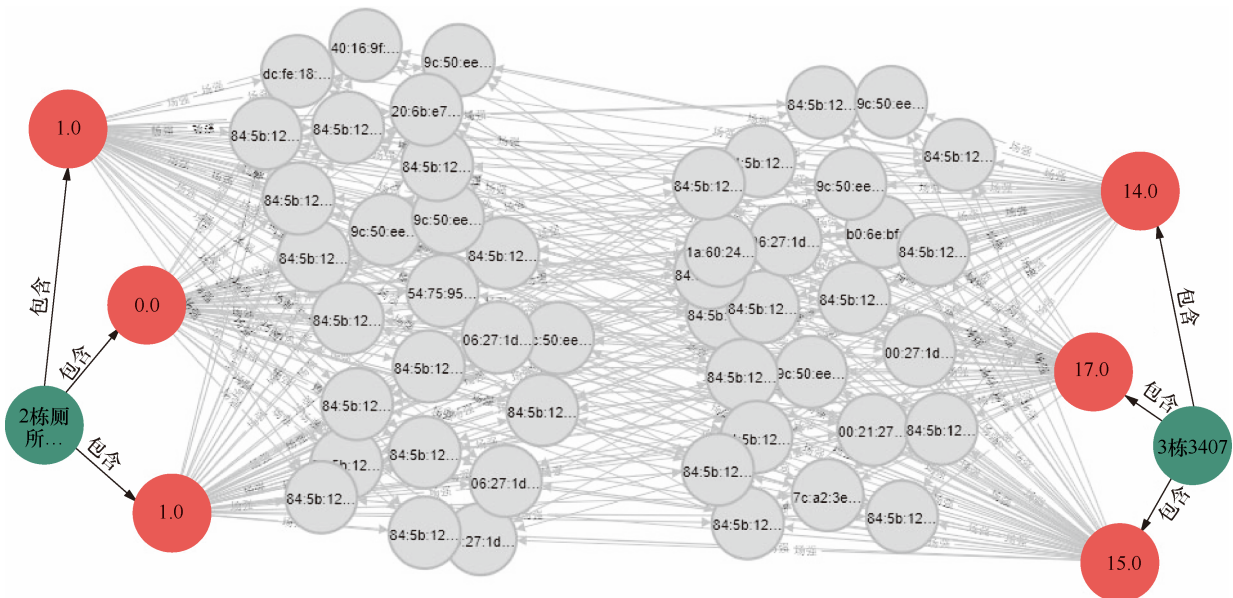


图 3 电子指纹库部分数据关系

要获取目标建筑的平面图,按照建筑实际尺寸大小使用 AutoCAD 软件设计出相应的二维线框,然后使用 SketchUp 设计软件对照真实模型在绘制完成的二维线框图上加工完成三维模型。云南大学信息学院 4 楼三维立体模型如图 4 所示,走廊中的黑点为 WAP。

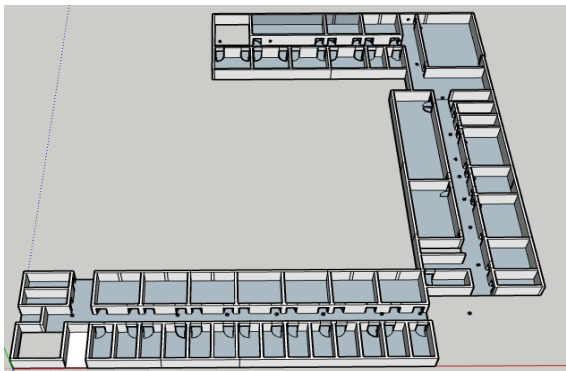


图 4 云南大学信息学院 4 楼三维立体模型

## 2 系统开发

### 2.1 系统框架搭建

系统基于 Django 框架平台进行二次开发。Django 是一个由 Python 语言编写的开源 Web 应用框架,由于集成度高、开发完整等优点,经常用于企业级项目开发。本文软件系统通过此框架连接前后端结构,进行业务交互,实现需求。

本系统后端根据需求不同处理多种工作逻辑,编写不同功能的应用接口,如存储和检索数据、业务规则、结果预测等。系统前端的搭建除常用前端技术 HTML、CSS、JS 以外,还需要用到 Three.js<sup>[20]</sup> 技术。Three.js 是在浏览器中运行的 WebGL 三维引擎,但这款引擎目前处于开发阶段,不够丰富的 API 以及匮乏的文档增加了学习难度。在建立好信息学院三维模型后,将其导入 Three.js 创建的三维世界场景,借助 3D 引擎 Three.js 技术可以很好地实现基于 WebGL 技术对于 3D 相关数据的可视化,这也是此项目应用 Three.js 技术的主要原因。

