

1-3-2019

Multi-stage Filtering Method for Pedestrian Navigation and Location

Zhidan Gu

Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, University of Beijing Information Science & Technology, Beijing 100101, China;

Li Qing

Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, University of Beijing Information Science & Technology, Beijing 100101, China;

Zhao Hui

Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, University of Beijing Information Science & Technology, Beijing 100101, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Multi-stage Filtering Method for Pedestrian Navigation and Location

Abstract

Abstract: In the process of navigation and location of a pedestrian for a wearable IMU, the inertial device generates an accumulated drift error affecting the navigation and location accuracy of pedestrian navigation. *A multi-stage filtering method is studied: after the zero-speed detection and the zero-speed correction based on Extended Kalman Filter are carried out, the vector domain is divided by the indoor geometric layout features, and the projected matching model is used to determine the optimal coordinates of the nodes to get the trajectory.* Using the self-developed MIMU pedestrian navigation module, a field experiment was conducted. The experimental results show that this method can suppress the accumulation of inertial navigation error, which is better than the current single-stage Kalman filter inertial navigation method. There is no pedestrian trajectory passing through the wall. The navigation and location accuracy of pedestrian navigation is improved and the location accuracy is 0.9%. The research has theoretical and practical significance.

Keywords

zero-speed detection, EKF, map matching, multi-stage filtering, pedestrian navigation

Recommended Citation

Gu Zhidan, Li Qing, Zhao Hui. Multi-stage Filtering Method for Pedestrian Navigation and Location[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(12): 4727-4732.

行人自主导航定位的多级滤波方法

谷志丹, 李擎, 赵辉

(北京信息科技大学 高动态导航技术北京市重点实验室, 北京 100101)

摘要: 针对携带式 IMU 对行人进行导航定位时, 惯性器件的误差随时间增长累积变大, 影响导航准确性的问题, 研究了一种多级滤波的方法: 零速检测并利用扩展卡尔曼滤波进行零速校正后, 再通过室内几何布局特征划分矢量区, 利用投影匹配算法判定位置的最优解, 来确定人行走轨迹。用自主研制的 MIMU 行人导航模块做了场地实验, 结果表明: 该方法相对目前单级卡尔曼滤波的惯性导航方法, 能够很好地抑制惯性导航误差积累, 且不会出现行人轨迹穿墙问题, 定位精度为 0.9%, 具有理论和实际的意义。

关键词: 零速检测; 扩展卡尔曼滤波; 地图匹配; 多级滤波; 行人导航

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 12-4727-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201812029

Multi-stage Filtering Method for Pedestrian Navigation and Location

Gu Zhidan, Li Qing, Zhao Hui

(Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, University of Beijing Information Science & Technology, Beijing 100101, China)

Abstract: In the process of navigation and location of a pedestrian for a wearable IMU, the inertial device generates an accumulated drift error affecting the navigation and location accuracy of pedestrian navigation. A multi-stage filtering method is studied: after the zero-speed detection and the zero-speed correction based on Extended Kalman Filter are carried out, the vector domain is divided by the indoor geometric layout features, and the projected matching model is used to determine the optimal coordinates of the nodes to get the trajectory. Using the self-developed MIMU pedestrian navigation module, a field experiment was conducted. The experimental results show that this method can suppress the accumulation of inertial navigation error, which is better than the current single-stage Kalman filter inertial navigation method. There is no pedestrian trajectory passing through the wall. The navigation and location accuracy of pedestrian navigation is improved and the location accuracy is 0.9%. The research has theoretical and practical significance.

