

Pseudorange Double Difference and PDR Fusion Algorithm Using Smartphone GNSS Raw Measurements

Zida Wu¹, Peilin Liu¹, Qiang Liu¹, Yuze Wang¹, Jiuchao Qian¹, Huiping Zhu¹

1. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China

1. wuzida@sjtu.edu.cn

Abstract: Limited by the low-cost antenna of mobile phones and unstable crystal oscillator, the positioning accuracy of existing smartphones can only reach about 10 meters. Compared to GNSS typical shortcomings, such as weak signal, low update rate and static divergence, high update rates and independent of outside information make IMU (Inertial Measurement Unit) become an ideal fusion option. But the analysis shows that the MEMS-based IMU owes high instability and severe cumulative errors make it difficult to directly integrate with GNSS. The target of this paper is to achieve high-precision positioning by using the GNSS chip raw observation data and IMU information. Pseudorange double difference (PDD) and PDR were chosen as the fusion algorithm sub-systems. This paper analyzes the constraints of high-precision positioning of mobile phones, and then the main error sources of GNSS were eliminated by establishing a pseudorange double-difference model based on smart phones. Afterwards an error estimation model was established to induce PDR technology to correct the positioning quality in complex environments such as tunnels and tree shade, the estimator was fed back to PDR simultaneously. Ultimately, tests were carried out in various scenarios and the performance analysis of the algorithm was given. Experiments show that compared with the traditional positioning technology, PDD-PDR fusion algorithm would show obvious better positioning performance, which can achieve 5m positioning accuracy under dynamic and static alternating motion and short-time tunnel conditions.

Keywords: smartphone; sport state monitor; PDD; PDR; Integrated Navigation

基于手机GNSS原始观测量的伪距双差与PDR融合算法

武子达¹, 刘佩林¹, 刘强¹, 王玉泽¹, 钱久超¹, 朱会平¹

1. 上海交通大学, 上海, 中国, 200240

1. wuzida@sjtu.edu.cn

【摘要】智能终端实现更高精度的米级定位需求日趋强烈,但受限于手机的低成本天线以及不稳定的晶体振荡器,现有智能手机定位精度普遍只能达到10米左右。针对GNSS (Global Navigation Satellite System)信号弱、更新率低及静态发散等缺点,惯性测量单元 (Inertial Measurement Unit, IMU)的高刷新率以及不依赖外界信息的特点使得其成为良好的融合方式,但分析表明手机IMU具有较高的不稳定性以及陀螺仪存在的累计误差,使其很难直接与GNSS相融合。本文目标是利用手机GNSS芯片原始观测测量与IMU信息实现高精度定位,通过伪距双差 (pseudorange double difference, PDD)与PDR融合算法达到更高精度定位效果。文章首先分析了手机高精度定位的制约条件,再通过建立基于智能手机的伪距双差技术来消除主要误差源,针对PDD在隧道和林荫等复杂环境下信号质量差导致定位不理想的情况,建立误差估计模型加入PDR技术进行误差校正,并实时反馈给PDR系统。最后在多种场景下展开测试并进行了算法的性能分析。实验表明,相较于传统定位技术,PDD-PDR融合算法都能表现出明显的优势,在动静态交替运动和短时隧道条件下都能达到5米的定位精度。

【关键词】智能手机; 运动监测; 伪距双差; PDD; PDR

1 引言

过去几十年, GNSS 导航系统的发展使得定位精度得到极大提高,但是受限于硬件条件以及成本问题,智能终端的精度提高特别是面向手机的导航定位精度一直处于较低的水准,而现实生活中对智能终端的高精度定位却有着强烈的需求。对于手机端的米级定位技术,一直依赖于其他定位技术,如 Wi-Fi, 蓝牙, UWB 等,但这些定位方式都需要布设大量的外界设备,并且多用于室内定位,在室外条件下不具有较好的适用性。

安卓原始观测量的开放使得手机端的实现更高精度的定位成为可能, Pesyna 等人^[1-3]通过天线和芯片外接的方式的证明手机天线和 GNSS 芯片组有能力获得高精度定位结果,而在[4]表明手机端完全有能力独立实现伪距双差(Pseudorange double difference, PDD)的高精度定位结果,同时也指出手机端的 GNSS 信号在遇到阻挡时表现极差,以及无法分辨静态的运动状态使得静态下定位结果发散,所以需要一定的辅助技术进行融合。