### 2.2 系统功能开发

#### 2.2.1 电子指纹展示功能

电子指纹展示功能实现了知识图谱指纹数据在三维场景中的坐标可视化。单击系统主页面中电子指纹展示部分页面将跳转到该功能的三维显示页面,此功能操作系统服务端与知识图谱数据库产生交互并获取电子指纹数据,再按照指纹数据采集

点在实际场景中的坐标位置依次将其显示在三维模型中。此世界场景中的三维模型可以实现自由放大缩小,左右拖拽及变换观察角度,以便找到直观的展示视角。

#### 2.2.2 定位功能

单击系统主页面中的定位功能展示部分,定位功能界面如图 5 所示。此页面集中展示与系统定位相关的功能,单击 1 号箭头位置显示信息学院 4L 二维平面对照图,再次单击则收起,此图详细对照三维模型中出现的定位点所属区域;2 号箭头位置为坐标显示区,根据页面坐标与世界坐标的转换算法,单击页面中指纹点则获取到三维世界场景实际位置点的坐标,并将坐标显示在 2 号箭头位置;3 号箭头位置为计算机端待测定位点数据采集功能,单击该按钮自动获取用户所在区域信息并将信息存入知识图谱指纹库中。单击 4 号箭头所指按钮,则删除已采集且存入知识图谱指纹库中的待测定位点。

5 号箭头所指功能为相似度检测功能,待测定位点数据采集完毕后单击此按钮,在系统后端进行相似度计算,相似度计算是待测点与信息学院 4 楼所有 WAP 的信息匹配计算,由于在室内 Wi-Fi 定位中,设备较多且信号复杂,使用相似度检测算法可判断待测点所属区域,从而缩小计算范围,避免了在全部指纹数据中直接进行计算引起的处理时延。6 号箭头所指的是测试点定位功能按钮,单击该按钮后将跳转至精确定位页面,此页面中三维模型内出现位置预测点,在坐标显示区出现该点坐标以及所属区域的中文提示。

#### 2.2.3 异步采集功能

异步采集功能是通过开发手机应用程序实现手机端应用的定位功能。具体过程为首先通过手机应用程序获取用户所在地点信息,然后将信息以云端无线传输的方式发送到系统服务器接收站点内,经过系统运算最终实现本定位系统的手机端位置服务。手机端异步采集应用界面如图 6 所示。

## 3 系统测试及结果分析

### 3.1 相似度检测对系统的影响

ALGO 是 Neo4j 开发和共享的数据库扩展库,包含常用的图算法过程。相似度算法描述两个节点或者更加复杂的结构是否或者在何等程度上属于同一类别,其计算需要特定的属性值、结构<sup>[21]</sup>。使用本系统定位时,待测点数据信息首先经过分步定

