

# 基于 RFID 室内可视化定位系统设计与实现<sup>\*</sup>

钟 晴 叶芝慧 郭小青

(南京大学电子科学与工程学院 南京 210023)

**摘要:** 目前,RFID室内定位数据的可视化方法简单,视觉效果不理想。为了解决这一问题,提出了一种新型的RFID室内定位系统,即在地理信息系统上执行RFID室内定位算法,并给出了兼顾实时性与定位精度的室内定位算法。文中定位所用装置与传统的RFID阅读器相比,无需调节天线的发射功率。在定位过程中,与传统的基于RSSI信号强度的LandMarc定位算法及其改进Vire算法相比,降低了器件的复杂度,将阅读器模块最小化,提高了定位的实时性,有效解决了室内定位的精度与实时性问题。基于该方法,本文设计并实现了一个基于RFID室内可视化定位系统,并验证了算法的有效性。

**关键词:** RFID;室内定位算法;区域划分;可视化

**中图分类号:** TN702    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.50 510.80

## Design and implementation of RFID-based indoor visual positioning system

Zhong Qing Ye Zhihui Guo Xiaoqing

(School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** At present, RFID indoor positioning data visualization methods are simple and the visual effect is not ideal. To solve this problem, an RFID indoor localization algorithm is proposed for a geographic information system. Furthermore, the indoor positioning algorithm balances the tradeoff between real-time operation and positioning accuracy. Compared with the conventional LandMarc algorithm and its improved Vire algorithm, the complexity of the equipment is simplified and the running time is reduced in the positioning process. Experiment results indicate that the proposed system with RFID-based indoor visual positioning scheme can work efficiently.

**Keywords:** RFID; indoor localization algorithm; zoning; data visualization

## 1 引言

随着物联网的快速发展,近年来基于无线射频识别系统RFID的精确室内定位技术越来越受到人们的关注<sup>[1]</sup>,RFID技术的应用和发展涉及到人类活动的各个领域,首先是个人室内导航的需求,当人在大型的室内环境如大型超市、停车场、火车站、机场、博物馆中,根据当前个人所处的位置快速找到目的地,不仅可以有效地节约个人时间,更可以提高人员流动速度,有效解决一定区域内人员长时间聚集的问题;其次是个人轨迹的跟踪与记录<sup>[2]</sup>。但是大部分现有的室内定位系统只是在网格中显示位置数据,无法对定位数据实时追踪。同时,RFID缺少与地理信息系统的有效结合,这限制了室内定位结果的实际应用,此外,室外定位算法的精度要求相对较低,难以满足室内精确定位

的要求<sup>[3]</sup>。

针对现有工作的不足,本文提出建立一个基于地理位置信息的RFID室内定位系统,通过在地面铺设RFID标签建立室内平面坐标系统,使用地理信息系统构建地理信息与室内地图,阅读器读取实验区域内的标签,提出了一个基于最小化RFID阅读器的区域划分的定位算法,实现了室内环境下的可靠定位。基于该方法,设计并实现了一个基于RFID室内定位数据可视化系统,验证了算法的有效性。

## 2 LandMarc及其改进算法Vire

### 2.1 LandMarc定位算法

LandMarc(location identification based on dynamic Active RFID calibration)定位系统是一种经典的基于接收

收稿日期:2016-01

<sup>\*</sup> 基金项目:卫星通信与导航协同创新中心(SatCN-201408)、国家海洋公益重大专项(201205035-07)、江苏省普通高校研究生科研实践计划(省立校助32)资助项目

信号强度(received signal strength indicator, RSSI)的定位技术<sup>[4]</sup>,最早由密歇根州立大学的 M. Ni Lionel 提出,该方法提出参考标签的概念,进行辅助定位。参考标签的使用既能代替大量昂贵的阅读器,也能让定位系统更好地适应环境的改变。LandMarc 系统使用最近 K 邻居算法<sup>[5]</sup>,图 1 为 LandMarc 系统阅读器和标签分布图。

