

文章编号: 1671-8836(2009)06-0696-05

# 卡尔曼滤波在室内定位系统实时跟踪中的应用

赵永翔<sup>1</sup>, 周怀北<sup>1,†</sup>, 陈 淼<sup>2</sup>, 温 斌<sup>1</sup>

(1. 武汉大学 软件工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

**摘 要:** 为了解决室内定位系统实时跟踪应用中所估算的用户位置方差较大, 用户位置移动不平缓这一难题, 提出了一种基于卡尔曼滤波的室内定位方法. 首先利用最近邻居法估算用户的位置坐标, 然后再利用卡尔曼滤波算法对用户的估算位置坐标进行滤波处理, 以提高室内定位系统的性能和稳定性. 实验结果表明, 卡尔曼滤波算法可以将 2 m 以内 85% 的定位精度进一步提高到 93%, 3 m 以内 95% 的定位精度提高到 98%, 改进效果明显而且稳定.

**关 键 词:** 无线局域网; 室内定位; 位置指纹; 卡尔曼滤波; 实时跟踪

**中图分类号:** TP 301.6 TP 303.17

**文献标识码:** A

## 0 引 言

卫星导航定位技术的产生及发展, 使人们拥有了在全球广阔的室外空间中获取事物空间位置属性的技术方法, 并已在军事、交通、资源环境、农牧渔业、测绘等领域以及人们日常生活中得到了广泛的应用. 室外空间虽然广阔, 但大部分时间里, 人们的活动主要在室内进行, 而在目前的技术条件下, 由于 GPS 的标准误差相对于较小的室内环境来说比较大, 同时由于室内环境信号受到遮蔽, 定位精度将受到更大的影响, 卫星导航定位技术还难以满足室内环境下进行精确定位的要求. 因此, 针对室内的环境, 必须研究专门的定位方法来进行室内定位.

从 20 世纪 90 年代末起, 人们开始了室内定位系统的研究. 具有代表性的有 AT & T Cambridge 主持的 Active Badges 项目<sup>[1]</sup>, 之后进一步改进为 Active Bats<sup>[2]</sup>, Cricket<sup>[3]</sup>, Georgia Tech 公司研发的 Smart Floor 项目<sup>[4]</sup>, 微软公司的 Easy Living 项目<sup>[5]</sup>以及香港科技大学的 LANDMARC 系统<sup>[6]</sup>等. 它们虽然取得了一定的效果, 有的还可以达到毫米级的精度<sup>[7]</sup>, 但这些定位系统均需研发新的硬件设备, 因而维护成本较高, 可扩展性差.

另一方面, 基于 802.11 协议的无线局域网已经广泛分布在校园和办公大楼内, 各类掌上电脑、笔记

本等移动设备也都内置了无线网卡. 基于接收信号强度(RSS)的无线局域网定位技术是根据接收信号强度随距离变化而变化的规律来进行定位, 与基于信号到达时间(TOA)和信号到达角度(AOA)的定位技术相比, 它不需要开发额外的硬件设备来进行精确的时间同步和角度测量, 能充分利用现有的无线网络基础设施, 大大降低了系统的成本, 因而成为室内定位技术的研究热点<sup>[8]</sup>.

在实时跟踪应用时, 系统要达到实时的目的, 一般要在较短时间内计算出用户当前的位置. 因此, 实时跟踪时无线网卡读取的信号强度样本较小, 此时直接用定位算法(如最近邻居法)来计算用户位置时, 其得到的用户位置变化方差较大, 用户位置的移动不平缓, 从而严重影响了室内定位系统的定位性能和稳定性. 本文用卡尔曼滤波算法(Kalman filter)来对定位算法估算出的用户位置坐标进行滤波处理, 以进一步提高室内定位系统的定位精度.

