

Indoor Space Plan Perception Based on Mobile User Crowdsourcing Data

Liang Zhao, Pinghua Chen

Department of Computer, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong
Email: joe_2018@163.com

Received: Aug. 29th, 2019; accepted: Sep. 13th, 2019; published: Sep. 20th, 2019

Abstract

Aiming at the problem that the spatial structure of large indoor environment and object entities change frequently to affect the provision of real-time location service, a method of using the mobile user crowdsourcing location data to sense the indoor floor plan is designed. The method uses crowdsourced data from mobile users to reconstruct the indoor floor plan. Firstly, the Voronoi map is used to divide the indoor space into space to find the topological relationship of the space in the indoor environment, then using the topological relationship to constrain the DAG-SVM algorithm to generate the geometric features of the spatial object; finally, the topological relationship and the geometric features are used to construct the indoor space plan. The experimental results show that the proposed method can sense the indoor space plan.

Keywords

Crowdsourcing, Indoor Space Plan Perception, Voronoi Diagram, DAG-SVM

基于移动用户众包数据的室内平面图感知

赵 亮, 陈平华

广东工业大学计算机学院, 广东 广州
Email: joe_2018@163.com

收稿日期: 2019年8月29日; 录用日期: 2019年9月13日; 发布日期: 2019年9月20日

摘 要

针对大型室内环境空间结构和对象实体经常变化进而影响提供实时位置服务的问题, 设计了一种利用移动用户众包位置数据感知室内平面图的方法。方法使用来自移动用户的众包数据进行室内平面图的重建,

首先应用Voronoi图对室内空间进行空间区域划分, 以寻找室内环境下空间的拓扑关系; 然后利用拓扑关系约束有向无环图支持向量机(DAG-SVM)生成空间对象的几何特征; 最后, 联结拓扑关系和几何特征构建室内空间平面图。实验结果表明本文的方法能够感知室内空间平面图。

关键词

移动众包, 室内空间平面图, Voronoi图, DAG-SVM

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

数字地图服务为户外的基于位置的服务(Location Based Services, LBS)提供了便利, 例如兴趣点推荐(Point of Interest, POI)和导航服务。然而, 在人们花费大量时间的室内场所中, 这种室内平面图是极少的, 也是室内 LBS 服务的一大难点[1]。随着城市化进程的加快, 大型建筑物内部复杂的空间结构加重了人们的认知负担[2], 特别是商场、会展中心和游乐场等大型公共场所中, 交错的空间和复合功能区会让人产生“云深不知处”的错觉, 使得研究室内数字地图服务更加有意义。同时, 人们在社交网络上以签到的方式分享地理标签或地理位置, 与好友分享(餐厅、商场、娱乐场所等)体验和经历[3], 这种方式极大促进了个性化推荐服务的发展。但室内条件下, 全球定位系统(Global Positioning System, GPS)受到高层建筑物的遮挡导致精度下降, 无法像户外一样直接利用 GPS 信息建立位置和地理标签的联系, 且大型的室内场所通常集中了很多地理标签和位置, 这对室内 LBS 服务的精度和准确性提出了更高的要求。

近年来, 对室内 LBS 服务的研究不局限于室内导航、基于位置的推荐等服务, 在社交营销、基于位置的查询、临近搜索等领域也可以看到室内位置服务的身影。室内 LBS 服务要求在室内提供基于位置的地理标签和位置要尽可能精细(体现为需要用 x 品牌店铺来替代 x 商场)。Basiri A.在文献[4]中做出了对室内 LBS 服务的思考, 对比了现有室内定位、室内地图和位置隐私的解决方案, 探讨了研究室内 LBS 服务面临的技术挑战和机遇, 并指出解决这些挑战将会给人们带来更好的室内活动体验。

现在移动众包的概念比较流行, 众包方式减少了对专家的过度依赖, 且手持智能手机的用户数量较多, 为众包方案的实施提供了便利条件。文献[1]使用了众包采集的惯性数据来构建和组合用户移动性轨迹, 来计算平面图的可访问区域的近似形状。同时, 文献[5] [6]使用移动用户的众包数据进行室内平面地图重建, 他们从视频和图片等数据中提取用户运动轨迹来确定房间形状。这些研究者的工作证明了众包方式的可行性, 但他们的工作需要收集用户在一段时间内的行为轨迹数据, 长时间的收集用户数据和开启摄像头权限会侵犯用户隐私, 不易于应用到实际生活中去。本文使用移动用户众包的方式收集用户在室内签到、发生交易时的快照信息, 作为感知室内空间平面图的原始输入数据。

