

基于 AHRS 与 PDR 融合的个人室内自定位方法研究^①

彭 锐^② 程 磊^③ 代雅婷 赵熙桐

(武汉科技大学信息科学与工程学院 武汉 430081)

摘 要 针对个人室内自定位问题,本文提出了基于航姿系统(AHRS)与行人航位推算(PDR)融合的自定位方法。该方法分为 4 部分:在步频测量中通过加速度计数据变化反映行人步行状态,在步长估计中利用模糊决策的方式获得较为合理的计算步长,在姿态估计中使用 AHRS 来得到低动态下个人相对精确的姿态信息,在位姿计算中结合步长和姿态数据最终计算得到个人的位姿信息。进行了不同室内环境下的实验以及与 PDR 方法的仿真对比,实验结果证明了该方法的可行性,仿真对比结果表明了该方法的有效性,室内定位误差不超过 0.5m。

关键词 个人室内自定位, 航姿系统(AHRS), 行人航位推算(PDR), 模糊决策

0 引 言

目前个人室内自定位^[1,2]方法一般分为两类,第一类是基于射频信号定位(GPS 信号不理想),但这种定位需要移动通信基站^[3]和无线网络接入点^[4]等外部设备支持,和预先建立室内环境的 RSSI 数据库^[5]。第二类是基于自包含传感器的定位技术^[6],其突出优势在于导航定位的自主性和连续性。最普遍的自包含传感器包括惯性传感器、磁罗盘、气压计和倾斜仪等。第一类方法存在环境约束,只有在外在环境满足约束,基于它们的定位方法才可以使用,这无疑是不方便的。第二类方法则不存在环境约束,没有对环境提出任何要求,自包含传感器获取外界环境观测数据,通过一些间接手段来估算自己的位置,具有独特的优势和广阔的前景。传统的陀螺仪和加速度计组成的惯性导航系统^[7],算法简单,可以实现室内定位,但存在加速度累计误差、长期定位精度差的问题。针对惯性导航积分机制的弊端,Judd 和 Levi^[8]在前人的研究基础上提出

行人航位推算(pedestrian dead reckoning, PDR)方法,算法复杂度适中而且一定程度上避免了累计误差,提高了定位精度,但是存在角度漂移问题,长距离定位精度一般。近年来,为了更进一步提高定位精度,借鉴移动机器人同步定位以及制图原理(simultaneous location and mapping, SLAM)^[9],有学者引入了视觉传感器和激光雷达等传感器。Mur-Artal^[10]的 ORB_SLAM2 系统利用 ORB 特征进行视觉定位与构图,室内定位精度较好。Zhang^[11]提出的 V-LOAM 系统使用视觉与激光里程计融合的方法进行定位与构图,室内和小范围室外环境下定位精度良好。但是这类算法的计算复杂度过高,对设备要求较高,执行效率偏低,不适用于个人室内定位。此外还有多种自包含传感器定位算法^[12]以及多传感器组合定位方案^[13],它们主要侧重于提高定位精度及降低算法复杂度。

因此,本文根据第二类方法的研究现状提出了基于航姿系统(attitude heading reference system, AHRS)与行人航位推算(PDR)融合的个人室内自

① 国家自然科学基金(61203331,61573263),湖北省自然科学基金(2014CFB813),湖北省科技支撑计划(2015BAA018)和湖北省教育厅科研计划重点(D20131105)资助项目。
② 男,1993 年生,硕士生;研究方向:移动机器人定位与导航;E-mail: 2283990131@qq.com
③ 通信作者,E-mail: chenglei@wust.edu.cn
(收稿日期:2017-12-21)

定位方法,该方法通过多传感器数据融合降低了 PDR 方法中的角度漂移,获得较好的姿态信息,从而提高了定位精度。同时算法计算复杂度低,执行效率高。本文利用该算法进行室内个人定位实验,验证了算法的可行性。并且与 PDR 算法进行仿真对比,结果表明融合算法精度明显高于 PDR 算法,对个人室内位姿信息计算更准确,从而证明了融合算法的有效性。

1 PDR 机制

根据人体步态的研究^[14]结果,PDR 的基本思想为:利用加速信号探测用户行走时的跨步,采用估计的步长和从角度传感器获得角度信息推算出行人的位置、距离、速度和方向信息。这个算法的 4 个核心问题为:步频测量、步长估计、姿态测量和位置推算。算法流程如图 1 所示。