## 1 室内定位算法描述

由于在室内狭小的空间里, 无线电波的传播方式非常复杂, 反射、透射、散射等方式使得大多数的定位方法, 如到达时间(TOA)、到达时间差(TDOA)和到达角度(AOA)等难以实现, 因为这些

收稿日期: 2009-07-16      † 通讯联系人 E-mail: zhouhuaibei@vip.sina.com

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA12Z324, 2009AA12Z324); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2009CB320401)

作者简介: 赵永翔(1978-), 男, 博士生, 现从事无线通信、室内定位和演化计算的研究. E-mail: zhaosanhe@263.net

方法只有在无线电波的视距传播占支配地位的情况下才是可靠的, 而且所需要的硬件开发成本也较高. 因此, 本文采用基于接收信号强度(RSS)的定位方法.

基于接收信号强度的室内定位算法可分为传播模型法和位置指纹法.

① 传播模型法是指依据信号强度和距离的特定关系, 结合三边测量法, 根据来自 3 个(或以上)无线接入点(AP)的信号强度来计算出待测点的位置. 该方法受到很多方面的影响, 如信号穿墙时的损耗、多径传播和非视距传播等, 因而难以建立合适的模型来进行精确的室内定位.

② 位置指纹法(location fingerprints)是完全在实验的基础上进行, 因此可以在一定程度上解决非视距传播和多径传播等问题. 一般情况下, 位置指纹法分为两个阶段: 离线训练阶段和在线定位阶段. 离线训练阶段时, 对各个参考点进行采样, 并将读取到的各个 AP 的信号强度值保存到位置指纹数据库中; 在线定位阶段时, 再将实时测量的信号强度信息与指纹数据库中的信息进行比较, 取信号强度最接近的点的位置作为估计的位置.

基于上述原因, 本文采用位置指纹的方法来进行室内定位. 位置指纹法一般可分为最近邻居法(k nearest neighborhood, kNN)和概率方法(probabilistic method)两种, 本文采用最近邻居法进行室内定位. 该算法的主要思路如下的过程.

最近邻居法(kNN)<sup>[9, 10]</sup>: 采样阶段时, 设  $RSSI_{ij}$  表示第  $i$  个采样点接收到第  $j$  个 AP 的信号强度平均值, 在各个采样点处测量并记录下位置指纹数据, 即

$$(x_i, y_i, RSSI_{i1}, RSSI_{i2}, \dots, RSSI_{iN}),$$
$$i = 1, 2, \dots, n$$

其中  $n$  表示采样点的总数,  $N$  表示接入点 AP 的总数.

实时定位阶段时, 设  $S_j$  表示接收到的来自从第  $j$  个 AP 的信号强度平均值, 由公式

$$d_i = \sqrt[p]{\sum_{j=1}^N |S_j - RSSI_{ij}|^p},$$
$$i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, N$$

计算出  $d_i$  值最小的  $k$  个采样点并取它们位置的平均坐标作为定位结果  $(\hat{x}, \hat{y})$ , 此处  $(\hat{x}, \hat{y}) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (x_i, y_i)$ . 经过实验比较,  $k$  取 3 或 4 时系统的定位精度较高.

上述公式中, 当  $p = 1$  时,  $d_i$  表示曼哈顿距离(Manhattan distance); 当  $p = 2$  时,  $d_i$  表示欧氏距

离(Euclidean distance). 实验结果表明,  $p = 2$  时系统的定位精度比较稳定.

## 2 卡尔曼滤波算法

由于在实时跟踪应用时, 系统要达到实时的目的, 一般要在 5 s 左右计算出用户当前的位置信息. 因此, 实时跟踪时无线网卡读取的信号强度样本较小, 如 5 s 仅读取 10 个信号强度数据(当扫描频率为 2 次/s 时), 此时直接用上述的最近邻居法来计算用户位置时, 其得到的用户位置变化方差较大, 用户位置的移动不平缓, 从而严重影响了室内定位系统的定位性能和稳定性. 因此, 本文的研究重点是针对这一难题尝试用卡尔曼滤波算法来对最近邻居法估算出的用户位置坐标进行滤波处理, 以进一步提高室内定位系统的定位精度.

