

多传感器融合的手机室内三维定位试验

刘志平¹, 余前勇²

(1. 中国矿业大学 国土环境与灾害监测国家测绘地理信息局重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 中船勘察设计研究院有限公司, 上海 200063)

摘要:以智能手机为用户端平台,利用行人航迹推算(pedestrian dead reckoning, PDR)改进算法和气压测高原理设计了三维多传感器融合定位的扩展卡尔曼滤波器,基于 Android 操作系统开发了手机传感器融合的室内三维定位程序。最后,利用中国矿业大学室内外无缝定位试验场进行了定位算法性能评估。结果表明,三维融合定位方法能有效抑制漂移误差,定位精度和可靠性能够满足室内应用环境的要求,且定位精度优于 WiFi 方法和常规 PDR 方法。

关键词:智能手机;室内三维定位;行人航迹推算;扩展卡尔曼滤波

中图分类号:TN929.5;P224.8

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2015)06-0090-06

Experiments on 3D Indoor Localization of Smart Phones

Liu Zhiping¹, Yu Qianrong²

(1. NASG Key Laboratory for Land Environment and Disaster Monitoring,

China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. China Shipbuilding Industry of the Engineering Investigation & Design Co. Ltd, Shanghai 200063, China)

Abstract: With smart phones as the platform, the extended Kalman filter with 3D localization based on multi-sensor fusion was designed by using the improved pedestrian dead-reckoning algorithm and barometric altimeter, and a 3D indoor localization program for multi-sensor fused smart phones was developed based on the Android operating system. In the end, the precision and reliability of this localization algorithm were tested at the seamless localization field of CUMT. Experiment results show that by effectively restraining the drift error and having a localization precision superior to both traditional PDR algorithm and WiFi method, the 3D fusion localization method can satisfy the requirements of indoor application environment in terms of localization precision and reliability.

Key words: smart phone; 3D indoor localization; pedestrian dead-reckoning algorithm; extended Kalman filter

随着室外开阔环境下的定位技术越来越成熟,半遮掩地区和室内环境下的定位技术逐渐引起人们的关注^[1-2]。室内定位技术主要包括 WLAN(wireless local area network)定位技术、行人导航技术、超声波定位技术、ZigBee 技术、射频无线标签(radio frequency identification, RFID)技术、超宽带(ultra wideband, UWB)定位技术等^[3-5]。其中,基于内置惯性传感器的行人导航技术受室内环境影响小,具有完好的自主性和连续性,无需其他信号发射等硬件设备便可实现移动客户端(以智能手机为代表)室内定位,因而得到了广泛研究与应用^[6-9]。

收稿日期:2015-08-19

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目(2013AA12A201);大地测量与地球动力学国家重点实验室开放基金项目(SKLGED2014-3-2-E);国家自然科学基金青年基金项目(41204011)

作者简介:刘志平(1982—),男,江西九江人,副教授,主要从事导航位置服务与大地测量反演方面的研究。

E-mail:zhpliu@cumt.edu.cn

利用智能手机惯性传感器的行人导航技术,其关键在于行人航迹推算算法(pedestrian dead reckoning, PDR)^[9-12]。为提高PDR平面定位精度,一些学者开展了PDR和RFID等其他技术相结合的改进研究^[13-14]。但是,现有PDR算法在步频探测方面存在易检测出伪波峰和易误判跨步点的问题,而且仅能够提供二维平面位置。鉴于此,拟开展PDR算法改进研究,并设计三维融合定位的扩展卡尔曼滤波算法,结合智能手机惯性传感器和内置气压计进行室内三维定位试验研究。

1 室内三维定位算法

基于滑动窗口内加速度最大值的波峰探测法易检测出伪波峰,而利用行人步行过程中减速和加速交替变化的零点交叉法易误判跨步点。本研究结合波峰探测法和零点交叉法提出一种“动态窗口+峰值探测+零点交叉法”的步频探测方法,在此基础上结合陀螺仪和磁力计的方向估计,得到室内二维定位的PDR改进算法。

通过PDR改进算法可获得二维定位结果,在此基础上结合气压测高原理^[15],便可同步实现二维平面和高程定位。不过,该思路仅实现了传感器的松散组合,难以有效提高室内三维定位的精度和可靠性。因此,本研究进一步将惯性传感器和气压计进行融合数据处理(图1),设计扩展卡尔曼滤波融合算法进行位置参数最优估计。