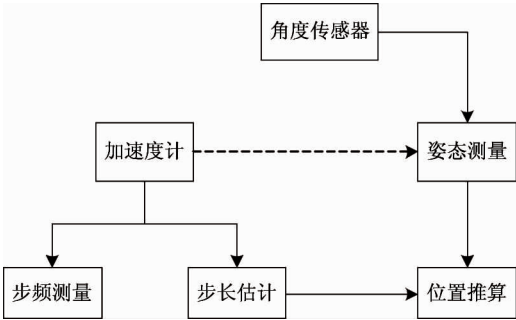


图 1 PDR 算法流程图

2 AHRS 与 PDR 融合

2.1 AHRS

AHRS 由一个 MEMS 传感器和一个磁力计组成。它能提供 3 个分量的惯性姿态但不提供位置和速度。其基本原理为:通过加速度计补偿陀螺仪调平滚动角和俯仰角。这两个角度可以通过低增益的方式,平滑处理载体机动导致的水平测量偏差,从而校正由陀螺仪推算出的滚动角和俯仰角。同时由于加速度计无法感知偏航旋转,因此通过加入磁力计来调整偏航角,同样是通过低增益方式平滑处理载体旋转所带来的误差,校正陀螺仪推算出的航向。通过补偿后,陀螺仪指示的滚动角和俯仰角结合三

轴磁力计测量值就可以推算出载体正确的姿态信息。图 2 为 AHRS 基本构成框图。

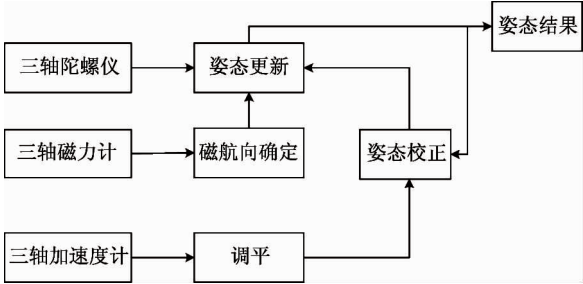


图 2 AHRS 基本结构框图

低动态时,AHRS 一般能提供 10mrad(0.6°)的滚动角和俯仰角精度以及 20mrad(1.2°)的偏航角精度。在高动态情况下,精度将会降低一倍。因为外力加速度的干扰会对姿态估计产生明显的影响。

2.2 AHRS 与 PDR 融合

考虑到一般行人步幅的频率为 1~3Hz,本文可以将其运动划分为低动态运动,因此可以把 PDR 与 AHRS 结合起来,对个人的运动位姿信息进行估计,相对于 PDR 机制,这种结合方式更合理。PDR 进行无积分累积误差的距离信息测量,AHRS 进行低角度漂移的姿态信息估计,且二者共用加速度计组件,可以保持很好的同步性,提高算法执行效率。图 3 为二者融合后的算法流程图。

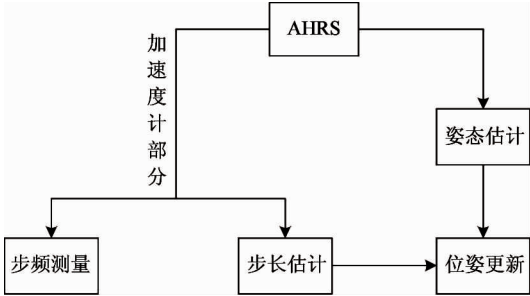


图 3 AHRS 和 PDR 融合算法

3 融合定位算法

3.1 步频测量

针对人体运动时不同部位加速度波形特征不一样的特点,本文将加速度测量模块放置于人体上半身,对单步加速度波形进行处理,采用峰值检测法进行步频测量。峰值检测法是根据人们行走时,上半身加速度信号呈现单峰的特征,通过寻找固定时间

段的最大值实现步频检测。

加速度计测量的数据采用合力加速度,避免单轴加速度会受到设备安装误差的影响,但其依旧包含了地球重力分量,还会受到仪器测量噪声和行走时身体抖动的影响,因此首先需要进行滤波处理:

(1)对 x, y 方向上的数据进行去零漂处理,抑制地球重力分量影响;

(2)使用巴特沃斯滤波器对加速度计数据进行低通滤波,去除仪器噪声;

