



基于线性内插法改进的室内定位算法

张梦丹, 卢光跃, 王宏刚, 刘继明

(西安邮电大学, 陕西 西安 710121)

摘要: 针对室内位置指纹定位技术存在的离线阶段工作量大、定位精度有限、顽健性较差的缺点, 提出了一种基于线性内插法改进的指纹定位匹配算法。与传统位置指纹定位技术相比, 该算法不仅降低了整体工作量, 而且降低了多径效应造成的不利影响。最后搭建实验场景对该算法定位性能进行测试。实验数据显示, 该算法与 WKNN 法相比, 平均定位精度大约提高了 34.25%, 绝大部分待测点的定位误差在 0.4 m 以内, 验证了所提算法在定位精度、顽健性和适应环境变化方面的优势。

关键词: 室内定位; 位置指纹; WKNN; PCA; 线性内插法

中图分类号: TN961

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017020

An improved indoor location algorithm based on linear interpolation

ZHANG Mengdan, LU Guangyue, WANG Honggang, LIU Jiming

Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China

Abstract: Aiming at the shortcomings of heavy workload in the off-line phase, limited positioning accuracy and poor robustness of indoor location fingerprint positioning technology, an improved fingerprint matching algorithm based on linear interpolation was proposed. Compared with the traditional location fingerprint positioning technology, it reduced the overall workload as well as the bad effects caused by multi-path effect. At last, a lab scene was set up to test the positioning performance of this algorithm. It is shown by the test that the average positioning accuracy of this algorithm has been improved by 34.25% compared with that of WKNN method, and the positioning accuracy error ratio of most points to be test is within 0.4 m, the positioning accuracy, robustness and adaptability in environment change were demonstrated.

Key words: indoor location, location fingerprint, weighted K -nearest neighbor, principal component analysis, linear interpolation

1 引言

随着无线技术、移动计算机和互联网应用的不断增

长, 人们对位置敏感系统及其服务的需求越来越高。在室外, GPS 系统被广泛用于提供定位信息与服务, 其室外定位精度能够达到美国 E911 标准。但在室内复杂环境中, 由

收稿日期: 2016-07-29; 修回日期: 2017-01-10

基金项目: 陕西省工业科技攻关项目 (No.2014K05-09); 陕西省教育厅科学研究计划项目 (No.14JK1660)

Foundation Items: Shaanxi Industrial Science and Technology Project (No.2014K05-09), Shaanxi Science Research Program of Education Department (No.14JK1660)



于室内物品的干扰、非视距等因素,一般不采用 GPS 系统进行定位。现在常用的室内定位技术有 Wi-Fi 技术、蓝牙技术^[1]、红外线室内定位技术、超声波定位技术等。这些技术有的成本较高、有的室内定位精度低,均不利于室内定位的广泛推广。而融入了蓝牙 4.0 的新技术,不仅增强了信号的稳定性及覆盖范围,而且降低了功耗,因此迅速成为室内定位领域的优选技术。

根据定位过程中是否需要实际测量节点间距离,室内定位方式可分为两类:即基于距离^[2]和距离无关。目前,基于测距的定位技术主要有到达角度(angle of arrival, AOA)法、到达时间(time of arrival, TOA)法、到达时间差(time difference of arrival, TDOA)法等,而基于非测距定位主要是基于信号强度测量法定位^[4]。基于信号强度测量法定位可分为位置指纹定位法和信号传输损耗法^[5],而现有利用位置指纹进行匹配的算法主要包括 WKNN (weighted K-nearest neighbor, 加权 K 邻近)算法、神经网络算法、概率算法和支持向量机(SVM)算法等。WKNN 算法遍历指纹点的接收信号强度指示(received signal strength indication, RSSI),找出最接近测试点 RSSI 的一个或多个指纹点,然后将这些指纹点位置的加权值作为测试点的估计位置。WKNN 算法容易实现,但定位精度不高,且在实际的室内环境中,无线信号在传播过程中会受到多径效应的影响,因而在同一个位置上的接入点(access point, AP)的 RSSI 往往表现出复杂的时变特性,进而进一步降低了室内定位的精度。为此,本文应用主成分分析(principal component analysis, PCA)变换提取原始 RSSI 信号中的主要定位特征,以减少多径效应对定位的影响。另外,针对定位离线阶段工作量大的问题,本文应用线性插值法来重构离线指纹库,并对测试点进行定位。实验证明,所提算法具有较高的定位精度和较好的实时性,满足了室内定位的基本需求。

