

基于 WiFi 辅助的自适应步长的室内定位算法

金彦亮 张晓帅 齐 崎 谢秋云 周裕畅

(上海大学 特种光纤与光接入重点实验室 上海 200072)

摘要: 随着室内定位的需求越来越多,基于 PDR 算法的低成本惯性传感器定位方法备受青睐。在 PDR 算法的基础上,提出了一种步长可随着步频自适应变化的 $s-f$ 关系模型。同时针对 PDR 算法的误差累积问题,利用 WiFi 信号的接入点位置的绝对坐标对定位误差进行校正,利用连续的两个 WiFi 信号接入点位置辅助动态调整步长,避免了长时间的计步累积误差对步长的影响。实验验证该方法可有效提高室内定位的精度。

关键词: 室内定位;PDR 算法;自适应步长;WiFi 辅助校准

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Indoor positioning algorithm based on adaptive step size and WiFi assisted

Jin Yanliang Zhang Xiaoshuai Qi Qi Xie Qiuyun Zhou Huyang

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: With increasing demand for indoor positioning, a low-cost inertial sensor positioning method based on PDR algorithm is favored. This paper proposed a $s-f$ relationship model on the basis of PDR algorithm. This model means step size may vary adaptively with step frequency changes. Because of PDR algorithm will inevitably produce accumulative error, this paper uses the absolute locations of WiFi signal access point to eliminate the accumulative error, while taking advantage of two adjacent WiFi signal access points to dynamically adjust the step size avoiding the influence of pedometer cumulative error. Experimental results show that this method can effectively improve indoor location accuracy.

Keywords: indoor positioning; PDR algorithm; adaptive step size; WiFi adjustment

0 引 言

随着移动通信技术的发展,人们对基于位置的服务需求越来越强烈。现代人们日常活动大多在室内完成,行人在室内环境下的定位可应用于军事、商业等领域,具有巨大的应用前景^[1-2]。全球定位系统(GPS)能够在室外环境中提供精确的位置导航服务,然而在室内环境中,由于建筑物结构的复杂及人员走动的影响,卫星信号受到干扰,GPS 无法提供可靠的定位信息^[3]。因此,研究人员将红外、蓝牙、无线局域网、无线射频识别(RFID)、超宽带(UWB)等技术应用于室内定位系统中^[4-6]。然而这些技术需要安装基础设施,增加了成本,不便于实现。一种基于 MEMS 惯性传感器的利用航位推算(dead reckoning, DR)方法的定位系统可以解决这一问题,该系统无需预装基础设施,成本低、易实现。航位推算通过行走距离和方位推算用户的相对位置,但是随着距离的增大,该算法会产生累积误差。

本文采用 MEMS 惯性传感器结合 WiFi 信号^[7]进行室

内定位,提出了一种自适应步长模型,使得步长可以随着行走速度的不同自适应变化,在惯性定位阶段通过提高步长的准确性来提高整体定位精度。由于惯性定位阶段误差不断累积,本文根据 WiFi 信号的变化特点利用 AP 点绝对位置信息消除累积误差,动态校正步长。

1 行人航位推算

行人航位推算(pedestrian dead reckoning, PDR)是一种完全自主式的定位方法^[8],主要是基于微机电惯性测量单元 MEMS 而实现的。PDR 算法的基本原理是得到初始位置的坐标后,通过惯性传感器得到航向角数据、计步数据和步长估计的数据,初始坐标累加上每一步的行走路径,就可以得到行人当前的位置坐标。其原理如图 1 所示。

PDR 算法公式如下:

$$\begin{cases} E_1 = E_0 + V \times (t_1 - t_0) \sin \alpha \\ N_1 = N_0 + V \times (t_1 - t_0) \cos \alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中: (E_0, N_0) 表示初始位置 P_0 的坐标, (E_1, N_1) 表示 P_1

