

基于声波测距与 PDR 融合的手机室内定位方法

庞茂¹, 王玫², 宋湜瑜¹, 罗丽燕¹, 阮琨¹

(1. 桂林电子科技大学认知无线电与信息处理省部共建教育部重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 桂林理工大学, 广西 桂林 541004)

摘要: 在室内定位过程中, 针对行人航迹推算 (PDR, pedestrian dead reckoning) 算法中惯性传感器的累积误差随时间增大的问题, 提出一种基于智能手机的声波测距与 PDR 融合的室内定位方法。首先, 利用 PDR 进行位置推算, 然后, 利用声波测量手机与墙之间的距离, 结合已知的室内地图信息, 对 PDR 中的累积误差进行纠正。在不需要布置任何节点的情况下, 实现长时间稳定的室内定位。为解决长距离条件下墙体反射的回波信号难以检测的问题, 利用智能手机内置双麦克风的特点, 采用波束成形的方法, 对目标墙体反射的回波进行信号增强, 增大了声波测距的有效测量距离, 从而扩大了所提定位方法的应用范围。实验结果表明, 所提融合定位方法的平均定位误差为 0.427 m, 与单独使用 PDR 的定位结果相比, 平均定位误差降低了 2.748 m。

关键词: 室内定位; 声波测距; PDR; 波束成形; 智能手机

中图分类号: TP391

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2018.00054

Smartphone-based indoor localization by fusion of acoustic ranging and PDR

PANG Mao¹, WANG Mei², SONG Xiyu¹, LUO Liyan¹, RUAN Kun¹

1. Key Laboratory of Cognitive Radio and Information Processing of Ministry of Education, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China

2. Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

Abstract: A novel indoor localization algorithm that integrates acoustic ranging and pedestrian dead reckoning (PDR) algorithm was presented, to reduce the accumulated error of the inertial sensors in the process of indoor positioning using PDR. Firstly, the PDR was used for position estimation. Then, the distance between the mobile phone and the wall was measured by using sound waves, and the cumulative error in the PDR was corrected by combining the above position and the distance with the known indoor map information. Hence, long-term stable indoor positioning can be achieved without laying out any nodes. In order to solve the problem that the echo signals reflected by the wall under long-distance conditions were difficult to detect, signal enhancement on the echoes reflected from the target wall was performed by using beamforming, taking advantage of the characteristics of the built-in dual microphones in the smartphone, then the effective measurement distance was increased and the application range of the proposed method was expanded. Experimental results show that the average positioning error of the proposed fusion localization method is 0.427 m. Compared with the results of using PDR alone, the average positioning error is reduced by 2.748 m.

Key words: indoor localization, acoustic ranging, PDR, beamforming, smartphone

收稿日期: 2018-02-26; 修回日期: 2018-03-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61771151); 广西重点基金资助项目 (No.AB17292058); 广西信息科学实验中心平台建设基金资助项目 (No.PT1604); 广西自然科学基金资助项目 (No.2016GXNSFBA38014); 中国博士后科学基金资助项目 (No.2016M602921XB); 广西研究生教育创新计划基金资助项目 (No.YCSW2017137)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61771151), Key Funding Projects of Guangxi (No.AB17292058), Guangxi Information Science Experiment Center Platform Construction Project (No.PT1604), Guangxi Natural Science Foundation of China (No.2016GXNSFBA38014), China Postdoctoral Science Foundation Projects (No.2016M602921XB), Innovation Project of Foundation Guangxi Graduate Education (No.YCSW2017137)