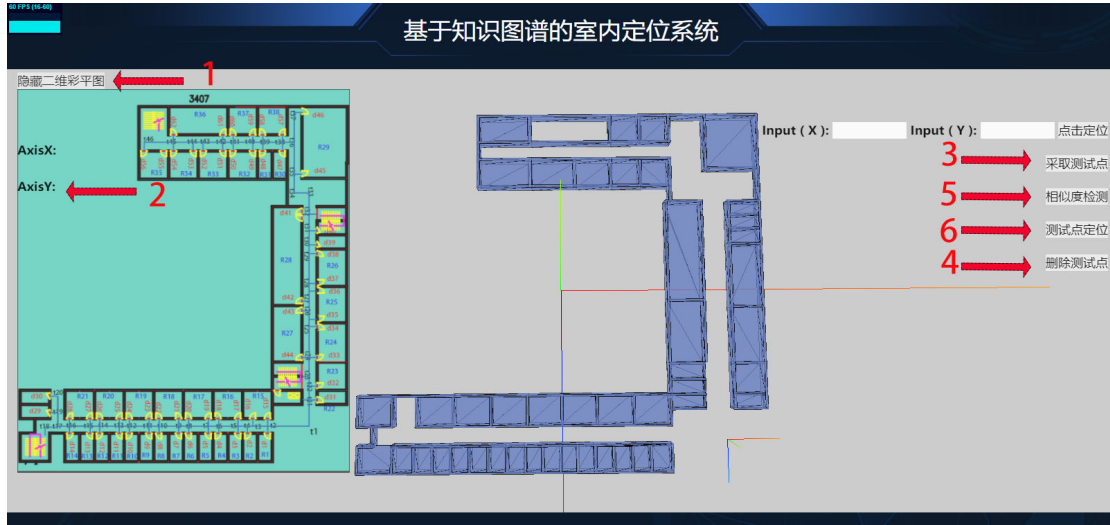


图 5 定位功能界面

位方法的第一步运算,即使用 ALGO 相似度检测算法判断出与待测点相似度最高的前 3 个 WAP,再根据 WKNN 判定待测点与哪个 WAP 坐标节点属同一区域,判断出所属区域信息意味着缩小了指纹库范围;第二步将待测点与所属区域内的指纹数据再次进行 WKNN 计算便可得出定位结果,即选择较少的数据关系入手,以快速判定待测点所属区域删除无关指纹数据,最终通过减少无效计算量来降低系统运行花费时间,但是与定位精度有关的指纹数据并没有被筛选掉,因而定位精度不会改变。基于知识图谱的分步定位方法使用前后(分步计算前和分步计算后),系统后台计算时长见表 1。



图 6 手机端异步采集应用界面

表 1 系统后台计算时长

	相似度计算时长/s	加权近邻计算时长/s	时间和/s
分步计算前	0	2.623	2.623
分步计算后	0.033	0.809	0.842
时间差	-0.033	1.814	1.781

在相同条件下,相较于直接加权近邻计算,基于知识图谱的分步计算方法使得系统后台运算时间更少。此优势得益于知识图谱对数据信息突破碎片化壁垒,从数据关系的角度提供强大信息处理能力,数据量越大、信息关系越复杂则知识图谱优势越突出<sup>[22]</sup>,这也是后续工作中场景扩容与业务扩展的重要基础。

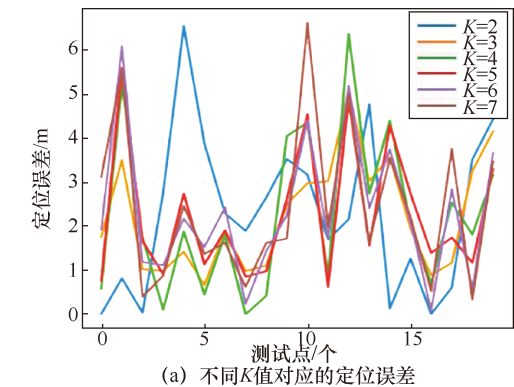
### 3.2 定位测试结果及分析

对于类域交叉或重叠较多的样本集来说,  $K$  近邻(KNN,  $K$  nearest neighbor)算法是更适合也是较为常用的方法之一,而 WKNN 较 KNN 来说更加有效地利用  $K$  个样本值的权重,权重值大,则贡献程度大;权重值小,则贡献程度小,而不是求取平均值,分类效果得到了改进<sup>[23]</sup>。本文定位精度不仅与指纹数据量相关,也与 WKNN 算法中  $K$  值的选择相关,当  $K=1$  时,算法在数据库中仅起到查找作用,而  $K$  值也不应该过大,以免较远的指纹点对待测点产生较大影响。在不同的室内场景中,  $K$  值不同定位精度也不同,本文根据室内场景布局特点,规定采集指纹点间隔为 2 m,  $K$  值对定位精度的影响如图 7 所示,随机抽取了 20 个测试点,研究此场景中在指纹坐标点固定的条件下,  $K$  值对本系统的定位精度影响。

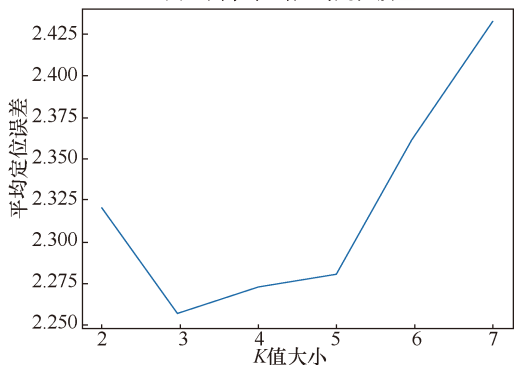
由图 7(a)可见,  $K$  值为 3 时,定位误差的波动范围最小。由图 7(b)可见,当  $K=3$  时,平均定位误差为 2.257 m 最小,当  $K=7$  时平均误差为 2.432 m 最大,因此在本系统中选择  $K=3$  作为计算参数。