滤波状态向量

$$\mathbf{X} = [X \ Y \ L_s \ \psi \ H]^T \quad (1)$$

其中: X, Y —载体在导航坐标系中的坐标; L_s —一步长; ψ —航向角; H —高度。

滤波状态方程

$$\mathbf{X}_k = \Phi_k \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{W}_k \quad (2)$$

其中: \mathbf{X}_k — t_k 时刻的状态向量; Φ_k —状态转移矩阵; \mathbf{W}_k —状态噪声向量。

根据PDR算法原理,可推导线性化后的状态转移矩阵为

$$\Phi_k \approx \left. \frac{\partial f}{\partial \mathbf{X}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_k} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cos \psi & -L_s \sin \psi & 0 \\ 0 & 1 & \sin \psi & L_s \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Bigg|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_k} \quad (3)$$

观测方程为

$$\mathbf{L} = \mathbf{B}_k \mathbf{X} + \mathbf{V} \quad (4)$$

设计矩阵和观测向量为

$$\mathbf{B}_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_s \\ \psi \\ H \end{bmatrix}_{\text{PDR}} \quad (5)$$

可根据手机性能和步行特征确定状态噪声和观测向量的协方差矩阵初值,分别记为

$$\begin{cases} \Sigma_{\mathbf{W}_k} = \text{diag} \{ [\sigma_X^2 \ \sigma_Y^2 \ \sigma_{L_s}^2 \ \sigma_\psi^2 \ \sigma_H^2] \} \\ \Sigma_{\mathbf{V}} = \text{diag} \{ [\bar{\sigma}_{L_s}^2 \ \bar{\sigma}_\psi^2 \ \bar{\sigma}_H^2] \} \end{cases} \quad (6)$$

上述扩展卡尔曼滤波算法实现的详细步骤见表1。

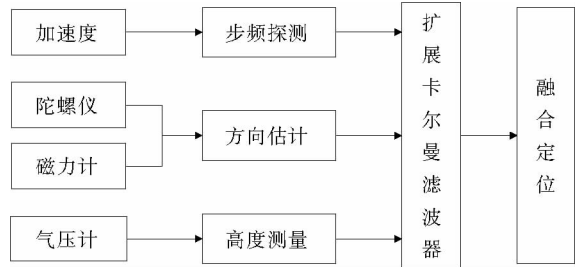


图1 三维融合定位流程图

Fig. 1 Flowchart of 3D fusion localization using multi-sensors

2 试验与结果分析

2.1 试验场地

测试场地为中国矿业大学室内无缝定位场,位于环境与测绘学院四楼(图 2),左端三角点至右端三角点连线的走廊作为定位试验区域和测试线路。

图 2 为环境与测绘学院四楼的室内地图,分为 A, B, C 三区,定位区域为三个区的走廊,并将其作为室内定位系统的试验场,走廊两侧均部署了普联(TP-Link)无线路由器,以此作为

WiFi 信号发射基站,可用于 WiFi 定位。采用三星 Galaxy SIII 型手机采集试验数据,该手机不仅搭载了加速度、陀螺和磁力计传感器,而且内置气压计传感器。数据采集平台是基于 Android 操作系统开发的应用程序,程序利用了两个线程:一个线程采集加速度、角速度和磁强数据,采样频率为 50 Hz;另一个线程采集气压数据,采样频率为 25 Hz。

表 1 扩展卡尔曼滤波算法

Tab. 1 Extended Kalman filter algorithm

已知量	观测信息	B_k, L_k, Σ_k
	状态信息	Φ_k, Σ_{w_k}
初始条件	参数初值	\hat{X}_1, Σ_{x_1}
	状态预测	$\bar{X}_k = f(\hat{X}_{k-1})$
预测值	观测向量预测	$\bar{L}_k = h(\bar{X}_k)$
	状态转移矩阵	$\Phi_k = \left. \frac{\partial f}{\partial X} \right _{x=\bar{x}_k}$
估计量	预测方差矩阵	$\Sigma_{x_k} = \Phi_k \Sigma_{x_{k-1}} \Phi_k^T + \Sigma_{w_k}$
	增益矩阵	$K_k = \Sigma_{x_k} B_k^T (B_k \Sigma_{x_k} B_k^T + \Sigma_k)^{-1}$
	状态估计	$\hat{X}_k = \bar{X}_k - K_k (\bar{L}_k - L_k)$
	估计方差矩阵	$\Sigma_{x_k} = (I - K_k B_k) \Sigma_{x_k}$