相比于视觉和地图匹配技术需要一定的先验知识以及大计算量,不依赖外界信息的惯性器件则成为一种理想选择。然而,低功耗 MEMS 具有很大的噪声和随机漂移,用智能手机内置 IMU 进行 INS 系统导航是不现实的,并且直接用 IMU 的加速度计进行二次积分运算对位置影响非常小,从而达不到辅助目的。行人航位推算(Pedestrians dead reckoning, PDR)技术能够很大的弥补这一点, PDR 将路径分为步态监测、步长估计和航向估计^[6],而针对每一个过程都有较为成熟的相关算法^[6],使得 PDR 在短时间内具有非常高的定位精度。但是 PDR 存在两个较为明显的问题,一是 PDR 需要外界给定有效的初值,二是陀螺仪的积分偏差会造成 PDR 产生累计误差,这种累计误差如不进行外部校正会使得定位结果完全不可用。因此,在此条件下,将 PDD 与 PDR 的结合能够很好的弥补各自系统的缺陷。

本文第二节对伪距双差模型和 PDR 技术进行了介绍,第三节给出了融合算法模型,并针对手机实现存在的问题进行了数据分析以及相应的处理方法,第四节通过实验验证融合算法的性能,最后给出结论和展望。

2 伪距差分与PDR模型

2.1 伪距双差模型

本采用文献[4]中提供的方法,通过安卓系统的 API (Application Programming Interface)获取的手机原

始观测量,组装成RINEX格式的数据文件,进而获得伪距和多普勒等观测量。伪距和多普勒的观测方程如下所示:

$$\rho_u^{(n)} = r_u^{(n)} + \delta t_u - \delta t^{(n)} + I_u^n + T_u^n + \xi_{pu}^{(n)} \quad (1)$$

$$\dot{\rho}_u^{(n)} - \mathbf{v}^{(n)} \cdot \mathbf{l}_u + \delta f^{(n)} - \xi_{pu}^{(n)} = -\mathbf{v}_u \cdot \mathbf{l}_u + \delta f_u \quad (2)$$

其中,上标 n 代表卫星号, ρ 表示从由发射时间和接收时间差而获得的手机伪距观测值, r 代表着卫星到用户的真实距离, I 和 T 代表着电离层和对流层误差, ξ 代表伪距测量中的其他误差, f 代表多普勒观测中的频率漂移, \mathbf{l} 表示从卫星指向用户的单位向量, \mathbf{v} 代表用户了卫星的速度。

如果直接采用传统卡尔曼滤波器,则该非线性系统需要引入扩展卡尔曼系统(Extended Kalman Filter, EKF)进行线性化。同时,电离层和对流层可能会产生几十米的误差,在之前的研究中[4]也指出,手机 GNSS 时钟具有较强的不稳定性,会产生间歇性的钟漂。因此我们通过伪距双差方程来消除或减弱上述误差项,在伪距双差系统中,基于短基线假设, $I_r = I_u$, 在 10km 范围内 $r_{ur} = -b_{ur} \cdot \mathbf{l}_r$, 由此基线向量 \mathbf{l} 不再由手机端获取,从而使得手机端的速度和位置关系解耦,原非线性系统也变为线性系统,传统卡尔曼滤波器即可适用。作为代价的是,假设双差模型的噪声是高斯噪声,则差分后的系统噪声将是原噪声方差的两倍,并且,最低需要 5 颗可见且有效的卫星方可进行差分定位。

伪距双差系统的观测过程:

$$\begin{bmatrix} \rho_{ur}^1 - \rho_{ur}^j \\ \rho_{ur}^2 - \rho_{ur}^j \\ \vdots \\ \rho_{ur}^i - \rho_{ur}^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[I_r^{(1)} - I_r^{(j)}] \cdot \mathbf{v}_u \\ -[I_r^{(2)} - I_r^{(j)}] \cdot \mathbf{v}_u \\ \vdots \\ -[I_r^{(i)} - I_r^{(j)}] \cdot \mathbf{v}_u \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \rho_{ur}^1 - \rho_{ur}^j \\ \rho_{ur}^2 - \rho_{ur}^j \\ \vdots \\ \rho_{ur}^i - \rho_{ur}^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[I_r^{(1)} - I_r^{(j)}] \cdot b_{ur} \\ -[I_r^{(2)} - I_r^{(j)}] \cdot b_{ur} \\ \vdots \\ -[I_r^{(i)} - I_r^{(j)}] \cdot b_{ur} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$K = P_k C^T (C P_k C^T + R)^{-1}$$