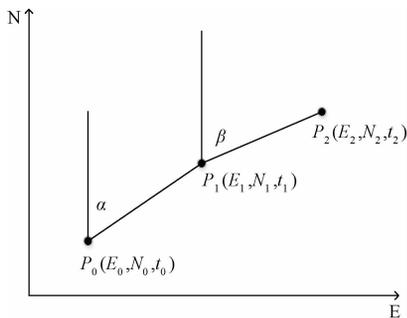


图 1 PDR 算法示意图
E 代表方位东, N 代表方位北

处的坐标, V 代表行走速度, 由跨步周期和步长的乘积计算而得, $(t_1 - t_0)$ 表示从 P_0 到 P_1 所用的时间, α 表示从 P_0 点到 P_1 点之间的航向角。可见, 影响行人航迹推算室内定位精度的主要因素就是初始位置坐标、磁力计的航向数据、计步数据的准确性以及可靠的步长估计模型。

1.1 加速度计数据的预处理

计步数据主要是根据三轴加速度计的数据来计算的。三轴加速度计配置于行人腰部, 加速度计 Z 轴方向的加速度数值波动明显且规律, 本文采用三轴总加速度作为计步数据, 总加速度不是一个矢量, 不具有方向性, 其值为:

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (2)$$

式中: a_x 代表侧向加速度值, a_y 代表前进方向加速度值, a_z 代表垂直方向的加速度值, a 代表三轴总加速度值。

三轴总加速度的波形如图 2 所示。从加速度波形图中可以明显看出, 人行行走一步的周期内, 随着脚后跟离开地面而加速, 在峰值点加速度数值达到最大, 之后开始减速到低谷点。随着另一只脚后跟离开地面开始新的加速减速的周期。在行走的过程中, 任何轻微的抖动或者加速度计位置的微小偏移都会对加速度数据产生影响, 即数据中的噪声, 因此需要对数据进行预处理, 滤去噪声获取有用信息。

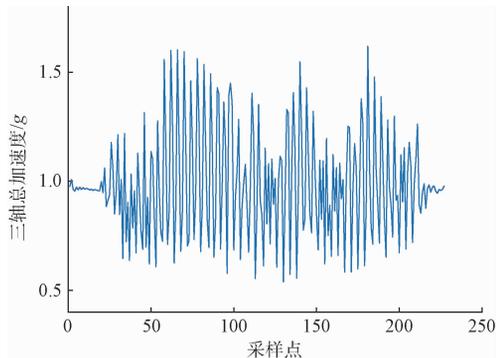


图 2 三轴总加速度波形

预处理的方式有滤波^[9]、平滑、小波变换等。文献[10]采用的预处理方法为平滑滤波, 文献[11]采用的是 FIR 滤波方式, 本文对加速度数据预处理采用小波滤波方法, 经过

预处理后的总加速度如图 3 所示。

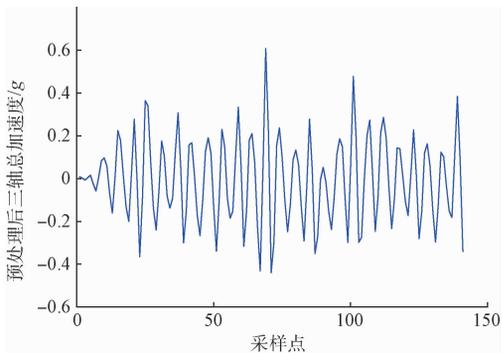


图 3 预处理后总加速度

从图 3 中可见, 经过预处理后的总加速度波形相对平滑而且可以明显地看出行走过程中的波动性。利用处理好的加速度值就可以进行下一步的分析了。

1.2 步频检测算法

步频检测即计步, 经过预处理后, 在处理加速度数据时, 需要针对每一步的数据进行处理。如何准确提取出一步的数据点, 关键就在于找出跨步的起始点和结束点。传统的方法采用过零检测法, 即设置固定的门限为 0, 当跨步开始后加速度计超过了零点时表示一步的开始, 当落步时加速度计的数值过零点时表示一步的结束。但是, 在行走过程中步态是不固定的, 不同的状态加速度值变化不同, 如果设置固定的门限值就不能准确获得完整的一步内的数据。还有峰值检测法、自相关法、步频探测传感器法等方法, 各有优缺点。本文采用动态的跨步门限^[12], 使当前步的门限值能根据之前步的加速度值的数据动态变化, 更准确地获得每一步的数据。