1 引言

随着智能手机的发展和普及，基于其的室内定位技术已成为国内外的研究热点。目前，常用的室内定位技术包括行人航迹推算（PDR, pedestrian dead reckoning）、Wi-Fi、地磁、声波等^[1]，相比其他定位技术，PDR 凭借不需要任何基础设施、抗干扰性强、短时间内跟踪定位精度高的优点，成为智能手机上最常用的一种室内定位技术。然而，由于所使用的惯性传感器存在累积误差和漂移，PDR 在长时间定位过程中误差会不断增大^[2-3]。零速修正方法可以有效地消除惯性传感器的累积误差，但该方法需要将传感器固定在脚部，无法应用在智能手机上^[4]。因此，为了消除累积误差，常将其他定位技术与 PDR 进行融合。文献[5-6]通过将 PDR 与 Wi-Fi 指纹定位方法进行融合，获得了更高的定位精度。但是，受设备类型、用户方向、环境变化等因素影响，定位阶段观测到的 Wi-Fi 指纹往往与训练阶段的不一致，容易出现定位精度不稳定的情况。而且，在 Wi-Fi 接入点密度较小的定位场所，RSSI 方法的定位精度也会明显下降。Elloumi 等^[7]利用图像处理技术来辅助室内惯性导航，通过对智能手机摄像头获取的视频流进行处理，获取手机的航位角，降低了角度测量的误差。然而，在行走过程中，相机抖动会引入较大的误差。

相对无线电波，声波在空气中传播速度较慢，其传播时间更容易测量，因此，能得到较高的测距精度。Peng 等^[8]的 Beep-Beep 系统通过测量声波信号到达本机麦克风以及接收端麦克风的到达时间（TOA, time of arrival），设计了一种可以免除手机之间时间同步的测距方法，在 4 m 内对 2 个移动设备进行测距实验，达到了小于 2 cm 的测距精度。Ayllón 等^[9]将声波到达角、接收声信号功率、直达波与反射波能量比以及 RT20 混响时间作为 4 个输入特征，利用人工神经网络得到不同手机间的距离估计，在 5 m×2 m 的会议桌上进行实验，平均距离估计误差为 0.13 m。由此可见，在智能手机上进行声波测距可以得到较高的测距精度，然而，受手机扬声器发射功率有限以及噪声的影响，其仅能在 4~5 m 范围内实现精确测距。

针对上述问题，本文提出了一种基于智能手机的声波测距与 PDR 融合的室内定位方法，首先利用 PDR 进行位置推算，然后通过测量墙体反射的

回波信号的到达时间求得距离，最后结合室内地图信息对 PDR 估计的位置进行纠正，从而减小惯性传感器带来的累积误差。进一步地，利用智能手机内置双麦克风的特点，采用波束成形的方法对目标回波进行信号增强，增大了声波测距的有效测量距离，从而扩大了本文所提融合定位方法的应用范围。

2 系统方案

本文所设计的室内定位系统主要包括 PDR、声波测距以及融合定位 3 个部分，系统结构如图 1 所示。

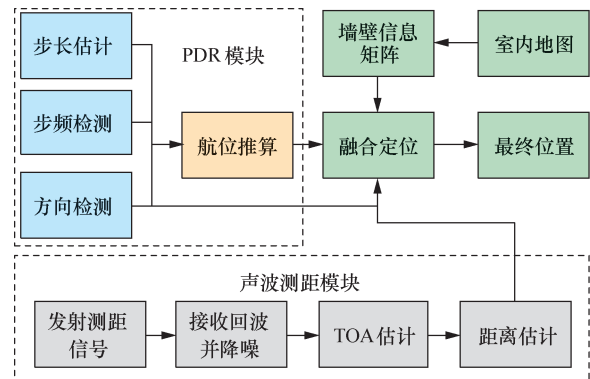


图 1 室内定位系统结构

在 PDR 模块中，采用传统的行人航位推算算法。利用手机内置的加速度计、陀螺仪、磁力计采集相应的惯性传感数据，进行步频检测、步长估计以及航向检测，从而得到行人行走的步数、步长和航向角，利用这 3 个参数即可推算出行人下一刻的位置。然而，由于惯性传感器的累积误差会随时间不断增大，PDR 只能实现短时间的高精度定位。