Keywords: zero-speed detection; EKF; map matching; multi-stage filtering; pedestrian navigation

引言

社会逐渐进步, 行人导航如今在人们生活中的



收稿日期: 2018-05-30 修回日期: 2018-09-05;
基金项目: 国家自然科学基金(61471046), 北京市教委市属高校创新能力提升计划 (TJSHG 201510772017);

作者简介: 谷志丹(1994-), 女, 河北, 硕士生, 研究方向为导航, 制导与控制; 李擎(1964-), 女, 河北, 博士, 教授, 研究方向为导航制导, 飞行器控制等。

用处愈加广泛。人们的日常生活已经离不开导航, 如我们去陌生的城市旅游、办公都需要导航。在当今人们的生活中, 常见定位导航的方法是 GPS 导航。如我们日常使用的手机导航。我们通常使用 GPS, 因为它可全天候工作, 定位精确, 不受天气影响。可是其缺点也不容忽视: 当有障碍物遮挡时, 卫星导航容易出现信号缺失, 定位不准的问题, 所

以在建筑内、森林、山谷等环境中使用 GPS 进行导航常常出现偏差。而使用微机电系统惯性传感器 (MEMS IMU) 进行行人导航定位正好可以在室内进行导航, 解决了在卫星信号被遮挡时 GPS 无法进行精确定位的问题。MEMS IMU 使用方便、不受环境约束, 在医院对病人定位、商场导航等日常导航与军事行动指挥等情况下都有很大的价值^[1]。

MEMS IMU 的优点是体积小、较轻便, 行人可以穿戴在鞋面等部位。但由于使用时间变长, MEMS 惯性器件的系统误差变得越来越大, 定位偏差变大, 无法满足人们对定位准确性的需求。因此需要引入辅助信息来减小误差。常见的室内定位辅助信息有: 人的行走模型^[2]; 房屋的主方向^[3]; 磁力计辅助^[4]; 建筑物构造^[5]。但是, 仅使用单一的辅助信息进行定位导航也满足不了室内复杂地形下对导航定位精度的要求。经过综合考虑导航定位的成本和效果后, 此文的方法利用零速检测并基于扩展卡尔曼滤波, 实现一次修正, 然后经过与已有地图匹配再实现二次修正, 使定位精度更高。

1 基于“零瞬态”的 EKF

“零瞬态”是指为人在行走时, 运动状态符合 3 个要求的瞬时状态^[6]。本文中, 扩展卡尔曼滤波器(EKF)设计具体流程是将捷联惯性导航器件输出的误差量当成 EKF 输入的状态量, 根据人行走时脚步运动的特征建立 18 维滤波模型, 结合 ZUPT、ZARU 和地磁信息来完成更加精确的导航定位。

1.1 选取状态量及建立状态方程

本文方法中所选扩展卡尔曼滤波器中状态变量采用下述误差值描述:

$$\delta_x = [\delta r_N, \delta r_E, \delta r_D, \delta v_N, \delta v_E, \delta v_D, \delta \phi_H, \delta \phi_P, \delta \phi_R, \nabla_b, \varepsilon_b, \delta g_N, \delta g_E, \delta g_D] \quad (1)$$

式中: δ_r 是位置误差; δ_v 是速度误差; δ_ϕ 是姿态误差, r , v , ϕ 为航向、俯仰和横滚角。 ∇_b 为加速度的零偏误差; ε_b 为陀螺仪的零偏误差; ε_g 为重力不确定误差。

本文中滤波器的系统状态方程为:

$$\dot{\delta x}(t) = F(t)\delta x(t) + W(t) \quad (2)$$

展开如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_r \\ \dot{X}_v \\ \dot{X}_f \\ \dot{X}_{acc} \\ \dot{X}_{gyro} \\ \dot{X}_{grav} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} & F_{24} & 0 & I \\ 0 & 0 & F_{33} & 0 & F_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_r \\ X_v \\ X_f \\ X_{acc} \\ X_{gyro} \\ X_{grav} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_r \\ W_v \\ W_f \\ W_{acc} \\ W_{gyro} \\ W_{grav} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $\dot{X}_r, \dot{X}_v, \dot{X}_f, \dot{X}_{acc}, \dot{X}_{gyro}, \dot{X}_{grav}$ 分别是 r 、 v 及 f 的误差量, 加速度计、陀螺仪的漂移量及重力 g 的不确定量。 I 为 3×3 的单位矩阵; 0 为 3×3 零矩阵; W 为零均值高斯白噪声。式中各个量的矩阵如下:

