

8-7-2020

IEKF-SWCS Method for Pedestrian Self-navigation and Location

Zhe Gao

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

Li Qing

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

Li Chao

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

Liu Ning

Beijing Information Science and Technology University Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation 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.

IEKF-SWCS Method for Pedestrian Self-navigation and Location

Abstract

Abstract: In the process of using wearable inertial measurement unit to realize pedestrian navigation, accumulated drift errors are increasing with pedestrian moving, which has serious effects on the navigation accuracy. To solve this problem, *a pedestrian self-navigation and location method was proposed based on improved extended kalman filter (IEKF). An 18 dimensional filter model fused with human motion characteristics was built. Meanwhile, a step wise closed loop smoothing (SWCS) algorithm was designed in IEKF, which could eliminate the sharp correction at some sample points and improve the smoothness of the trajectory.* A self-developed IMU sensor was used to make tests. The results demonstrate that the proposed method can significantly restrain the divergence of MEMS IMU, and effectively improve the location accuracy. In the process, no extra hardware cost has produced. So this method has practical application value for pedestrian navigation.

Keywords

IMU, wearable, pedestrian self-navigation, improved EKF, SWCS

Recommended Citation

Gao Zhe, Li Qing, Li Chao, Liu Ning. IEKF-SWCS Method for Pedestrian Self-navigation and Location[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(9): 1944-1950.

行人自主导航定位的 IEKF-SWCS 方法

高哲, 李擎, 李超, 刘宁

(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: 针对利用可穿戴式 IMU 对行人进行导航定位过程中, 惯性器件产生累积漂移误差影响导航定位精度的问题, 提出了一种基于改进扩展卡尔曼滤波(Improved Extended Kalman Filter, IEKF)的行人自主导航定位方法。该方法建立了融合人体运动特征的 18 维滤波模型, 在 IEKF 中设计分段闭环平滑(Step Wise Closed loop Smoothing, SWCS)算法, 消除跳变的修正采样点, 提高了轨迹平滑度。利用自研的 IMU 传感器进行试验验证, 结果表明该方法能够有效抑制惯性器件的发散, 进一步提高了行人自主导航定位精度, 并且不增加任何额外的硬件成本, 对行人导航的研究具有实际应用价值。

关键词: 惯性测量单元; 可穿戴; 行人自主导航; 改进的扩展卡尔曼滤波; 分段闭环平滑

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 09-1944-07

IEKF-SWCS Method for Pedestrian Self-navigation and Location

Gao Zhe, Li Qing, Li Chao, Liu Ning

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

Abstract: In the process of using wearable inertial measurement unit to realize pedestrian navigation, accumulated drift errors are increasing with pedestrian moving, which has serious effects on the navigation accuracy. To solve this problem, a pedestrian self-navigation and location method was proposed based on improved extended kalman filter (IEKF). An 18 dimensional filter model fused with human motion characteristics was built. Meanwhile, a step wise closed loop smoothing (SWCS) algorithm was designed in IEKF, which could eliminate the sharp correction at some sample points and improve the smoothness of the trajectory. A self-developed IMU sensor was used to make tests. The results demonstrate that the proposed method can significantly restrain the divergence of MEMS IMU, and effectively improve the location accuracy. In the process, no extra hardware cost has produced. So this method has practical application value for pedestrian navigation.

Keywords: IMU; wearable; pedestrian self-navigation; improved EKF; SWCS

引言

行人导航在现代社会中有着重要的地位和作用^[1]。目前使用最广泛的定位导航是基于卫星的 GPS 行人导航系统。GPS 定位精度高, 使用范围

广, 但是存在卫星信号易被遮挡的缺点, 所以在卫星信号遮挡严重的室内、市区道路、丛林、峡谷等环境中无法实现行人无缝导航。基于微机电系统惯性传感器(MEMS IMU)的行人导航定位具有不受环境约束、使用灵活性和定位鲁棒性好的优点, 在应急救援、反恐安全、军事行动指挥及日常导航等方面均具有重要的应用价值^[2]。

MEMS IMU 尺寸小、成本低, 质量轻, 通常以安装形式由行人直接携带。美国 Draper 实验室^[3]



