



基于 RSSI 和惯性导航的融合室内定位算法

朱亚萍¹, 夏玮玮¹, 章跃跃¹, 燕锋¹, 左旭舟², 沈连丰¹

(1. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096;

2. 电子科技大学信息与软件工程学院, 四川 成都 610054)

摘要: 针对目前对高精度室内定位算法的需求, 提出一种基于接收信号强度识别 (RSSI) 和惯性导航的融合室内定位算法。基于无线传感网中 ZigBee 节点的 RSSI 值, 采用位置指纹识别算法, 对网络中的未知节点进行定位。结合惯性传感单元 (IMU) 提供的惯性数据, 对 RSSI 定位结果进行融合修正。利用 Kalman 滤波器, 采用状态方程描述待定位节点位置坐标的动态变化规律, 从而实现一种以无线传感网络定位为主、IMU 为辅的融合定位方法。仿真结果表明, 提出的融合定位算法既能改善单独使用 RSSI 定位受环境干扰较大的问题, 又能避免单独使用惯性导航带来的累积误差, 极大地提高了定位精度。

关键词: 高精度室内定位; 接收信号强度识别; 惯性导航; 融合定位算法

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017284

A hybrid indoor localization algorithm based on RSSI and inertial navigation

ZHU Yaping¹, XIA Weiwei¹, ZHANG Yueyue¹, YAN Feng¹, ZUO Xuzhou², SHEN Lianfeng¹

1. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China

2. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China

Abstract: To cater for the requirements of high-precision indoor localization algorithms, a hybrid indoor localization algorithm based on received signal strength identification (RSSI) and inertial navigation was proposed. This algorithm used fingerprint identification algorithm to localize the agents, based on the RSSI values of ZigBee nodes in wireless sensor network. The algorithm combined the inertial information provided by inertial measurement units (IMU), to correct the RSSI localization results. This algorithm used Kalman filter and adopted state equations to describe the dynamic change rules of agents' positions, thus it achieved a hybrid localization algorithm which relied WSN localization first and IMU last. Simulations evaluate that the proposed algorithm can improve the localization performances of algorithms which adopt RSSI localization and inertial navigation individually, and can greatly improve localization accuracy.

Key words: high-precision indoor localization, received signal strength identification, inertial navigation, hybrid localization algorithm

收稿日期: 2017-09-01; 修回日期: 2017-09-30

通讯作者: 夏玮玮, wwwxia@seu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61471164, No.61201175, No.61601122); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (No.KYLX16_0222); 网络与交换技术国家重点实验室 (北京邮电大学) 开放课题资助项目 (No. SKLNST-2016-2-16)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61471164, No.61201175, No.61601122), Fundamental Research Funds for the Central University (No.KYLX16_0222), Open Foundation of State Key Laboratory of Networking and Switching Technology (Beijing University of Posts and Telecommunications) (No.SKLNST-2016-2-16)



1 引言

近年来数据业务的快速增长促成了基于位置服务 (location-based service, LBS) 的蓬勃发展, 也促使了人们对导航定位技术准确性、可靠性和连续性的要求更加迫切^[1]。目前, 应用比较广泛的卫星导航系统 (global positioning system, GPS) 基本上能够做到全球覆盖。然而, 随着城市发展和建筑水平的提高, 越来越多的大型且结构复杂的建筑 (比如机场航站楼、大型商场、图书馆、展览馆、大型超市以及地下停车场等) 进入人们的生活, 对于这些复杂环境, 卫星导航系统的信号穿透能力较弱, 其信号能量和接收信噪比相比于普通环境有很大程度的恶化, 信号的可用性和总体性能都大大下降, 接收机定位精度很差, 有些情况下甚至无法定位^[2,3]。GPS 在场所定位性能的欠缺, 使得如何在室内提供一种比较精确的定位方法成为目前比较急迫的需求之一。与此同时, 在物联网 (internet of things, IoT)、智慧城市、应急救援、大型场馆管理等领域都需要室内定位技术的支持, 因而, 精确的室内定位技术研究是前沿且极具发展前景的, 存在很大的市场发展空间^[4-7]。

室内定位技术的种类繁多, 目前主要的局域室内高精度定位技术有: 无线局域网 (wireless local area network, WLAN)、射频识别 (radio frequency identification, RFID)、ZigBee、蓝牙 (bluetooth, BT)、超宽带 (ultra wideband, UWB)