$$F_{11} = \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\lambda} \sin(\varphi) & \dot{\varphi} \\ \dot{\lambda} \sin(\varphi) & 0 & \dot{\lambda} \cos(\varphi) \\ -\dot{\varphi} & -\dot{\lambda} \cos(\varphi) & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$F_{21} = \text{diag} \left[-\frac{g}{R_e}, -\frac{g}{R_e}, \frac{2g}{R_e} \right] \quad (5)$$

$$F_{22} = \begin{bmatrix} 0 & -(2w_{ie} + \dot{\lambda}) \sin(\varphi) & \dot{\varphi} \\ (2w_{ie} + \dot{\lambda}) \sin(\varphi) & 0 & (2w_{ie} + \dot{\lambda}) \cos(\varphi) \\ -\dot{\varphi} & -(2w_{ie} + \dot{\lambda}) \cos(\varphi) & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$F_{23} = C_b^n \begin{bmatrix} 0 & -f_z^b & f_y^b \\ f_z^b & 0 & -f_x^b \\ -f_y^b & f_x^b & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$F_{24} = C_b^n \quad (8)$$

$$F_{33} = \begin{bmatrix} 0 & -(w_{ie} + \dot{\lambda}) \sin(\varphi) & \dot{\varphi} \\ (w_{ie} + \dot{\lambda}) \sin(\varphi) & 0 & (w_{ie} + \dot{\lambda}) \cos(\varphi) \\ -\dot{\varphi} & -(w_{ie} + \dot{\lambda}) \cos(\varphi) & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$F_{35} = -C_b^n \quad (10)$$

$$\mathbf{F}_{66} = \text{diag}[-\tau_x \quad -\tau_y \quad -\tau_z] \quad (11)$$

在式(4)到式(11)表示中, φ 是所处位置的经度, λ 代表所处位置的纬度; $\mathbf{C}_b^n$ 是由下标 b 系过渡到上标 n 系的方向余弦矩阵; g 为重力常数; R_e 是平行曲率半径; f^b 是加速度计于载体坐标系中的输出比力; ω_{ie} 是地球旋转的速率; τ 是在重力不为定值时, 在高斯—马尔可夫过程(Gauss—Markov)中对应时间的倒数。

离散化上述已经建立的扩展卡尔曼滤波器(EKF)状态方程, 得到:

$$\delta x_{k+1} = \Phi_k \delta x_k + W_k \quad (12)$$

Φ_k 是系统的状态转移矩阵, 由近似原理^[7] $\Phi_k \approx \mathbf{I} + \mathbf{F}\Delta t$ 算出。

1.2 选取观测量及建立观测方程

由上文所述, 已经确定了状态量及状态方程。再进行观测量和观测方程的确定。人在行走时, 当脚落地时, 脚和地面一般接触几毫秒或几十毫秒, 当装置检测到脚触碰地面的动作, 达到瞬间静止的状态, 此瞬间静止状态就是“零瞬态”, 此时的输出速度、角速度理论上都是零。但是因为计算时会出现的各种误差导致在“零瞬态”时, 计算得到的量不为零。因此, 本文中滤波器中观测量取零瞬态时速度、角速度的误差。由如下式子表示:

$$\Delta \mathbf{v}_k = \mathbf{v}_k - [0 \quad 0 \quad 0] \quad (13)$$

$$\Delta \mathbf{w}_k = \mathbf{w}_k - [0 \quad 0 \quad 0] \quad (14)$$

其他观测量选取原理如下: 利用地磁器件和惯导器件分别得到运动航向角, 用这两个量来得到相应的航向角误差, 将此误差作为滤波器的一个观测量; 再用惯导器件得到的姿态角结合加速度计得到的俯仰与横滚角, 计算出相应的俯仰与横滚角误差, 此误差也是本文中扩展卡尔曼滤波器的观测量。

由上述, 可确定滤波器的观测量:

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_k = & [\Delta \mathbf{v}_k \quad \Delta \mathbf{w}_k \quad \Delta \varphi_H \quad \Delta \varphi_P \quad \Delta \varphi_R]^T = \\ & [\mathbf{v}_k \quad \mathbf{w}_k \quad \varphi_{H-INS} \quad \varphi_{P-INS} \quad \varphi_{R-INS}]^T - \\ & [0 \quad 0 \quad \varphi_m \quad \varphi_{P_acc} \quad \varphi_{R_acc}]^T \end{aligned} \quad (15)$$

令

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{I} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

本文方法设定扩展卡尔曼滤波器中所需观测方程为:

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H} \delta \mathbf{x}_{k|k} + \mathbf{v}_k \quad (16)$$

式中: $\mathbf{z}_k$ 是上述确定的观测量; $\mathbf{H}$ 是观测矩阵; $\mathbf{v}_k$ 是观测的噪声, 噪声的协方差矩阵为 $\mathbf{R}_k = E(\mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^T)$ 。

1.3 校正误差

此过程修正误差使系统更加精确, 具体做法是由上述估计的误差状态量 δ_k 与捷联惯导系统解算结果比较并校正后者, 减小误差。在系统校正 $\mathbf{v}$ 、 $\mathbf{r}$ 和 φ 对应的误差时, 原理由下式表示:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{v}} &= \hat{\mathbf{v}}^- + \delta \mathbf{v} \\ \hat{\mathbf{r}} &= \hat{\mathbf{r}}^- + \delta \mathbf{r} \\ \hat{\varphi} &= \hat{\varphi}^- + \delta \varphi \end{aligned} \quad (17)$$

计算 $\mathbf{C}_b^n$ 时, 利用小角度近似的方法计算相应的等效旋转矩阵, 方法如下:

$$\hat{\mathbf{C}}_b^n = \begin{bmatrix} 1 & \delta \varphi_z & \delta \varphi_y \\ -\delta \varphi_z & 1 & \delta \varphi_x \\ \delta \varphi_y & -\delta \varphi_x & 1 \end{bmatrix} \hat{\mathbf{C}}_b^{n-} \quad (18)$$

2 地图匹配

地图匹配方法是指在已知地图的情况下, 利用软件结合已知地图来进行更精确定位的方法。该方法通常是对比系统的定位状态是否符合原有地图的可行区, 去掉其中不可能的轨迹点, 并且利用投影匹配, 将位于不可通行区域的点位投影到可行区, 得到与真实运动轨迹最匹配的轨迹, 除此之外, 还利用地图中路径的关键点位(如拐点)来校正系统定位时出现的积累误差^[8]。

2.1 投影匹配算法介绍

当行人的定位位置超出可行区时, 通过比较此位置到所有可行区路径的距离最小来确定超出可

行区位置的最优解。此方法的目的是把行人在不可通行区域的位置匹配到距其最近的可行路径,得到位置的最优解。

2.2 将地图分块

在对已有地图进行分块时,首先将地图导入计算机,在地图中确定建筑中心线,然后计算机可根据区域的可通行或不可通行特征生成中心线的周边缓冲区域。此次地图分块首先将地图中区域分类:可行区及不可行区。不可行区就是不可通行区域。可行区根据建筑内构造的差异,分成线性矢量域与非线性矢量域。其中,若区域内所有点的横截面都互相平行,比如我们经常走的楼道,行人在此类区域中行走时一般走直线型,则我们称为线性矢量域;非线性矢量域为区域中有的点之间的横截面互相不平行的区域。

2.3 匹配地图

划分的区域不同则判断航向角的方法不同。在本文划分的线性矢量域中,行人行走时,一般只有正方向与反方向,如图1中箭头 ca_1 与 ca_2 所示;当行人在非线性矢量域时,则根据陀螺一方向传感器来得到航向角。