收稿日期: 2015-05-13 修回日期: 2015-07-07;
基金项目: 国家自然科学基金(61471046); 北京市科技计划课题(Z131100005313009);
作者简介: 高哲(1990-), 女, 满, 哈尔滨, 硕士生, 研究方向为惯性器件、高动态导航技术等; 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; 李超(1990-), 男, 北京, 博士生, 研究方向为室内定位技术、组合导航算法。

<http://www.china-simulation.com>

• 1944 •

首先提出利用人体足部安装方式实现行人自主导航, 其解决了遮挡环境下卫星信号不可用的“盲区”问题, 但由于 MEMS 惯性器件精度较低, 系统误差随时间迅速累积增长, 定位精度无法满足需求。为了减少此种累积误差的影响, 国内外学者进行了相关研究, 如 Foxlin^[4]提出在静止区间用零速更新辅助卡尔曼滤波的方法对误差进行实时校正, Francisco^[5]提出利用 UKF 滤波器进行信息融合, 李佳璇^[6]提出双 MIMU 方案等。但目前已有的方法仍存在一定局限性, 如静止区域检测不准确, 人体运动晃动带来的干扰噪声无法弱化, 计算繁琐、结构复杂等。

针对以上问题, 本文提出基于改进扩展卡尔曼滤波的行人导航方法。此方法将捷联惯导系统的误

差作为状态量, 建立融合人体运动特征的 18 维滤波模型, 同时利用速度辅助修正、角速度辅助修正和地磁辅助修正完成导航信息校正。相比常规模型具有更高的可观测度, 对陀螺误差的补偿性能更进一步。同时, 在 IEKF 滤波器中设计分段闭环平滑算法, 消除跳变修正的采样点, 提高轨迹平滑度。通过试验验证结果表明, 该行人自主导航定位方法切实可行。

1 方法总体结构

本方法主要由三部分组成, 分别是捷联惯性导航系统的解算、“零瞬态”检测和卡尔曼滤波器的设计。具体工作原理如图 1 所示。

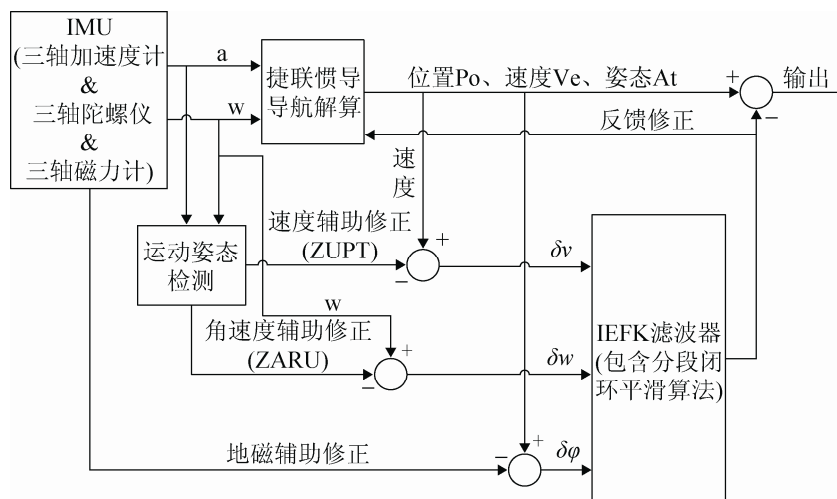


图 1 行人自主导航定位的 IEKF-SWCS 方法原理图

本方法采用直接积分策略, 在步态检测之间直接根据惯性原理(加速度积分和角速度积分)进行解算, 采用经典四元数方法进行行人的运动姿态更新^[7-9]。其中, “零瞬态”定义为同时满足以下 3 个条件^[10]的瞬间状态。

条件 1(C1): 加速度计输出合成幅值, 处于给定的上下阈值之间, 则人体静止。

定义加速度计的输出合成幅值为:

$$|a_k| = \sqrt{a_k^b(x)^2 + a_k^b(y)^2 + a_k^b(z)^2} \quad (1)$$

定义给定的加速度阈值为 $th_{a_{min}} = 9 \text{ m/s}^2$,

$th_{a_{max}} = 11 \text{ m/s}^2$, 并有:

$$C1 = \begin{cases} 1 & th_{a_{min}} < |a_k| < th_{a_{max}} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