系统定位测试在信息学院 4 楼公共区域进行,对照图 2 中 C1~C6 区域,每部分公共区域都包含多个 WAP,其中含有 WAP 较多的区域面积也较大,

采集 40 个测试点；WAP 较少的区域面积小，采集 20 个测试点，为了使测量结果尽量准确，选取与邻近无交叉的区域和交界区域分别采点测试。随机样本点定位结果见表 2，预测精度为某区域内测试点属于此区域数量即正确数量比总测试数量。C5~C6 区域测试锚点如图 8 所示，黑色锚点表示该区域内测试信号采集点。



(a) 不同K值对应的定位误差



(b) 不同K值对应的平均定位误差

图 7 K 值对定位精度的影响

表 2 随机样本点定位结果

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
测试数量	20	40	40	20	40	20
正确数量	17	37	36	16	37	19
预测精度	85.0%	92.5%	90.0%	80.0%	92.5%	95%
平均精度	89.17%					

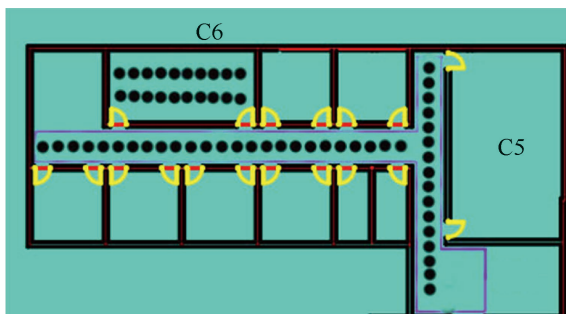


图 8 C5~C6 区域测试锚点

由表 2 和图 8 可见，本系统在房间级的区域定位方面，平均精度达到 89.17%，其中对区域判断有误的点皆在区域交界处，原因是区域交界处信号复杂且多变，采集指纹点密度不足，难以进行精确判断，文献[24]通过采集利用 CSI 信息可实现亚米级定位，但本文旨在结合知识图谱技术与传统定位技术，对室内已有信息应如何在定位系统中整合利用而进行的探索研发，暂时对场景内定位精度只要求在房间级别。例如，当用户在已采集指纹点的 C6 区域时，只需要使手机连接到室内 Wi-Fi，操作本系统的数据异步采集 App 向云服务端上传所在位置的数据信息，便可在系统前端看到用户的位置在 3407 教室，即实现房间级位置服务。

#### 4 结束语

本文在传统 Wi-Fi 指纹定位技术基础上结合知识图谱技术，采用分步定位的方法，以多种软件开发技术为手段，研发出具有 3D 展示功能的定位系统，旨在为物流园、校园等大型应用场景提供房间级定位服务。其分步定位方法有重要意义：

1) 通过判断计算范围的方式筛选掉与待测点无关的指纹数据，减少参与的有效计算量来降低系统运行花费时间；

2) 可根据 WAP 位置判断待测点所属区域，且房间级定位精度对某单一 WAP 依赖性降低，使得本系统具有不错的鲁棒性，部署方便、普遍适用。

总的来说，本系统技术新颖、无须专用设备且成本可控，能有效整合利用室内已有物联网设备信息源，证明了文中提出分步定位方法的合理性和实用性。下一步的工作将对系统做改进和扩容，首先在定位算法精度方面进行改进提升，以便系统适应更复杂的室内定位应用场景需求；其次对系统进行扩容，将场景扩展到整个云南大学呈贡校区，数据量的函数式增长将使得实体及实体间关系极其复杂，从而更加突出本文的工程价值；最后在定位功能的基础上降低对某单一信息的依赖性，使得定位系统具有更好的可靠性。

#### 参考文献：

[1] ALI K, JAVED T, HASSANEIN H S, et al. Non-audible acoustic communication and its application in indoor location-based services[C]//Proceedings of 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.