如图 4 所示, 动态跨步门限的具体设定方法为: 初始设置跨步门限值为 0, 跨步起点与跨步结束点之间要满足一定的时间间距才记为有效。正常人的步频为 0.5~5 Hz, 因此跨步时间间距应在 0.2~2 s。当获取到一步的数据后, 可以得到该步内加速度数据的最大值和最小值, 最大值和最小值只有达到一定的阈值才能记为有效跨步, 利用这一步的最大值和最小值的平均值作为下一步的跨步门限值。

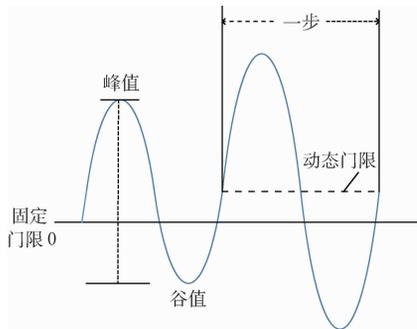


图 4 动态门限设置示意图

为了验证动态门限法步频检测算法的计步效果,行人以相对一致的速度行走一段距离,和单独采用峰值检测法和过零检测法计步效果进行对比,结果如表 1 所示。

表 1 步频检测算法计步效果比较

实际步数	过零检测法		峰值检测法		动态门限法	
	步数	误差	步数	误差	步数	误差
30	30	0	31	1	30	0
62	65	3	67	4	60	2
91	97	6	101	7	88	3
128	137	9	132	9	123	5

从表 1 中可以看出,本文采用的动态门限检测法与过零检测法和峰值检测法相比,计步误差有所减小,可见该算法可以在一定程度上提高计步的准确性。同时可以看出,随着行走距离的增加,计步误差也在不断累积。

1.3 步长估计 s - f 模型

步长是一个动态变化量,行人的身高、体重、步态、路面情况等都会对其产生影响。本文主要研究在建筑物内部的行人步长估计。行人的行走状态可以根据加速度传感器的数据分析获得。传统的步长估计模型有常数模型、线性模型、非线性模型等^[13]。由于步长估计存在个体差异,采用传统的方法对不同的行人及不同运动状态的适应性较差。为了更方便的处理数据,得到估计的步长,在借鉴了上述常用的步长估计模型的基础上,本文经过大量的实验测量,发现行走速度和频率之间的存在一定的关系,提出了一种基于步频的步长估计模型: s - f 关系模型。图 5 所示为步频和速度关系曲线。

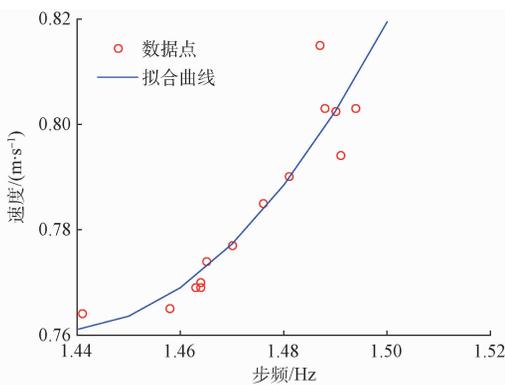


图 5 步频和速度关系曲线

图 5 中的每一个数据点都是经过 10 组实验而得的平均值,其中每组实验尽量保持相同的行走状态。实验数据利用最小二乘法,拟合出步频和行走速度的关系曲线。步频和速度的关系基本满足如下的关系:

$$v = af^2 + bf + c \quad (3)$$

式中: v 表示行走的速度, m/s ; f 表示步频, Hz ; a 、 b 、 c 均为

个性化参数,即这些参数并不是固定值,而是针对不同的行人和该行人的运动状态进行个性化标定的数值。表 2 所示为不同的行人的个性化参数值。

表 2 不同行人的个性化参数

性别	序号	行走距离/ m	a	b	c
女	1	30	16.116	-58.638	54.511
女	2	30	8.668	-32.334	31.377
男	1	30	3.121	-12.226	10.671
男	2	30	13.861	-37.479	27.836

已知行走速度 v 、步频 f 和步长 s 之间有如下关系:

$$v = s \times f \quad (4)$$

结合式(3)和(4)得到 s - f 关系模型:

$$s = a \times f + \frac{b}{f} + c \quad (5)$$

根据式(5),步长的变化可以由步频的变化进行动态调整。由于在行走的过程中,步频的数据相对容易获得,本文中在惯性定位阶段步长的估计可以通过步频数据推算而得。同时,个性化参数的设置根据行人的个体差异进行提前标定,具有更好的个体适应性,提高了定位的精度。

2 WiFi 辅助校准

2.1 WiFi 辅助

惯性传感器定位中采用的 PDR 算法不可避免的会产生累积误差,随着行走距离的增大,误差的积累会越来越明显。为了消除累积误差,本文采用了 WiFi 信号来辅助惯性传感器定位,一方面利用 WiFi 信号的接入点(access point, AP)的绝对位置消除累积误差,另一方面,利用 WiFi 信号进行动态的调整步长,对估计的步长进行动态的调整,提高定位精度。由于室内环境复杂,加之信号在不同路径的衰减各不相同^[14],即使在同一地点,接收信号强度指示值也会因为人员的走动、时间的改变、环境的影响而产生较大的波动^[15]。本文利用 WiFi 信号来辅助定位,根据 WiFi 信号强度的变化特点而非 WiFi 的绝对信号强度值来判断位置,消除 PDR 算法的累积误差。

由于本文研究的是建筑物内部的定位,受到建筑物结构的限制,行人的行走路线并不是杂乱无章的,而是有规则的。如图 6 所示,当行人相对于 WiFi 信号接入点的位置由远及近再远离的过程中,WiFi 模块检测到的该 AP 点信号强度由弱变强再变弱。利用这种变化特点检测出信号最强点时,表明当前行人离 AP 最近,可以用此 AP 的位置作为当前行人的位置。AP 点信号最强点的位置需要提前测量并在地图上标记出来。

接收到的 WiFi 信号强度单位 dbm ,是负值,图 6 中显示的是 WiFi 信号强度的绝对值,因此在曲线的最低点处,信号强度最强,此时行人离 WiFi 信号 AP 点位置最近。设

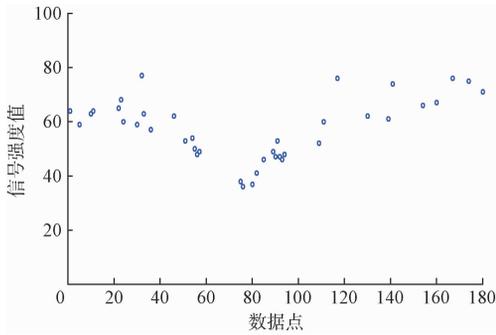


图 6 AP 点附近 RSSI 值变化曲线

定一个 WiFi 信号强度的阈值作为判断进入 AP 点位置附近的条件,本文中设阈值为 50 dbm。

当行人前后连续经过两个 AP 点时,因为 AP 点位置已知,就可以获得行人的行走距离,在计步准确的基础上,可以根据行走的步数计算出这两个 AP 点之间的平均步长,用此步长作为最新的步长对原来的步长进行动态校正。