条件 2(C2): 加速度计输出的局部方差, 低于给定的阈值, 则人体静止。

定义加速度计输出的局部方差为:

$$\sigma_{a_k^b}^2 = \frac{1}{2s+1} \sum_{q=k-s}^{k+s} (a_q^b - \bar{a}_k^b)^2 \quad (3)$$

其中 \bar{a}_k^b 为此区间加速度计合成幅值的输出平均

值, 其表达式为:

$$\bar{a}_k^b = \frac{1}{2s+1} \sum_{q=k-s}^{k+s} a_q \quad (4)$$

s 为半窗口采样数量, 通常定义其值为 15。定义给定阈值为: $th_{\sigma_a} = 0.5 \text{ m/s}^2$, 并有:

$$C2 = \begin{cases} 1 & \sigma_{a_k^b} > th_{\sigma_a} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

条件 3(C3): 陀螺仪输出合成幅值, 低于给定的阈值, 则人体静止。

定义陀螺仪输出的合成幅值为:

$$|\omega_k| = \sqrt{\omega_k^b(x)^2 + \omega_k^b(y)^2 + \omega_k^b(z)^2} \quad (6)$$

给定的阈值为: $th_{\omega_{\max}} = 50^\circ/s$, 并有:

$$C3 = \begin{cases} 1 & |\omega_k| < th_{\omega_{\max}} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

3 个条件之间采用“与”逻辑, 即只有当 3 个条件的判断结果都为“1”时才认为步态处于绝对静止状态, 即“零瞬态”。

2 改进的 EKF 滤波器

2.1 系统动力学模型及导航量测

本方法将定位问题转化为对如下离散随机系统的估计问题:

$$\begin{aligned} x_k &= f(x_{k-1}, u_k, w_k) \\ z_k &= h(x_k, v_k) \end{aligned} \quad (8)$$

其中: k 为离散时间; x_k 为系统在时刻 k 的状态; $z_k \in R^n$ 为观测信号; $f(\cdot)$ 和 $h(\cdot)$ 分别是系统状态方程和观测方程; $w_k \in R^r$ 为输入的白噪声, $v_k \in R^n$ 为观测噪声; u_k 为控制输入; w_k 和 v_k 是均值为 0、方差阵分别为 Q 和 R 的不相关白噪声, 有以下概率特征, $Ew_k = 0$, $Ev_k = 0$, $Ew_k w_k^T = Q\delta_{kj}$, w_k 和 v_k 不相关, 因此有 $E[w_k v_j^T] = 0$, $\forall k, j$, 其中 E 为均值符号, T 为矩阵转置符号, $\delta_{kj} = 0$, $\delta_{kk} = 1$, \forall 表示任意。

2.1.1 状态量选取及状态方程的建立

状态量的选取和误差模型的设计是滤波方法是否有效的关键影响因素。本方法中的 IEKF 滤波

器利用以下 18 个误差值作为状态变量:

$$\delta x = [\delta r_N, \delta r_E, \delta r_D, \delta v_N, \delta v_E, \delta v_D, \delta \varphi_H, \delta \varphi_P, \delta \varphi_R, \nabla_b, \varepsilon_b, \delta g_N, \delta g_E, \delta g_D] \quad (9)$$

选取北东地(N-E-D)坐标系为导航坐标系。其中: δr 为位置误差; δv 为速度误差; $\delta \varphi$ 为姿态误差, 下标分别代表航向角、俯仰角和横滚角; ∇_b 是加速度计零偏误差; ε_b 是陀螺仪零偏误差; δg 是重力的不确定误差。

连续系统状态方程可表示为:

$$\dot{\delta x}(t) = F(t)\delta x(t) + W(t) \quad (10)$$

具体展开如下:

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

其中: I 和 0 分别为 3×3 的单位矩阵和零矩阵。

$X_r, X_v, X_\varphi, X_{acc}, X_{gyro}, X_{grav}$ 分别为位置、速度和姿态误差向量, 加速度计零偏, 陀螺仪零偏和重力不确定误差。 W 为零均值高斯白噪声。其中各矩阵具体表示如下:

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

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

$$F_{22} =$$

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

$$\mathbf{F}_{23} = \mathbf{C}_b^n \begin{bmatrix} 0 & -f_z^b & f_y^b \\ f_z^b & 0 & -f_x^b \\ -f_y^b & f_x^b & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}_{24} = \mathbf{C}_b^n$$

$$\mathbf{F}_{33} = \begin{bmatrix} 0 & -(2w_{ie} + \dot{\lambda})\sin(\varphi) & \dot{\varphi} \\ (w_{ie} + \dot{\lambda})\sin(\varphi) & 0 & (w_{ie} + \dot{\lambda})\cos(\varphi) \\ -\dot{\varphi} & -(w_{ie}w_{ie} + \dot{\lambda})\cos(\varphi) & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}_{35} = -\mathbf{C}_b^n$$

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

其中: \mathbf{C}_b^n 为载体坐标系(b 系)到导航坐标系(n 系)的方向余弦矩阵; φ 和 λ 分别代表经度和纬度; g 为重力常数; R_e 为平行曲率半径; f^b 为加速度计 b 系输出比力; τ 为重力不确定的高斯马尔科夫过程相关时间的倒数; w_{ie} 为地球旋转速率。

连续系统方程离散化:

$$\delta \mathbf{x}_{k+1} = \Phi_k \delta \mathbf{x}_k + \mathbf{W}_k \quad (12)$$

Φ_k 为状态转移矩阵, 利用近似原理^[11] $\Phi_k \approx \mathbf{I} + \mathbf{F} \Delta t$ 得到。

2.1.2 观测量选取及观测方程的建立

人体在正常运动过程中, 与地面接触时间为毫秒级或更长, 当检测到人体与地面接触达到瞬间静止时, 即达到“零瞬态”, 其输出速度、角速度为零, 但这只是理论上的。由于传感器的测量误差、噪声以及算法误差等原因, 此时计算值并不为零。利用此时速度、加速度的误差作为滤波器的观测量。

瞬间静止时, 速度输出误差和角速度输出误差分别为:

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

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

为了有效校正行人运动方向, 引入地磁辅助, 根据地磁测量单元计算的航向角与惯性导航系统解算出的航向角, 获得航向角误差; 利用加速度计计算出的俯仰角和横滚角与惯性导航系统解算出的姿态角, 获得俯仰角和横滚角误差。将俯仰角、横滚角、航向角误差作为滤波器的观测量。

综上, 选取的观测量为:

$$\mathbf{z}_k = [\Delta \mathbf{v}_k \quad \Delta \mathbf{w}_k \quad \Delta \varphi_H \quad \Delta \varphi_P \quad \Delta \varphi_R]^T =$$

$$[\mathbf{v}_k \quad \mathbf{w}_k \quad \varphi_{H_INS} \quad \varphi_{P_INS} \quad \varphi_{R_INS}]^T -$$

$$[0 \quad 0 \quad \varphi_m \quad \varphi_{P_acc} \quad \varphi_{R_acc}]^T \quad (15)$$

基于 IEKF 的观测方程为:

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

式中: \mathbf{z}_k 为观测量; \mathbf{H} 为观测矩阵; \mathbf{v}_k 是观测噪声, 其协方差矩阵表示为: $\mathbf{R}_k = E(\mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^T)$ 。

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

其中: \mathbf{I} 和 $\mathbf{0}$ 分别为 3×3 的单位矩阵和零矩阵。

2.2 误差校正

在校正步骤中, 估计的误差状态量 $\delta \mathbf{x}$ 对捷联解算部分进行反馈校正, 以修正捷联惯导系统的输出。速度、位置和姿态误差通过如下公式校正:

$$\hat{\mathbf{v}} = \hat{\mathbf{v}}^- + \delta \mathbf{v}$$

$$\hat{\mathbf{r}} = \hat{\mathbf{r}}^- + \delta \mathbf{r} \quad (17)$$

$$\hat{\varphi} = \hat{\varphi}^- + \delta \varphi$$

根据小角度近似原则, 得到等效旋转矩阵, 从而更新 \mathbf{C}_b^n 。

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

2.3 分段闭环平滑算法

常规 EKF 滤波通常将预测的误差状态量作归零处理。本方法中为了达到平滑效果, 对预测状态量作传播迭代, 而非置零。只在“零瞬态”进行状态及协方差更新, 并于此时对误差状态量进行平滑处理。在执行逐步分割后, 估计的状态量融合平滑误差状态量, 从而得到最终导航结果。