卡尔曼滤波(Kalman filter)<sup>[11]</sup>是高斯过程最优滤波的一种有效算法, 当对象模型足够准确且系统状态和参数不发生突变时, 性能较好. 卡尔曼滤波的过程方程和观测方程如下所示:

$$x_k = F_k x_{k-1} + w_k, w_k \sim N(0, Q),$$
$$x(0) \sim N(X(0), V(0)),$$
$$z_k = H_k x_k + v_k, v_k \sim N(0, R) \quad (1)$$

本文中, 假设过程噪声(process noise)和观测噪声(measurement noise)是相互独立的, 分别用协方差矩阵  $Q$  和  $R$  来表示, 它们的初始值通过测量室内环境下不同路径的协方差得到, 其中,  $Q_k = 1 \times 10^{-2}$ ,  $R_k = 4$ .

卡尔曼滤波的时间更新方程和测量更新方程分别为:

① 时间更新方程

$$\hat{x}_k = F_k \hat{x}_{k-1}, P_k = F_k P_{k-1} F_k^T + Q \quad (2)$$

② 测量更新方程

$$\begin{cases} K_k = P_k H^T (H P_k H^T + R)^{-1} \\ \hat{x}_k = \hat{x}_k + K_k (z_k - H \hat{x}_k) \\ P_k = (I - K_k H) P_k \end{cases} \quad (3)$$

用户位置移动的二维模型如下所示:

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ V_k^x \\ V_k^y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ y_{k-1} \\ V_{k-1}^x \\ V_{k-1}^y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_k^x \\ w_k^y \\ w_k^x \\ w_k^y \end{bmatrix},$$
$$\begin{bmatrix} z_k^x \\ z_k^y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ V_k^x \\ V_k^y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_k^x \\ v_k^y \end{bmatrix} \quad (4)$$

卡尔曼滤波的模拟实验如图 1 和图 2 所示. 图 1 为  $x$  坐标的卡尔曼滤波结果, 图 2 为  $y$  坐标的卡尔曼滤波结果. 其中, 用户位置的样本总数为 22 个. 从图中可以看出, 未滤波时, 系统估算的  $x$  和  $y$  坐标同真实坐标相比均相差较远; 而经过卡尔曼滤波处理后, 系统估算的  $x$  和  $y$  坐标与真实坐标相比均比较接近.

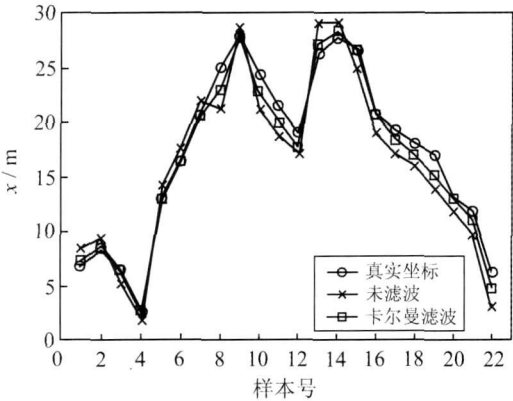


图 1  $x$  坐标的卡尔曼滤波模拟

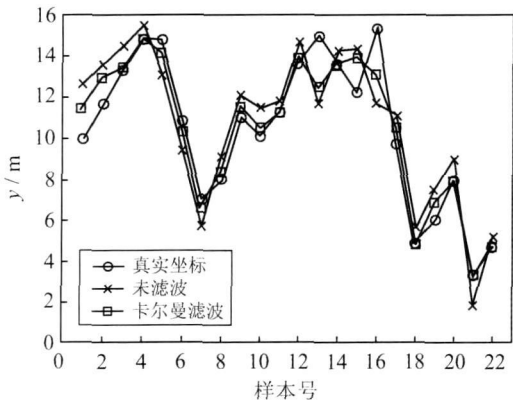


图 2  $y$  坐标的卡尔曼滤波模拟

3 实验结果与分析

3.1 实验环境

本文室内定位的实验场地为樱花大厦的 11 楼, 该环境为典型的办公楼环境. 在本文的实验中, 仅对 405 m<sup>2</sup> 的半层楼进行 AP 部署实验. 该区域的长度为 27 m, 宽度为 15 m, 包括 15 个小房间, 一条走廊, 一个卫生间, 一个楼梯和电梯, 为典型的办公楼环境.