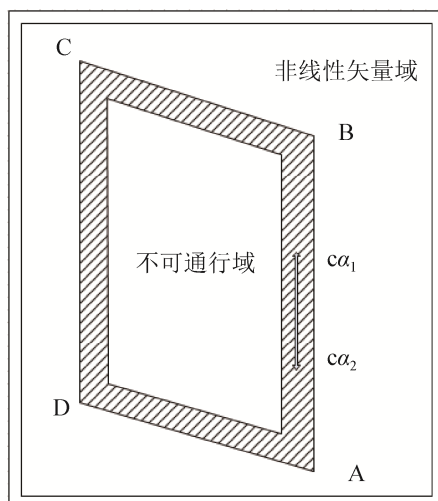


图1 线性矢量域示意图(阴影部分)

Fig. 1 Schematic diagram of linear vector domain (shadow part)

开始对行人进行定位时,首先判断行人的位置区域,若判断得到行人在不可行区中,直接按照最近距离匹配原则将行人的位置投影到可行区中,得到行人的位置最优解;如果判断得到行人在线性矢量域中,则认为行人行走时按直线行走,此时由磁力计结果判断行人行走的方向;若判断得到行人在非线性矢量域中,此时判断行人的行走方向需要利用系统传感器来确定。在此次地图匹配时,在地图中的重要点位(本实验主要是转弯处)对行人轨迹进行修正。

3 实验验证及结果分析

本文技术实现步骤如下:(1)首先对惯性器件输出的数据进行捷联解算,并用ZUPT, ZARU及地磁辅助校正结果触发EKF,然后利用反馈校正捷联解算误差。(2)判断终端所在矢量域,利用地图匹配对位置进行二次修正。(3)最终得到处理后的行人轨迹。

在本文所提方法的基础上,使用实验室自研的鞋面MIMU行人导航模块做了场地实验。进行实验时把导航模块绑在行人鞋面上方,行人在室内行走。

实验场地为实验楼某矩形空地,行人绕封闭路线A-B-C-D行走四圈,又回到起点A。通过本方法和目前单级卡尔曼滤波的惯性导航方法对传感器数据进行处理得到其在行走状态下的位置、速度、姿态角协方差图分别如图2、图3所示,两种方法的运动轨迹结果分别如图4、图5所示。

通过实验结果图进行对比看出,未经多级滤波时位置、速度误差的均方差在0.1左右,而滤波后其值控制在0.05以内,多级滤波后,定位精度为0.9%,且经过多级滤波后,计算出人行走的路径逼近行人实际的行走路径。本文研究的方法应用零速检测,并基于扩展卡尔曼滤波进行零速修正,使惯性器件的误差大幅度减小,利用地图匹配方法又将轨迹固定在可通行域中,在转角点定位也更加准确。

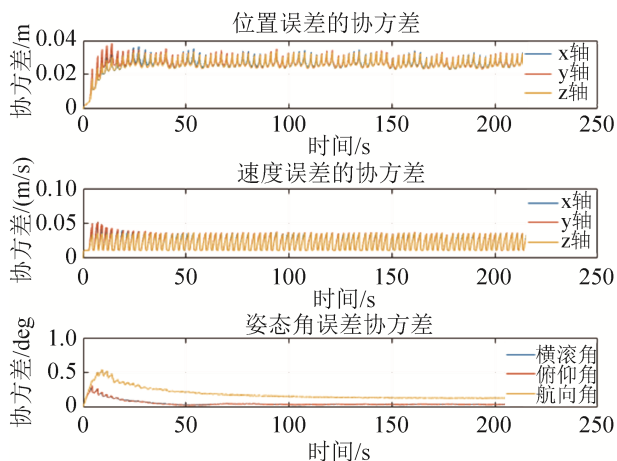


图 2 位置、速度、姿态角误差的协方差图(滤波后)

Fig. 2 Covariance diagram of position, velocity, attitude angle errors (after filtering)