无线电、惯性单元辅助定位、红外定位、光跟踪定位等。由于室内定位的环境非常复杂, 不同的建筑物, 不同的室内布置、格局、材料以及建筑物的尺寸, 都会对室内定位技术产生不同的要求。上述几种无线定位技术各有利弊, 实际应用中可以根据不同的场景加以选择, 几种关键技术的优缺点见表 1, 更多的描述见参考文献[8]。

在室内定位技术中, 使用到的定位算法可分为基于非测距和基于测距的定位算法。基于非测距的算法包括质心算法、Dv-Hop 算法、近似三角形内点测试 (approximate point-in-triangulation test, APIT) 算法等^[8]。相对而言, 使用较多的是基于测距的定位算法, 基于测距的算法一般分为两个步骤: 是利用某种测量方法测出距离或者角度信息; 利用获得的信息计算出未知节点的坐标。根据测量方法的不同, 基于测距的定位算法可以包括基于到达时间 (time of arrival, TOA)、基于到达时间差 (time difference of arrival, TDOA)、基于到达角度 (angle of arrival, AOA) 以及基于接收信号强度识别 (received signal strength identification, RSSI) 等的定位^[9-12]。

本文采用基于无线传感器网络 (wireless sensor network, WSN) 的 ZigBee 节点定位系统, 并结合惯性测量单元 (inertial measurement unit, IMU) 进行辅助融合定位。WSN 具有自组织性、灵活性且便于大规模部署, ZigBee 技术有低功耗、低成本、组网灵活、自恢复能力强等特点。利用 ZigBee 组网的 WSN 室内定位系统使用场景范围

表 1 不同局域室内定位方式的比较

信号载体	典型定位方式	定位精度	成本	其他不足
Wi-Fi	基于场强定位	米级	高	
ZigBee	基于场强定位	米级	高	
RFID	门禁方式	区间定位, 精度低	高	室内覆盖能力有限
BT	基于场强定位	米级	高	
UWB	基于时延或到达角解算	视距环境可达亚米级	极高	
IMU	基于行人航迹推算	终端亚米级	低	室内覆盖能力有限, 不能单独使用

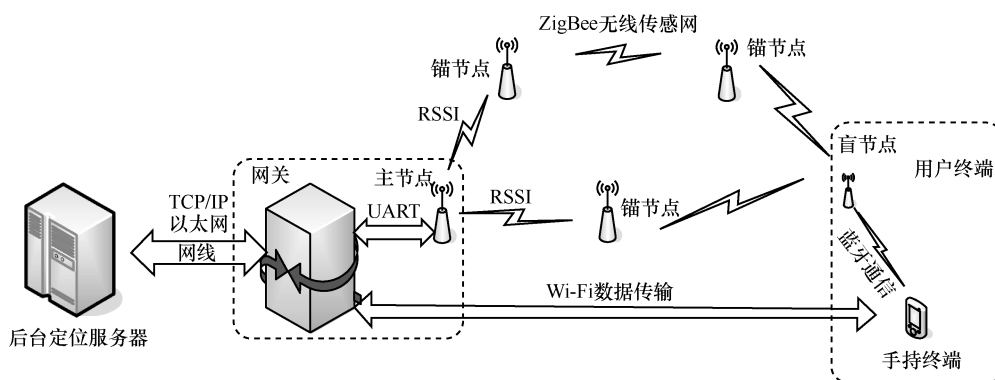


图1 室内定位系统网络拓扑

较广，从几平方米的房间到几百平方米的厂区或楼层，都可以进行布置。它相比于超声波、UWB定位系统，有成本低、布局简单、组网方便等特点；相比于WLAN、RFID、红外定位系统，有定位精度高、适用范围广等特点。但由于信号强度受环境影响较大（比如人员走动、墙体/门的遮挡反射），单独使用该技术会对定位精度造成一定的限制。利用IMU所提供的惯性传感数据，基于行人航迹推算（pedestrian dead reckoning, PDR）算法，融合无线定位系统，可以有效地提高室内定位精度以及顽健性，而且还可以降低用于提高室内定位系统信号覆盖所需要的成本。