2 基于 RSSI 的位置指纹定位算法

2.1 指纹算法描述

位置指纹定位算法包括两个阶段:离线阶段和在线阶段。离线阶段的工作是在待定位区域内按照一定的间隔距离确定若干参考点,形成一个采样网格图,并将每个节点测得的信号强度值及其位置信息按照<指纹,地点>的格式存储在数据库中;在线阶段,通过移动终端对各个 AP 发出的信号强度进行实时采集,通过特定的匹配算法实现对移动设备位置的估计^[7,8]。

2.2 WKNN 算法

WKNN 法属于典型的确定性定位算法^[9]。其定位思路为:首先构建离线指纹库, $F_i = (f_{i1}, f_{i2}, f_{i3}, \dots, f_{in})$, f_{in} 表示在第 i 个参考点处接收到第 n 个 AP 的指纹信息,其次,移动终端用户获取在待测点位置处各个 AP 的信号强度值,记为向量 $R_i = (r_1, r_2, r_3, \dots, r_n)$, r_n 为移动设备接收到的第 n 个 AP 的信号强度,最后计算此向量与指纹库中向量的欧氏距离,为:

$$D_{is}(R_i, F_i) = R_i - f_i^2 = \sum_{j=1}^n (R_i - f_{ij})^2 \quad (1)$$

选择距离最小的前 K 个采样点,并按照每个参考点对待测点的贡献程度计算每个参考点的权值 w_j ^[10],如式(3)所示,定位点的估计位置 $\bar{L}$ 是这 K 个点的加权质心。其中, K 值可根据定位环境选取^[11]。

$$\bar{L} = 1/K \sum_{j=1}^K w_j L_j \quad (2)$$

$$w_k = \frac{1}{D_j} \sum_{j=1}^k \frac{1}{D_j} \quad (3)$$

其中, D_j 表示第 j 个参考点与待测点的欧氏距离。由式(3)知,欧氏距离 D_j 越大, w_j 越小;相反欧氏距离 D_j 越小, w_j 越大。

3 改进的定位估计匹配算法

WKNN 算法虽然能基本满足人们对位置的需求,但是仍存在问题:增加参考标签数目可以提高室内定位精度,但会增加额外的成本;在密集环境下,多径效应会给定位结果带来一定的影响。因此提出了一种基于子区域插值改进的指纹定位匹配算法。

3.1 主成分分析法

主成分分析法的基本原理是:根据 $K-L$ 变换在测试空间中找到一组能最大限度表示出原始数据信息的正交向量,把原始数据从原来的空间投影到这组正交向量组成的空间上,其投影系数便构成新的特征矢量,从而完成对维数的压缩。

设 $T = \{(S_1, L_1), (S_2, L_2), \dots, (S_p, L_p)\}$, $S_p \in R_m$ 为参考点处的信号集。 S_p 为在位置 p 处接收到的 AP 的信号强度, L_p 为位置 p 的二维位置坐标。假设 $X = [S_1, S_2, \dots, S_p]^T$, 则 PCA 变换为: $Z = A^T(X - E[X])$, $A = [u_1, u_2, \dots, u_k]$, A 中的 u_k 是由 X 的协

方差矩阵 $C_X = E\{(X - \bar{X})(X - \bar{X})^T\}$ 的特征值 λ_k 对应的特征向量按从大到小的顺序排列组成。经过 PCA 变换, Z 中各个矢量间的相似性基本消除, 其中, Z 中前 m 个主成分占据了 X 的绝大部分信息, $Z' = [S_1', S_2', \dots, S_p']^T$, 因 $m < d$, 因此完成了对指纹数据维数的压缩。