其中 ρ_{ur} 表示用户伪距观测值减去基准站伪距值, K 表示增益矩阵, R 表示观测噪声矩阵, C 代表观测向量和状态向量的关系矩阵。

预测过程:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{b}_{ur} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{ur} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, \mathbf{b}_{ur} 代表用户到基准站的基线向量, \mathbf{v} 代

表用户速度。

2.2 PDR模型

传统的 PDR 算法是基于捆绑在行人身体上的 IMU 来进行航位推算^[7],由于 IMU 固定在行人身体上,使得惯性传感器采集到的惯性信号能够准确反映行人的动作,通过零速校正 (Zero velocity update, ZUPT)^[8]方法进行获取行人准确的定位位置,但是在实际应用中会对行人的行走方式进行限制,甚至会给行人的行走带来不便,使得基于固定在行人脚上的传感器的 PDR 算法很难在实际中普遍应用。所以针对智能手机的 PDR 算法才有了相应改进和补充。

通常来说, PDR 由三部分组成: (1) 步态监测 (2) 补偿估计 (3) 航向估计。本文根据手机 MEMS 特性在三个部分中分别采用的方法如下:

Step1: 步态检测

采用峰值检测法^[9],即在行人行走过程中,脚步起落前后, 竖直方向的加速度发生剧烈变化, 形成信号波峰, 在设定阈值后监测每个周期内的信号峰值, 并对峰值技术即可判断行人的步数。

Step2: 步长估计

步长估计分为经验模型^[10], 线性模型^[9]、非线性模型^[11]和人工智能模型^[12]等, 为了方便起见, 我们选用线性模型中的一种:

$$S = K \cdot \sqrt[4]{a_M - a_m} \quad (5)$$

其中 K 是估计参数, 可以通过室内训练得到估值, a_M 为一个周期内竖直加速度的最大值, a_m 为一个周期内竖直加速度的最小值。

Step3: 航向估计

PDR 的航向估计分为 INS 和 SHS^[6], 其中 INS 是 3 维姿态, 而 SHS 则是 2D 姿态, 而 SHS 又有 6 轴和 9 轴之分, 磁力计易受干扰所以我们用 6 轴信息进行融合得到航向。由于加速度计动态性能不佳, 而陀螺仪长期存在累计误差的特点, 本文采用 Madgwick 的姿态估计算法^[13]进行姿态校准, 以陀螺仪为主, 加速度计进行修正而得到航向估计角。

3 PDR-PDD融合算法

3.1 数据预处理

为了准确地完成行人步态检测, 在采用上述 PDR 算法之前, 通常会对行走过程中实际采集的加速度信号进行预处理。由于实际采集的加速度信号中会存在高频噪声, 所以利用低通滤波器对信号进行去噪。鉴于行人的步频特性, 设计了等波纹 FIR 低通滤波器对 IMU 数据进行预滤波, 截止频率设置为 3HZ。在预滤

波之后, 考虑到行人步行是低动态运动, 为了进一步平滑结果, 将低通滤波后的数据每三个点选择一个点作为有效值, 并在两个有效值之间通过多项式插值以恢复未被记录的两个点。

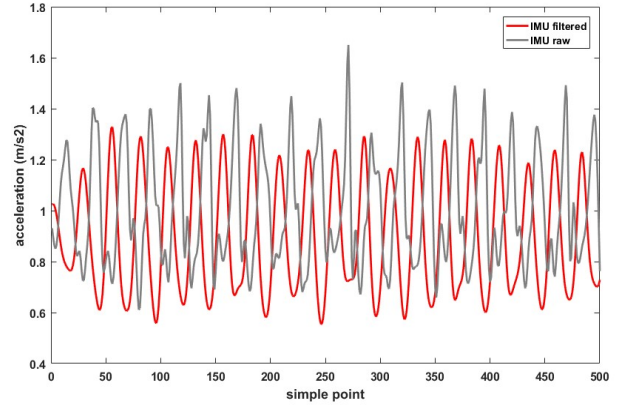


Figure 1. Comparison of IMU pre- and post-processing data

图 1. IMU 预处理前后数据对比图

从上图可以看出, 经过预滤波等处理之后, IMU 数据明显得到了平滑, 而且突变点会得到抑制。

由于 GNSS 定位结果不平滑, 为了使得 GNSS 求算的偏航角更加平滑, 先对 GNSS 信号进行一步 Kalman 滤波。因为步行姿态变化率较低, 所以由两级滤波器导致的时间延迟是可以接受的。