室内 LBS 服务亟需解决的关键问题是室内空间建模[7], 即按需求建立位置和环境的联系。文献[8] [9]采用基于图模型的方法来表示室内空间的拓扑关系, 建立室内空间拓扑模型; Li [10]等人提出基于格的几何模型; Z. Lei 在其文献[11]中提出空间距离的概念, 使用不同层次表达室内元素、传感器和对象之间的关系, 表达室内空间的语义信息。文献[12]提出将几何模型、符号模型、语义模型的优势结合起来, 建立一种情境相关的双层室内空间数据模型, 融合了几何、符号和语义模型的优势, 使模型能表达更多的室内环境信息。传统的室内空间建模方法对建筑平面图的依赖程度较高, 导致模型不易更新, 对结构改

变和对象变更不敏感; 当空间对象发生变更时不能做出调整, 导致对应导航服务和基于位置的服务出错。

室内空间模型不是人们对基于位置服务的最终需求, 需要通过对位置的解读去感知和理解室内环境。现在通过人工或同步定位与建图(Simultaneous Localization And Mapping, SLAM)的机器人系统感知室内空间建立室内环境地图的方法已经开始流行[13], 但这种做法具有时效性, 当空间实体对象发生变更时需要重新测量建模, 造成了人力、财力资源的浪费。Shu L.介绍了一种检测有毒气体边缘的方法, 使用由大量的传感器构成传感器网络对有毒气体覆盖的区域进行检测, 将有毒气体覆盖区域的几何轮廓可视化[14]。这种利用众多传感器检测区域几何形状, 并即时更新状态的方法启发了本文的工作。随着学术界和大量研究人员对 wifi 室内定位技术的探索和研究[15] [16] [17], 使得室内定位的精度不断提升, 这也是本文工作的一个便利条件。

针对上述问题, 本文设计了一种感知室内空间布局的方法, 通过众包方式获取移动用户在室内签到或者交易快照信息。利用 wifi 室内定位技术解决 GPS 系统无法在室内工作的问题; 然后利用用户在室内的位置数据重建室内空间平面图。本文方法有以下优点: 1) 利用众包的方式获取用户在室内场所的数据进行室内空间平面图感知, 与传统人工测绘方法相比, 节省了人力和财力; 2) 利用现有 wifi 基础设施进行室内定位, 无须额外的定位设施; 3) 使用空间拓扑关系约束 DAG-SVM 算法计算室内空间的几何形态, 可以减少计算的复杂程度。

2. 室内空间平面图感知

2.1. 移动用户众包数据获取

获取用户签到、打卡或交易快照等在室内场所活动的的数据记录。我们只需要获取一次用户在室内某空间签到或交易快照信息, 获取当前用户智能手机的环境 RSSI 信息作为输入, 如表 1 所示。

Table 1. Environment information of indoor mobile users

表 1. 室内移动用户环境信息

序号	标签	用户 ID	RSSI 信息
1	R_1	01	b_63964380 -67 false; b_13784698 -75 false;
2	R_2	02	b_41424524 -86 false; b_10120963 -76 false;
3	R_3	02	b_37749132 -77 false; b_28723327 -90 false;

在本文中, 将地理标签视为室内空间对象, 其在二维平面下的几何度量看作子空间区域。通过 Wifi 室内定位算法计算得到用户的室内位置, 得到形如 $L = \langle U_i, R_i, P \rangle$ 的三元组, 用来表示用户在室内的一条位置记录。其中 U_i 为用户 ID, R_i 为空间对象, P 为当前记录在室内的相对位置坐标。

2.2. 室内空间的拓扑关系

Voronoi 图是用于空间分割的几何结构, 能描述平面空间内实体的临近关系, Voronoi 图由离散点(空间对象)和对应的 Voronoi 区域组成[18]。使用空间对象作为 Voronoi 区域的生成点, 由于同一个用户在不同子空间区域中可以进行多次签到等数据收集操作, 因此把同一子空间对象下所有记录中用户位置的均值作为 Voronoi 区域的生成点。生成的 Voronoi 图将室内空间划分为与室内空间对象数目相等的子区域。