该区域一共部署了 8 个 AP, 其中 AP 的型号为国内最常见的 TP-LINK TL-WA501G 型号. AP 的布局<sup>[12]</sup> 即它们之间应该呈非对称状或者呈之字状布局, 不能放置在一条直线上, 且 AP 之间的距离也

不应太小. 实验场地的采样路径和 AP 的布局如图 3 所示, 实验 AP 的 MAC 地址、名称和频道等配置信息见表 1 所示.

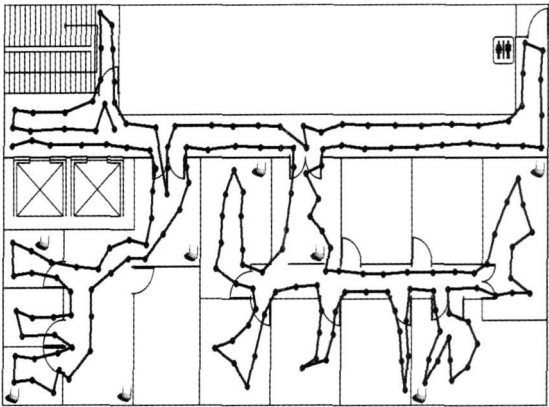


图 3 实验场地的采样路径和 AP 布局

表 1 实验 AP 的 MAC 地址、名称和频道的参数

MAC 地址	名称	频道
00:1D:0F:43:CA:7F	indoor11-A	9
00:1D:0F:43:CA:80	indoor11-B	6
00:1D:0F:43:CA:86	indoor11-C	13
00:1D:0F:43:CA:87	indoor11-D	1
00:1D:0F:43:CB:A1	indoor11-E	3
00:1D:0F:43:CB:A7	indoor11-F	11
00:1D:0F:43:CB:A8	indoor11-G	1
00:1D:0F:43:CC:28	indoor11-H	7

每个采样点的间距为 1.5 m 左右. 采样阶段时, 每个采样点的采样时间为 25 s, 即每个采样点读取信号强度 50 次(本系统的信号强度扫描频率为 2 次/s); 实时跟踪阶段时, 每个采样点的采样时间为 5 s, 即每个采样点读取信号强度 10 次.

另外, 子空间的划分标准为每个小房间为一个子空间, 房间外走廊、房间内走廊、卫生间处、楼梯处和电梯处分别为单独的子空间, 因此, 本实验环境中共有 20 个子空间.

3.2 实验结果

针对上述的实验环境, 本文对卡尔曼滤波的实验结果进行了综合比较, 比较结果如表 2 所示. 其中, 定位算法统一采用最近邻居法(kNN). 卡尔曼滤波算法对室内定位系统精度的影响评价标准主要参照 Ekahau 定位系统<sup>[13]</sup>, 分别为平均误差、90%定位误差、子空间精确度、2 m 以内精确度、3 m 以内精确度和 5 m 以内精确度.

表 2 的实验结果表明, 卡尔曼滤波与未滤波的情况相比, 室内定位系统的综合性能有了显著的提

表 2 卡尔曼滤波的实验结果综合比较

滤波类型	平均误差/m	90%定位误差/ m	精确度/ %			
			子空间	2 m 以内	3 m 以内	5 m 以内
未滤波	1. 3	2. 3	74	85	95	98
卡尔曼滤波	1. 1	1. 9	84	93	98	99

高. 未滤波情况下, 系统的平均误差为 1.3 m, 90%定位误差为 2.3 m, 子空间的定位精度为 74%, 2 m 以内的定位精度为 85%, 3 m 以内的定位精度为 95%, 5 m 以内的定位精度为 98%. 卡尔曼滤波后, 系统的平均误差为 1.1 m, 改进了 0.2 m; 90%定位误差为 1.9 m, 改进了 0.4 m; 子空间的定位精度为 84%, 提高了 10%; 2 m 以内的定位精度为 93%, 提高了 8%; 3 m 以内的定位精度为 98%, 提高了 3%; 5 m 以内的定位精度为 99%, 提高了 1%.