3.2 线性内插法

线性内插法的基本思想是: 在待定位区域内按照一定的间隔距离确定若干采样点, 形成一个采样网格图, 在网格图内进一步划分, 将每个由 4 个参考标签覆盖的网格分为 $N \times N$ 个大小相同的虚拟网格单元, 由于参考标签坐标已知, 虚拟参考标签易得到, 同时采用线性插值方法来获得虚拟参考标签的信号强度值。下面将详细地对该算法进行介绍。线性内插法原理如图 1 所示。

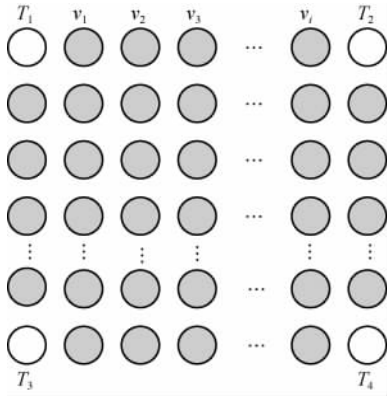


图 1 线性内插法原理

如图 1 所示, 其中, 白色圆圈代表采样点, 4 个组成采样网格图, 然后把网格划分成 $N \times N$ 个小网格, 灰色圆圈代表划分好的虚拟参考点。根据实际参考点位置坐标可求得虚拟参考点的坐标。最后采用线性插值可以得到虚拟参考点处的接收信号强度值。

水平方向上的虚拟参考点接收信号强度值可以由式(4)求出:

$$\begin{aligned} S_k(T_{p,b}) &= S_k(T_{a,b}) + p \times \frac{S_k(T_{a+n,b}) - S_k(T_{a,b})}{n} \\ &= \frac{p \times S_k(T_{a+n,b}) + (n+1-p) \times S_k(T_{a,b})}{n} \end{aligned} \quad (4)$$

垂直方向上的虚拟参考点接收信号强度值可以由式(5)求出:

$$\begin{aligned} S_k(T_{a,q}) &= S_k(T_{a,b}) + q \times \frac{S_k(T_{a,b+n}) - S_k(T_{a,b})}{n} \\ &= \frac{q \times S_k(T_{a,b+n}) + (n+1-q) \times S_k(T_{a,b})}{n} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $S_k(T_{ij})$ 表示在第 k 个参考点坐标位置为 (i, j) 处收到的接收信号强度值, $a = \lceil i/n \rceil, b = \lceil j/n \rceil, \lceil \cdot \rceil$ 表示向下取整, $0 \leq p = i \% n \leq n-1, 0 \leq q = j \% n \leq n-1, n = N-1$ 。

3.3 N 值的选择

实际上, 参考点处的 RSSI 值与距离的关系非线性, 室内环境信道的大尺度衰落服从对数正态分布的特性, 选用对数距离路径损耗模型获取虚拟参考点的 RSSI 值。“距离—损耗”计算式为:

$$P = P_0 + 10n \lg \left(\frac{d_{ij}}{d_0} \right) + \zeta_{ij} \quad (6)$$

其中, d_0 是参考距离; d_{ij} 是第 i 个参考点到第 j 个 AP 的实际距离; P_0 是终端和 AP 的距离为 d_0 时接收到的 RSSI; P 是距离为 d_{ij} 时接收到的 RSSI; n 是路径损耗指数; ζ 为遮蔽因子, 是均值为 0、标准差为 σ 的正态随机变量。