GNSS 的偏航角估计一般有两种方式, 一种是基于位置的^[14]:

$$\varphi^{GNSS} = \arctan\left(\frac{\Delta P_k^{GNSS,E}}{\Delta P_k^{GNSS,N}}\right) \quad (9)$$

其中 ΔP 代表在第 k 步的位移矢量, E 和 N 代表方向。

一种是基于速度的^[15]:

$$\varphi^{GNSS} = \arctan\left(\frac{V_k^{GNSS,E}}{V_k^{GNSS,N}}\right) \quad (10)$$

其中 v 代表第 k 步的多普勒频移求算的速度值。

理论上卫星多普勒的精度远大于伪距精度, 其速度精度也大于位置精度, 并且由于位置是由卡尔曼滤波得到, 前后位置具有相关性, 而多普勒值没有时间相关性, 在真实的实验数据分析中也可以说明这一点。

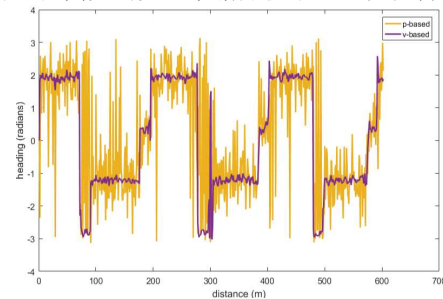


Figure 2. Comparison of velocity-based and position-based estimation of yaw

图 2. 基于位置和基于速度的偏航角估计对比图

从上图可以看出，基于多普勒频移得的速度值所估算出来的偏航角显著优于由位置估算的偏航角，所以实际判断中我们将采用基于速度的偏航角估算方法。

3.2 融合算法

考虑到 PDR 与 GNSS 各自的特点，PDR 得到的路径具有很强的连续性，不会出现断点，且航向估计短时间内可信度很高，而 GNSS 不会出现累积误差，但短时间内的误差较大的特点，本文选择在解算的位置、速度、偏航角估计上对两个系统进行紧耦合。

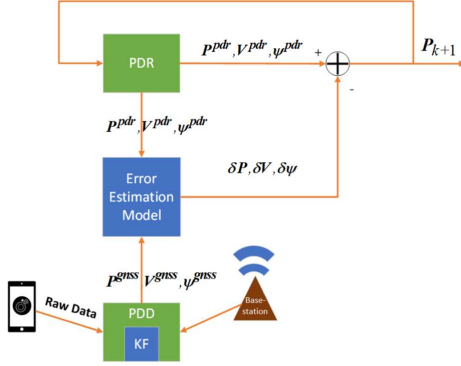


Figure 3. PDD and GNSS fusion algorithm framework

图 3. PDR 与 GNSS 融合算法流程图

融合算法框图如图 3 所示，手机原始观测量和基准站的观测量首先在通过一次 Kalman 滤波得到 PDD 定位结果，与 PDR 此刻的相关数据送入误差估计模型，进行二阶 Kalman 滤波，再通过此误差估计值去校正 PDR 定位结果，由于 PDR 的位置估计是马尔可夫过程，下一步时刻位置包含了上一步的累积误差，并且相对于 GNSS 系统，PDR 的更新率更高，所以将此时的位置校正值反馈给 PDR 系统作为下一时刻的初值。由相对于无反馈的融合系统，该算法可以实时校正 PDR 的漂移，从而防止时间过长引起的累积误差。