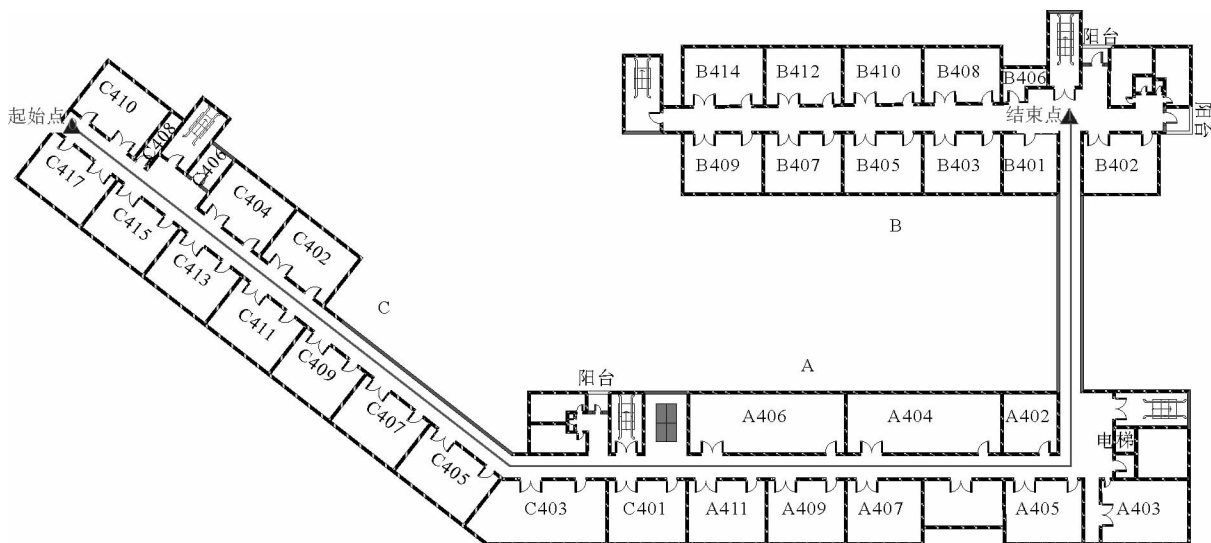


图 2 室内定位试验区域

Fig. 2 Experiments area of indoor localization

2.2 试验方案

为评估基于多传感器信息融合的三维定位算法的定位性能,设计了三维定位试验。如图 2 所示,以中国矿业大学环测学院的四楼结构底图作为依据设计了一条步行轨迹路线,走廊左端三角点为步行起始点,走廊右端三角点为步行结束点,两点间连接实线为预先设定的路线。试验共行走了 248 步,采集的惯性数据和磁场强度数据历元数均为 6 587,气压数据的历元数为 3 338,平均气温为 19 °C,参考楼层的气压平均数为 100.536 kPa。

本研究基于 Android 操作系统开发了传感器数据采集,并结合 Fortran 语言编程实现了基于 PDR 算法和气压计测高的室内定位程序。室内定位数据处理流程,如图 3 所示。

为对比三维非融合定位与三维融合定位的精度,设计三种定位方案并进行比较研究。

1)非融合定位方案:PDR 与气压计测高组合定位,不进行三维融合数据处理。

2)融合定位方案:PDR 与气压计测高进行组合,并利用三维融合定位算法进行处理。

3)WiFi 定位方案:利用 WiFi 进行平面二维定位。

2.3 试验结果分析

根据 PDR 改进算法和高度计算方法,对试验采集的数据进行处理,计算每步定位结果,并将试验结果与实际的路线相对比。以起始点为原点,利用楼道中线方向和平均步长计算点位坐标。为比较两种定位方案的精度,将平面定位与高度定位结果分开对比,如图 4 和图 5 所示。

图 4 为两种定位方案的二维结果,圆圈代表的参考点所成轨迹不含误差,星号点表示的定位轨迹含有误差。其中,图 4(a)为非融合定位的二维结果,图 4(b)为融合定位的二维结果。由图可看出,三维融合定位结果轨迹与参考点轨迹重叠度要高于非融合定位结果,尤其是在 A 区和 B 区之间的定位结果,由此说明三维融合定位较非融合定位精度更高。