由此, 可以得出: 必然存在一个使定位误差达到最小的 N 值, 下面将进一步进行理论论证。

以图 1 参考点为例进行线性插值, 假设该网格的 4 个参考点为 T_1, T_2, T_3 和 T_4 , 假设 R_{ik} 为第 i 个参考点 (包括实际参考点和虚拟参考点) 处接收到的第 k ($k=1, 2, 3, 4, 5, 6$) 个 AP 的 RSSI 值, E_{pk} 为相邻参考点 RSSI 的差值, $p=0, 1, 2, \dots, N-1$, 则:

$$E_{pk} = \frac{R_{2k} - R_{1k}}{N-1} \times p + R_{1k} - R_{0k} - 10n \lg \frac{d}{d_0} \quad (7)$$

其中, $d = \sqrt{\left(x_1 + \frac{x_2 - x_1}{N-1} \times p - a_k \right)^2 + (y_1 - b_k)^2}$, R_{1k} 为在参考点 T_1 处接收到的节点 AP_k 的 RSSI, R_{2k} 为在参考点 T_2 处接收到的节点 AP_k 的 RSSI, R_{0k} 为在位置 d_0 处接收到的节点 AP_1 的 RSSI, 参考点 T_1 的坐标为 (x_1, y_1) , T_2 的坐标为 (x_2, y_1) , AP_k 的坐标为 (a_k, b_k) 。

对 E_{pk} 求 $N-1$ 的导数, 并令导数为零, 可得:

$$w = [2p(x_1 - a_k)(R_{2k} - R_{1k})(x_2 - x_1) - 10np(x_2 - x_1)^2 + 4p^2(R_{2k} - R_{1k})(x_2 - x_1)^2 \times \{10n(x_1 - a_k)(x_2 - x_1) - (R_{2k} - R_{1k})[(x_1 - a_k)^2 + (y_1 - b_k)^2]\}] \quad (8)$$

$$N = \frac{2p(x_1 - a_k)(R_{2k} - R_{1k})(x_2 - x_1) - 10np(x_2 - x_1)^2 + \sqrt{w}}{2 \times \{10n \times (x_1 - a_k)(x_2 - x_1) - (R_{2k} - R_{1k})[(x_1 - a_k)^2 + (y_1 - b_k)^2]\}} + 1 \quad (9)$$

假设 $k=1$, 此时 $(a_k, b_k) = (a_1, b_1) = (0, 0)$, 若 p 取 1, 分别遍历 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_1) , 并将各个参数的值代入式(9)中, 最终得到 N 值变化如图 2 所示。实验面积为 $14 \text{ m} \times 10 \text{ m}$, 参考点数为 7×5 , 可见, 理论上当 N 为 5~6 时, 用线性内插法的误差达到最小值。

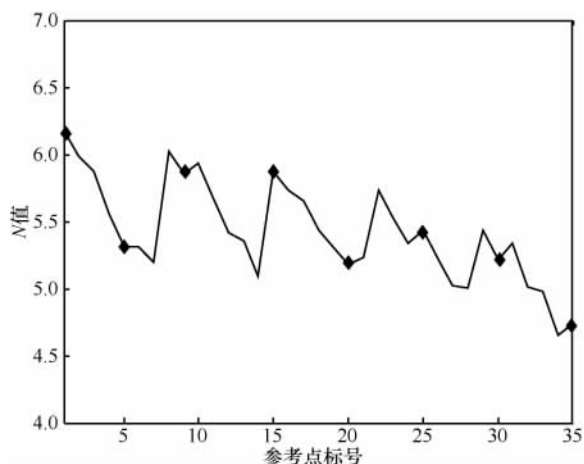


图2 N值变化折线

3.4 定位步骤

对于室内位置指纹定位算法来说,离线阶段数据库的构建以及室内环境存在多径效应的特点都对定位产生严重的影响。下面将详细介绍改进的定位估计匹配算法的步骤。对应的匹配算法流程如图3所示。

步骤1 选取试验场景,搭建测试环境,并多次采集每个参考点处的 RSSI 值求平均,构建离线指纹数据库。

步骤2 选取 N 值,确定虚拟参考点的划分结构,利用第3.2节介绍的线性内插法求解虚拟参考点的位置坐标和各个虚拟参考节点的 RSSI 值,重新构建离线指纹数据库。