2.2 步态动态调整

利用 WiFi 信号 AP 点的绝对位置消除定位累积误差的同时,也可以对步长进行动态的调整。当完成一次 AP 点位置绝对定位时无法调整步长,只有当检测到第二次 AP 点绝对位置的时候才可进行步长的调整。两个 AP 点之间的位置间隔不要超过 50 m,这样规定是为了保证在两点之间测得的航向和计步的准确,在这一前提下,利用两个 AP 点之间的绝对距离和步数,就可以修正步长数值。通过两个 AP 点位置调整步长示意图如图 7 所示。

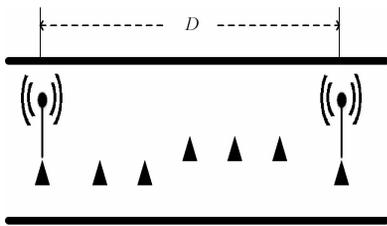


图 7 利用 WiFi 调整步长示意图

图 7 中三角形代表两个 WiFi 信号 AP 点之间惯性定位的轨迹。 D 表示两个 AP 点之间的距离,设行走的步数为 n ,则调整后的步长 S 为:

$$S_{(修正)} = D/n \quad (6)$$

3 实验与结果分析

实验环境设在学校大楼的走廊过道,实验地点平面图如图 8 所示。

图 8 中并未将所有房间的画出来,图 8 中黑三角形标示处为室内 WiFi 的 AP 点位置。

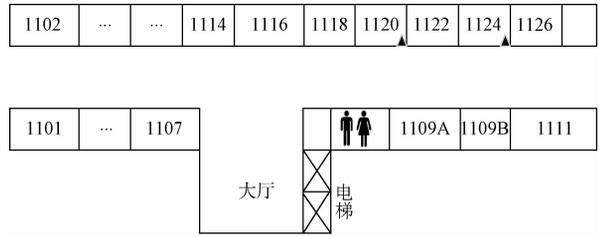


图 8 实验环境平面图

3.1 惯性传感器定位

对只用惯性传感器的 PDR 算法进行实验,验证 $s-f$ 模型的效果。实验人员要将惯性传感器实验装置固定于腰部,保持水平,在实际定位之前,需要以不同的速度任意行走一段距离,以便获取 $s-f$ 关系模型中的参数。参数标定好后,可以进行定位实验。

文献[16]中也提出了一种“步长-步频”的模型:

$$s = \begin{cases} 0.4375, 0 < f \leq 1.35 \\ 0.45 \times f - 0.17, 1.35 < f < 2.45 \\ 0.9325, 2.45 \leq f < +\infty \end{cases} \quad (7)$$

为了验证实验效果,同一个行人进行 5 组行走实验,取得数据的平均值,将两种算法模型的实验结果进行对比,结果如表 3 所示。

表 3 $s-f$ 模型实验效果对比

实际 距离/m	式(7)中 $s-f$ 模型		本文 $s-f$ 模型	
	定位距离/m	误差/%	定位距离/m	误差/%
20	20.8	4.0	20.3	1.5
40	41.8	4.5	40.8	2.0
60	63	5.0	58.4	2.7
80	84.7	5.9	83.5	4.4

根据表 3 的测试结果可见,本文提出的 $s-f$ 关系模型的定位误差比文献[16]中的 $s-f$ 关系模型的定位误差有明显的减小。对其他行人进行相同的实验,结果表明均有类似的减小定位误差的效果。

3.2 惯性传感器+WiFi 辅助定位

随着行走的距离的增大,PDR 算法的累积误差就越来越大,定位越来越不准确。此时,加入 WiFi 信号 AP 点位置辅助校准,在校准绝对位置的同时也调整步长,避免计步误差累积导致无法获取准确的步频从而影响步长估计。