2 系统模型

本文采用的系统模型由用户终端、锚节点、网关及定位服务器组成，整体的网络拓扑如图1所示。用户终端由定位人员随身携带，其中包含了如图2所示的惯性传感单元。该惯性导航系统在3个两两互相垂直的平面上安装一个加速度传感器和陀螺仪，加速度计和陀螺仪采集自身所在轴向上的加速度和角速度数据，这些数据经过一系列的运算处理得到包含载体航向、姿态、速度和位置等信息。用户终端将这些信息上传，同时周期性地向网络中进行无线广播，一边锚节点测算广播信号的RSSI值进行后续定位计算。锚节点是定位系统中自身位置坐标已知的参考节点，锚

节点之间以自组网的形式构成WSN，接收来自用户终端的无线信号并测算相应的RSSI值，再上报至网关。网关的主要功能是锚节点的RSSI值，同时还可以通过无线网卡与用户终端之间进行数据通信，获取IMU的相关信息。网关与锚节点之间通过ZigBee协议组网。定位服务器主要负责位置坐标的结算及处理一些用户界面的互动应用，它与网关之间通过有线网络相连，接收来自网关的上传数据和定位运算的一些信息。

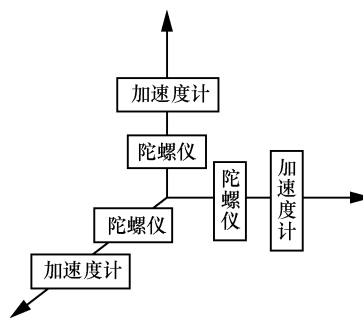


图2 惯性传感单元

3 融合定位算法

从第1节可知，单独使用RSSI定位，由于环境干扰，会对定位精度造成一定程度的影响。使用惯性导航定位时，一般采用的PDR算法是在已知行人初始位置的基础上，通过计算行人每次行走的步伐长度以及航向角，在检测到每次步伐发生的时候对行人的位置坐标进行更新。因而，单独使用惯性导航定位时，会存在无法获知其初始



位置的问题,同时,由于算法采用累加的形式,因而还存在累计误差逐渐增大的问题。事实上,在基于 RSSI 测量值使用位置指纹识别算法定位时,能够在节点静止的情况下获得良好的定位性能。综上考虑,本文提出一种基于 RSSI 和惯性导航的融合定位算法,该算法利用 Kalman 滤波器,采用状态方程描述待定位节点位置坐标的动态变化规律,实现一种以无线传感网络定位为主、惯性传感单元为辅的定位方法。

3.1 基于 RSSI 的位置指纹识别算法

基于 RSSI 使用位置指纹识别算法定位包含两个阶段:离线训练阶段和在线定位阶段,算法的主要过程如图 3 所示。

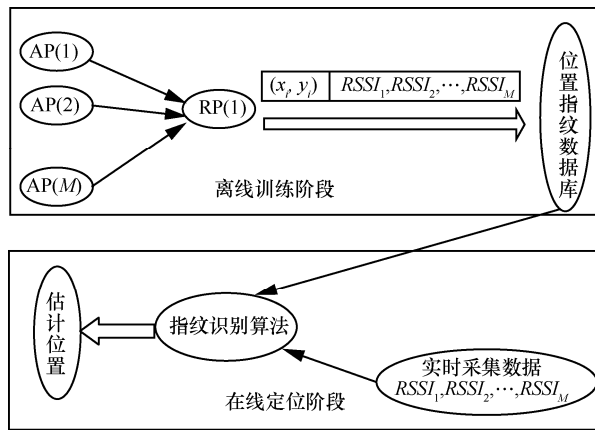


图 3 基于 RSSI 的位置指纹识别算法

离线训练阶段就是建立位置指纹数据库,在定位区域的各参考点(reference point, RP)处采集每一个接入点(access point, AP)的 RSSI 值,并将 RSSI 值、锚节点信息以及 RP 的位置存储起来,形成位置指纹数据库。

在线定位阶段是移动节点在某一时刻收集到各个锚节点的 RSSI 向量后,在指纹数据库中搜索特征匹配的结果并进行筛选,最终得出该节点当前所处未知的估计值。本文使用 K 近邻法对位置进行估计,该方法选取数据库中与当前 RSSI 向量最接近的 $K(K \geq 2)$ 个记录的平均值作为定位位置的估计值。假设待定位节点对网络中 M 个锚节