PDR 的航向与手机 Y 轴（API 指定，即屏幕正上方）重合，PDR 的速度定义为一次步长内的平均速度，由以下公式获得：

$$V_k^{PDR} = \frac{S_k}{t_k - t_{k-1}} \quad (6)$$

其中 S 代表步长， t_k 代表第 k 步的时间点。

位置估计由以下公式获得：

$$E_k = E_{k-1} + S_{k-1} \cdot \sin(\varphi_{k-1}) \quad (7)$$

$$N_k = N_{k-1} + S_{k-1} \cdot \cos(\varphi_{k-1}) \quad (8)$$

其中 E 代表在东北天（East North Up, ENU）坐标系下的 E 方向的位置坐标，N 代表北方向的位置坐标， φ 代表偏航角。

需要注意的是，用伪距和多普勒获得的位置和速度矢量是在 WGS84 世界坐标系下的，而 PDR 则是在

ENU 坐标系下，所以需要将 GNSS 定位结果映射到 ENU 坐标系。

PDR 与 GNSS 融合误差卡尔曼滤波器观测过程：

$$\begin{bmatrix} W \cdot P^{GNSS} - P^{PDR} \\ W \cdot V^{GNSS} - V^{PDR} \\ W \cdot \varphi^{GNSS} - \varphi^{PDR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta P \\ \delta V \\ \delta \varphi \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中 P 代表位置向量，V 表示速度向量， φ 表示偏航角，W 是与 GNSS 信号的载噪比相关的一个权重函数。在误差模型中，这一步加权非常重要，因为误差代表了 PDD 与 PDR 误差的可信任度，即相信 GNSS 定位精度的程度。由于 GNSS 误差并不是严格服从高斯分布，而且误差模型通过 KF 滤波，故可以总体上认为，在 GNSS 卫星的信噪比高的时候可信度高，则校正更偏重于 GNSS。W 定义为：

$$W = \frac{\sum cnr_i}{50n} \quad (12)$$

其中 cnr_i 代表这一时刻用于定位的第 i 颗卫星的载噪比，n 代表此时用于定位的有效卫星数之和，而 50 dB-Hz 是根据经验值得到的 CNR 的最大载噪比值。

预测过程：

$$\begin{bmatrix} \delta P_k \\ \delta V_k \\ \delta \varphi_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta P_{k-1} \\ \delta V_{k-1} \\ \delta \varphi_{k-1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中 δP 代表 GNSS 与 PDR 的定位误差，用于校正 PDR 的位置偏差， δV 用来校正 PDR 的速度偏差， Δt 值得是第 k 步与 k-1 步的时间差。虽然 GNSS 与 PDR 的系统噪声频率不一样，但均假设高斯白噪声，且噪声矩阵与 PDD 和 PDR 各自系统的噪声功率谱密度相关。

理论上，长期来看，GNSS 还起到校正步长的作用，与此同时，PDR 减弱了对差分系统信号要求的依赖性。尽管 Android API 24 提供了评价 GNSS 数据可靠性的指标，但是我们依据经验额外设定了一些阈值，比如将 GNSS 卫星仰角门限设置为 15 度，CNR 门限设置为 15dB，关于其他原始观测量的阈值设置见文献 [4]。考虑到信号与智能手机硬件的不稳定性一些限制条件，考虑到信号误差与实际行走特点，判断 GNSS 单位时间（1s）内移动超过 20m，则判定为信号不可用，即 $\|P_{x,y,k} - P_{x,y,k-1}\| < 400$ 。另外，手机 GNSS 芯片只有 1Hz 的低更新率，而 PDR 每步的时间 < 1s，所以实际上，我们将通过如下图所示的时间戳对齐方式，进行的粗略时间对准，如图 4 所示，这将会导致最多 1s 的时间误差。

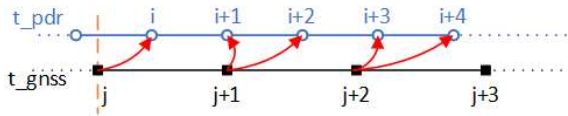


Figure 4. Timestamp alignment of PDR and GNSS
图 4. PDR 与 GNSS 不同步情况下时间戳对齐方式

4 实验设计与结果分析

4.1 实验设计

本实验平台是华为 P10，内置 GNSS 芯片是 Broadcom BCM4774，手机 IMU 采样频率是 50HZ，搭载 South HYBLRB02R 的 U-blox-m8p 为对比实验同时测试。实验测试环境分别为：（1）两侧有树木直行的马路，（2）通过两次短隧道的回环路线，（3）林荫路下的回环路线。融合定位结果将映射到百度地图。

4.2 实验结果

融合结果如下所示，三种测试环境都将给出伪距双差（pseudorange double difference, PDD）、纯 PDR 和 PDR-PDD 融合算法的定位结果对比，路径由 U-blox-m8p RTK 模式进行标定作为标定值。真实测试环境实景图如下：