步骤3 对构建的离线指纹数据库进行主成分分析,去掉多径效应对信号造成的干扰,构建特征数据库。

步骤4 选取待测点,并用移动终端读取待测点的 RSSI 值,对待测点测量的数据进行 PCA 变换,提取特征,假设变换后的向量为 $Z'=[S'_1, S'_2, \dots, S'_p]^T$ 。

步骤5 选取指纹定位算法 WKNN 的 K 值,这里令 $K=4$,然后计算 Z' 与特征数据库中每个参考点的欧氏距离,选取欧氏距离最小的前4个参考点,并分别计算对应的加权值 w_j 。

步骤6 按照式(3)估算移动端的位置,实现对移动端的实时定位。

4 实验性能比较与结果分析

4.1 测试平台

本实验软件平台是基于 Andriod 开发的手机应用软件

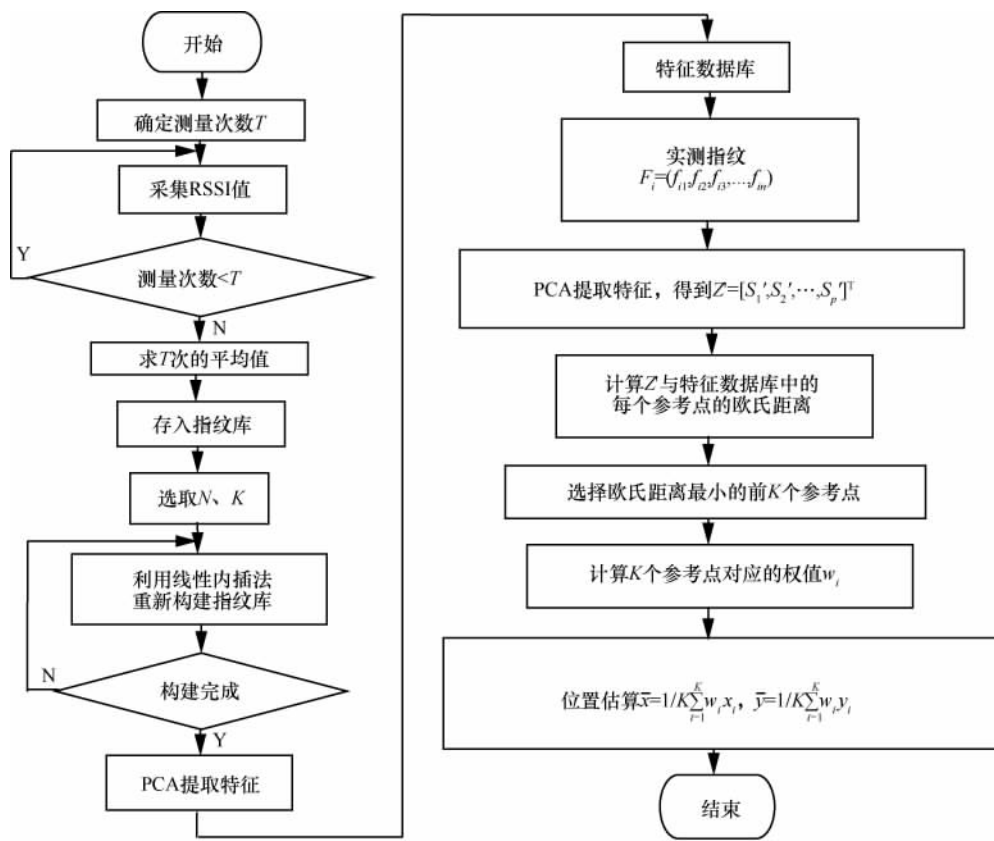


图3 基于线性内插和 PCA 改进的指纹定位匹配算法流程

BLE Scanner,用于实现离线及在线阶段的 RSSI 数据采集。硬件平台采用的是 iPhone 5 和苹果公司的 iBeacon 产品。实验环境位于西安邮电大学长安区 3 号实验楼 523 房间。实验软件、硬件平台和实验场地实景如图4 所示。实验环境参数选取见表 1。



