



系统工程与电子技术
Systems Engineering and Electronics
ISSN 1001-506X, CN 11-2422/TN

《系统工程与电子技术》网络首发论文

题目: 基于 ZIHR 航向角修正方法的行人导航算法
作者: 周广涛, 王晴晴, 高远
收稿日期: 2017-11-27
网络首发日期: 2018-11-14
引用格式: 周广涛, 王晴晴, 高远. 基于 ZIHR 航向角修正方法的行人导航算法[J/OL]. 系统工程与电子技术.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20181113.1522.012.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于 ZIHR 航向角修正方法的行人导航算法

周广涛, 王晴晴, 高远

(哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 在行人导航系统中, 零速修正 (zero velocity update, ZUPT) 方法能够准确计算出速度误差和水平姿态角误差, 但是航向角误差却因其不可观难以估计而极易发散。为了解决航向角误差极易发散的问题, 本文提出了零积分航向角速率 (zero integrated heading rate, ZIHR) 修正方法。推导发现在零速状态下相邻航向角差值和陀螺的漂移及航向角误差存在一定的关系, 将此差值作为量测值, 在 ZUPT 的基础上扩展一维量测, 将卡尔曼滤波得到的估计值进行反馈校正。通过多组微机电系统 (micro-electro mechanical system, MEMS) 实物实验验证: 提出的 ZIHR 修正方法能够很好的解决 MEMS 惯性器件漂移导致的误差累积问题, 多组实验的定位误差均小于总行程的 2%。

关键词: 行人导航; 零速修正; 零积分航向角速率; 卡尔曼滤波

中图分类号: U666.1 **文献标志码:** A

Pedestrian navigation algorithm based on ZIHR heading angle correction method

ZHOU Guangtao, WANG Qingqing, GAO Yuan

(School of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In pedestrian navigation system, zero velocity update (ZUPT) can estimate the velocity errors and horizontal attitude errors. However, good heading error estimation for such a system remains a challenge, this is due to the unobservability of heading error. In order to solve the problem of easily divergent heading error, zero integrated heading rate (ZIHR) correction method is proposed. The heading angle difference at adjacent time has a certain relationship with the drift of the gyro and heading error angle. The difference is taken as the measurement value and one-dimensional measurement is extended on the basis of ZUPT. The errors which are estimated by Kalman filter are fed back to original navigation system. In the end, multiple sets of physical experiment results show that the ZIHR correction method can efficiently reduce the drift errors of the MEMS inertial sensors, and the position accuracy can reach 2% of travel distance.

Keywords: pedestrian navigation; zero velocity update(ZUPT); zero integrated heading rate(ZIHR); Kalman filter

0 引 言

由于微机电系统 (micro-electro mechanical system, MEMS) 具有体积小, 成本低, 重量轻等优点, 因此对以 MEMS 为基础的行人导航方法的研究已经成为热点^[1]。行人导航系统对人员

的定位起到很大的帮助作用, 尤其是消防人员和盲人。在没有全球定位系统 (global positioning system, GPS) 辅助下的行人导航可以使用陀螺仪来估计行人航向的变化。陀螺仪能够输出载体的旋转角速率, 对其测量值施加数值积分就能够产生所需的航向信息。由于陀螺仪的测量信号里

存在接近恒定的、数值很小的漂移值，尤其是 MEMS 陀螺仪，其精度低，漂移相对较大，使得在信号积分过程中计算出的航向角与真实的航向角之间产生不可忽略的误差。

行人导航运动轨迹会随着航向角误差的累积而偏离真实的行走路线，如何将航向角误差降低到合理的范围内，是行人导航研究的一大难题。文献[2]利用零角速率修正算法来抑制静止时刻陀螺仪的漂移。文献[3]提出了启发式漂移减少的技术来减小航向角误差。文献[4]将磁力计易受干扰但是长时间定位精度高的特点与 MEMS 抗干扰能力强短时定位精度高，长时间误差发散的特点实施优势互补，对航向角施加修正。文献[5]利用楼向信息来对航向角进行修正，但是此方法需假设建筑物内大部分走廊和路径是直的。文献[6]利用 WIFI 辅助航迹推算，采用无迹卡尔曼滤波方法，以松组合的形式对航向角进行修正。文献[7]提出一种脚踏式行人导航方法，采用零速修正（zero velocity update, ZUPT）的方法能有效降低传感器引起的累积误差。

虽然 ZUPT 能够使得速度误差与水平姿态角误差在一定程度上得到抑制，但是航向角误差仍然不能得到很好的校正^[8]。这是由于航向角误差状态量的不可观测性导致的，对于不可观的状态量，卡尔曼滤波器是不能精确地对其进行估计的^[9]。本文提出的零积分航向角速率（zero integrated heading rate, ZIHR）修正算法，利用零速期间相邻时刻航向角真值相同，但是 MEMS 惯导计算出的航向角大小不同的特点，将相邻时刻航向角的差值作为量测值，来抑制航向角误差的累积。公式推导发现，相邻时刻航向角的差值和陀螺漂移及航向角误差存在确定的联系^[10]。实验证明此方法能够很好的抑制航向角误差的发散。