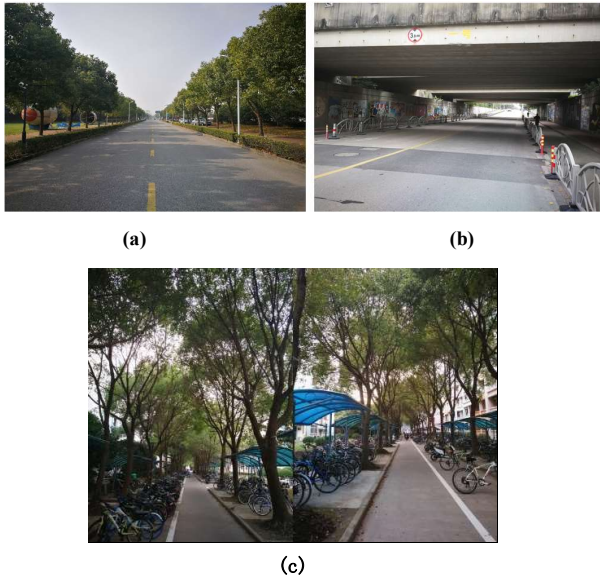


Figure 11. The photo of the three test scenarios
图 5. 三种测试环境的实景图

上图中 (a) 给出了马路的实景照片，路宽度为 10 米，路边存在着两排树木以及建筑物，空旷的室外条件使得可见卫星数以及信号质量都足够提供有效的定位结果；图 (b) 给出了隧道的实景图，隧道并非完全隔绝信号，依然允许有微弱的 GNSS 信号通过；图 (c)

给出了林荫回环的实景图，路宽两米，路正上方信号被树木遮挡。

4.2.1 空旷马路

本段实验地点选取 800 米长的直线马路，行走中在起点终点以及中间阶段一共存在 5 个停止行走点。

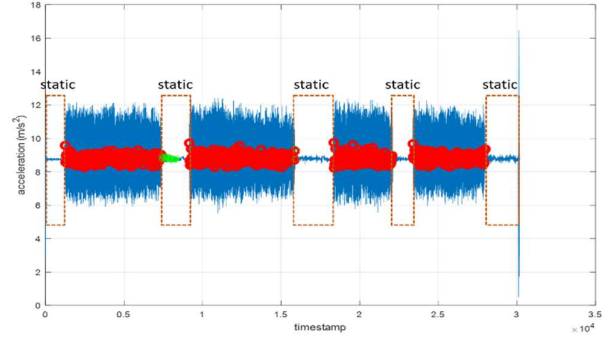


Figure 6. The peak detection algorithm of PDR
图 6. PDR 步态检测算法结果图

上图给出了步态检测结果，检测图中说明通过本文的滤波和预处理方法后可以很清晰的分辨出行人运动导致的加速度计的震荡，步数检测为 757 步，实际行走 757 步，可以达到 100% 的正确率。

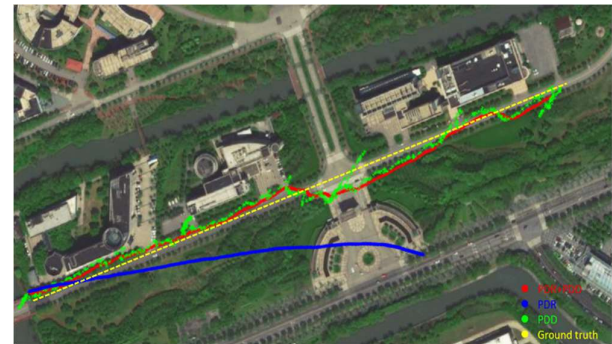


Figure 7. The comparison results between PDR/PDD/PDR-PDD algorithms on road

图 7. PDR、GNSS 与 PDR-PDD 融合算法马路定位结果对比图

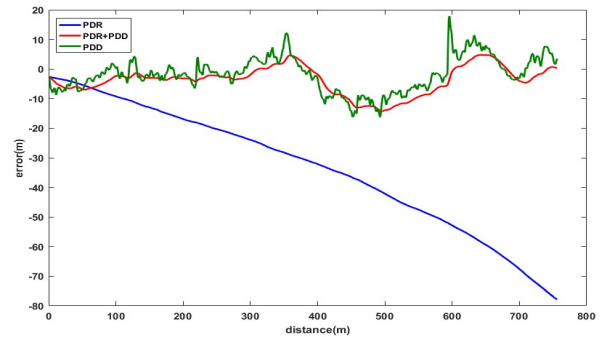


Figure 8. The comparison curves of horizontal error.