融合了平滑算法的 IEKF 滤波具体实施步骤如下表 1 所示。

表 1 IEKF 滤波具体实施步骤

步骤名称	具体实施	公式表达说明
时间更新	捷联惯导解算	\hat{x}_k^-
更新	状态预测	$\delta \hat{x}_k = F_{k,k-1} \delta \hat{x}_{k-1}$
	协方差预测	$P_k^- = F_{k,k-1} P_{k-1}^+ F_{k,k-1}^T + Q_{k-1}$
量测更新	卡尔曼增益	$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1}$
	状态更新	$v_k = z_k - H_k \delta \hat{x}_k^-$
零瞬态触发	协方差更新	$\delta \hat{x}_k^+ = \delta \hat{x}_k^- + K_k v_k$
	补偿校正	$P_k^+ = (I - K_k H_k) P_k^-$ $\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + \delta \hat{x}_k^+$
分割	决定返回时间	分割点为满足分割阈值条件的点
	更新/结束	
闭环后处理	平滑处理	$\delta \hat{x}_{k N}$
	补偿校正	$\hat{x}_{k N} = \hat{x}_k^+ + \delta \hat{x}_{k N}$
	返回闭环	
	继续迭代	

为了得到接近实时平滑的效果,并且尽可能的减少存储负担,上表中所述的分割部分利用直观的阈值控制分割原则,选取零瞬态区间内符合阈值条件的点作为分割点。

定义旋转能量为 T_k , 分割阈值条件为:

$$T_k = \frac{1}{W} \sum_k^{k+W-1} \|\omega_k\|^2 < T_S$$

其中: ω_k 为 k 时刻陀螺仪角速率向量; W 为窗的大小; T_S 为阈值。

此分割原则引入的旋转能量可以检测出晃动点和步态起始点(脚跟落地时刻点),从而避免摆动造成的虚假分割,使分割规则更灵活,可以满足复杂的环境。图 2 显示了旋转能量在一个步态周期内的变化情况。

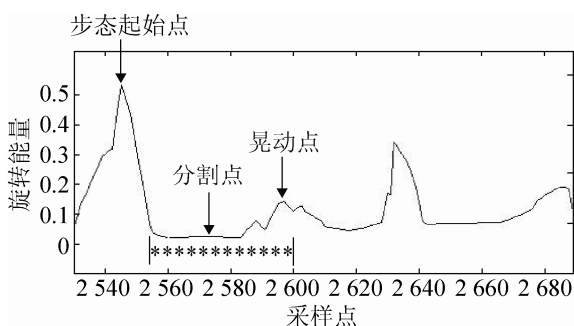


图 2 位置、速度、姿态角误差的协方差图

3 试验验证及结果分析

本文采用自研 IMU 进行鞋载行人运动试验。IMU 包括三轴加速度计、三轴陀螺仪和三轴磁力计,其主要技术指标如表 2 所示。

表 2 IMU 主要技术指标

参数	技术指标		
连续工作时间	≥1 小时		
工作电压	9±0.45V DC		
功耗	≤3W		
静态精度	±0.5°(横滚, 俯仰); ±1°(航向)		
分辨率	0.05°		
输出频率	0.01 to 100 Hz		
标准传感器	加速度计	陀螺仪	磁传感器
测量范围	±10 g	±100/s	±2Gauss
非线性	<0.2% of FS	<0.1% of FS	<0.2% of FS
随机漂移	± 4mg	9.2°/h	±0.5mGauss
带宽	100 Hz	150 Hz	50 Hz

在初始对准后,行人绕某近矩形花坛运动,进行 2 min 左右的多次测试,通过本方法设计的 IEKF 滤波器对传感器数据进行处理得到其在行走状态下的位置、速度、姿态协方差图,如图 3。得到校正平滑后的轨迹图,如图 4。

传感器按 50 Hz/s 更新数据,其数据统计特性如表 3 所示。

通过上述试验结果图和统计数据可以看出,基于 IEKF 的行人导航定位方法可以准确地检测出“零瞬态”时刻,并将如图 5 所示发散严重的纯惯导定位有效收敛,最终得到较为平滑和始末点重复性较高的行进轨迹。应用 IEKF 滤波补偿了惯性器件因长时漂移所带来的定位误差,快速可靠地将速度、位置及姿态角误差保持到很小的阈值里面,使之最终的水平误差精度达到接近 1% 以内(3σ)。试验结果表明本 IEKF-SWCS 方法稳定可靠并且行之有效。