Voronoi 区域生成点 R_i 的计算如公式(1)所示。

$$R_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n U_{ij} \quad (j=1,2,3,\dots,n) \quad (1)$$

其中, R_i 表示第 i 个 voronoi 区域的生成点(室内空间对象), U_{ij} 表示第 i 个空间对象下的第 $j(j=1,2,3,\dots,n)$ 条记录。

使用 D-三角网生成 Voronoi 图的步骤如下:

Step1 数据预处理, 应用公式(1)计算 Voronoi 区域生成点 R_i , 建立索引;

Step2 使用内插法建立 Delaunay 三角网;

Step3 计算目标三角形的外接圆心;

Step4 遍历生成点的索引, 重复 step3, step4;

Step5 连接外接圆心, 生成 Voronoi 图。

图 1 是商场某层空间例子。室内空间由若干个店铺组成, R_i 表示店铺的标识, 不同店铺之间由墙体隔开。图 2 给出了图 1 对应的 Voronoi 图, 其中虚线所围成的区域是各子区域初步的边界。每个子区域内仅有一个生成点, 子区域之间互不相交。

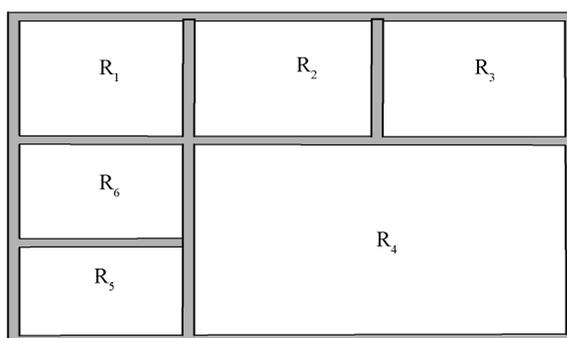


Figure 1. Indoor space example

图 1. 室内空间例子

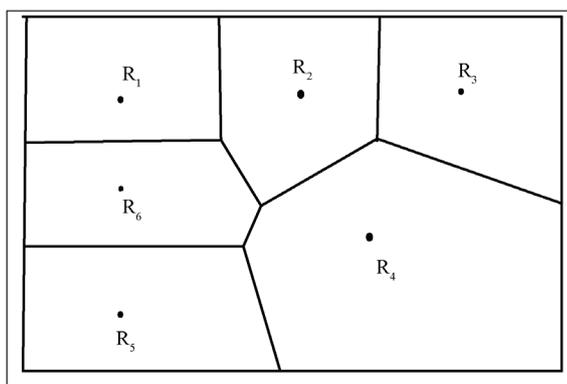


Figure 2. Voronoi diagram of interior space

图 2. 室内空间 Voronoi 图

使用 Voronoi 图将室内空间划分为多个子区域, 可由 Voronoi 图直接找出与目标区域相邻的其他区域, 且当 Voronoi 区域是 n 边形时, 目标区域与 n 个区域相邻。下面结合 Voronoi 图给出室内环境下常用的相邻、相离空间关系的定义。

定义 1 (相邻关系)两空间对象之间直接连通,可由空间 1 直接到达空间 2 的两空间对象被定义为相邻关系。

定义 2 (相离关系)两空间对象不直接连通,需经过中间节点才能到达。如空间 1 需要通过途经空间 2 才能到达空间 3,则空间 1 和空间 3 被定义为相离关系。

通过解读 Voronoi 图结合给出的室内空间关系定义得到空间拓扑关系。为方便存储和表达,两空间关系映射为图的边,相邻关系在图模型中用连通顶点的边表示,无直接连通的顶点即为相离关系。以图 2 为例,用图模型存储并表达室内空间拓扑关系如下:

$$G = \langle V, E \rangle$$

$$V(G) = \{R_1, R_2, R_3, R_4, R_5\}$$

$$E(G) = \{(R_1, R_2), (R_1, R_5), (R_2, R_3), (R_2, R_4), (R_3, R_4), (R_4, R_5), (R_5, R_2)\}$$

其中, $V(G)$ 是图的顶点集,由室内子区域对象组成; $E(G)$ 是图的边集,用来存储室内环境空间拓扑关系。

2.3. 室内空间平面图的生成

现实室内环境中的房间分隔会使用一面公共墙壁作为分离相邻空间的界线,且一个房间拥有墙壁的数目由其相邻的空间数目决定,使用 SVM 分类器训练两个相邻空间的位置数据得到的分离超平面作为相邻空间的间隔边界,使用这些边界组成室内空间的平面图。使用 SVM 分类器训练数据生成室内空间平面图,这种方法依据拓扑关系保留了空间对象的几何形态,还可以还原客观世界存在的墙壁隔断。