图 8. PDR、GNSS 与 PDR-PDD 融合算法马路水平误差对比图

在上图中可以看出，在行进中五个静置的位置处定位结果明显发散严重，而且在某些时段中存在向某一方向的偏移，说明道路两侧的树木和建筑对 GNSS 的信号存在一定程度的多径干扰；纯 PDR 的定位结果不存在发散问题，以及定位结果非常平滑，但存在的问题是 PDR 的累积误差导致其中段之后对定位结果发生了快速的漂移，并且由于初值的不准确，使得 PDR 始终不能够回到正确的轨迹中来。与此同时，本文的 PDR-PDD 融合算法的定位结果误差标准差为 3.3 米，既保持了平滑的特点，并且不会受到 PDR 的累积误差的影响，使得结果始终保持在 ground truth 附近。

4.2.2 隧道回环

本段实验地点选取 1km 长的方形回环路线，其路线的北段和南段分别存在 65 米和 40 米的短暂隧道，行走全程没有停顿点。

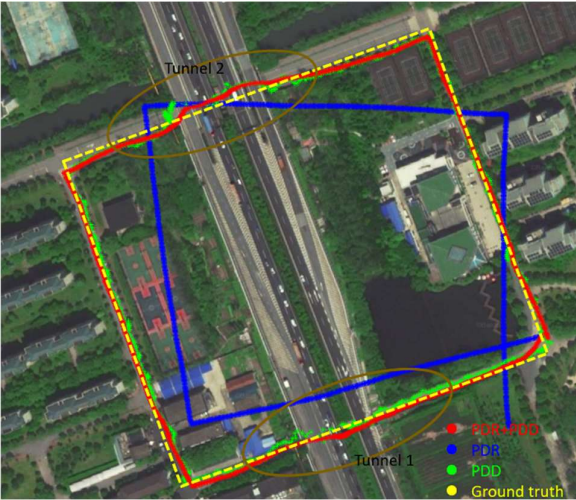


Figure 9. The comparison results between PDR/PDD/PDR-PDD algorithms on tunnel loop

图 9. PDR、GNSS 与 PDR-PDD 融合算法隧道回环定位结果对比图

在图 10 中可以看出，相比于第一次在空旷马路上动静态结合运动，连续运动下的 PDD 在信号状况良好的情况下不存在发散点，且在隧道外的区域定位误差在 5 米以内，但是通过隧道段的时候，定位结果明显出现了发散情况，且在隧道区域内定位的密度小于正常环境，这是由于隧道条件下，PDD 的定位点主要由进入隧道前的位置和多普勒在 Kalman 滤波器中的残余值预测产生；而纯 PDR 算法中，由于初始航向的估计失误以及两次转弯的角度估计出现误差，导致回环终点与初始点出现了大约 100 米的偏差，而且定位轨迹与实际轨迹相差较大；与此同时，本文 PDR-PDD 算法定位轨迹在无隧道区域有着 GNSS 相同的准确度，

而在两段隧道段，定位轨迹平稳连续，且回环终点与起点近乎可以认为处于相同位置，说明融合算法非常有效。

4.2.3 树荫下回环

本段实验地点选取 840 米长的林荫下的矩形回环路线，其路线的长边 300 米，短边 120 米，行走全程没有停顿点。



Figure 10. The comparison results between PDR/PDD/PDR-PDD algorithms on shade loop

图 10. PDR、GNSS 与 PDR-PDD 融合算法林荫下回环定位结果对比图

在上图中，可以看出林荫对信号的阻挡作用对 GNSS 的信号影响很大，且 PDD 的误差大于 10 米，而纯 PDR 算法虽然准确的反应出了行人矩形轨迹，但是由于步长估计的原因导致 PDR 路线轨迹在路口提前发生了偏转；与此同时，PDR-PDD 融合算法的定位结果中，能够大致反映出行走轨迹且方差相对 PDD 和 PDR 都小，但是相比于前两次马路和隧道实验中的轨迹依然有更大的不平滑效果，这是由于 PDD 的定位效果太差，导致在平滑过程中依然出现了较大的误差，这也说明在本文当前的额 PDR 与 PDD 融合算法中，如果有一方系统出现质量很差的情况时，会导致融合结果也出现较大的偏差。尽管如此，PDD-PDR 融合算法相较于其他算法依然表现优异。