在声波测距模块，利用手机对目标墙体发射声波测距信号并接收回波信号，然后采用 FIR 数字带通滤波器以及波束成形的方法，对目标墙体反射的回波信号进行降噪处理，从而实现目标回波信号的增强。进一步，采用广义互相关法进行 TOA 估计，从而得到手机与目标墙体的距离估计。

在融合定位部分，从室内地图中提取墙壁坐标信息，并将其与 PDR 位置信息和声波测距信息进行融合，有效地提高了室内定位的精度和可靠性。融合的具体方法将在第 3 节进行介绍。

3 声波测距

3.1 声测距信号

线性调频（LFM, linear frequency modulation）

信号指的是频率随时间线性地增大或减小的信号，因其具有较好的抗干扰能力以及良好的自相关性，本文系统选用该类型信号作为声测距信号。LFM 信号可表示为

$$s(t) = \sin\left(2\pi\left(f_0 + \frac{f_1 - f_0}{2T}t\right)t\right) \quad (1)$$

其中， T 表示 LFM 信号的周期， f_0 与 f_1 分别代表起始频率与结束频率。

实际应用中，LFM 信号频段的选取会受到手机自身硬件的限制。手机的扬声器和麦克风主要是根据语音的用途来设计的，其在低频带具有较好的频率响应，而在高频段的频率响应特性则没有那么理想。图 2 是用华为荣耀 7 手机测试得到的声音频响曲线。由于手机的声音采样频率最高仅支持 44.1 kHz，故声波信号的最高频率要低于该采样频率的一半，所以图 2 中的测试信号选用 0~22 kHz 的 LFM 信号。由图 2 可知，当声波信号频率大于 20 kHz 时，其幅度衰减较大。由于人耳感觉不到频率大于 16 kHz 的声音，为了在定位过程中不产生扰民的噪声，取 16~20 kHz 频段的 LFM 信号作为声测距信号。同时，16~20 kHz 的声波与超声波类似，指向性较好，更有利于估测目标方向的距离。

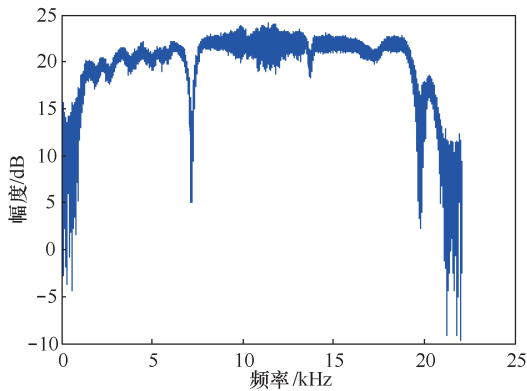


图 2 荣耀 7 手机的声音频响特性

3.2 噪声抑制

在低信噪比或长距离条件下，经过墙体反射回传的声波信号较弱，受噪声影响很大，难以实现信号检测，导致广义互相关 TOA 估计精度下降。由于智能手机的声换能器的性能是固定的，无法通过增大发射功率或提高声换能器的灵敏度来改善测距效果。噪声抑制过程如图 3 所示，为了降低噪声的影响，本文先用 FIR 数字带通滤波器对麦克风接收信号进行预处理，然后利用智能手机双麦克风可

组成线性麦克风阵列的特点，采用时延一求和波束成形 (BF, delay and sum beamforming) 的方法，对接收信号中的目标回波信号进行增强，同时抑制非目标方向的干扰和噪声，以实现弱信号检测。

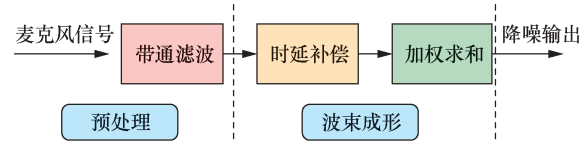


图 3 噪声抑制过程

如图 3 所示，时延一求和波束成形主要分为时延补偿和加权求和 2 个部分。首先求得各个麦克风接收目标信号的相对时延，然后进行时延补偿与加权相加，用式(2)表示。

$$y(n) = \sum_{i=0}^{M-1} (\omega_i(n)x_i(n - \tau_i)) \quad (2)$$

其中， $x_i(n)$ 表示第 i 个麦克风的接收信号， $y(n)$ 表示波束成形的输出， ω_i 是权值，本文用的是平均权值。麦克风之间的相对时延 τ_i 则可根据手机自身 2 个麦克风的几何关系求解，如图 4 所示。