(3)加速度连续峰值之间的时间必须大于一个时间阈值,一般取0.75s,以消除身体抖动导致同一步中出现多个峰值点造成的错误判断。

图4是运动加速度未经滤波处理的变化曲线,图5是运动加速度经过滤波处理的加速度变化曲

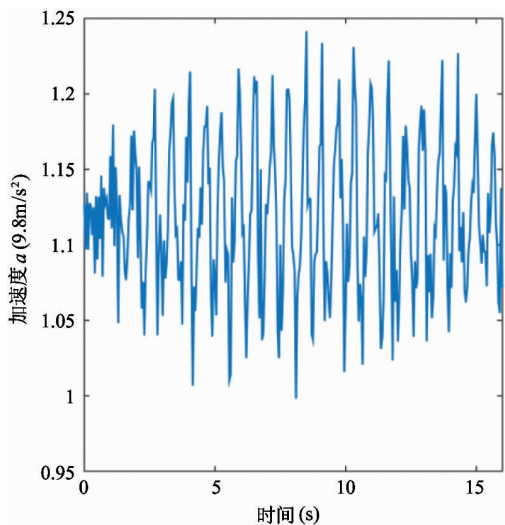


图4 无滤波处理的加速度曲线

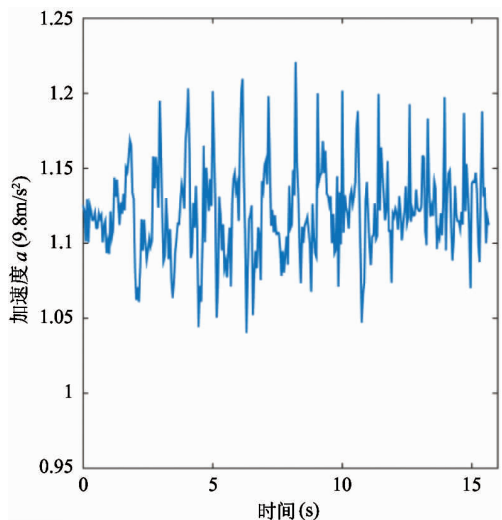


图5 滤波处理后的加速度曲线

线,可以看出滤波处理后的加速度变化要清晰很多,通过峰值检测法可以很好地分辨出峰值点,得到行走的步数,便于计算步频。

3.2 步长估计

人体步态研究结果表明步长与步频呈近似线性关系^[14],随运动速度而变化,同时和加速度的某些统计值具有良好的相关性,以实验对象为样本,低步频下步长约为30cm,正常步频下步长约为40cm,高步频下步长约50cm,图6呈现出了不同步频下加速度和步长的变化曲线。

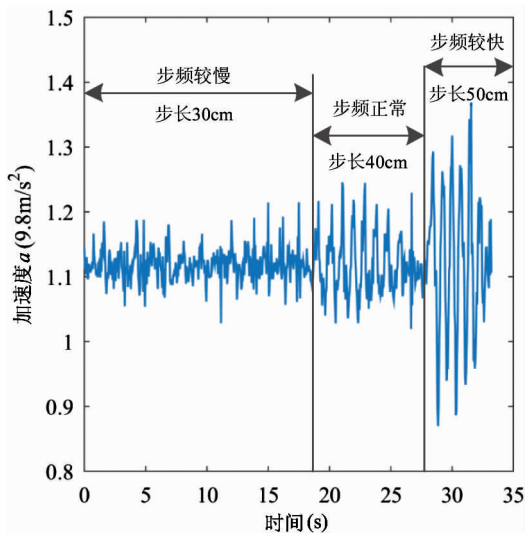


图6 不同步频下加速度和步长变化曲线

根据图6中加速度和步长之间的关系,采用模糊决策^[15]的思想对步长进行估计。设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为同一个样本不同步长的集合, $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ 为 X 集合中每种步长根据实际加速度情况所得的加权模糊集,其中 $\sum_{i=1}^n a_i = 1$, $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ 为 X 中每种步长在不同加速度情况下的评语集,可根据 Y 中的评语获得模糊关系 $R_i = (r_1, r_2, \dots, r_m)$, 其中 $\sum_{i=1}^m r_i = 1, i = 1, 2, \dots, n$, 从而得到模糊关系矩阵: $\bar{R} = [R_1 \ R_2 \ \dots \ R_n]$, 通过模糊变换 $\bar{R}$ 后,最后针对某一种步长的清晰决策输出为: $B = A \circ \bar{R} = (b_1, b_2, \dots, b_n)$, 根据最大值原理选择其中的最大隶属度 $b_{\max}$ 作为相应步长的权值,那么对各种步长及其对应的隶属度求加权平均值就

