

基于卡尔曼滤波算法的室内无线定位系统^①

曹春萍, 罗玲莉

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 针对基于接收信号强度 (RSS) 的室内无线定位方法存在信号误差的问题, 引入了一种基于模糊自适应控制的卡尔曼滤波算法。该滤波方法不仅有效地抑制了定位数据信息的误差发散, 而且能充分利用线性插值法对随机误差进行补偿。实验表明它对静止和移动目标都能有效的提高定位精度, 能较全面地满足复杂室内空间定位的需求。

关键词: 无线局域网; 室内定位; 卡尔曼滤波; 实时跟踪; 线性插值

Wireless Indoor Positioning System Based on Kalman Filtering Algorithm

CAO Chun-Ping, LUO Ling-Li

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: This paper is mainly concerned with finding ways to resolve the signal inaccuracy problem in indoor wireless positioning system which based on receiving signal strength (RSS). It introduced a kind of kalman filtering algorithm which based on fuzzy adaptive control. This filter method cannot only effectively suppress the error of positioning data information, but is also able to make full use of linear interpolation method to compensation stochastic error. Experiments show that it can effectively improve the positioning accuracy against stationary and moving target, and can more full satisfy the complex interior space positioning demand.

Key words: wireless LAN; indoor positioning; kalman filtering; real-time tracking; linear interpolation

当前对复杂室内环境中人力资源、物资资源、材料机械等的定位需求越来越明显。准确的位置信息定位不仅可以大大提高劳动效率, 还可以为复杂环境中的施工管理等提供有价值的决策支持信息。因此, 为隧道、建筑工地等一些复杂室内环境选择合适的定位系统是很有必要的。

尽管全球定位系统 GPS 在室外定位中获得了广泛应用, 但由于其信号无法穿透多种建筑材料而使其难以适用于室内环境。目前基于 802.11 协议的无线局域网已作为一种全新的信息获取平台广泛分布在很多室内场所, 这使得基于 RSS 的室内无线定位系统能充分利用现有的无线网络设施, 实现大范围的定位、监测和追踪任务。与传统的定位技术相比, 它不需要开发额外的硬件设备来实现精确的时间同步和角度测量,

不会对网络数据传输和成本产生明显影响, 同时由于其传输的是射频信号, 还可保证系统的稳定性。因此, 对基于 RSS 的室内无线定位系统进行研究具有重要的现实意义。

采用基于 RSS 的室内无线定位系统进行跟踪定位时, 要达到实时的目的, 一般要求在较短解的时间内计算出目标的当前位置。因此, 实时跟踪时无线网卡读取的信号强度样本较小, 若直接用定位算法(如最近邻居法)来计算目标位置, 其得到的位置变化方差较大, 目标位置的移动曲线不平缓, 从而严重影响室内定位系统的稳定性和准确性^[1]。本文通过引入卡尔曼滤波 (Kalman filtering) 算法来对定位算法估算出的位置坐标进行滤波处理, 不仅有效地抑制了定位信息的误差发散, 还能充分利用线性插值法对随机信号误差进行

① 基金项目: 国家自然科学基金(60873230)

收稿时间: 2011-03-20; 收到修改稿时间: 2011-05-03

补偿。实验结果表明引入该算法后进一步提高了定位系统的定位精度和稳定性。

1 室内无线定位系统概述

室内无线定位系统的核心是终端位置的测量和计算其与已知位置关联的算法。其中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^[2]：传播模型法是利用三个（或以上）无线接入点(AP)的信号强度与距离的特定关系来计算待测点的位置，该方法易受信号穿墙损耗、多径传播和非视距传播等方面的影响，因而难以建立合适的模型来进行精确定位。位置指纹法(location fingerprints)是完全在实验的基础上进行的跟踪定位，它利用表征目标特征的信息数据来建立统计模型，在一定程度上可解决非视距和多径传播等问题。位置指纹法分为两个阶段：模型建立阶段和定位阶段。在模型建立阶段，对各个参考点进行采样，并将读取到的各 AP 的信号强度值保存在指定的位置指纹数据库中；在定位阶段，通过比较实时测量的信号强度信息与数据库中的信息，取信号强度值最接近的点作为估测的位置。

基于上述分析可知，采用位置指纹的方法来对复杂多变的室内环境进行室内定位是较合适的选择。关于位置指纹定位的实现方法有多种，其中基于最近邻居法的位置指纹定位算法的主要过程如下^[3]：