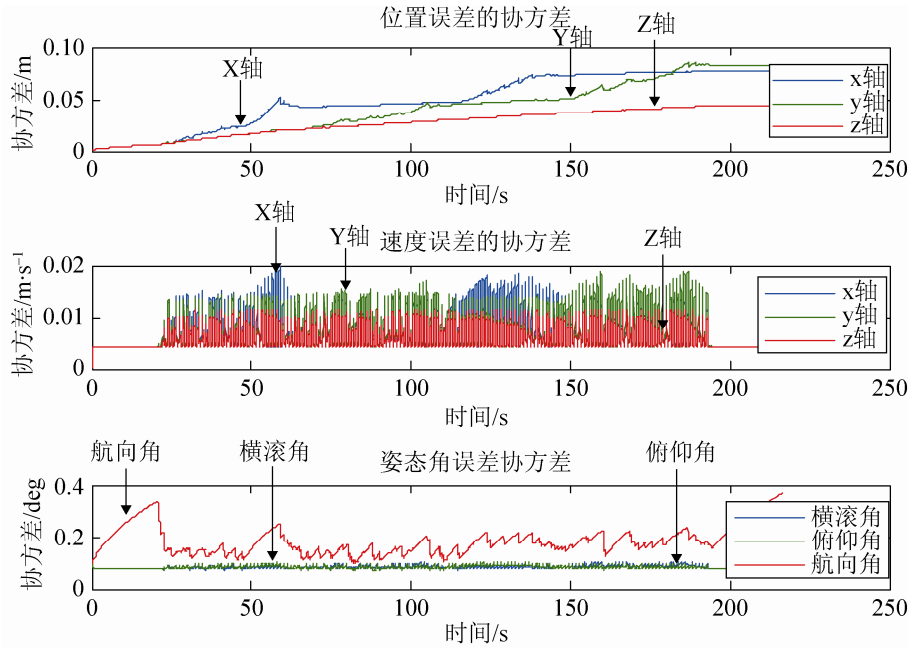


图 3 位置、速度、姿态角误差的协方差图

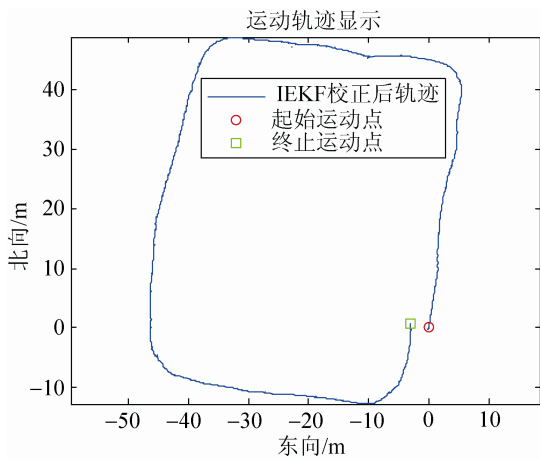


图 4 IEKF 校正后轨迹图

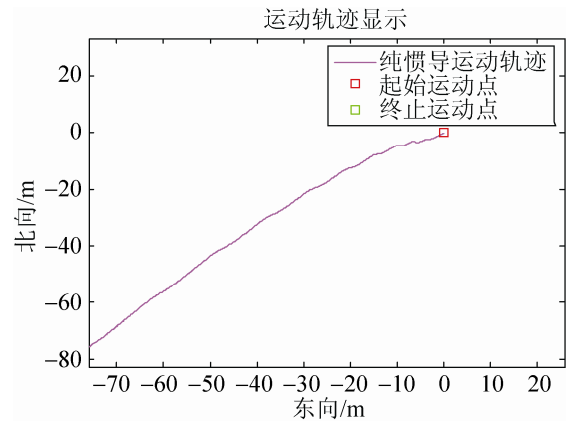


图 5 纯惯导定位的发散轨迹图

表 3 试验结果统计表

试验结果名称	平均值	
位置	X 轴位置误差的协方差	0.049 m
	Y 轴位置误差的协方差	0.051 m
	Z 轴位置误差的协方差	0.025 m
速度	X 轴速度误差的协方差	0.01 m/s
	Y 轴速度误差的协方差	0.01 m/s
	Z 轴速度误差的协方差	0.005 m/s
姿态	横滚角误差的协方差	0.01°
	俯仰角误差的协方差	0.01°
	航向角误差的协方差	0.2°
水平位置差	2.36 m	
单圈路程	230 m	
水平定位精度	1.026 %	