得到了最终估计的步长。

3.3 姿态估计

在 AHRS 中采用互补滤波算法进行姿态解算,陀螺仪动态响应特性良好,但计算时会产生累计误差。磁力计和加速度计测量姿态时没有累积误差,但动态响应较差。因此它们在频域上特性互补,可采用融合三种传感器数据方式来提高测量精度和系统的动态性能。

用 C 表示实验对象运动过程中真实的姿态矩阵,则:

$$\hat{C} = C_0 G_1 + C_w G_2 \tag{1}$$

其中, G_1 具有一阶低通滤波特性, G_2 具有一阶高通滤波特性, $\hat{C}$ 为互补滤波器的姿态估计矩阵, $C_w = C + u_l$ 为陀螺仪测量得到的数据计算的姿态矩阵, u_l 为低频误差累积, $C_0 = C + u_h$ 为加速度计和磁力计观测的姿态矩阵, u_h 为观测到的高频噪声。

经计算可得:

$$\hat{C} = C + G_1 u_h + G_2 u_l \approx C \tag{2}$$

即通过互补滤波器消除了高频噪声和低频误差累积,从而修正陀螺仪得到正确姿态信息。

通过四元数法进行姿态计算,修正后的陀螺仪数值 W 采用一阶龙格库塔法求解四元数微分方程,以此更新四元数得到实验对象实时姿态信息:

$$\phi = \arctan\left(\frac{2(q_2 q_3 + q_0 q_1)}{q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2}\right) \tag{3}$$

$$o = \arcsin(-2(q_2 q_3 - q_0 q_1)) \tag{4}$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{2(q_1 q_2 - q_0 q_3)}{q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2}\right) \tag{5}$$

其中, ϕ 为航向角, o 为俯仰角, φ 为滚动角。

3.4 位姿更新

通过前面的步频测量,步长估计和姿态估计后,可以计算出行走距离和行走过程中航向的变化。假设第 k 个单步的位移为 $\vec{L}_k$, 可得:

第 k 步时总的位移为:

$$\vec{L} = \vec{L}_1 + \vec{L}_2 + \cdots + \vec{L}_k \tag{6}$$

第 k 步时总的路程为:

$$|L| = k |\vec{L}_k| \tag{7}$$

根据式(3),第 k 步时转过的角度为:

$$\theta = \phi_k - \phi_1 \tag{8}$$

规定正北方向为 0° , 顺时针旋转为正方向,取值区间为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。

以起始点为原点,初始前进方向为 Y 轴正方向建立二维平面直角坐标系。基于人们每个单步过程中行走路线是直线的假设,可以计算实验对象每一步的位姿信息 (X_i, Y_i, θ_i) , 其数学表达式表示如下:

$$\begin{cases} Y_i = |\vec{L}_i| (\cos\theta_1 + \cos\theta_2 + \cdots + \cos\theta_i) \\ X_i = |\vec{L}_i| (\sin\theta_1 + \sin\theta_2 + \cdots + \sin\theta_i) \end{cases} \tag{9}$$

其中, θ_i 为前行方向与 Y 轴的夹角; $i = 1, 2, 3, \cdots, n$; n 为总步数。

4 实验结果与分析

为了验证本文所提出的定位方法的有效性和可行性,测量实验对象在室内环境下行走不同路线,实验硬件平台为 stm32f103rct6 单片机,6 轴加速度计、陀螺仪模块 mpu6050 以及 hmc5883l 磁力计。实验过程中,实验对象手持笔记本电脑和相关传感器,测得的数据通过串口传回电脑,利用 Matlab 进行处理,数据采样频率为 20Hz。实验分为两个室内场景,如图 7 所示。图 8 为两种实验路径示意图。