点的 RSSI 测距集为 $(R_1, R_2, \dots, R_M)$, 在位置指纹数据库中,第 i 个参考点存储的 RSSI 向量为 $(R_{i1}, R_{i2}, \dots, R_{iM})$, 则:

$$D_i = \left(\sum_{n=1}^M (R_{in} - R_n)^2 \right)^{1/2} \quad (1)$$

并找出 K 个 D_i 最小的参考点,根据式 (2) 可以得到位置的估计值:

$$\hat{p} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K p_i \quad (2)$$

其中, $p_i = (x_i, y_i), i=1, 2, \dots, K$ 是 K 个最近邻点的位置坐标。

3.2 基于 RSSI 的位置指纹识别算法

假设待定位节点采集 RSSI 值的时间间隔为 T , 在这个时间间隔内,惯性传感器共检测出 k 组数据,在扩展 Kalman 滤波中利用加速度的测量值作为控制输入。

该 Kalman 滤波器的状态方程和观测方程为:

$$X(t|t-1) = A \cdot X(t-1|t-1) + c(t) \quad (3)$$

$$Z(t) = h(X(t|t-1)) + n(t) \quad (4)$$

其中, $c(t)$ 为 Kalman 滤波的控制方程, $n(t)$ 是过程噪声,其方差为 R , $h(X)$ 是非线性的,在进行状态估计时,近似用它的 Jacobian (雅可比) 矩阵 $H(t+1)$ 来代替。

导出扩展 Kalman 的 5 个方程,见式 (5)~式 (9)。

系统预测方程:

$$X(t|t-1) = A \cdot X(t-1|t-1) + c(t) \quad (5)$$

协方差方程:

$$P(t|t-1) = A \cdot X(t-1|t-1) \cdot A^T + Q \quad (6)$$

测量值更新:

$$X(t|t) = X(t|t-1) + K \cdot (Z - h(X(t|t-1))) \quad (7)$$

Kalman 增益更新:

$$K(t-1) = P(t|t-1) \cdot H(t)^T \cdot (H(t)P(t|t-1)H(t)^T + R)^{-1} \quad (8)$$

协方差更新:

$$\mathbf{P}(t|t) = (\mathbf{I} - \mathbf{K} \cdot \mathbf{H}(t)) \cdot \mathbf{P}(t|t-1) \quad (9)$$

为了确定状态更新矩阵 $\mathbf{A}$ 、状态方差矩阵 $\mathbf{Q}$ 以及输入控制 $\mathbf{c}$ ，分析从状态 $\mathbf{X}(t-1|t-1)$ 转变为 $\mathbf{X}(t|t-1)$ 时，加速度值对状态改变的影响。

由于加速度对位置的影响是关于时间的非线性函数，本文不能直接对加速度的测量值进行积分来作为控制输入。为了简化分析，首先考虑在每个节点的一维情况，由于每个节点在不同维的过程是独立的，可以很容易地推导得到二维的情况。当每次检测加速度值时，利用运动学方程更新节点的位置和速度信息，表达式如下：

$$s(n) = s(n-1) + v(n-1) + 0.5a(n)T^2 \quad (10)$$

$$v(n) = v(n-1) + a(n)T \quad (11)$$

其中， $s(n-1)$ 和 $v(n-1)$ 分别为当前时刻对节点位置和速度的估计值， $a(n)$ 为第 n 次的加速度测量值。

将式 (10) 和式 (11) 写成矩阵表达式为：

$$\mathbf{x}(n) = \mathbf{A}_a \mathbf{x}(n-1) + \begin{bmatrix} \frac{a(n)T^2}{2} \\ a(n)T \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\text{其中, } \mathbf{x}(n) = \begin{bmatrix} s(n) \\ v(n) \end{bmatrix}, \mathbf{A}_a = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

在两次 RSSI 值上传期间， $\mathbf{x}(n)$ 的值更新 k 次，将 $\mathbf{x}(k)$ 的值用 $\mathbf{x}(0)$ 表达如下：

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{A}_a^k \mathbf{x}(0) + \sum_{m=0}^{k-1} \mathbf{A}_a^m \begin{bmatrix} \frac{a(k-m)T^2}{2} \\ a(k-m)T \end{bmatrix} \quad (13)$$

将式 (13) 与 Kalman 的状态方程式进行比较，可以得到 $\mathbf{A} = \mathbf{A}_a^k = \begin{bmatrix} 1 & kT \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ，状态噪声 $\mathbf{q}(n) =$

$$\sum_{m=0}^{k-1} \mathbf{A}_a^m \begin{bmatrix} \frac{a(k-m)T^2}{2} \\ a(k-m)T \end{bmatrix}.$$