(1) 采样阶段

设 $RSSI_{ij}$ 表示第 i 个采样点接收到第 j 个 AP 的信号强度的平均值，在各个采样点处测量并记录下位置指纹数据，即 $(x_i, y_i, RSSI_{i1}, RSSI_{i2}, \dots, RSSI_{im})$ ($i=1, 2, \dots, n$)，其中 n 表示采样点的总数， m 表示接入点 AP 的总数。

(2) 实时定位阶段

设 M_j 表示接收到的来自第 j 个 AP 的信号强度平均值，具体的定位计算公式如下：

$$d_i = \sqrt[k]{\sum_{j=1}^N |M_j - RSSI_{ij}|} \quad (1)$$

其中 $i = (1, 2, \dots, n)$ ， $j = (1, 2, \dots, N)$ 。仅当 $k=2$ 时， d_i 表示欧氏距离(Euclidean distance)，此时系统的定位精度较稳定。由上式计算出 d_i 值最小的 s 个采样点，并取这些点的平均坐标值作为估测位置坐标，此坐标的表达式为：

$$(x, y) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s (x_i, y_i) \quad (2)$$

按上述方法来实现室内无线定位的实时跟踪时，由于无线网卡读取的信号强度样本较小，因此直接用上述 RSS 技术来估测的目标位置误差较大，目标移动曲线不平缓，使系统的准确性和稳定性受到严重影响。针对这一问题，在深入理解基于 RSS 的室内无线定位原理的基础上本文引入一种自适应卡尔曼滤波算法来对最近邻居法估算出的目标位置信息进行滤波处理，再通过线性插值法进行误差补偿，最后通过实验案例证实了该方法确定可行并提高了定位精度。

2 卡尔曼滤波算法

卡尔曼滤波算法是利用目标的动态信息，在设法去掉噪声的影响后得到的一个关于目标位置的较准确的估计。这个估计可以是对当前位置的估计(滤波)，也可以是对将来位置的估计(预测)，还可以是对过去位置的估计(插值或平滑)^[4]。虽然接收信号频率可经调整后符合环境的变化，但环境干扰同时易导致信号发散或丢失从而对信号分布产生影响，因此，利用卡尔曼滤波算法进行滤波处理后可提高接收信号的准确性。该算法实现方程表达如下。

预测：

$$\hat{X}_{k+1/k} = \Phi_{k+1/k} \hat{X}_{k/k} \quad (3)$$

$$Q_{X(k+1/k)} = \Phi_{k+1/k} Q_{X(k/k)} \Phi_{k+1/k}^T + \Gamma_{k+1/k}^T Q_{X(k/k)} \Gamma_{k+1/k} \quad (4)$$

更新：

$$\hat{X}_{k+1/k+1} = \hat{X}_{k+1/k} + K_{k+1}(L_{k+1} - B_{k+1} \hat{X}_{k+1/k}) \quad (5)$$

$$Q_{X(k+1/k)} = (1 - K_{k+1} B_{k+1}) Q_{X(k+1/k)} \quad (6)$$

$$K_{k+1/k} = Q_{X(k+1/k)} B_{k+1}^T + (B_{k+1} Q_{X(k+1/k)} B_{k+1}^T + Q_{L(k+1)}) \quad (7)$$

其中， X_k 表示 k 时刻的状态估计值， L_{k+1} 表示 $k+1$ 时刻的预测估计， B_{k+1} 表示预测矩阵， $Q_{X(k+1/k)}$ 表示 k 时刻对 $k+1$ 时刻的预测误差估计的方差阵， K_{k+1} 表示增益矩阵， $Q_{X(k+1/k+1)}$ 表示方差矩阵。

上述公式反映了卡尔曼滤波器操作的两个阶段：预测与更新^[5]。在预测阶段，滤波器使用上一状态的估计做出对当前状态的估计。在更新阶段，滤波器通过当前状态的观测值优化预测阶段获取的预测值，以获得一个更精确的新估计值。从图 1 可看出未滤波处