用户的签到数据映射在二维平面上是具有明显类别界限的散点,随着用户数据的不断丰富,这些用户的散点位置所形成的形状会逐渐接近真实世界的轮廓。对室内空间平面图的感知关键是依托空间拓扑关系计算子空间的几何属性,进而感知室内空间的布局。

空间的几何形态采用由 SVM 分类器训练生成的分离超平面表达。在求解目标空间的几何形态的过程中,只考虑与邻接的空间分离超平面,因为具有相离空间关系的空间与目标空间是不存在公共墙等隔断的。基于空间拓扑关系感知室内空间平面图的计算框图如图 3 所示。

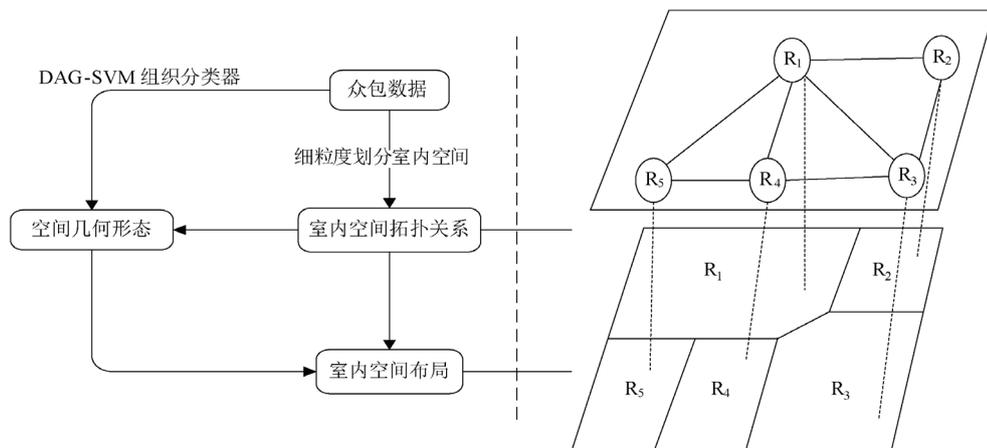


Figure 3. Calculation block diagram of indoor space plan
图 3. 室内空间平面图计算框图

使用 DAG-SVM 方法进行目标空间几何形态的求解,计算过程中加入空间拓扑关系 $G = \langle V, E \rangle$ 这个限制条件,确保在正确分类时构造节点路径只与相邻空间有关,而不会经过相离空间,使得分类节点可

以代表室内环境下的隔断。

使用空间拓扑关系做约束条件构造 DAG-SVM 的节点数小于传统方法, 数目小于 $N*(N-1)$ 个。室内空间平面图感知过程如下:

输入: 空间对象索引列表 `Object_index`, 室内位置记录三元组 $L = \langle U_i, R_i, P \rangle$, 室内空间拓扑关系 $G = \langle V, E \rangle$,