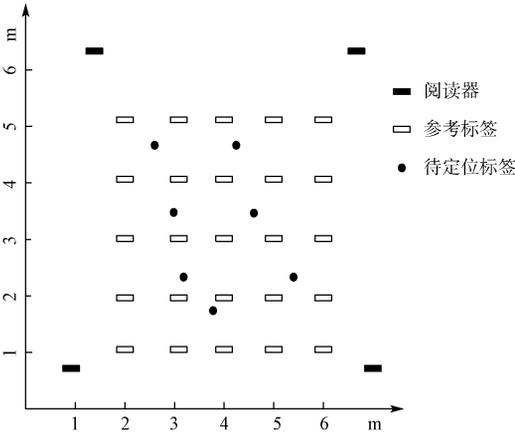


图 1 LandMarc 系统阅读器和标签分布

如图假设有  $M$  个阅读器,  $N$  个参考标签,  $H$  个待定位标签, RFID 阅读器天线具有 8 个不同功率的档位,在探测过程中,每个阅读器逐一增大档位 1~8,记录下探测到的参考标签和待定位标签的信号强度值,探测结束后,将待定位标签的探测结果定义为  $S_i = [S_{i,1}, S_{i,2}, \dots, S_{i,M}]$ ,其中  $S_{i,j}$  表示第  $j$  个阅读器探测到第  $i$  个待定位标签的信号强度矢量。将参考标签的探测结果定义为  $Q_i = [Q_{i,1}, Q_{i,2}, \dots, Q_{i,M}]$ ,其中  $Q_{i,j}$  表示第  $j$  个阅读器探测到第  $i$  个参考标签的信号强度矢量,比较每个参考标签到待定位标签之间的距离矢量,找到最接近定位标签的距离矢量  $K$ 。最优矢量比较度量的选择,可以用欧式距离,曼哈顿距离, Hellinger 距离,以及余弦相似函数。理论上,欧氏距离计算最小  $K$  值可以达最高的定位精度<sup>[6]</sup>,公式如下:

$$E_{i,j} = \sqrt{\sum_{k=1}^M (Q_{i,k} - S_{j,k})^2} \quad (1)$$

两个向量间  $E$  越小表示这两个向量探测差异越小,距离也就越相近。这样在所有参考标签中寻找出和待测标签距离最近的  $K$  个参考标签,通过多个已知位置的参考标签用加权求和的方法求得待定位标签的位置坐标。未知的待定位标签坐标  $(x, y)$  由式(2)给出:

$$(x, y) = \sum_{l=1}^k w_l (x_l, y_l) \quad (2)$$

式中:  $w_l$  是第  $l$  个最近邻居的权重因子,  $l \in (1, k)$ ,  $(x_l, y_l)$  为预先测得的参考标签坐标,对  $l$  个坐标加权求和可以得到待定位标签的坐标。经验上,  $w_l$  由式(3)给出:

$$w_l = \frac{1/E_l^2}{\sum_{j=1}^k 1/E_j^2} \quad (3)$$

LandMarc 算法的精髓在于减少了阅读器的数量,且提升了定位系统对环境变化的适应性,缺点是实时性差,算法需要在标签静止的条件下将天线发射功率从 1~8 档逐次增大,1 个周期为 7.5 s<sup>[7]</sup>,这就意味着,即使不考虑算法的复杂度,仅探测数据的步骤就要花费 7.5 s;在选择最近邻标签的时候,会对布局中所有的参考标签进行计算,这样会增加许多不必要的运算;在实际测试中还会发现,阅读器读取每个标签的信号强度时,经常会出现个别标签的信号强度相对于周围标签数值过大或过小的情况,或者存在读不到数值的情况<sup>[8]</sup>,只要有一个参考标签的信号强度值偏离其实际值较大,而且其偏离值又恰巧在待定位标签的信号强度值附近时,这个参考标签就可能被选作最近邻标签,从而使定位出现较大的偏差。