在如图 8 所示的实验环境中,分别在起始位置处、60 m 处和 85 m 处放置了 3 个 WiFi 的 AP 点。第 1 个 AP 点有确定初始位置坐标的作用,当行人经过拐角处的 AP 点时,纠正定位累积误差,当经过第 3 个 AP 点时,进行 WiFi 定位的同时动态矫正步长。在进行惯性传感器定位实验时,行人以相对平缓的速度行走,这样可以保证计步准确率较高。实际验证时,行人进行 5 组实验,取结果的平均值进行

对比,得到表 4 所示数据。

表 4 PDR 和 PDR+WiFi 辅助定位效果对比

实际 距离/m	PDR 定位		PDR+WiFi 定位	
	定位距离/m	误差/%	定位距离/m	误差/%
40	40.8	2.0	40.8	2.0
60	58.4	2.7	60.2	0.3
80	83.5	4.4	79.7	0.4
100	106.3	6.3	100.8	0.8

从表 4 可以看出,PDR 算法结合 WiFi 辅助定位的效果要比单纯用 PDR 算法定位精度高。由表中可见,在经过拐角处的 AP 点时,定位误差明显减小,累积误差得以消除。在经过第 3 个 AP 点时,调整了步长,调整后的步长更接近实际步长,使得定位误差减小。经过 WiFi 辅助调整后步长的变化如图 9 所示,行走 100 m 的过程中产生了 84 个步长数据,由于累积误差导致步长越来越大,在第 62 个数据点处步长数据的跳变是由 WiFi 对步长的校准引起的,此时行人经过第 3 个 AP 点附近,步长经过校准又回到正常值,室内定位精度由此得到提升。

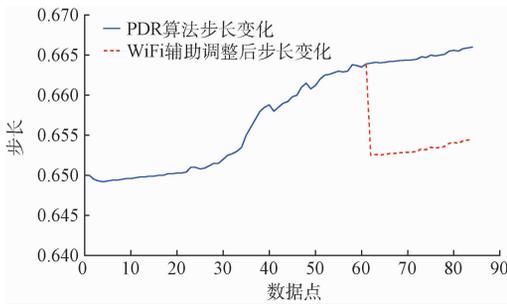


图 9 步长的变化

在 MATLAB 中分别对采用 PDR 算法定位和采用 PDR 算法结合 WiFi 定位两种方法采集到的数据进行仿真分析,画出行人的轨迹如图 10 所示。

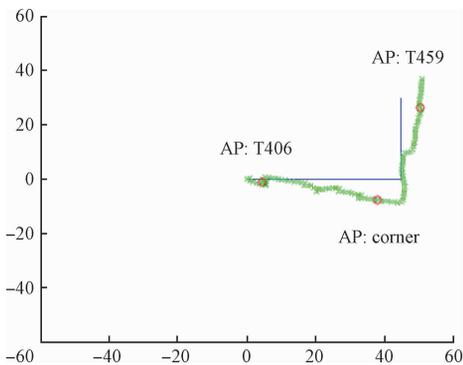


图 10 无 AP 修正时的轨迹

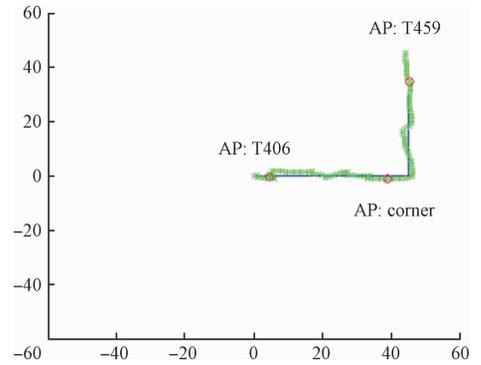


图 11 有 AP 修正时的轨迹

了走廊地板砖的个数,每个地板砖的尺寸大约是 $1.2\text{ m} \times 0.8\text{ m}$,所以横坐标每一格代表的距离为 1.2 m ,纵坐标每一格代表的距离为 0.8 m 。图中折线表示实际的行走的参考轨迹,曲线表示定位出的轨迹,圆圈表示检测到 AP 点信号时进行的标注。