输出: 室内空间平面图,

Step1: 选取目标空间对象,

Step2: 广度优先遍历图 $G = \langle V, E \rangle$, 找出目标空间的相邻空间,

Step3: 以 step2 的输出作为 DAG-SVM 方法组织分类节点的限制条件,

Step3: 训练目标节点的 SVM 分类器,

Step4: 遍历整个空间对象索引列表, 重复 step1, step2, step3,

Step5: 分类节点可视化, 得到室内空间布局地图。

下面给出了基于空间拓扑关系的 DAG-SVM 方法组织分类节点的关键函数的伪代码如下:

```

1) Object_Space      #目标空间
2) Object_list      #候选空间列表
3) Neighbor_list    #目标相邻空间合集
4) DefNeighborSpace (目标空间):
5)      BFS (G = <V, E>)
6)      ReturnNeighbor_list
#广度优先的方法遍历图 G = <V, E>, 返回目标空间的相邻空间集合
7) DefIs_NeighborSpace (候选空间, 相邻空间)
8)      If 候选空间 isin(Neighbor_list):
9)          Return true
#若候选空间在相邻空间列表, 返回 true
10)     Else:
11)         Return false
#若候选空间不在相邻空间列表, 返回 false
12) DefCreate_Node (目标空间, 候选空间)
13)     If Is_NeighborSpce:
#对候选节点进行空间关系判定
14)         构造 SVM 分类节点
#若判定结果为 true, 则构造二分类节点
15)     Else:
16)         Create_Node (目标空间, 更换候选空间)
#判定结果为 false, 则更换候选空间重新执行。

```

3. 实验

3.1. 实验设置

本文通过模拟室内定位得到的位置数据进行实验, 首先设置一个具有 5 个空间的室内环境, 然后在

每个空间内随机生成数据(为保证实验的合理性,每个空间下生成数量不同的记录)模拟众包方式获得的数据,来模拟一个具有 5 个子空间的室内环境进行仿真实验。使用文章提出方法进行室内平面图感知,设置的室内空间环境的平面图和数据如图 4 所示。

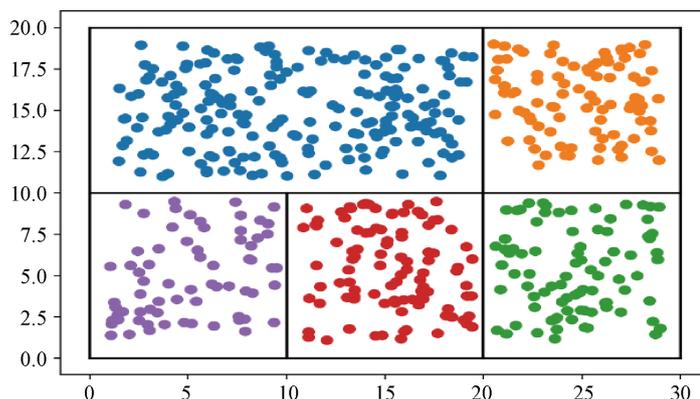


Figure 4. Experimental data distribution map

图 4. 实验数据分布

使用本文方法对数据进行室内空间平面图的感知,首先使用 voronoi 图对室内空间进行划分子区域,找到室内空间拓扑关系,用图模型来存储拓扑关系;然后根据空间拓扑关系来组织分类器节点,以拓扑关系约束空间对象的几何形状;最后将分类节点的分离超平面可视化建立室内空间的布局。

3.2. 实验结果

将数据输入进行室内空间平面图感知,通过细粒度的室内空间划分将室内空间划分为 5 个子区域,如图 5 所示,从 Voronoi 图中得到当前室内空间的环境拓扑关系 $G = \langle V, E \rangle$ 如图 6 所示。

实验中基于空间拓扑关系的 DAG-SVM 方法组织的分类器节点树状图如图 7 所示,以空间拓扑关系作为限制条件组织的分类节点数目少于传统 DAG-SVM 方法。在分类正确的前提下,缩减了计算资源的开支。将训练 SVM 得到的分离超平面可视化后得到室内空间平面图如图 8 所示,从实验结果可以看出与设置的室内空间平面图近似,表明本文方法可以感知室内空间平面图,且随着数据不断丰富,感知到的室内平面图会更加精确。