## 2.2 Vire 定位算法

Vire (active RFID-based localization using virtual reference elimination) 系统是由 Yiyang Zhao 提出的 RFID 室内定位的经典算法<sup>[9]</sup>,Vire 系统是在 LandMarc 系统基础上的改进,它不需要增加额外参考标签,通过在参考标签之间插入虚拟标签来增加已知的位置参考数据,减少成本的同时也降低了过多真实参考标签产生的多径传播和信号干扰的问题,每一个虚拟标签的 RSSI 值通过周围的真实参考标签的 RSSI 值计算。此外,该系统还提出了相似地图(proximity map)的概念<sup>[10]</sup>,近似图覆盖整个定位区域,并且划分为很多小区域(小方格),其中每个区域的中心对应一个虚拟参考标签。每个阅读器都建立自己的相似地图,如果要定位一个待测标签,先找到与待定位标签相近的一个小区域,然后对这些小区域中的标签进行标记,接着用相似地图进行交集运算,从而消除那些标签不可能出现在区域内的位置<sup>[11]</sup>,提高定位精度。但是虚拟标签的 RSSI 值与距离的函数关系并不呈线性关系,所以对插值进行简单的线性处理会造成比较大的误差,此外,由于需要计算虚拟标签的位置和信号强度等信息,计算量大,在追求精度的同时,牺牲掉实时性。

LandMarc 和 Vire 算法在要求高精度的室内定位中具有很大的参考价值,但是局限性也很明显,在追求高精度的过程中,繁琐的步骤和算法的复杂度降低了探测的实时性,导致了 RFID 室内定位在现实生活中无法被广泛应用,尤其在物联网中对物品的智能化识别、定位、跟踪、监控和管理等追求实时性的定位场景中,需要考虑更加快捷与直接的定位方法。

## 3 最小化阅读器的区域划分定位模型

为了克服 LandMarc 算法需要不断调整天线功率并且可能选择出错参考标签作为最近邻的缺点,以及 Vire 算法中需要对标签 RSSI 进行大量计算的问题,提高算法的实时性,本文提出一种最小化 RFID 阅读器的区域划分的方案,即在原有的 RFID 阅读器基础上,将阅读器天线的发射

功率固定,改为探测标签的有无信号<sup>[12]</sup>。文中假设阅读器没有方向性,此时最小化 RFID 阅读器的探测范围是以阅读器为中心,以探测距离为半径的一个圆。

为满足精度、实时性和节约成本,同时覆盖整块区域的基本要求,制定如下定位规则:

- a) 阅读器的分布是均匀的。
- b) 每个阅读器的探测距离是  $r$ , 在以阅读器为中心半径为  $r$  的圆内所有标签能够平等地被阅读器读到(无信号强弱顺序), 圆外的标签是探测不到的。
- c) 阅读器能够涵盖区域内的所有标签, 无盲区。
- d) 阅读器之间的距离应不小于阅读器的探测距离, 如再增加阅读器密度会产生跨阅读器的探测, 是一种重复和浪费。

基于以上原则,为满足区域的无缝连接,求出 RFID 阅读器可能的分布情况。已知  $N$  边形的每个内角度为  $\frac{180(N-2)}{N}$ , 而为了满足每个区域能被单一的  $N$  边形不重叠地无缝布满, 每个内角必须能够被 360 整除。即

$$\frac{180(N-2)}{N} = \frac{360}{m} \quad (4)$$

式中:  $m$  为正整数, 由此得到  $m = \frac{4}{N-2} + 2$ , 为使  $m$  为正整数, 则有  $N=3, 4, 6$ 。

因此,只有三角形、正方形和六边形模型可以无缝布满整个区域,为了简化模型,只考虑正方形模型情况。

图 2 描述的是 RFID 阅读器正方形分布模型。如图 2 所示,  $A, B, C, D$  是 4 个固定发射功率的 RFID 阅读器, 正方形区域均匀分布着 RFID 参考标签, 阅读器之间分布的距离为  $d$ , 其中  $d$  ( $r$  (阅读器最大探测距离))。区域划分的思想是将正方形区域根据每个阅读器的探测范围, 划分