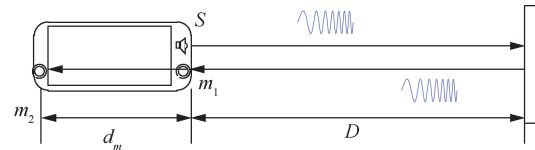


图 4 手机麦克风的相对时延求解

由图 4 可知，将手机扬声器 S 朝着目标方向发射声波信号，由于扬声器与主麦克风的间距很小，可认为经墙面反射的回波信号到达麦克风 m_1 、 m_2 的到达角相同。声波信号从发射经过反射到麦克风 m_1 、 m_2 接收所飞行的路程分别为 $2 \times D$ 和 $2 \times D + d_m$ ，则路程差等于 d_m ，从而求得 2 个麦克风的相对时延 τ 为 $\frac{d_m}{C}$ ，

C 表示声波在空气中的传播速度， d_m 表示手机 2 个麦克风在水平方向上的距离，可直接测量获得。

将所求的相对时延 τ 代入式(2)中，即可得到麦克风信号的波束成形的输出 $y(n)$ 。由于 τ 是根据扬声器所指方向（目标方向）的回波求得的，故在波束成形的时延补偿过程中，仅是对目标方向的回波信号实现了时间对齐，而其他方向上的干扰信号则存在一定的相位差，因此，输出的 $y(n)$ 在增强了目标方向回波信号的同时，也抑制了非目标方向的信号及噪声。

3.3 距离估计

由于声波没有一个准确的室内传播模型，无法通过接收信号的功率来估计距离，所以，基于手机的室内声波测距通常是通过估计声波 TOA 来求得。利用广义互相关（GCC）方法进行 TOA 估计具有以下 3 个优点：第一，接收信号与参考信号的相关性可以消除不相关的噪声，即能够抑制背景噪声；第二，在计算上，频域互相关的实现比时域互相关更高效，这可以减小手机对定位运算的处理时延，增强定位系统在手机上的实用性；第三，广义互相关可以通过加入一个频域滤波器来改善 TOA 的估计。广义互相关可以表示为

$$R(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(\omega)G(\omega)e^{j\omega\tau} d\omega \quad (3)$$

其中， $G(\omega) = S_{\text{ref}}(\omega)Y(\omega)^*$ 表示互功率谱函数， $S_{\text{ref}}(\omega)$ 和 $Y(\omega)$ 分别为参考信号与麦克风接收信号的频域表达式，上标 $(\cdot)^*$ 表示共轭运算。 $\psi(\omega)$ 表示频域滤波器，这里，令 $\psi(\omega) = \frac{1}{S_{\text{ref}}(\omega)Y(\omega)}$ ，即选

取 PHAT（phase transform filter）作为频域滤波器，因其对混响有抑制作用^[10]。当式(1)取最大值时，对应的 τ 就是所求的 TOA 估计，即

$$\tau = \arg \max_{\tau} R(\tau) \quad (4)$$

得到 TOA 估计后，将其与声音传播速度相乘，即可求得距离。声音在空气中的传播速度（单位为 m/s）与环境温度的关系为

$$C_{\text{air}} = 331.5 \sqrt{1 + \frac{T}{273.15^\circ \text{C}}} \quad (5)$$

其中， T 表示环境温度。由式(5)可知，声音在 10°C~30°C 空气中的传播速度为 338~349 m/s，速度值相差 11 m/s，若忽略温度对速度的影响，将会引入较大的测距误差。因此，有必要采取温度补偿措施，利用式(5)对声速进行修正，以提高声波测距的精度。