图 5 为步行过程中定位点相对一楼的高度估计结果,实线表示四楼相对一楼的真实高度,星号点为步行过程中定位点的高度估计结果,图 5(a)为非融合定位的高度估计结果,图 5(b)为融合定位的高度估计结果。可以看出,三维融合定位的高度估计结果较非融合定位的高度估计结果更为集中,且更趋近于真实高度,由此说明三维融合定位的高度估计结果较非融合定位的高度估计结果精度更高。

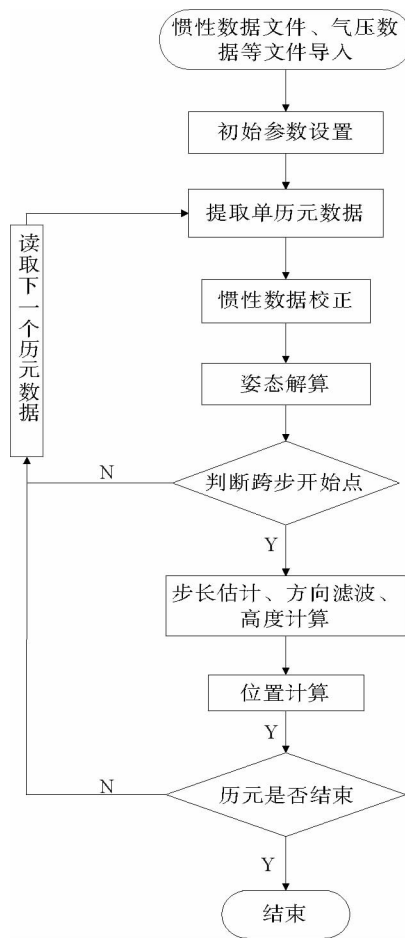


图 3 数据处理流程

Fig. 3 Flowchart of data processing

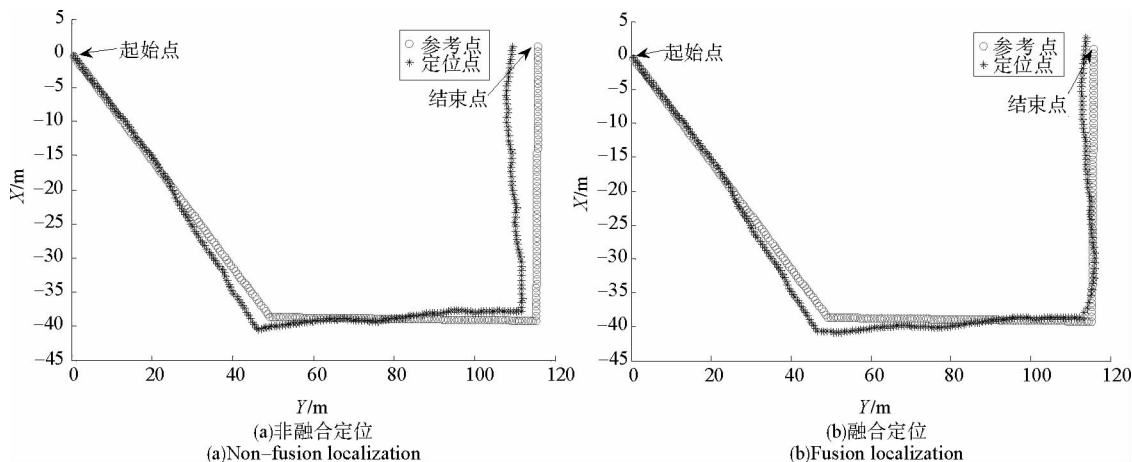


图 4 两种方案的二维定位结果

Fig. 4 Horizontal indoor localization results of two schemes

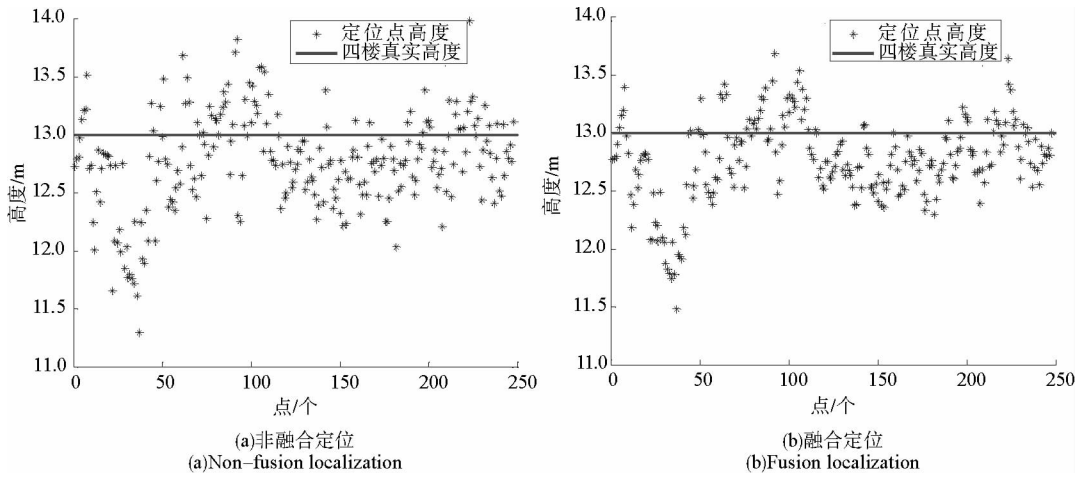


图 5 两种方案的高度估计结果

Fig. 5 Vertical indoor localization results of two schemes

为进一步评价三种定位方案的精度,将定位点坐标与参考点坐标作差,每点的高度估计结果与对应楼层的真实高作差,对比结果如图 6 所示,相应误差统计结果见表 2。

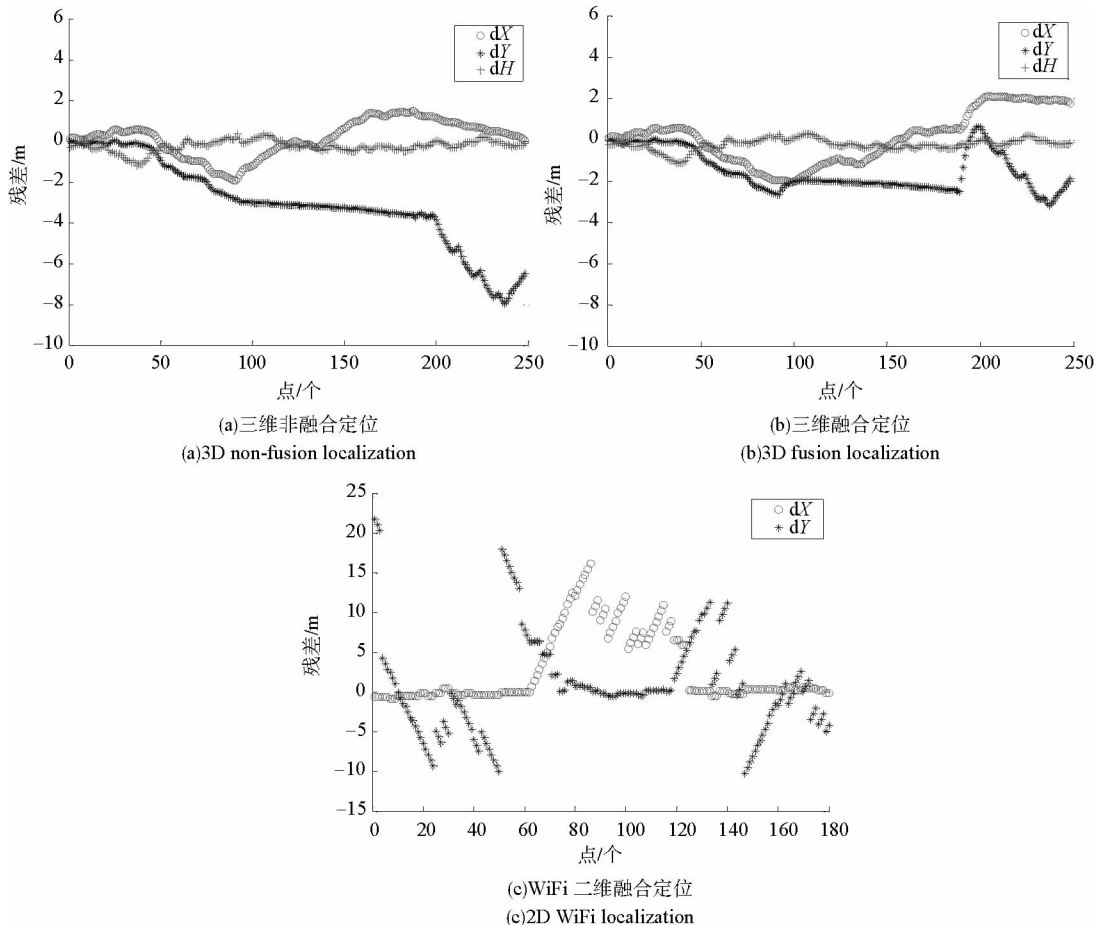


图 6 三种方案的定位残差

Fig. 6 Indoor location error results of three schemes

图 6(a)为非融合定位三维残差,图 6(b)为融合定位三维残差,图 6(c)为 WiFi 二维定位残差。可以看出,融合定位的 X 轴残差较非融合定位稍差,但基本稳定在(-2 m, 2 m);融合定位的 Y 轴残差较非融合定位精度要高,融合定位的 Y 轴残差均在(-4 m, 1 m),而非融合定位的 Y 轴残差存在较严重的漂移误差,最大约为 8 m;两种定位方案的高度残差均较小,可以准确判定行人所在楼层。而且, PDR 二维与三维融合定位结果均优于 WiFi 定位结果。此外,

由表 2 可知,融合定位的 Y 轴和高度最大误差较非融合定位要小,而 X 轴最大误差较非融合定位稍大,且非融合定位的 Y 轴最大误差达到了 7.9 m;非融合与融合定位中误差均优于 WiFi 定位结果,而且融合定位的三维误差得到了改善,表明三维融合定位方法能够提高定位精度。