为不同的小区域。图 2 中, 正方形的 4 个顶点上分布着 4 个阅读器 ( $A, B, C, D$ ), 如果标签仅被阅读器 ( $A, B$ ) 探测到, 即可确定标签位于范围 1 中; 如果标签被阅读器 ( $A, B, C$ ) 探测到, 可确定标签位于范围 2 中; 如果标签被阅读器 ( $A, C$ ) 探测到, 可知标签位于区域 3 中; 如果标签同时被阅读器 ( $A, B, C, D$ ) 探测到, 那么标签就位于区域 5 中; 以此类推。这样就可以根据一组探测情况推断出标签所处的区域, 大幅度缩小了定位的范围, 减少了冗余计算, 增加了定位的实时性。

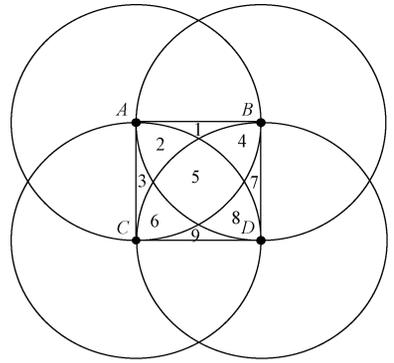


图 2 阅读器区域划分模型

利用参考标签来计算待测物体的位置坐标, 经验上选取与待测标签 RSSI 值最相近 3 个参考标签作为  $K$  值。为进一步缩小定位误差, 这里加入一些优化措施, 当定位区域内参考标签数目  $M$  为 0 时, 求出每个定位区域的质心作为待测物体的位置坐标, 表 1 给出了正方形模型的区域质心。关于质心, 以区域 5 为例, 因为整块区域在正方形中心, 又是上下左右对称的图形, 所以区域的质心就是正方形  $ABCD$  的中心。

表 1 正方形模型区域质心

探测到的点组合	$A, B$	$A, C$	$B, D$	$C, D$	$A, B, C$	$A, B, D$	$A, C, D$	$B, C, D$	$A, B, C, D$
位于区域	1	3	7	9	2	4	6	8	5
区域质心	线段 $AB$ 中点	线段 $AC$ 中点	线段 $BD$ 中点	线段 $CD$ 中点	区域 2 质心	区域 4 质心	区域 6 质心	区域 8 质心	区域 5 质心

当定位区域参考标签数目  $M < K$  时, 利用式(1)得出欧式距离  $E$ , 由式(3)求出权重因子  $w_1, w_2, \dots, w_k$ , 已知参考标签坐标  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_k, y_k)$ , 然后由式(2)计算得出待定位标签的位置坐标  $(x, y)$ 。当定位区域参考标签数目  $M \geq K$  时, 选取与待测标签 RSSI 值最相近 3 个参考标签, 然后利用这 3 个标签的位置坐标计算质心, 求出该质心和与待定位信号强度最接近的那个参考标签之间的中点坐标, 以此作为待定位标签的最终位置。

#### 4 系统结构

本系统主要包括客户端和服务端, 其中客户端包含了 RFID 阅读器和 RFID 电子标签以及便携式终端, 终端主要由 GSM 通信模块、STM32 数据处理模块组成, 支持基于 GPRS 的无线通信网络。RFID 阅读器为德国 Nanotron 公司的 Mercury6e RFID 阅读器, 阅读器和标签工作频段为 920~925 MHz, 灵敏度达 -50 dBm, 支持 ISO18000-6C 协议。GSM 通信模块利用 AT 指令和服务

器通信,将采集到的数据信息通过 TCP/IP 协议发送到服务器。服务器端结合地理信息系统构建位置信息服务平台,主要由各种算法组成,开发环境采用 Webservice 自带的代码编写。当测试人员携带标签在实验区域行走时,终端的电子标签与 RFID 阅读器实现数据交互,标签发射 RFID 数据到阅读器,包括标签 ID、发送时间、信号强度 (RSSI) 等。客户端通过 TCP/IP 协议连接到采集数据的服务器,服务器上运行的 GIS 信息系统及 RFID 定位算法,对来自终端的各种信息进行融合、筛选、处理、显示和存贮,为用户提供位置可视化服务。系统结构图如图 3 所示。