图 4 软件、硬件平台和实验场地实景

表 1 实验环境参数选取

参数	取值
实验室面积	15.05 m×10.85 m
试验面积	14 m×10 m
AP 数目/个	6
AP 距离地面的距离/m	1.3
移动终端离地面距离/m	1.3
iBeacon 发射功率/dBm	-23

4.2 性能比较与仿真分析

由第 2.2 节的介绍可知,当测试环境和 K 值一定的情况下,影响 WKNN 算法定位结果的主要因素是:离线阶段的参考点的数量太少,则造成定位精度下降;数量太大,耗时耗力,造成定位成本的增加。因此要根据具体的实验场景,合理地选择参考点的数量。对这种算法的参考点的数量选取不同的值进行 MATLAB 仿真,参考点的数量的选取及定位误差见表 2,仿真结果如图 5 所示。由仿真结果可知,定位误差随着参考点数量的增加而减少。

表 2 WKNN 参考点数量的选取及定位误差

参考点的数量/个	平均定位误差/m
24	0.439 9
35	0.310 7
48	0.260 7

同理,由第 3.2 节对线性内插法的介绍可知,为了在不增加定位成本的情况下提高定位精度,在 WKNN 算法的基础上提出了线性内插法。当测试环境、 K 值以及参考点数量一定的情况下,影响基于线性内插法改进的 WKNN

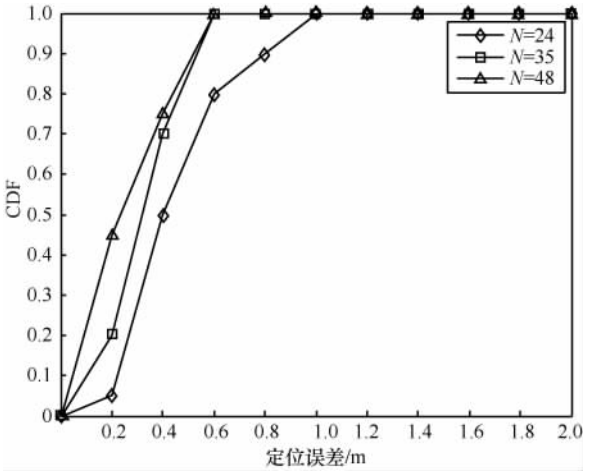


图 5 WKNN 法不同参考点数量仿真结果对比

算法定位结果的因素主要是 N 值的选取; N 值太小,造成定位精度提高得不明显; N 值太大,由于位置和接收信号强度的非线性关系造成定位精度降低。因此要根据具体的实验场景,合理地选择 N 值的大小。对这种改进算法的参考点数量取 35 个,对 N 选取不同的值进行 MATLAB 仿真, N 的选取及定位误差分别见表 3,仿真如图 6 所示。由仿真结果可知,定位误差并不是随着 N 的增大而增大,而是有一个最佳值,因此要根据试验场景,合理地选择 N 的大小,从而达到最佳定位效果。