图 7 实验场景图

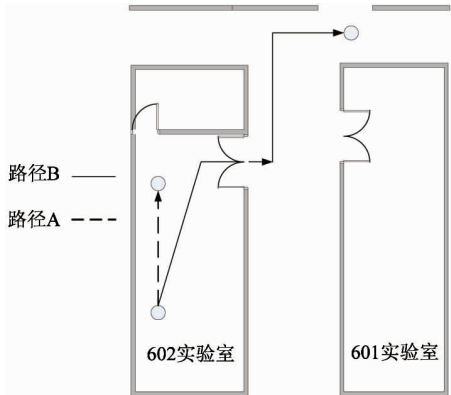


图 8 两种实验路径示意图

图 9、图 10 为两种路径下行走的加速度变化曲线,表 1 为不同路径下步数及步频统计数据。

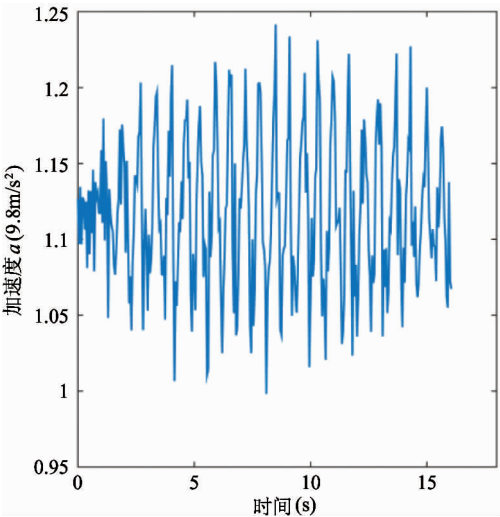


图 9 路径 A 加速度变化曲线

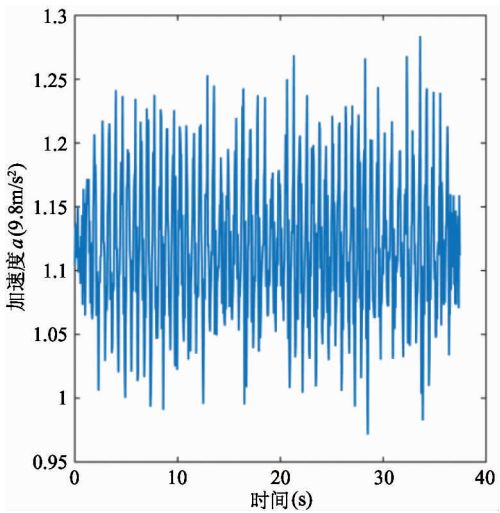


图 10 路径 B 加速度变化曲线

表 1 不同路径下步数及步频统计

项目 名称	时间 (s)	实际 步数	测量 步数	实际 步频 (Hz)	测量 步频 (Hz)	步数 误差	步频 误差 (%)
路径 A	15	23	23	1.53	1.53	0	0
路径 B	34	60	58	1.76	1.71	2	2.8