最后, 本文将卡尔曼滤波对定位精度的影响进行了详细分析, 其分析结果如图 4 所示. 图 4 的实验结果表明, 当误差距离分别为 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5 m 时, 卡尔曼滤波的定位精度与未滤波时的定位精度相比均有明显的提高, 因而改进效果明显而且稳定. 总之, 卡尔曼滤波可以将 2 m 以内 85%的定位精度提高到 2 m 以内 93%, 3 m 以内 95%的定位精度提高到 3 m 以内 98%, 5 m 以内 98%的定位精度提高到 5 m 以内 99%.

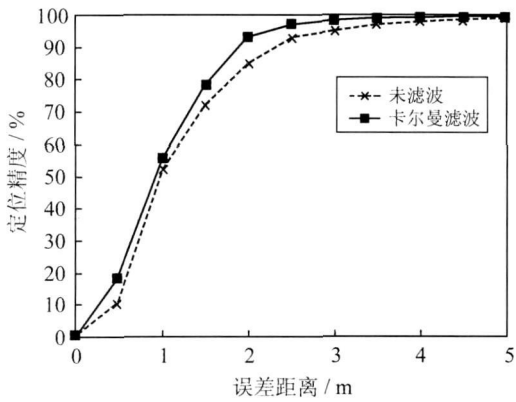


图 4 卡尔曼滤波在定位精度和误差距离的关系

4 结 论

由于在实时跟踪应用时, 系统要达到实时的目的, 一般要在较短时间内计算出用户当前的位置信息. 因此, 实时跟踪时无线网卡读取的信号强度样本数据较小, 此时直接用定位算法计算用户位置时, 其得到的用户位置变化方差较大, 用户位置的移动不平缓, 从而严重影响了室内定位系统的定位性能和稳定性. 因此, 本文的研究重点是针对这一难题尝试

用卡尔曼滤波算法来对系统估算出的用户位置坐标进行滤波处理, 以期待进一步提高室内定位系统的定位精度.

实验结果表明, 卡尔曼滤波可以将 2 m 以内 85%的定位精度进一步提高到 2 m 以内 93%, 定位精度改进了 8%; 3 m 以内 95%的定位精度进一步提高到 3 m 以内 98%, 定位精度改进了 3%; 5 m 以内 98%的定位精度进一步提高到 5 m 以内 99%, 定位精度改进了 1%, 因而改进效果明显而且稳定. 因此, 本文提出的用卡尔曼滤波算法来对系统估算出的用户位置坐标进行滤波处理以提高室内定位系统的定位精度这一方法是行之有效的.

未来的工作主要有: ① 尝试用扩展卡尔曼滤波 (extended kalman filters)<sup>[14]</sup> 或者粒子滤波 (particle filters)<sup>[15]</sup> 对系统估算出的用户位置坐标进行滤波处理, 以分析其性能是否比卡尔曼滤波有明显改进; ② 本文的主要思路是针对系统估算出的用户位置坐标进行滤波处理, 可以考虑对系统采样获得的原始信号强度 (RSS) 进行滤波降噪处理, 或者将信号强度滤波和用户位置滤波两种方法相结合, 以进一步提高室内定位系统的定位精度和可靠性.

参考文献:

[1] Want R, Hopper A, Falcao V, et al. The Active Badge Location System [J]. *ACM Transactions on Office Information Systems (TOIS)*, 1992, 10(1): 91-102.