3 结论

基于 Android 操作系统开发了智能手机传感器数据采集程序,设计了基于扩展卡尔曼滤波的室内三维融合定位算法,并开发了室内三维定位程序。在此基础上,利用中国矿业大学室内外无缝定位试验场进行了手机传感器融合的室内三维定位试验。结果表明,与常规的 WiFi 定位、PDR 气压非融合三维定位相比,利用 PDR 气压融合的三维定位能有效提高定位精度和可靠性,定位结果避免了漂移误差现象,同时可在复杂室内环境下准确判别楼层。

参考文献:

[1]谢翔,荆昊,郭际明. 室内环境下手机 GPS 定位精度研究[J]. 测绘通报, 2012(8):95-98.
Xie Xiang, Jing Hao, Guo Jiming. Research on accuracy of indoor-mobile-GPS positioning[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2012(8):95-98.

[2]田辉,夏林元,莫志明,等. 泛在无线信号辅助的室内外无缝定位方法与关键技术[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2009, 34(11):1372-1376.
Tian Hui, Xia Linyuan, Mo Zhiming, et al. Signals of opportunity assisted ubiquitous positioning and its key elements for outdoor/indoor environment[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(11):1372-1376.

[3]闫保中,姜琛,尹伟伟. 基于 RFID 技术的室内定位算法研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(2):320-324.
Yan Baozhong, Jiang Chen, Yin Weiwei. Research on the indoor positioning algorithm based on RFID[J]. Computer Simulation, 2010, 27(2):320-324.