Table 1. Algorithm results of different experiments				
场景	误差项	PDD	PDR	PDR-PDD
空旷马路	均值(m)	4.8	45.2	4.5
	标准差(m)	7.4	49	5.2
隧道回环	均值(m)	7.1	71.5	3.2
	标准差(m)	8.1	74.2	3.5
林荫回环	均值(m)	16.2	21.3	8.8
	标准差(m)	19.3	22.1	10.7

表 1. 各种实验条件下的算法结果对比

5 结束语

本文提出了基于智能手机的PDR-PDD融合算法,首次实现了利用原始 GNSS 观测量和内置 MEMS-IMU 的高精度定位。文章根据手机器件的特性做出了针对性的数据处理,把伪距双差结果通过误差模型滤波后实时同步校正 PDR 系统,并通过反馈系统避免了累计误差造成的偏移。实验证明,在动静态交替运动,短时间信号缺失以及林荫下信号质量差的情况下都能达到良好的定位结果,但同时发现在融合过程中,如果某一子系统出现大误差点会对融合结果产生较大影响。在下一步研究工作中,将会在原始观测量层面上提前估计信号可靠性来影响 PDD 系统权重,从而避免大误差点对整体系统的干扰。

References (参考文献)

- [1] Banville S, Diggelen FJGW. Innovation: Precise positioning using raw GPS measurements from Android smartphones. 2016
- [2] Pesyna Jr KM, Heath Jr RW, Humphreys TE, editors. Centimeter positioning with a smartphone-quality GNSS antenna. Radionavigation Laboratory Conference Proceedings; 2014.
- [3] Humphreys TE, Murrian M, Pesyna Jr KM, Podshivalov S, van Diggelen F, editors. On the feasibility of cm-accurate positioning via a smartphone's antenna and GNSS chip. Radionavigation Laboratory Conference Proceedings; 2016.
- [4] Wu Z, Liu P, Liu Q, Wang Y, "MEMS-based IMU Assisted Real Time Difference Using Raw Measurements from Smartphone," Proceedings of the 31st International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018), Miami, Florida, September 2018, pp. 445-454.
- [5] Qian J, Ma J, Ying R, Liu P, Pei L, editors. An improved indoor localization method using smartphone inertial sensors. Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2013 International Conference on; 2013: IEEE.
- [6] Harle RJCS, Tutorials. A survey of indoor inertial positioning systems for pedestrians. 2013;15(3):1281-93.
- [7] Gadeke T, Schmid J, Zahnlecker M, Stork W, Muller-Glaser KD, editors. Smartphone pedestrian navigation by foot-IMU sensor fusion. Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation, and Location Based Service (UPINLBS), 2012; 2012: IEEE.
- [8] Park SK, Suh YSJS. A zero velocity detection algorithm using inertial sensors for pedestrian navigation systems. 2010;10(10):9163-78.
- [9] Levi RW, Judd T. Dead reckoning navigational system using accelerometer to measure foot impacts. Google Patents; 1996.
- [10] Chen R, Pei L, Chen Y, editors. A smart phone based PDR solution for indoor navigation. Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation; 2011.
- [11] Alvarez D, González RC, López A, Alvarez JC. Comparison of step length estimators from wearable accelerometer devices. Encyclopedia of Healthcare Information Systems: IGI Global; 2008. p. 244-50.
- [12] Beauregard S, Haas H, editors. Pedestrian dead reckoning: A basis for personal positioning. Proceedings of the 3rd Workshop on Positioning, Navigation and Communication; 2006.
- [13] Madgwick SJRx-i, Bristol Uo. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. 2010;25:113-8.
- [14] Lan H, Yu C, El-Sheimy N, editors. An integrated PDR/GNSS pedestrian navigation system. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2015 Proceedings: Volume III; 2015: Springer.
- [15] Hsu L-T, Gu Y, Huang Y, Kamijo SJISJ. Urban pedestrian navigation using smartphone-based dead reckoning and 3-D map-aided GNSS. 2016;16(5):1281-93.