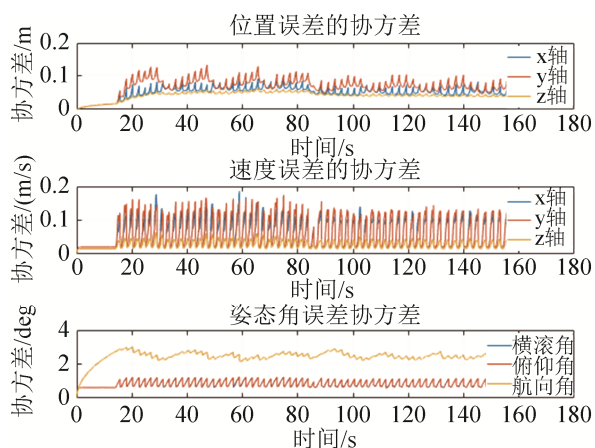


图 3 位置、速度、姿态角误差的协方差图(滤波前)

Fig. 3 Covariance diagram of position, velocity, attitude angle errors (before filtering)

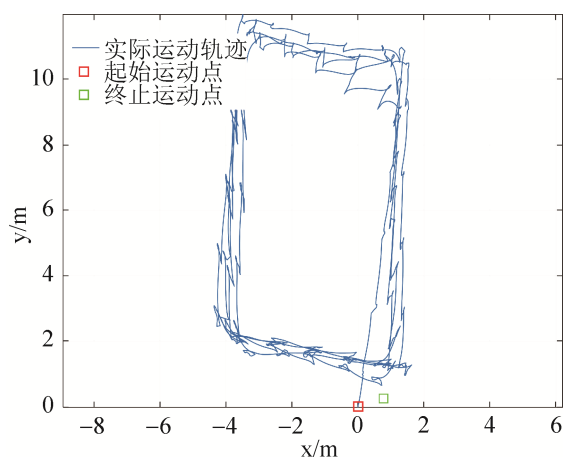


图 4 运动轨迹显示图(滤波后)

Fig. 4 Motion trajectory display (after filtering)

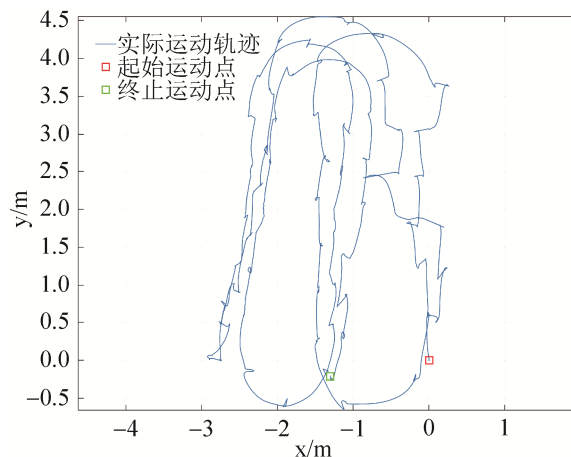


图 5 运动轨迹显示图(滤波前)

Fig. 5 Motion trajectory display (before filtering)

4 结论

本文针对 MEMS 惯性器件随着时间累积的零漂误差大, 有时出现轨迹穿墙现象的问题, 提出一种行人自主导航定位的多级滤波方法: 先零速检测之后利用扩展卡尔曼滤波实现零速修正, 完成对误差的初步修正, 之后用地图匹配校正航向角, 削弱线性矢量域误差, 并通过行人运动关键点点位坐标进行轨迹的校正。经过实验仿真, 验证了此多级滤波的有效性。实验结果显示此多级滤波方法可准确记录行人行走轨迹, 具有较高的准确性与稳定性。

参考文献:

- [1] 高哲. 行人自主导航定位的 IEKF_SWCS 方法[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(9): 1944-1950.
Gao Zhe. The IEKF_SWCS method of pedestrian autonomous navigation and positioning[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(9): 1944-1950.
- [2] Abdulrahim K, Hide C, Moore T, et al. Integrating low cost IMU with building heading in indoor pedestrian navigation[J]. Journal of Global Positioning Systems (S1446-3164), 2011, 10(1): 30-38.
- [3] 于飞. 步幅和建筑方向辅助的行人导航算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(3): 408-413.
Yu Fei. Pedestrian navigation algorithm assisted by stride and building direction[J]. Harbin Engineering Newspaper, 2016, 37(3): 408-413.