[2] KHALAJMEHRABADI A, GATSIS N, AKOPIAN D. Modern WLAN fingerprinting indoor positioning methods and deployment

- challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(3): 1974-2002.
- [3] WANG Y X, YE Q, CHENG J, et al. RSSI-based bluetooth indoor localization[C]//Proceedings of 2015 11th International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN). Piscataway: IEEE Press, 2015: 165-171.
- [4] KUNG H Y, CHAISIT S, PHUONG N T M. Optimization of an RFID location identification scheme based on the neural network[J]. International Journal of Communication Systems, 2015, 28(4): 625-644.
- [5] SECO F, JIMÉNEZ A R. Smartphone-based cooperative indoor localization with RFID technology[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2018, 18(1): 266.
- [6] YANG B, LEI Y Q, YAN B. Distributed multi-human location algorithm using naive Bayes classifier for a binary pyroelectric infrared sensor tracking system[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(1): 216-223.
- [7] KAREGAR P A. Wireless fingerprinting indoor positioning using affinity propagation clustering methods[J]. Wireless Networks, 2018, 24(8): 2825-2833.
- [8] YOUSSEF M A, AGRAWALA A, UDAYA SHANKAR A. WLAN location determination via clustering and probability distributions[C]//Proceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, Piscataway: IEEE Press, 2003: 143-150.
- [9] SACCOMANNO N, BRUNELLO A, MONTANARI A. What you sense is not where you are: on the relationships between fingerprints and spatial knowledge in indoor positioning[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, PP(99): 1-1.
- [10] 常娥, 冷卫杰. 工业互联网无线室内定位技术概述[J]. 物联网学报, 2020, 4(2): 129-135.
- CHANG E, LENG W J. Summary of wireless indoor positioning technology in industry Internet[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(2): 129-135.
- [11] 段嘉伟, 薛冰岩, 尹学锋. 基于传播图论的多链路信道仿真及其在 TDOA 定位系统性能评估中的应用[J]. 电波科学学报, 2021, 36(3): 413-421.
- DUAN J W, XUE B Y, YIN X F. Multi-link channel simulation based on propagation graph theory and application in performance evaluation of TDOA positioning system[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021, 36(3): 413-421.
- [12] GUO S, NIU G C, WANG Z W, et al. An indoor knowledge graph framework for efficient pedestrian localization[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(4): 5151-5163.
- [13] ABRUDAN T E, XIAO Z L, MARKHAM A, et al. Distortion rejecting magneto-inductive three-dimensional localization (MagLoc)[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(11): 2404-2417.
- [14] ZHOU Y W, FENG J H, YANG Z H, et al. Overview of knowledge graph completion algorithms based on representation learning[C]//Proceedings of 2021 IEEE 6th International Conference on Cloud Computing and Big Data Analytics. Piscataway: IEEE Press, 2021: 222-228.
- [15] HE S N, CHAN S H G. Wi-Fi fingerprint-based indoor positioning: recent advances and comparisons[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2016, 18(1): 466-490.
- [16] XIA S X, LIU Y, YUAN G, et al. Indoor fingerprint positioning based on Wi-Fi: an overview[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2017, 6(5): 135.
- [17] MATSUDA K, LEA R. WebGL programming guide: interactive 3D graphics programming with WebGL[M]. Hoboken: Addison-Wesley Professional, 2013.
- [18] WANG Q, MAO Z D, WANG B, et al. Knowledge graph embedding: a survey of approaches and applications[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2017, 29(12): 2724-2743.
- [19] LIU X Y, TAN H B, CHEN Q H, et al. RAGAT: relation aware graph attention network for knowledge graph completion[J]. IEEE Access, 2021, 9: 20840-20849.
- [20] 乔斯·德克森. Three.js 开发指南: 基于 WebGL 和 HTML5 在网页上渲染 3D 图形和动画[M]. 周翀, 张薇, 译. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- DIRKSEN J. Three.js development guide: rendering 3D graphics and animations on web pages based on WebGL and HTML5[M]. ZHOU C, ZHANG W translate. Beijing: China Machinery Industry Press, 2019.
- [21] NSSDHAM M, HOLDER A. Graph Algorithms[M]. Beijing: O'Reilly Media, Inc 2019.
- [22] FENSEL D, ŞİMŞEK U, ANGELE K, et al. Knowledge Graphs[M]. Cham: Springer International Publishing, 2020.
- [23] ZHOU R, YANG Y X, CHEN P C. An RSS transform—based WKNN for indoor positioning[J]. Sensors, 2021, 21(17): 5685.
- [24] YANG R M, YANG X L, WANG J C, et al. Decimeter level indoor localization using Wi-Fi channel state information[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, PP(99): 1-1.

## [作者简介]



李建东 (1995—), 男, 云南大学信息学院硕士生, 主要研究方向为无线定位技术。



杨晶晶 (1983—), 女, 博士, 云南大学信息学院教授、博士生导师, 主要研究方向为无线通信信号处理。



黄铭 (1963—), 男, 博士, 云南大学信息学院教授、博士生导师, 主要研究方向为电磁空间安全、无线电监测。