4 声波与 PDR 融合定位方法

图 5 为声波与 PDR 进行融合定位的过程，包括转向判断以及位置纠正。由于手机陀螺仪测量的角度抖动在 15° 以内，一般将航向角偏转大于 15° 的情况判定为发生转向，这种方法在手机发生抖动时容易造成误判。由于在墙角对角线附近测得的距离明显大于直走时的距离测量值，在转向的过程中，声波测距结果

先变大后变小。实验数据表明，转向过程中相邻时刻的距离测量值相差大于 0.6 m，而在直走过程中测量值相差均小于 0.6 m（实验中，楼梯口处的测量值由于大于所测距离被剔除）。因此，将上述结论加入转向判断中，即当航向角偏转大于 15° 且相邻时刻的距离测量值相差大于 0.6 m 时，才判定发生了转向，以此来提高转向判断的准确率。

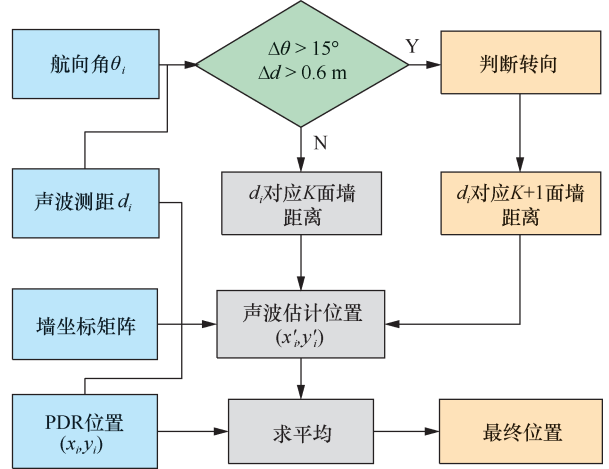


图 5 声波与 PDR 融合定位过程

由图 5 可知，融合定位开始阶段，首先利用 PDR 的航向角 θ_i 与声波测量的距离 d_i 进行转向判断，若判断没有发生转向，则 d_i 对应的是手机与 K 面墙的距离；若判断发生了转向，则 d_i 对应的是手机与 $K+1$ 面墙的距离。墙与手机的关系如图 6 所示。

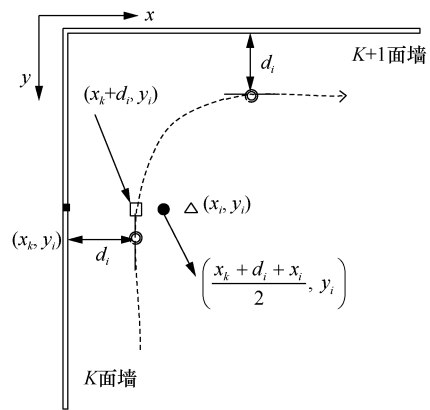


图 6 位置纠正过程

图 5 中转向判断完成后，开始进行位置纠正，即利用声波的测距结果、PDR 位置和墙坐标矩阵获取最终位置。图 6 中虚线表示人行走的轨迹，空心圆表示人的真实位置。假设没有发生转向，即 d_i 对应的是手机与 K 面墙的距离。假设 PDR 推算得到

的位置为 (x_i, y_i) (图 6 中三角形), 通过查询墙坐标矩阵得到 y_i 对应的墙坐标 (x_k, y_i) (图 6 中 K 面墙标黑处), 则根据声波测量的手机与该墙面的距离可求得声波估计的位置 $(x_k + d_i, y_i)$ (图 6 中正方形), 最后, 将声波估计的位置与 PDR 估计的位置求平均, 从而得到最终的位置估计 $\left(\frac{x_k + d_i + x_i}{2}, y_i\right)$ (图 6 中黑色圆点)。可见, 相对于 PDR 估计的位置, 最终的位置估计只是对 x 轴方向 (即声波测距方向—横向) 的坐标进行了纠正。因为本文的 PDR 使用了动态步长估计, 所以在 y 轴方向 (人行走方向—纵向) 的累积误差很小, 而且, 当发生转向后, 转向前的纵向变成了横向, 故 y 轴方向的累积误差也会在转向后逐步被声波估计的位置纠正。