表 3 基于线性内插法的 WKNN 不同 N 值及定位误差

N	平均定位误差/m
4	0.193 2
5	0.178 3
6	0.183 1
7	0.196 8

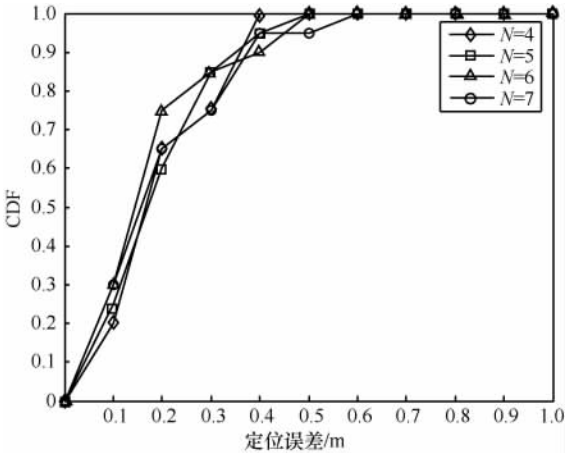


图 6 基于线性内插法的 WKNN 不同 N 值仿真结果对比



最后,根据第 3.1 节对 PCA 的介绍可知,为了减少多径效应对定位造成的影响,在基于线性内插法改进的 WKNN 算法的基础上增加了 PCA,先对离线指纹库数据进行降维,去除干扰,再进行定位,此时,选择 $K=5$, $K=4$,参考点的数目为 35 个,待测点数量为 20 个,并用 MATLAB 对比 WKNN 法和基于线性内插法改进的 WKNN 法,仿真结果如图 7 所示,各个算法的定位误差见表 4。由仿真结果可知,PCA 能进一步提高定位的精确度,精度提高了 4% 左右。

表 4 不同算法相同条件情况下的定位误差

算法	平均定位误差/m
WKNN	0.260 7
基于线性内插法的 WKNN	0.178 3
基于线性内插和 PCA 的 WKNN	0.171 4

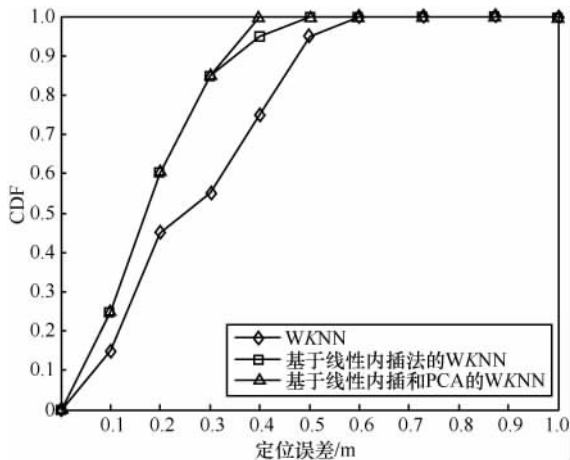


图 7 不同算法相同条件下定位误差累计分布仿真对比

另外,对于 WKNN 法、基于线性内插法改进的 WKNN 法以及基于线性内插和 PCA 改进的 WKNN 法分别进行 20 次测试,定位误差对比如图 8 所示。由图 8 可知,基于线性内插和 PCA 的 WKNN 匹配算法的定位误差明显比 WKNN 法的定位误差低。

由上述对算法的仿真结果可知,基于线性内插和 PCA 改进的 WKNN 法能在减少定位成本的同时提高定位精度,该算法与 WKNN 法相比,平均定位精度大约提高了 34.25%,但是,由于离线指纹库是根据线性内插法构建,计算势必带来定位时间的消耗,进而影响定位效率,用 MATLAB 中的 tic 和 toc 语句分别对 WKNN 法、基于线性内插法改进的 WKNN 法以及基于线性内插和 PCA 改进的 WKNN 法的效率进行仿真,仿真时间见表 5,结果显示,该