理时, 系统估算的 x 和 y 坐标易出现大幅度信号突变或误差发散; 经过卡尔曼滤波处理后, 系统估算的 x

和 y 坐标与真实坐标值相比均比较接近, 说明该方法有效的抑制了信号的丢失或发散。

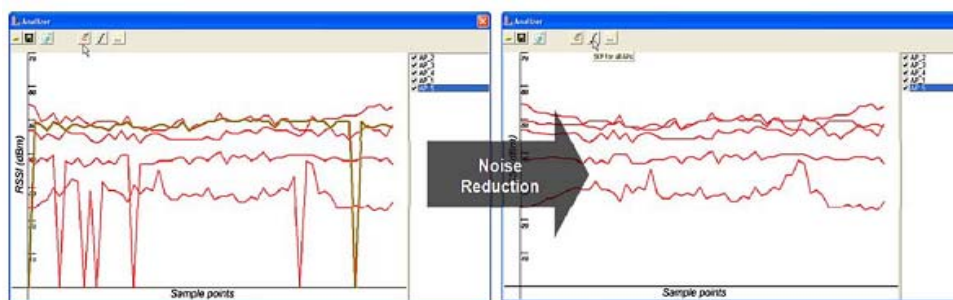


图 1 卡尔曼滤波处理前后样本曲线

2.1 线性插值法

线性插值是数学、计算机图形学等领域广泛使用的一种简单插值方法。假设我们已知坐标 (x_1, y_0) 与 (x_1, y_1) , 要得到某一直线上 $[x_0, x_1]$ 区间内的坐标, 可由两已知点计算得出。线性插值法的一般表达式如下^[6]:

$$\frac{y - y_0}{x - x_0} = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \quad (8)$$

解这个方程, y 的值域为:

$$y = y_0 + (x - x_0) \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \quad (9)$$

这种在一组点 (x_0, y_0) 、 (x_1, y_1) 、...、 (x_n, y_n) 中插值的方式可被定义为点对之间的线性连续插入, 可产生一条实线。在本文研究中, 将接收的定位信号经卡尔曼滤波处理后再用线性插值方法预测未知的多点对之间的未知点的信号强度^[7]。这样处理后可得到更准确的估测位置, 如图 2 所示移动曲线会更平缓, 说明进一步提高了室内无线定位系统的稳定性和准确性。

3 实验结果与分析

3.1 实验环境

基于上述理论研究, 为证实改进后室内无线定位系统在复杂室内环境中具有更好的稳定性和准确度, 我们选择某一建筑工地做为实验场地。实测中配备

Intel(R) PRO/ Wireless 3945 ABG Network Connection 网卡的 IBM X200 笔记本电脑收集定位信息; 软件部分采用 WirelessMon3.1 监控 AP 信号, 并记录 MAC、RSS、时间等信息。所选实测地点环境恶劣且距机房远, 从中选择三个较典型的位置做为实测样本区域:

- ①通往地下的楼梯处: 验证定位系统在垂直的方向的可行性及定位精度;
- ②复杂机器区域: 监测水平方向几处典型的设备区域的运作情况及准确性;
- ③大范围内移动点: 通过实时跟踪移动中的工人测试对移动点位置的定位精度。

3.2 实验结果

针对上述的实验环境, 本文应用卡尔曼滤波算法的理论分析结果, 并进一步结合线性插值法进行实验验证。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样本区域的测试数据分析得出。

第一个样本试验点针对垂直方向。在楼梯处放置两个 RFID 标签 (短距离射频识别产品), 图 3 描述了实时跟踪两个静态标签的位置波动情况。系统趋于稳定后, 两标签的平均位置误差分别为 5.38 米和 4.64 米。