则状态噪声 $\mathbf{q}$ 的平均值为：

$$\bar{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} T \sum_{n=0}^{k-1} \frac{v(n) + v(n-1)}{2} \\ T \sum_{n=0}^{k-1} a(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^2 \sum_{n=0}^{k-1} \frac{a(n)}{2} + (k-n)a(n-1) \\ T \sum_{n=0}^{k-1} a(n) \end{bmatrix} \quad (14)$$

其方差为：

$$\mathbf{Q} = \sigma_\eta^2 T^2 \begin{bmatrix} T^2 \left(\frac{k^3}{3} - \frac{k}{12} \right) & T \frac{k^3}{2} \\ T \frac{k^3}{2} & k \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中， σ_η^2 是人为加给直接测量得到的加速度值的高斯白噪声 η 的方差。将状态噪声 $\mathbf{q}$ 的均值作为输入控制 $\mathbf{c}(t)$ ，该输入控制利用式 (16) 进行更新：

$$\mathbf{c}_a(n+1) = \mathbf{c}_a(n) + \begin{bmatrix} a(n)T^2(k-n+0.5) \\ a(n)T \end{bmatrix} \quad (16)$$

在式 (16) 中， $a(n)$ 是在两次 RSSI 值上传的间隔内的第 n 次的加速度值， $\mathbf{c}_a(0)=0$ 。当每次更新坐标值时，将上次更新得到的值作为控制输入， $\mathbf{c}=\mathbf{c}_a(k)$ 。

需要注意的是，上述算法不可避免地存在一定的误差，因为在实际中，加速度的值是一个连续的量，而每次测量得到的是当前时刻的瞬时加速度，这个测量值被作为两次间隔内加速度值的平均值，因而会产生误差。但是当采样间隔足够小，加速度值可以被近似认为是连续的，此时的误差可以被忽略。具体的基于 RSSI 和惯性导航的融合室内定位算法的流程如图 4 所示。

4 仿真结果

本文以中国无线谷 A2 号楼三楼的会议室作为实验场地，建立 ZigBee 网络实验系统进行研究，定位场景如图 5 所示。在定位场景中，在房间的 4 个角落分别部署位置已知的锚节点，锚节点的天线竖直向下，天线顶端距离地面的