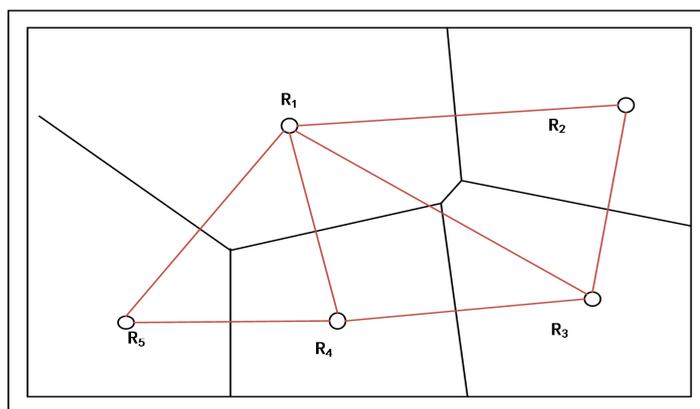


Figure 5. Voronoi diagram divides indoor space

图 5. Voronoi 图划分室内空间

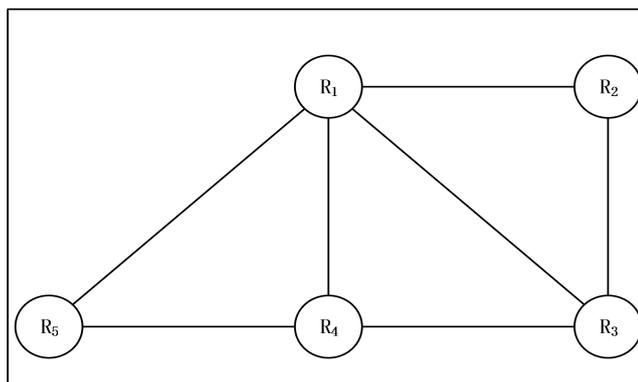


Figure 6. Topological relationship of indoor space
图 6. 室内空间拓扑关系图

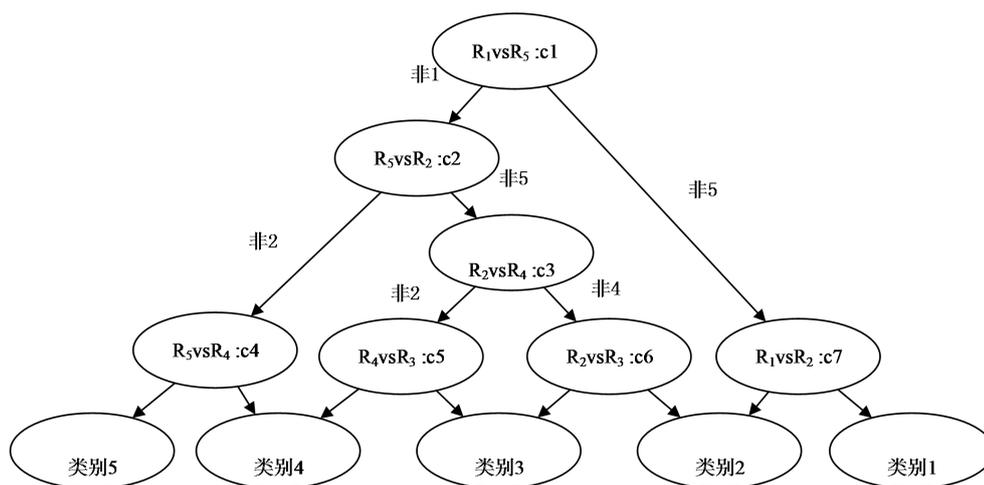


Figure 7. Construction of nodes based on DAG-SVM method based on spatial topology
图 7. 基于空间拓扑关系的 DAG-SVM 方法构造分类节点

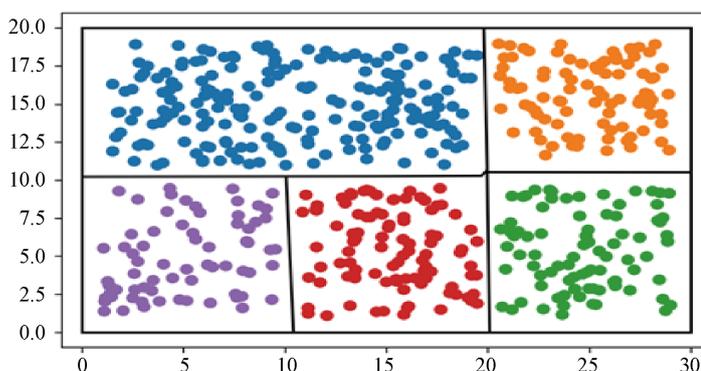


Figure 8. Indoor space layout map
图 8. 室内环境空间布局地图

4. 总结与展望

本文设计了一种利用移动用户众包数据感知室内空间平面图的方法, 使用室内定位得到的位置数据作为输入, 进行室内空间平面图的感知。实验结果表明, 本文的方法是可行的, 并随着用户数据的不断