5 实验结果及分析

5.1 声波测距实验

为了评估本文所提测距方法的性能, 选择在实际的室内环境进行实验。实验场景为桂林电子科技大学第 7 教学楼 7 308 会议室, 面积为 $11\text{ m} \times 7.3\text{ m}$, 如图 7 所示。实验所用移动设备为华为荣耀 7 手机, 采用 $16\sim 20\text{ kHz}$ 的 LFM 信号作为声波测距信号, 长度为 6 ms 。由于手机扬声器在发声前 $3\sim 6\text{ ms}$ 存在信号失真现象, 故在 LFM 信号前加入一段 6 ms 的正弦信号, 让扬声器在测距前进行“热身”。

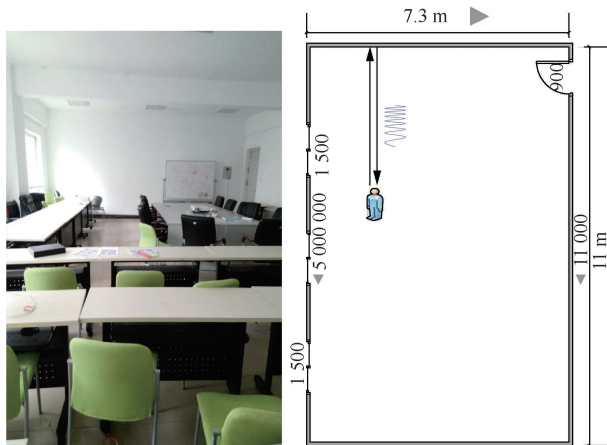


图 7 声波测距实验场景及平面图

实验过程如下: 将手机底部朝向目标墙面后, 打开 App 进行声波发射与采集。从距离墙面 1.35 m 开始, 依次增加 1 m 距离进行测量, 直到 9.35 m , 如图 7 平面图所示。实验结束后, 将手机采集的数据上传到 PC 端进行处理。

实验结果如图 8 所示, GCC 曲线表示仅用广义互相关得到的测距误差, GCC+BF 曲线表示将波束成形与广义互相关结合后进行测距得到误差。可见, 在 4.35 m 距离内, 2 种算法得到的平均误差基本一样, 为 0.232 m 。当距离大于 4.35 m 时, GCC 得到的误差急剧下降, 而 GCC+BF 在 $4.35\sim 7.38\text{ m}$ 内仍然能达到 0.274 m 的精度, 可见, 本文所提的 GCC+BF 算法比 GCC 算法增加了 3 m 的有效测量距离。

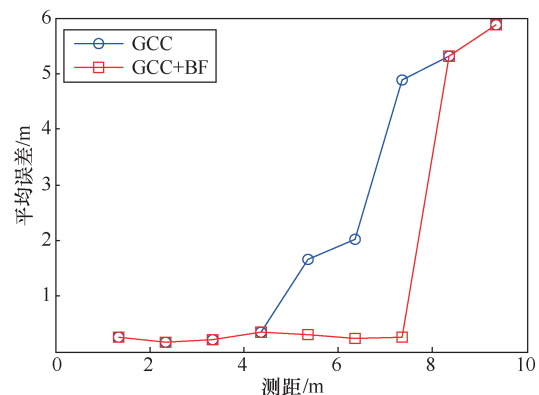


图 8 声波测距误差对比

由 GCC+BF 曲线可知, 当手机与墙的距离大于 7.35 m 时, 测距精度急剧下降。由文献[11]结论可知, 时延一求和波束成形对麦克风信号增强的效果与麦克风个数成正比, 而本文所用的智能手机仅有 2 个麦克风, 因而对信号增强效果有限。当手机与墙的距离大于 7.35 m 时, 增强后的信号仍然弱于噪声, 因此, 测距性能下降。