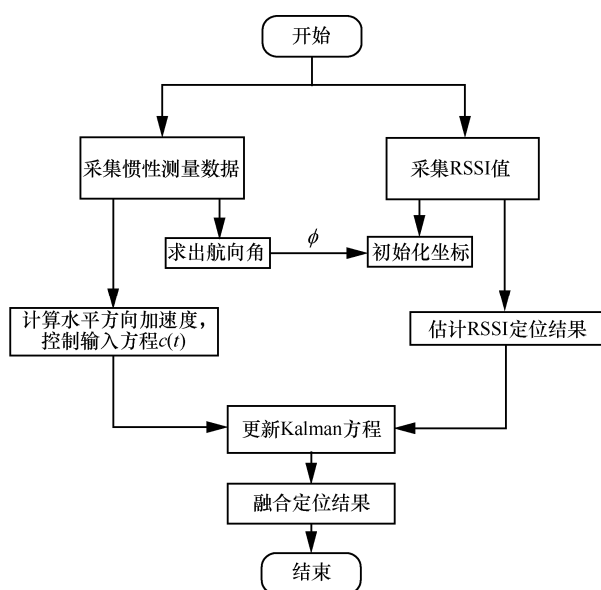


图4 基于RSSI和惯性导航的融合定位算法

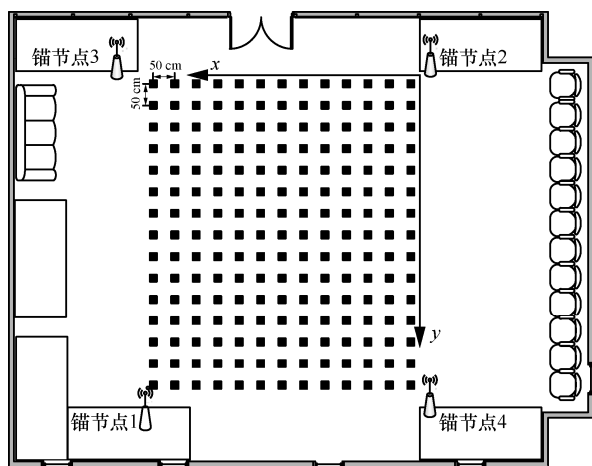


图5 定位场景

高度为 2.6 m。在房间的中央选取一块 6 m×7 m 的矩形区域作为定位区域，以 50 cm×50 cm 划分网格，网格的交点作为参考点，因而在测试区域一共有 $N=195$ 个参考点。在离线训练阶段，位置节点依次放置在每个网格交点处，记录当前参考点的位置坐标 (x_i, y_i) 和在该点采集到的某个锚节点的 RSSI 值，记录向量 $(R_{i1}, R_{i2}, R_{i3}, R_{i4})$ ，其中 $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ 代表参考点。实验过程中，由实验人员佩戴安装有盲节点的安全帽在测试区域行走，盲节点上装有惯性传感单元，提供惯性数据。

图 6 是分别使用 RSSI、惯性导航以及融合定位 3 种方法进行定位的轨迹，图中粗实线为实际行走的轨迹。从图 6 中可以看出 RSSI 定位结果性能较差。这是由于在实际测量中，RSSI 受到环境因素影响较大，微小的场景变化可能导致 RSSI 测量值发生很大的变化波动，因而不确定性很高。利用惯性导航定位曲线，可以看出，随着时间的推移，累积误差越来越大，定位轨迹越来越偏离真实值。由此可见，单独使用这两种定位方法获得的定位精度都很低，通过融合算法曲线可知，将 RSSI 定位值通过 Kalman 滤波器，结合惯性导航系统加以修正，从而在小范围区域内将定位误差控制在 1.5 m 以内，很大程度上改善了定位效果。

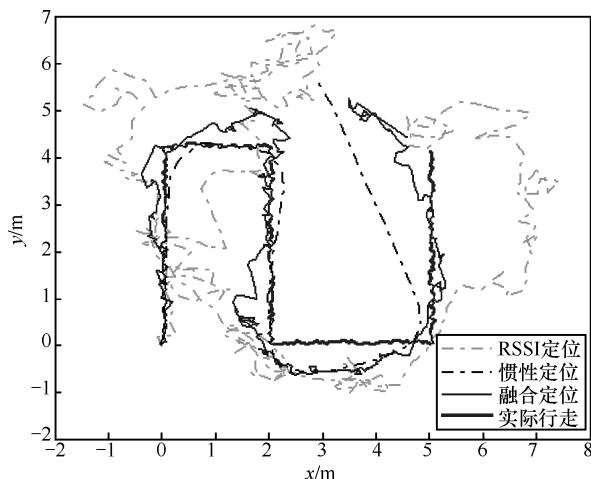


图6 RSSI、惯性导航以及融合算法定位轨迹

从图 7 的误差结果分析中可以看出，RSSI 定位误差分布比较随机，最大误差达到将近 4 m，在个别点能够取得较好的定位效果（误差在 0.5 m 以内）；惯性导航的定位结果在开始时误差很小，甚至优于采用融合算法的定位效果，但随着时间的推移，累积误差越来越大，达到将近 3 m；采用融合定位算法后，最大误差控制在了 2.3 m 以内，总体性能优于单独使用 RSSI 和惯性导航的定位方法。表 2 列出了分别使用这 3 种方法的最大误差、最小误差以及平均误差。

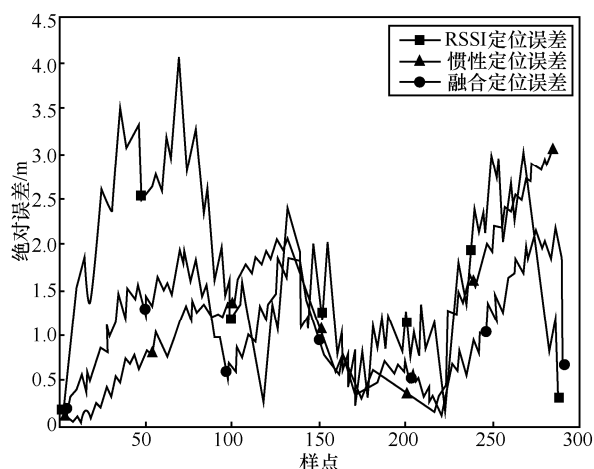


图7 RSSI、惯性导航以及融合算法定位误差结果分析

表2 RSSI、惯性导航以及融合算法定位的误差比较

方法	最大误差/m	最小误差/m	平均误差/m
RSSI 定位算法	4.050 0	0.071 4	1.718 8
惯性定位算法	3.086 9	0.043 1	1.173 8
融合定位算法	2.211 3	0.071 4	1.063 4