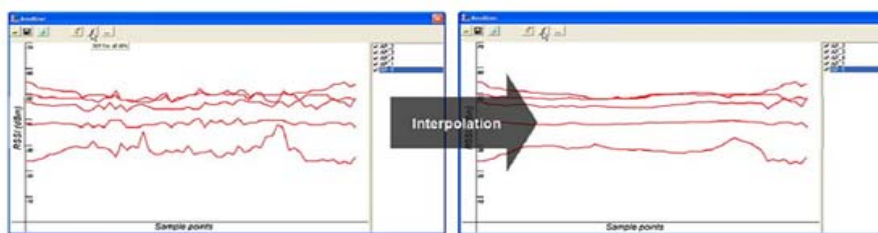


图 2 线性插值处理前后位置曲线

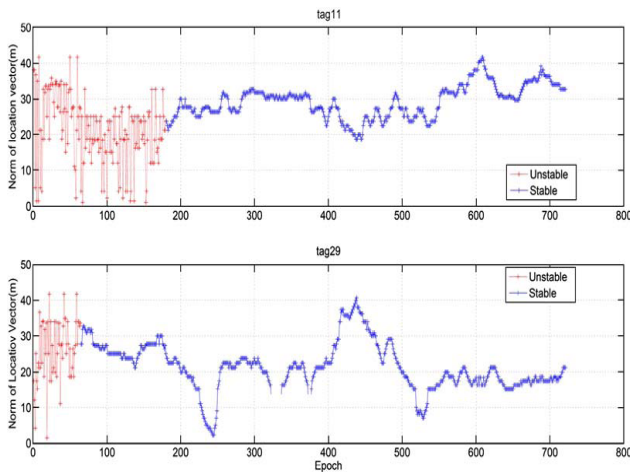


图3 两个标签的位置曲线

第二个样本区域考查水平方向。测试四个静态标签由隧道入口处无线接入点(AP)获取的定位误差。在隧道入口误差为0.62米,距入口1/3处误差为1.58米,距入口2/3处误差为4.33米;隧道尾端误差为1.34米。实验表明复杂环境下误差仍可保证在5米以内。

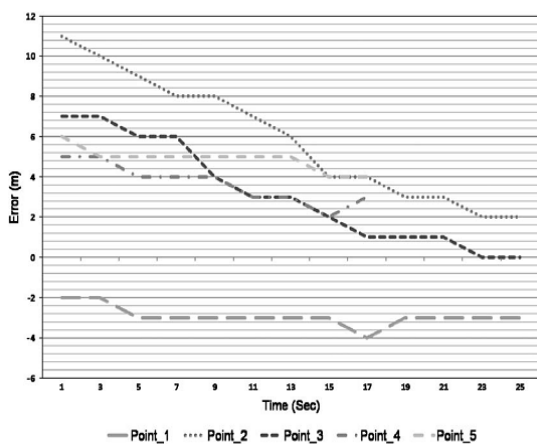


图4 移动中五点的误差比较

第三个样本点是对附有标签的五个移动中工人进行实时跟踪,分析估测位置与真实位置之间的误差。如图4所示平均误差范围是2.91~5.15米,实验表明该系统对动态对象同样具有较好的定位精度。

通过对这一系列实验的观察总结,证实基于RSS的室内无线定位系统在实际的复杂工地应用中定位精度可控制在5米以内。

3 总结与展望

本文在理论研究的基础上,选择经改进后卡尔曼滤波算法应用到定位系统中,使基于RSS的定位系统在如隧道施工地等严酷的室内环境下仍具有健壮的定位精度和稳定性^[8]。在实际的施工场地进行了实测分析,实验表明复杂室内环境下对静止和移动目标的定位精度都可控制在5米的范围。显然选用本文改进后的定位系统来替代传统的定位系统将是非常吸引人的,同时它还可延伸到对其他资源的定位管理中。

在进一步的研究中,考虑到室内无线定位系统采用卡尔曼滤波算法具有一定的局限性,使用中可与其它技术相相结合。此外,对该系统在实际应用中的改进还有两方面可以考虑^[9]:(1)同时定位数百个对象时通过增加通信带宽来增强系统的实效性。(2)定制额外的应用扩展,使该系统除了可实现人员和物资的管理跟踪外,还可用于其它多种资源的定位管理。

参考文献

- 1 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.计算机科学,2007,34(6):68-71.
- 2 梁元斌.基于无线局域网的室内定位技术的研究与实现.成都:电子科技大学,2005.45-58.
- 3 赵永翔,周怀北,陈淼,温斌.卡尔曼滤波在室内定位系统实时跟踪中的应用.武汉大学学报,2009,55(6):696-700.
- 4 Davies N, Cheverst K, Mitchell K, et al. Using and determining location in a context-sensitive tour guide. IEEE computer,2001,34(8):35-41.
- 5 Pratt T, Bostian C, Alluntt J. Satellite Communications. 2nd. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.
- 6 Rappaport TS. Wireless Communications Principles and Practice. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry. 2006.
- 7 孙瑜,范平志.射频识别技术及其在室内定位中的应用.计算机应用,2005,25(5):205-208.
- 8 张毅斌,郑中,应振宇.无线局域网室内精确定位装置机定位算法.中国专利,2005:15-30.
- 9 毛永毅.无线通信系统定位技术的研究.北京:中国科学院研究生院,2008.