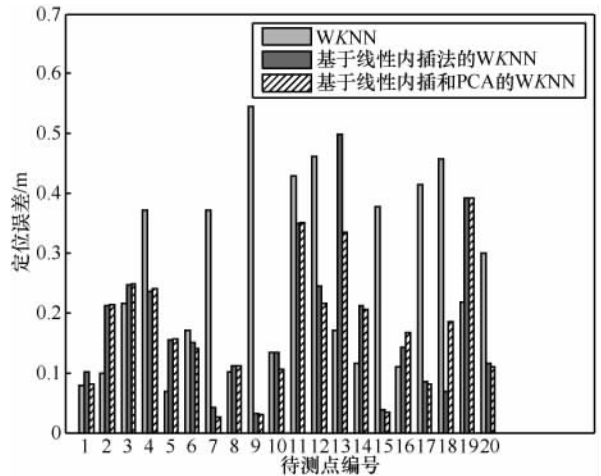


图 8 不同算法相同条件下各个待测点处定位误差对比

算法虽然以牺牲时间为代价提高定位精度,但消耗的时间处于可接受的范围内,说明在满足人们对定位的要求的同时提高了定位精度。

表 5 不同算法相同条件情况下的仿真时间

算法	仿真时间/s
WKNN	0.089 263
基于线性内插法的 WKNN	0.512 180
基于线性内插和 PCA 的 WKNN	0.523 913

5 结束语

本文针对增加参考点耗时耗力以及多径干扰问题,在位置指纹定位算法的基础上提出一种基于线性内插和 PCA 改进的 WKNN 定位方法。该算法将划分好的网格点进行进一步的划分,利用线性内插法重新构建离线指纹数据库,并引入主成分分析法,减少多径效应对定位造成的影响。所提算法使用匹配定位估计,在减少定位成本的同时提高了定位精度。由仿真分析可知,所提算法的最大定位误差为 0.391 9 m,最小定位误差为 0.026 6 m,对于长 14 m、宽 10 m 的定位环境而言,最大误差处于可接受范围内。

参考文献:

- [1] 陈锡剑,程良伦. 基于 RSSI 的功率匹配定位算法的研究与实现[J]. 传感技术学报, 2013, 26(5): 710-714.
CHEN X J, CHENG L L. Research and implementation of power matching algorithm based on RSSI [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26(5): 710-714.

- [2] LU Y H, LAI C F. Path loss exponent estimation for indoor wireless sensor positioning[J]. KSII Transactions on Internet and Information Systems, 2010, 4(3): 243-256.
- [3] PATWARI N, HERO A O, PERKINS M. Relative location estimation in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(8): 2137-2147.
- [4] 叶蔚. 室内无线定位的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
YE W. Study on indoor wireless location [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [5] 杨东勇, 顾东袁, 傅晓婕. 一种基于 RSSI 相似度的室内定位算法[J]. 传感技术学报, 2009, 22(2): 264-268.
YANG D Y, GU D Y, FU X J. An indoor location algorithm based on RSSI-similarity degree [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(2): 264-268.
- [6] 刘鹏, 卢潭城, 高翔. 基于射频识别的室内定位技术综述[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014(2): 195-201.
LIU P, LU T C, GAO X. A survey of indoor location technology based on radio frequency identification [J]. Terahertz Science and Electronic Information, 2014(2): 195-201.
- [7] 梁莹. INS/地磁匹配组合导航系统技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
LIANG Y. Study of INS/geomagnetic matching integrated navigation system technology [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.
- [8] 王欣. 基于地磁场和 RSSI 的室内定位算法设计与实现[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2014.
WANG X. Design and implementation of indoor location algorithm based on geomagnetic field and RSSI [J]. Hangzhou: Hangzhou University of Electronic Science and Technology, 2014.
- [9] JIANG S Y, PANG G S, WU M L. An improved K-nearest-neighbor algorithm for text categorization [J]. Expert Systems with Applications, 2012, 29(1): 1503-1509.
- [10] 詹杰, 刘宏立, 刘述钢, 等. 基于 RSSI 的动态权重定位算法研究[J]. 电子学报, 2011, 39(1): 82-88.
ZHAN J, LIU H L, LIU S G, et al. Study algorithm based RSSI's dynamic weights location [J]. Journal of Electronics, 2011, 39 (1): 82-88.
- [11] HUANG C N, CHAN C T. ZigBee-based indoor location system by k -nearest neighbor algorithm with weighted RSSI[J]. Procedia Computer Science, 2011(5): 58-65.

[作者简介]



张梦丹(1990-),女,西安邮电大学硕士生,主要研究方向为通信网技术。



卢光跃(1971-),男,博士,西安邮电大学通信工程学院教授,主要研究方向为现代移动通信中信号处理。



王宏刚(1977-),男,博士,西安邮电大学讲师,主要研究方向为物理层能源效率和通信协议的设计、RFID 和无线定位。



刘继明(1964-),男,博士,西安邮电大学教授,主要研究方向为下一代软交换核心技术。