5 结束语

本文提出了一种基于 RSSI 和惯性导航的融合室内定位算法,旨在提高室内定位的定位精度。该算法首先基于无线传感网中 ZigBee 节点的 RSSI 值,采用位置指纹识别算法对未知节点进行定位。然后,通过辅助 IMU 提供的惯性数据,利用 Kalman 滤波器,采用状态方程描述待定位节点位置坐标的动态变化规律,对 RSSI 的定位结果进行融合修正,实现了一种以无线传感网络定位为主、惯性传感单元为辅的定位方法。结果表明,相比于单独使用 RSSI 定位或惯性导航定位,本文提出的融合定位算法能很大程度上提高定位精度,改善定位性能。

参考文献:

- [1] ZHANG J, HAN G J, SUN N, et al. Path-loss-based fingerprint localization approach for location-based services in indoor environments[J]. IEEE Access, 2017: 13756-13769.
- [2] JOURDAN D B, DARDARI D, WIN M Z. Position error bound for UWB localization in dense cluttered environments[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(2): 613-628.
- [3] DAI W H, SHEN Y, WIN M Z. Distributed power allocation for

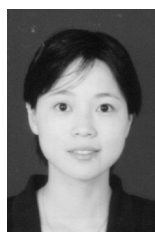
cooperative wireless network localization[J]. IEEE JSAC, 2015, 33(1): 28-40.

- [4] WYMEERSCH H, LIEN J, WIN M Z. Cooperative localization in wireless network[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(2): 427-450.
- [5] DAS K, WYMEERSCH H. Censoring for Bayesian cooperative positioning in dense wireless networks[J]. IEEE JSAC, 2012, 30(9): 1835-1842.
- [6] TOMIC S, BEKO M, DINIS R. RSS-based localization in wireless sensor networks using convex relaxation: noncooperative and cooperative schemes[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(5): 2037-2050.
- [7] WIN M Z, CONTI A, MAZUELAS S, et al. Network localization and navigation via cooperation[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(5): 56-62.
- [8] YASSIN A, NASSER Y, AWAD M, et al. Recent advances in indoor localization: a survey on theoretical approaches and applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(2): 1327-1346.
- [9] ZHANG Y Y, XING S, ZHU Y, et al. RSS-based localization in WSNs using Gaussian mixture model via semidefinite relaxation[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(6): 1329-1332.
- [10] CHEN H Y, WANG G, WANG Z Z, et al. Non-line-of-sight node localization based on semi-definite programming in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2012, 11(1): 108-116.
- [11] GHOLAMI M R, TETRUASHVILI L, STROM E G, et al. Cooperative wireless sensor network positioning via implicit convex feasibility[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(23): 5830-5840.
- [12] WANG G, YANG K H. A new approach to sensor node localization using RSS measurements in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(5): 1389-1395.

[作者简介]



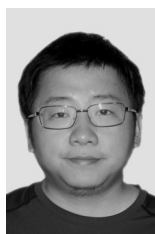
朱亚萍(1990—),女,东南大学移动通信国家重点实验室博士生,主要研究方向为宽带移动通信、无线传感器网络定位等。



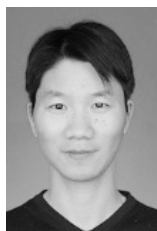
夏玮玮(1975—),女,博士,东南大学移动通信国家重点实验室副教授,主要研究方向为短距离无线通信与泛在网络、异构网络无线资源优化等。



章跃跃（1988–），男，东南大学移动通信国家重点实验室博士生，主要研究方向为异构网络资源分配、无线定位、无线传感器网络。



左旭舟（1983–），男，博士，电子科技大学信息与软件工程学院讲师，主要研究方向为认知无线电、室内定位等。



燕锋（1983–），男，博士，东南大学移动通信国家重点实验室副研究员，主要研究方向为无线传感器网络，异构网络等。



沈连丰（1952–），男，东南大学移动通信国家重点实验室教授、博士生导师，主要研究方向为宽带移动通信、短距离无线通信和泛在网络等。