[4]张瑞峰,张忠娟,吕辰刚. 基于质心-Taylor 的 UWB 室内定位算法研究[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版, 2011(6):717-721.
Zhang Ruifeng, Zhang Zhongjuan, Lü Chengang. Research of indoor location algorithm based on centroid-taylor[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2011(6):717-721.

[5]杨阳,肖金红,刘智,等. 基于超声波的室内三维定位系统[J]. 吉林大学学报:信息科学版, 2012, 30(3):267-271.
Yang Yang, Xiao Jinhong, Liu Zhi, et al. Indoor three-dimensional positioning system based on ultrasonic[J]. Journal of Jilin University: Information Science Edition, 2012, 30(3):267-271.

[6]Pratama A R, Widyawan, Hidayat R. Smartphone-based pedestrian dead reckoning as an indoor positioning system[C]//International Conference on System Engineering and Technology(ICSET). Bandung, Indonesia, Sep. 11-12, 2012:1-6.

[7]宋敏,申闰春. 室内定位航位推测算法的研究与实现[J]. 计算机工程, 2013(7):293-297.

表 2 三种方案的三维方向误差统计结果

Tab. 2 3D indoor localization error of three schemes

方案	坐标方向	最大误差/m	平均误差/m	中误差/m
非融合	X	1.927	0.156	0.883
	Y	7.921	-3.052	2.097
	H	1.705	-0.234	0.417
融合	X	2.092	0.061	1.263
	Y	3.196	-1.529	0.973
	H	1.520	-0.234	0.359
WiFi	X	16.084	2.824	4.486
	Y	21.670	0.800	6.218