由图 9、图 10 及表 1 可知,路径 A,测量步数与实际步数相同,步频相同;路径 B,测量步数与实际步数相差 2 步,步频误差小于 3%。表明步频测量

准确度很高,平均误差不超过 3%。

图 11、图 12 为两种路径下行走航向变化。

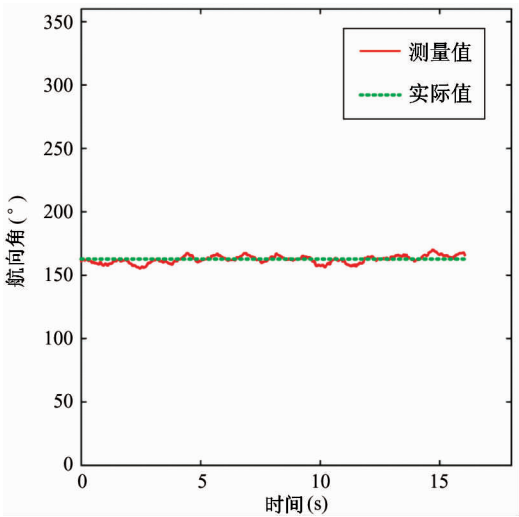


图 11 路径 A 航向变化

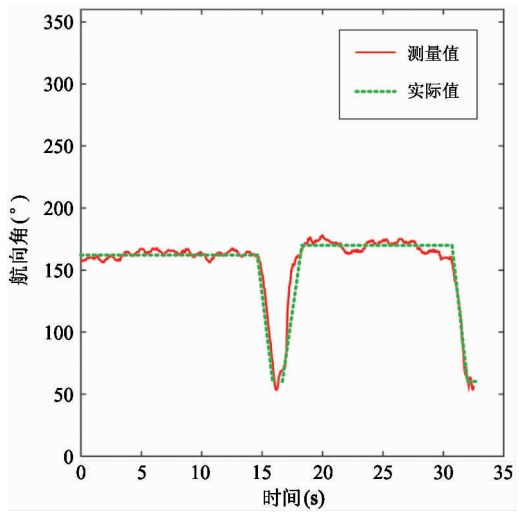


图 12 路径 B 航向变化

由图 11、图 12 可知,路径 A,实验对象航向角变化平均误差不超过 2°。路径 B,实验对象航向角平均误差不超过 5°。表明姿态估计的准确度很高,但是当实验对象有较大角度变化时,误差会增大。

根据两种不同路径行走实验所测得的数据,可以看出,通过峰值检测法加速度计数据很好地反映了实验对象的步数及步频。通过 AHRS 解算出的角度也较好地反映了实验对象的姿态变化。最后结合步长估计中估计的步长,通过式(9)可以计算出实验对象的行走路径。图 13 和图 14 为采集的数据通

过计算得到的两种场景下行走的路线。

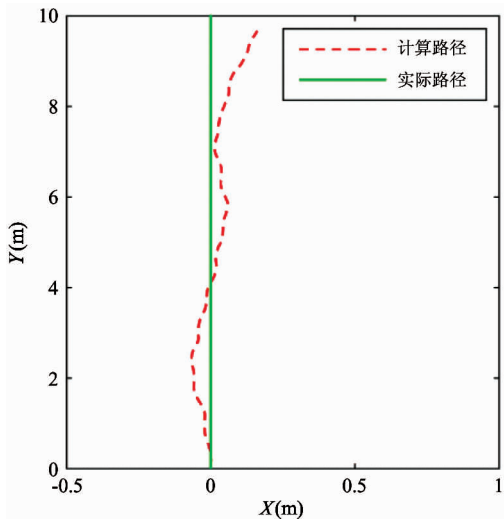


图 13 路径 A 计算路径

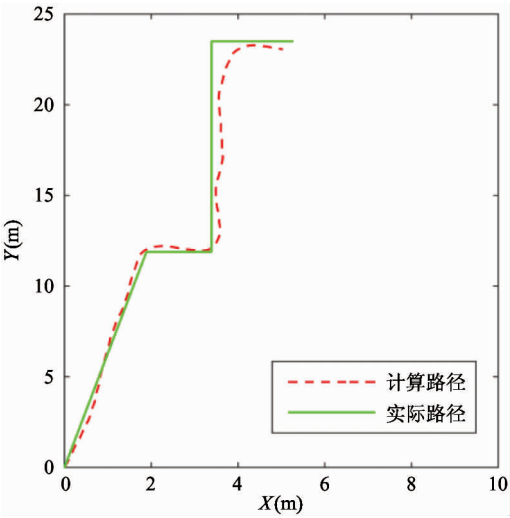


图 14 路径 B 计算路径

由图 13、图 14 可知,路径 A,实验对象在 X,Y 方向上的位置计算最大误差不超过 20cm。路径 B,实验对象在 X,Y 方向上的位置计算最大误差不超过 50cm。表明位置估计准确度较高,平均误差不超过 2%。通过不同场景下理想路径与计算路径的对比可以看出,本文提出的方法可以较好地还原个人在室内的位姿信息,得到了较好的定位结果,也证明了算法的可行性。