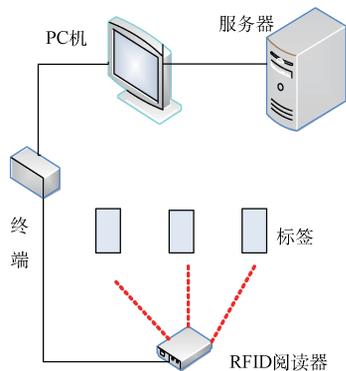


图 3 系统结构

本次实验选择南京大学仙林校区电子学院楼作为测试场景,由于设备数量有限,测试在一楼大厅进行,参考标签及具体设备布置如图 4 所示。



图 4 实验场景布置

由于射频识别系统阅读最大稳定距离  $d$  为 10 m,所以在实验楼大厅选取  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  的正方形区域作为测试区域,正方形的四角各布设一个定位终端和阅读器,阅读器功率为 26 dBm,工作频率为 915 MHz,接收灵敏度为  $-50\text{ dBm}$ ,室内地面每隔 1 m 放置一个参考标签,参考标签布设高度为 0.4 m。建立场景坐标系,且与三维场景模型保持一致,用于确定参考标签位置。RFID 阅读器扫描

标签,生成地面区域映射表。实验人员持标签从大门进入,在实验区域缓慢行走,标签根据预设功率发射信号,当标签进入到阅读器天线探测区域时,阅读器将自动读取标签数据,并把这些数据封装成数据包,通过 GPRS 发送到服务器,服务器把接收到的数据解析,查看定位区域映射表,再通过定位算法,计算出人员的具体位置坐标,通过 GIS 地图显示运动轨迹。系统测试结果如图 5 所示,所标注曲线为实际路线,点为实验测试值。

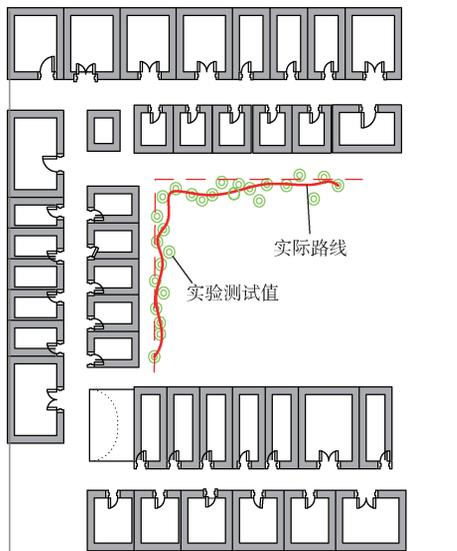


图 5 实验区域测试人员轨迹

## 5 实验结果分析

由于系统工作过程空间坐标公式较为复杂,为了简化表达,选取实验大厅的一角作为原点建立 1 个直角坐标系,西边是  $x$  轴正方向,北边是  $y$  轴正方向,将空间数据转换为平面坐标。随机选取轨迹中的一些点建立平面直角坐标系如图 6 所示。

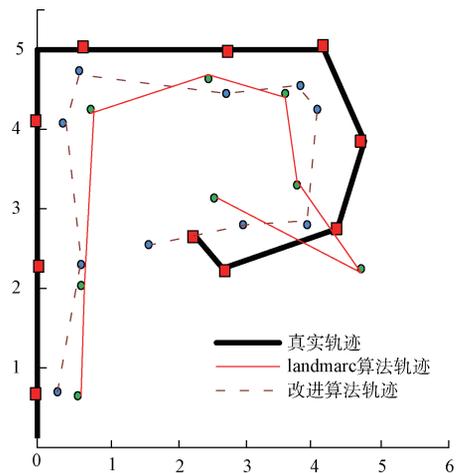


图 6 实际位置与测试位置对比

图中粗线为测试人员实际运动轨迹,细线为使用传统 LandMarc 算法计算得出的运动轨迹,虚线为改进算法计

算得出的运动轨迹,表 2 给出了 8 个测试点的误差值。

表 2 测试点误差值

算法比较	1	2	3	4	5	6	7	8
LandMarc 算法	1.09	0.34	0.69	0.99	0.45	0.73	1.25	0.55
改进算法	0.65	0.37	0.38	0.51	0.16	0.67	0.97	0.66