4 结论

本文针对鞋载 IMU 行人导航定位中存在的长时漂移误差累积影响定位精度的问题, 提出了一种基于改进扩展卡尔曼滤波(IEKF)的行人自主导航定位方法。该方法建立融合人体运动特征的滤波模型, 利用零瞬态触发校正行人速度、位置和姿态信息。同时在 IEKF 中设计闭环平滑算法, 提高轨迹平滑度。通过仿真及试验验证结果表明, 本方法能够实时稳定地输出高精度行人导航信息, 并且不增加任何额外硬件成本, 对行人导航的研究具有实际应用价值。

参考文献:

- [1] 赵正平. 典型 MEMS 和可穿戴传感技术的新发展 [J]. 微纳电子技术, 2015, 52(2): 69-74.
- [2] 齐保振. 基于运动传感的个人导航系统及算法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [3] A Jimenez, F Seco, J Prieto, *et al.* A comparison of Pedestrian Dead-Reckoning algorithms using a low-cost MEMS IMU [C]// IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing, 2009. USA: IEEE, 2009: 37-42.
- [4] E Foxlin, Pedestrian tracking with shoe-mounted inertial sensors [C]// IEEE Computer Graphics and Applications, 2005. USA: IEEE, 2005: 38-46.
- [5] Francisco Zampella. Unscented Kalman filter and Magnetic Angular Rate Update (MARU) for an improved Pedestrian Dead-Reckoning [C]// IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, 2012. USA: IEEE, 2012: 129-139.
- [6] 李佳璇. 基于等式约束卡尔曼的双 MIMU 行人导航方案 [J]. 压电与声光, 2015, 37(2): 237-242.
- [7] Shin E H. Estimation techniques for low cost inertial navigation [D]. Canada: University of Calgary, 2005.
- [8] 秦永元. 惯性导航 [M]. 北京: 科技出版社, 2006.
- [9] 秦永元, 张洪钺, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998.
- [10] S Rajagopal. Personal dead reckoning system with shoe mounted inertial sensors [D]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2008.
- [11] Grover Robert, P Y C Hwang. Introduction to random signals and applied Kalman filtering [M]. Canada: Hamilton Printing Company, 1992.
- [12] Yasmine. Divided Difference Kalman Filter for Indoor Mobile Localization [C]// IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, 2013. USA: IEEE, 2013: 1-8.
- [13] M Romanovas. A study on indoor pedestrian localization algorithms with foot-mounted sensors [C]// IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, 2012. USA: IEEE, 2012: 1-10.
- [14] Fredrik Olsson. Cooperative Localization Using a Foot-mounted Inertial Navigation System and Ultrawideband Ranging [C]// IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, 2014. USA: IEEE, 2014: 631-636.
- [15] Janardhanan J. Attitude Estimation for Pedestrian Navigation Using Low Cost MEMS Accelerometer in Mobile Applications, and Processing Methods, Apparatus and Systems [P]. US Patent: 8,694,251, 8 April 2014.

《系统仿真学报》荣获“2014 中国最具国际影响力学术期刊”证书

由中国学术期刊（光盘版）电子杂志社与清华大学图书馆联合成立的中国学术文献国际评价研究中心，以美国汤森路透 Web of Science 收录的 1.2 万余种期刊为引文统计源，首次研制发布了 2012《中国学术期刊国际引证年报》（CAJ-IJCR 年报）。第一次给出了我国 5600 余种中外文学术期刊总被引频次、影响因子、半衰期等各项国际引证指标，并采用了新的国际影响力综合评价指标 CI 对期刊排序，发布了“中国最具国际影响力学术期刊”（排序 TOP5%）和“中国国际影响力优秀学术期刊”（排序 TOP5-10%），在国内外学术界产生了较大反响。之后，2013 年版年报，将引文统计源期刊扩展到 1.44 万多种。目前，2014 版国际、国内年报与 TOP5% 和 TOP5-10% 期刊的遴选业已完成，《系统仿真学报》被列入“2014 中国最具国际影响力学术期刊”行列。

我学报连续 2 年被列入 TOP5% 国内一流的中国最具国际影响力学术期刊，走向世界，进入国际一流，指日可待！