5.2 声波与 PDR 融合定位实验

融合定位实验的地点为桂林电子科技大学东校区图书馆 5 楼的回廊, 回廊周长为 89 m , 如图 9 所示。实验所用手机以及声波测距信号与 4.1 节实验设置一致。设置惯性传感器的采样频率为 20 Hz , 声波每隔 0.3 s 采集一次, 约为一步采集一次。假定用户的初始位置已知, 实验开始后, 用户水平横握手机, 并将扬声器一端朝向墙面, 按照图 7 的路径进行数据采集。

定位轨迹对比如图 10 所示。由图 10 可以看出, 单独使用 PDR 得到的行走轨迹与参考轨迹偏差很大, 而 PDR+声波得到的轨迹与参考轨迹较为接近。不同定位方法的误差如表 1 所示。由表 1 可得, PDR+声波得到的平均定位误差为 0.427 m , 比 PDR 的平均误差降低了 2.748 m , 这说明融合方法有效减小了 PDR 的累积误差。图 11 为本文提出的声波与 PDR 融合的定位方法的误差累积概率分布。由

图 11 可知，定位误差小于 0.8 m 的概率为 96%，达到了室内定位精度的要求。

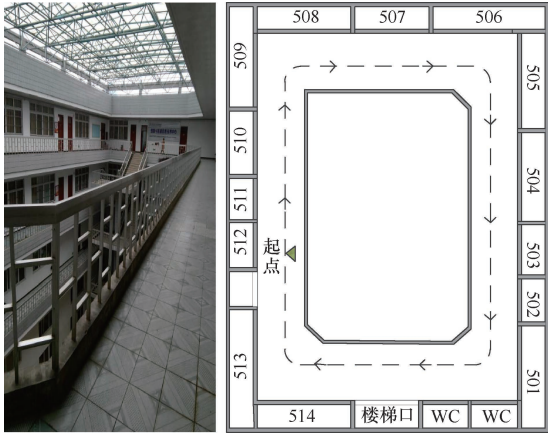


图 9 融合实验场景及平面图

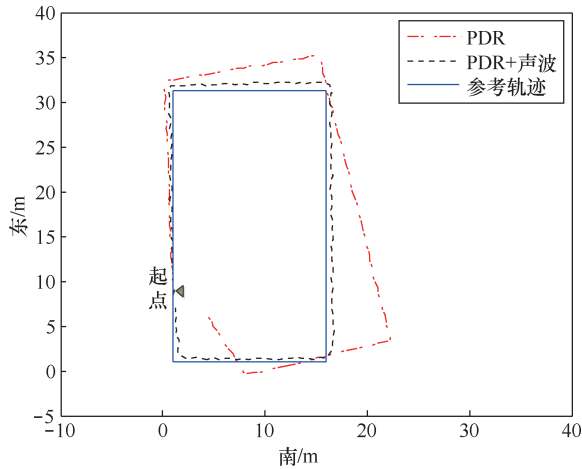


图 10 定位轨迹对比

表 1 不同定位方法的误差

定位算法	最大误差/m	最小误差/m	平均误差/m
PDR	5.216	0.082	3.175
PDR+声波	1.194	0.030	0.427

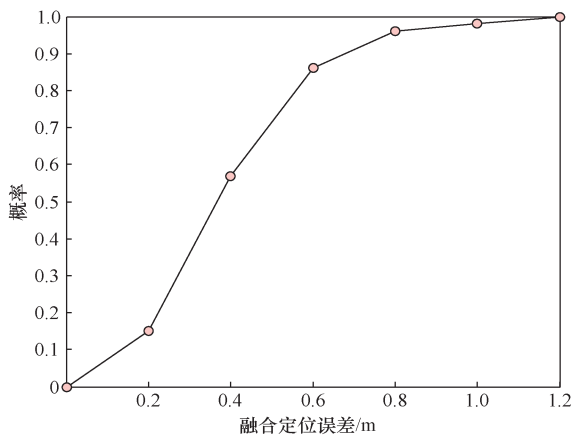


图 11 融合定位误差累积概率分布

6 结束语

本文提出的手机室内定位方法将声波测距与 PDR 进行融合，达到了 0.427 m 的平均定位精度，有效地减小了惯性传感器带来的累积误差。在不需要布置任何节点的情况下，实现了长时间稳定的室内定位，具有精度高、成本低的特点。在声波测距方面，根据手机硬件条件设计了声波测距信号，并采用广义互相关法在手机上实现了声波测距。同时，利用智能手机内置双麦克风的特点，采用波束成形的方法对目标回波进行信号增强处理，增大了声波测距的有效测量距离，从而扩大了本文所提出的融合定位方法的应用范围。本文设计的 App 目前仅实现了声波收发与传感器数据采集功能，位置的解算由电脑端处理，无法对定位系统在手机上实现的实时性、所需计算量以及能耗进行分析。下一步将就该问题展开研究，以对定位系统做进一步的改进。

参考文献：

- [1] CORREA A, LLADO M B, MORELL A, et al. Indoor pedestrian tracking by on-body multiple receivers[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(8):2545-2553.
- [2] BORDOY J, WENDEBERG J, SCHINDELHAUER C, et al. Single transceiver device-free indoor localization using ultrasound body reflections and walls[C]//International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. 2015:1-7.
- [3] LI W L, ILTIS R A, WIN M Z. A smartphone localization algorithm using RSSI and inertial sensor measurement fusion[C]// Global Communications Conference. 2014:3335-3340.