从图 11 可以看出,没有 AP 修正时的轨迹对比修正过的轨迹,差别十分明显,经过修正后的轨迹明显更接近实际的行走轨迹,证明了采用惯性传感器 PDR 算法结合 WiFi 辅助校正的定位方案的可行性。

4 结 论

本文针对惯性传感器定位采用的 PDR 算法,从其步长估计阶段进行研究,提出了步长步频的关系模型,在该模型中,步长会随着步频的变化而变化,也即不同的行走速度会对应着不同的步长。经过实验验证,该算法在一定程度上提高了定位的精度。随着行走距离的增大,PDR 算法的累积误差愈加明显,本文利用 WiFi 中 AP 点的绝对位置来消除累积误差,同时利用两个 AP 点的绝对位置对步长进行动态调整,以弥补长时间的累积误差导致步长估计的偏差。经过多组实验对比,上述利用本文的 $s-f$ 关系模型的 PDR 算法结合 WiFi 辅助的定位方法明显纠正了定位误差,提高了定位精度。

参考文献

- [1] 郑学理. 基于 PDR 和 RSSI 的室内定位算法研究[J]. 仪器仪表学报,2015,36(5):1177-1185.
- [2] 丁琳,管小卫,朱霞. 基于 RSSI 的集群实时定位系统设计[J]. 国外电子测量技术,2014, 33(12):69-73.
- [3] 姚团结,魏东,等. 基于反馈校正的 WLAN 与 PDR 融合定位方法研究[J]. 仪器仪表学报,2016,37(2): 446-453.
- [4] JIN T. EV-Loc: Integrating electronic and visual signals for accurate localization [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2014, 22(4): 1285-1296.

图 10、11 中横纵坐标的值并不是代表距离,而是代表

- [5] 殷红,郭杭,邓晓华. 基于 foot-mounted 的 IMU 室内行人航位推算研究[J]. 测绘科学,2014(1): 22-25.
- [6] 任航. 基于拟蒙特卡洛滤波的改进式粒子滤波目标跟踪算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015,29(2): 289-295.
- [7] WU C, YANG Z, LIU Y, et al. WILL: Wireless indoor localization without site survey [C]. INFOCOM Proceedings IEEE, 2012:64-72.
- [8] 胡安冬,王坚,高井祥. 一种基于地图匹配辅助行人航位推算的室内定位方法[J]. 测绘科学技术学报, 2014, 31(5): 529-532.
- [9] 孙超,张美君. 基于 Kalman 滤波的头盔运动姿态的预测方法[J]. 国外电子测量技术, 2015,34(2): 82-86.
- [10] 杨理践,李晖,等. 基于容积卡尔曼平滑滤波的管道缺陷定位技术[J]. 传感技术学报, 2015(4):591-597.
- [11] 陈兴秀. 三维复杂运动模式航迹推算惯性导航室内定位[J]. 应用科学学报,2014, 32(4):349-350.
- [12] ZHANG S Z, SONG Z, MA J, et al. Indoor location based on independent sensors and WiFi [C]. International Conference on Computer Science and Network Technology, 2011:2640-2643.
- [13] 陈伟. 基于 GPS 和自包含传感器的行人室内外无缝定位算法研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2010.
- [14] 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.
- [15] 杨帆,赵冬冬. 基于 Andriod 平台的 WiFi 定位[J]. 电子测量技术,2012,35(9):116-119.
- [16] 贺锋涛,赵胜利,周广平,等. 基于模糊逻辑的室内导航步长估计方法研究[J]. 电子技术应用, 2016, 42(11):59-61.

作者简介

金彦亮, 副教授, 主要研究方向为无线通信及信号处理。

E-mail:wuhaide@shu.edu.cn

张晓帅, 硕士研究生, 主要研究方向为无线通信。

E-mail:carolynzhang1992@sina.com