为了进一步证明融合算法的有效性,本实验将融合算法与 PDR 算法进行仿真对比实验,将在上述

实验环境下分别用这两种方法重新采集一组数据,然后利用 Matlab 进行仿真对比,结果如图 15 和图 16 所示。

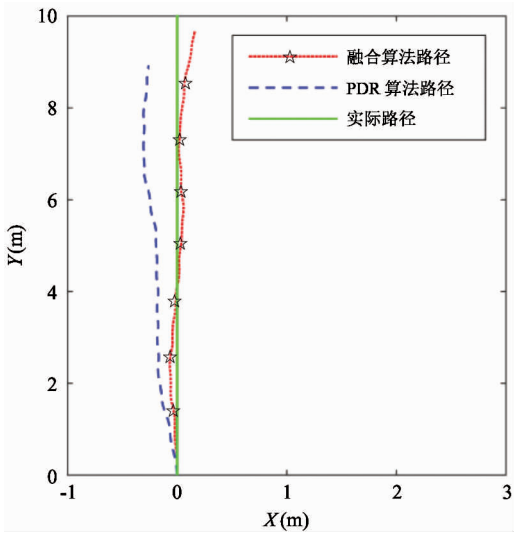


图 15 路径 A 仿真对比结果

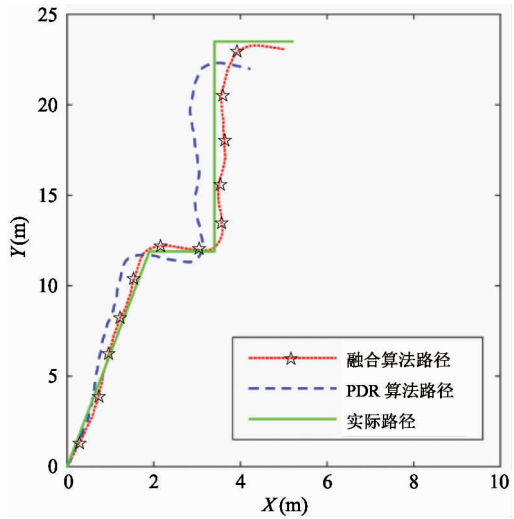


图 16 路径 B 仿真对比结果

由图 15、图 16 可以看出,融合算法无论是在简单的路线还是较为复杂的路线上,定位效果比 PDR 算法要更加优良。本文定义定位误差 $error$ 为实际目标点坐标 (x,y) 与估计目标点坐标 (p,q) 之间的欧式距离:

$$error = \sqrt{(x - p)^2 + (y - q)^2} \tag{10}$$

据此给出融合算法和 PDR 算法计算路径与实际路径之间的定位误差对比,如图 17、图 18 所示。

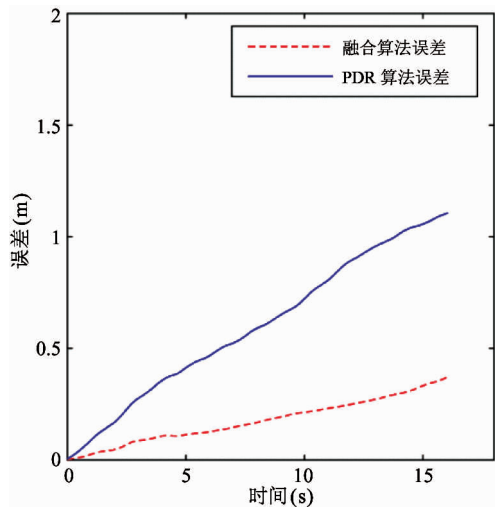


图 17 路径 A 误差对比

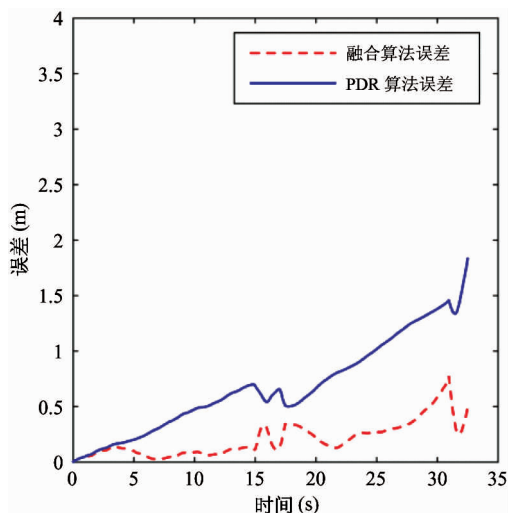


图 18 路径 B 误差对比

由图 17、图 18 可以看出,融合定位算法在简单和复杂的路线下定位精度都明显高于 PDR 算法,且能够将定位误差控制在 0.5m 以内,定位精度较高。从而也证明了融合算法的有效性。