丰富, 构建的室内空间平面地图会更加精确。此外, 室内元素不够丰富, 缺少一些公共设施的描述, 这也是未来要解决的问题。

基金项目

本文得到国家自然科学基金项目(No.61572144)的资助。

参考文献

- [1] Gao, R., Ye, F., Luo, G., *et al.* (2018) Indoor Map Construction via Mobile Crowdsensing. In: *Smartphone-Based Indoor Map Construction*, Springer, Singapore, 3-30. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8378-5_2
- [2] 林雕, 宋国民, 邓晨. 基于图的语义室内导航模型构建研究[J]. 测绘工程, 2015, 24(1): 48-52.
- [3] 任星怡, 宋美娜, 宋俊德. 基于用户签到行为的兴趣点推荐[J]. 计算机学报, 2017, 40(1): 30-53.
- [4] Basiri, A., Lohan, E.S., Moore, T., *et al.* (2017) Indoor Location Based Services Challenges, Requirements and Usability of Current Solutions. *Computer Science Review*, **24**, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.03.002>
- [5] Alzantot, M. and Youssef, M. (2012) CrowdInside: Automatic Construction of Indoor Floorplans. *Proceedings of the 20th International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, Redondo Beach, CA, 6-9 November 2012, 99-108. <https://doi.org/10.1145/2424321.2424335>
- [6] Chen, S., Li, M., Ren, K., *et al.* (2015) Crowd Map: Accurate Reconstruction of Indoor Floor Plans from Crowd-sourced Sensor-Rich Videos. *The 35th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS 2015)*, Columbus, OH, 29 June-2 July 2015, 1-10. <https://doi.org/10.1109/ICDCS.2015.9>
- [7] Lin, D., Song, G.-M. and Jia, F.-L. (2014) Review of the Research Progresses in Spatial Model for Indoor Location-Based Service. *Journal of Navigation and Positioning*, No. 4, 17-21.
- [8] Jensen, C.S., Lu, H. and Yang, B. (2009) Graph Model Based Indoor Tracking. *2009 10th International Conference on Mobile Data Management: Systems, Services and Middleware*, Taipei, 18-20 May 2009, 122-131. <https://doi.org/10.1109/MDM.2009.23>
- [9] Togashi, H., Furukawa, H., Yamaguchi, Y., *et al.* (2016) Network-Based Positioning and Pedestrian Flow Measurement System Utilizing Densely Placed Wireless Access Points. *International Conference on Indoor Positioning & Indoor Navigation*, Madrid, 4-7 October 2016, 1-8. <https://doi.org/10.1109/IPIN.2016.7743648>
- [10] Li, D. and Lee, D.L. (2008) A Lattice-Based Semantic Location Model for Indoor Navigation. *The 9th International Conference on Mobile Data Management*, Beijing, 27-30 April 2008, 17-24. <https://doi.org/10.1109/MDM.2008.11>
- [11] Lei, Z., Jin, P., Zhang, L., *et al.* (2011) Layered Model: A Data Model for Indoor Space Moving Object. *Journal of Computer Research & Development*, **48**, 274-281.
- [12] 李敬雯, 刘宇雷, 秦小麟. 一个情境相关的双层室内空间数据模型[J]. 计算机科学, 2017, 44(8): 187-192.
- [13] Hashikawa, F. and Morioka, K. (2011) Mobile Robot Navigation Based on Interactive SLAM with an Intelligent Space. *2011 8th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, Incheon, 23-26 November 2011, 788-789. <https://doi.org/10.1109/URAI.2011.6146017>
- [14] Shu, L., Mukherjee, M. and Chen, Y. (2016) Poster Abstract: DeGas—Toxic Gas Boundary Area Detection in Industrial Wireless Sensor Networks. *15th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, Vienna, Austria, 11-14 April 2016, 1-2. <https://doi.org/10.1109/IPSNS.2016.7460700>
- [15] 郭伯勋, 李军. 基于 KELM 的位置指纹室内定位方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(9): 78-83.
- [16] 韦燕华, 周彦, 王冬丽. 基于 LS-SVM 的位置指纹室内定位[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(9): 122-125.
- [17] 丁雪芳, 王琪. 基于改进支持向量机的 Wi-Fi 室内定位算法[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(6): 90-93.
- [18] Saye, R.I. and Sethian, J.A. (2012) Analysis and Applications of the Voronoi Implicit Interface Method. *Journal of Computational Physics*, **231**, 6051-6085. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2012.04.004>