- [4] RUIZ A R J, GRANJA F S, HONORATO J C P, et al. Accurate pedestrian indoor navigation by tightly coupling foot-mounted IMU and RFID measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2012, 61(1):178-189.
- [5] KIM Y, SHIN H, CHA H. Smartphone-based Wi-Fi pedestrian-tracking system tolerating the RSS variance problem[C]// IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. 2012:11-19.
- [6] BOURIMI M, MAU G, STEINMANN S, et al. A privacy-respecting indoor localization approach for identifying shopper paths by using end-users mobile devices[C]// Eighth International Conference on Information Technology: New Generations. 2011:139-144.
- [7] ELLOUMI W, GUISSOUS K, CHETOUANI A, et al. Indoor navigation assistance with a smartphone camera based on vanishing points[C]//International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. 2014:1-9.
- [8] PENG C, SHEN G, ZHANG Y. BeepBeep: a high-accuracy acoustic-based system for ranging and localization using COTS devices[J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 2012, 11(1): 1-29.
- [9] AYLLÓN D, SÁNCHEZ-HEVIA H, GIL-PITA R, et al. Indoor blind localization of smartphones by means of sensor data fusion[C]// Sen-

sors Applications Symposium. 2015:1-6.

[10] DIBIASE J H, SILVERMAN H F, BRANDSTEIN M S. Robust localization in reverberant rooms[J]. Microphone Arrays Signal Processing Techniques & Applications, 2001:157-180.

[11] BENESTY J, CHEN J, HUANG Y. Microphone array signal processing[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 125(6): 4097-4098.

[作者简介]



庞茂 (1990-), 男, 桂林电子科技大学硕士生, 主要研究方向为位置感知与协同定位。



宋湫瑜 (1984-), 女, 桂林电子科技大学博士生, 主要研究方向为声源定位、声学场景重构与分析。



罗丽燕 (1987-), 女, 博士, 桂林电子科技大学讲师, 主要研究方向为协同定位、智能感知信息处理。



王玫 (1963-), 女, 桂林理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为位置感知与协同定位、传感器网络、能效优化。



阮琨 (1993-), 男, 桂林电子科技大学硕士生, 主要研究方向为位置感知与协同定位。