从表 2 可以看出 LandMarc 算法的定位误差在 0.34~1.25 m 之间,改进算法的定位误差在 0.16~0.97 m 之间,相较传统 LandMarc 算法,改进后算法的平均误差由 0.7 m 降低到了 0.5 m,降低了 29.49%。根据标准误差公式  $RMSE = E = [(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2]^{1/2}$ ,可以得出传统的 LandMarc 算法均方差为 0.57,改进算法后为 0.28。改进算法较传统 LandMarc 算法 MSE 降低了 47.51%,说明该定位系统能够实现良好的可视化效果。

## 6 结 论

本文通过对现有室内定位方法的研究与分析,设计出最小化 RFID 阅读器的区域划分模型,通过划分区域减少邻居标签的候选数目降低计算量,并且消除了远距离不良参考标签对定位精度的影响,测试结果结果表明该算法具有更高的定位精度,且提高了定位实时性。同时,室内定位技术与 GIS 的结合,实现了 RFID 室内定位数据与地理信息系统的融合,使得 RFID 定位结果有更好的实际应用,室内定位数据的可视化也更具体,且使得室内定位结果与室外定位有统一的地理坐标,便于实现室内外定位无缝切换。根据系统的结构和实际需求,未来研究的主要方向是实现各种传感器数据的处理,如 GPS、北斗等,服务器端,研究如何制定各种过滤规则,实现事件监测。同时,提升 RFID 系统安全性能,确保重要数据的可靠传输。

## 参考文献

- [1] 许春生,初明. 基于射频识别技术室内定位系统综述[J]. 科技创新导报,2015,35(29):134-135.
- [2] 赵永翔,周怀北,陈森,等. 卡尔曼滤波在室内定位系统实时跟踪中的应用[J]. 武汉大学学报,2009,55(6):696-700.
- [3] 陈珂,何婷婷. RFID 系统架构技术兼顾计量精度和定制灵活性[J]. 前沿技术,2014,33(4):12-14.
- [4] 陶金龙,康志伟,骆坚. 基于 RSSI 测距的加权概率定位算法[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(10):

1123-1129.

- [5] 石欣,印爱民,陈曦. 基于 K 最近邻分类的无线传感网络定位算法[J]. 仪器仪表学报,2014,35(10):2239-2247.
- [6] VORST P, ZELL A. A comparison of similarity measures for localization with passive RFID fingerprints[J]. ISR and ROBOTIK, 2010,12(6):1-8.
- [7] 陈聪传,程良伦. 区域细化的 RFID 定位算法[J]. 计算机应用与软件,2011,28(1):50-60.
- [8] 樊存佳,汪友生,边航. 一种改进的 KNN 文本分类算法[J]. 国外电子测量技术,2015,34(12):39-43.
- [9] LI J H, SUN ZH Y, WANG F. RFID positioning system construction method based on virtual reference tags[J]. Computer Science, 2011,38(4):107-110.
- [10] LI J H, ZHANG G M, YU L. Efficient RFID location based on virtual signal strength [J]. Computer Science,2012,39(4):67-70.
- [11] KHEDO K, SATHAN D, ELAHEEBOCUS R. Overlapping zone partitioning localization technique for RFID[C]. UbiComp,2010,23(4):20-32.
- [12] IMPIEVICH G, SAVOCHKIN D. RFID indoor positioning system based on read rate measurement information[C]. ICAT,2013,45(9):546-548.

## 作者简介

钟晴,硕士研究生,主要研究方向为卫星通信、室内定位。

叶芝慧,副教授,主要研究方向为卫星通信、深空通信。

E-mail: yezh@nju.edu.cn

郭小青,硕士研究生,主要研究方向为无线通信、MIMO 系统。