5 结 论

本文提出的 AHRS 与 PDR 融合的个人室内自定位方法,该方法通过步频测量、步长估计、姿态估计和位姿计算四个步骤,可以解算出实验对象相对于出发点的比较准确的位姿信息。本文在室内两个不同场景对该算法进行了实验,实验结果比较理想,证明了该方法的可行性。然后与 PDR 算法进行仿

真对比实验,通过误差分析,表明该算法在定位精度上较 PDR 算法有很大的提高,在室内定位误差不超过 0.5m,对于个人室内定位具有很好的理论和实际意义,也证明了该方法的有效性。但是该方法随步行距离的增加以及航向角大幅度变化时仍然存在位姿偏移问题,因此需要进一步优化算法中的每个环节,尤其是步长估计和姿态估计,关于这方面的改进将在以后的工作中进行。

参考文献

- [1] Ban R, Kaji K, Hiroi K, et al. Indoor positioning method integrating pedestrian dead reckoning with magnetic field and WiFi fingerprints[C]. In: Proceedings of the 8th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking, Hakodate, Japan, 2015. 167-172
- [2] Garcia E, Poudereux P, Hernandez A, et al. A robust UWB indoor positioning system for highly complex environments[C]. In: Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology, Seville, Spain, 2015. 3386-3391
- [3] Zhang R, Bannoura A, Höflinger F. Indoor localization using a smart phone[C]. In: Proceedings of 2013 IEEE Sensors Applications Symposium Proceedings, Galveston, USA, 2013. 38-42
- [4] Bahillo A, Angulo I, Onieva E. Low-cost bluetooth foot-mounted IMU for pedestrian tracking in industrial environments[C]. In: Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology, Seville, Spain, 2015. 3430-3434
- [5] 张立国, 马鹏, 金梅, 等. 基于 RSSI 测距的三维无线传感网络萤火虫定位算法的研究[J]. 高技术通讯, 2016, 26(1): 1-7
- [6] 李若涵, 张金艺, 徐德政, 等. 运动分类步频调节的机电惯性测量单元室内行人航迹推算[J]. 上海大学学报: 自然科学版, 2014(5): 612-623
- [7] 王宝阔, 丁宏才. 惯性导航系统 INS 与 GPS 系统的组合应用[J]. 天津航海, 2003(4): 42-44
- [8] Levi R W, Judd T. Dead reckoning navigational system using accelerometer to measure foot impacts[P]. US patent: 5583776, 1996
- [9] Azizi A, Nourisola H, Ghiasi A. R. 3D inertial algorithm of SLAM for using on UAV[C]. In: Proceedings of the

- 4th International Conference on Robotics and Mechatronics, Tehran, Iran, 2016. 122-129
- [10] Mur-Artal R, Tardós J D. ORB-SLAM2: an open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2016, 33 (5): 1255-1262
- [11] Zhang J, Singh S. Visual-lidarodometry and mapping: low-drift, robust, and fast[C]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seattle, USA, 2015. 2174-2181
- [12] Diez L E, Bahillo A, Bataineh S. Enhancing improved heuristic drift elimination for wrist-worn PDR systems in buildings[C]. In: Proceedings of 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference, Montreal, Canada, 2016. 1-5
- [13] 郑学理, 付敬奇. 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
- [14] 孙作雷, 茅旭初, 田蔚风, 等. 基于动作识别和步幅估计的步行者航位推算[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(12): 2002-2005
- [15] 张国良, 曾静. 模糊控制及其 MATLAB 应用[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2002. 2-22

Research on personal indoor self-positioning method based on AHRS and PDR fusion

Peng Rui, Cheng Lei, Dai Yating, Zhao Xitong

(School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract

Aiming at personal indoor localization problem, self-positioning method based on attitude heading reference system (AHRS) and pedestrian dead reckoning (PDR) fusion is proposed in this work. The method is divided into four parts: pedestrian state is reflected through accelerometer data change in walking frequency measurement; the reasonable calculation step is obtained by using the method of fuzzy decision in step size estimation; relatively accurate attitude information at low dynamic is got by using AHRS in attitude estimation; the pose information is finally obtained by combining the step size and the attitude data in pose updating. Through experiments in different indoor environments and comparison with PDR method, the experimental results prove the feasibility of the method and simulation results show that the proposed method is effective and the indoor location error is no more than 0.5m.

Key words: personal indoor self-positioning, attitude heading reference system (AHRS), pedestrian dead reckoning (PDR), fuzzy decision