[2] Ward A, Jones A, Harper A. A New Location Technique for the Active Office[J]. *IEEE Personal Communications*, 1997, 4(5): 42-47.

[3] Priyantha N B, Chakraborty A, Balakrishnan H. The Cricket Location-Support System[C] // *Proceedings of MOBIKOM*. Boston: ACM Press, 2000: 32-43.

[4] Orr R J, Abowd G D. The Smart Floor: A Mechanism for Natural User Identification and Tracking[C] // *Proceedings of the 2000 Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI2000)*. Hague: ACM Press, 2000: 1-6.

[5] Microsoft Research. Easy Living[EB/OL]. [2001-05-01]. <http://www.research.microsoft.com/easyliving/>.

[6] 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.
- [ 7 ] Hightower J, Borriello G. A Survey and Taxonomy of Location Sensing Systems for Ubiquitous Computing [ J ] . *IEEE Computer*, 2001, 34(8): 57-66.
- [ 8 ] 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.  
Zhang Minghua, Zhang Shensheng, Cao Jian. Received-Signal-Strength-Based Indoor Location in Wireless LANs[ J ] . *Computer Science*, 2007, 34(6): 68-71(Ch).
- [ 9 ] Bahl P, Padmanabhan V N. RADAR: An In-Building RF-Based User Location and Tracking System[ C ] // *Proceedings of IEEE INFOCOM 2000*. Tel Aviv: IEEE Computer Society, 2000: 775-784.
- [ 10 ] Zhao Y X, Zhou H B, Li M F, et al. Implementation of Indoor Positioning System Based on Location Fingerprinting in Wireless Networks[ C ] // *Proceedings of the 2008 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM2008)*. Dalian: IEEE Computer Society, 2008: 1-4.
- [ 11 ] Kalman R E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems[ J ] . *Transactions of the ASME Journal of Basic Engineering*, 1960, 82(4): 34-45.
- [ 12 ] Zhao Yongxiang, Zhou Huaibei, Li Meifang. Indoor Access Points Location Optimization Using Differential Evolution[ C ] // *Proceedings of the 2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering (CSSE 2008)*. Wuhan: IEEE Computer Society, 2008: 382-385.
- [ 13 ] Ekahau Inc. Ekahau Positioning Engine 4. [ EB/OL ] . [ 2009-05-01 ] . <http://www.ekahau.com/>.
- [ 14 ] Muraca P, Pugliese P, Rocca G. Extended Kalman Filtering Using Wireless Sensor Networks[ C ] // *Proceedings of the 13th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2008)*. Hamburg: IEEE Computer Society, 2008: 1084-1087.
- [ 15 ] Arulampalam S, Maskell S, Gordon N, et al. A Tutorial on Particle Filters for On-Line Non-Linear/Non-Gaussian Bayesian Tracking[ J ] . *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, 50(2): 174-188.

# Application of Kalman Filter in Indoor Positioning System for Real-Time Tracking

ZHAO Yongxiang<sup>1</sup>, ZHOU Huaibei<sup>1,2</sup>, CHEN Miao<sup>2</sup>, WEN Bin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Software Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China;  
2. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China)

**Abstract:** In this paper, an indoor positioning technology based on Kalman filter algorithm is proposed to solve the problem that the standard deviation of forecasted user location is larger, and the move of user location is not smooth at real-time tracking stage. Firstly, nearest neighbor method is utilized to forecast the location of user, then the Kalman filter is used to filter the forecasted user location in order to further improve the performance and stability of indoor positioning system. Experimental results illustrate that the proposed kalman filter can increase the 85% accuracy of estimation with a precision of 2 meters to 93%, and increase 95% accuracy of estimation with a precision of 3 meters to 98%. Therefore, the proposed Kalman filter algorithm in this paper can improve the positioning accuracy remarkably and stably.

**Key words:** wireless LANs; indoor positioning; location fingerprinting; Kalman filter; real-time tracking