1 MEMS 行人导航定位算法

MEMS 行人导航定位算法包括两部分：初始对准和导航解算，图 1 为本文行人导航原理方框图。

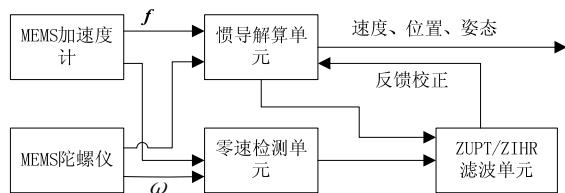


图 1 行人导航系统原理方框图

Fig. 1 Principle block diagram of Pedestrian navigation system

1.1 初始对准

初始对准为导航算法提供起始的纵摇、横摇以及航向信息，为导航定位中的一个重要环节。初始对准含有粗对准与精对准两部分。由于 MEMS 陀螺仪的精度低导致其不能敏感到地球的自转角速度，因此 MEMS 不能实现方位上的自校准功能，只能使用静止时刻加速度计的测量值实现水平方向上的粗校准。而方位上的粗校准则需要利用外部设备获取，比如磁力计。

下面介绍相关坐标系 n 系， b 系和 n' 系的定义和它们相互间的旋转关系。

n 系：导航坐标系。本文选取的导航系和地理系相重合。地理系的原点设在载体重心上， x_n 轴朝向东， y_n 朝向北， z_n 与 x_n ， y_n 构成右手正交定则。

b 系：载体坐标系。载体系的原点设在载体重心上， x_b 轴与载体的横轴重合并朝向右， y_b 轴与载体的纵轴重合并朝向前， z_b 轴与 x_b ， y_b 构成右手正交定则。

n' 系：由 b 系可以通过三次欧拉角转换到 n 系，而 n' 系是三次转换过程中的中间坐标系，绕 n' 系的 n'_z 轴转动一定的角度可以得到 n 系。

坐标系之间的旋转关系如图 2 所示。

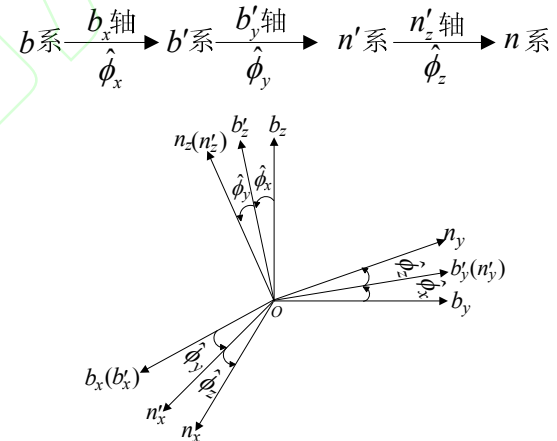


图 2 载体坐标系到导航坐标系的旋转示意图

Fig. 2 Rotation of carrier body coordinate system to navigation coordinate system

初始对准过程中，载体是静止的，可得如下公式：

$$\begin{bmatrix} f_x^b \\ f_y^b \\ f_z^b \end{bmatrix} = C_n^b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中， $C_n^b = (C_n^{n'})^T = (C_n^{n'} C_{b'}^{n'} C_{b'}^b)^T$ 。

得俯仰角 $\hat{\phi}_x$ 和横滚角 $\hat{\phi}_y$ 的初始值^[11]为

$$\hat{\phi}_x = -\arctan \frac{f_y^b}{f_z^b} \quad (2)$$

$$\hat{\phi}_y = -\arcsin \frac{f_x^b}{|g|} \quad (3)$$

式中, f_x^b , f_y^b , f_z^b 为三轴加速度计的直接输出值。

设三轴磁力计的直接输出值为 M_x^b , M_y^b , M_z^b , 则输出值在 n' 系下可分解^[12]为

$$\begin{bmatrix} M_x^{n'} \\ M_y^{n'} \\ M_z^{n'} \end{bmatrix} = C_b^{n'} \begin{bmatrix} M_x^b \\ M_y^b \\ M_z^b \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $C_b^{n'} = C_b^{n'} C_b^{b'}$ 。

$$\hat{\phi}_z = -\arctan \left(\frac{M_y^{n'}}{M_x^{n'}} \right) - M_d \quad (5)$$

化简之后可得:

$$\hat{\phi}_z = \arctan \frac{M_x^b \cos \hat{\phi}_x}{M_x^b \sin \hat{\phi}_x \sin \hat{\phi}_y - M_y^b \cos \hat{\phi}_y} - M_d \quad (6)$$

式中, M_d 为当地的地磁偏角; $\hat{\phi}_z$ 是磁力计测得的航向角。上述得到的 $\hat{\phi}_x$, $\hat{\phi}_y$, $\hat{\phi}_z$ 还存在很大的误差^[13]。因此在进行导航解算之前, 保持一段时间的静止, 利用基于 ZUPT 和 ZIHR 修正的卡尔曼滤波器来得到更加精确的初始姿态角。

1.2 导航解算

取人身体的右-前-上为载体坐标系 (b 系), 如图 3 所示。

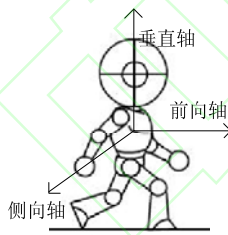


图 3 载体坐标系示意图

Fig. 3 The carrier body coordinate system

则 MEMS 行人导航系统基本方程如下^[14]:

$$\dot{C}_b^n = C_b^n \Omega_{ib}^b - \Omega_{in}^n C_b^n \quad (7)$$

$$\dot{v}^n = C_b^n f^b - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times v^n + g^n \quad (8)$$

$$\dot{r}^n = v^n \quad (9)$$

式中, C_b^n 为姿态矩阵; Ω_{ib}^b 为 ω_{ib}^b 的反对称矩阵; Ω_{in}^n 为 ω_{in}^n 的反对称矩阵, $\omega_{in}^n = \omega_{ie}^n + \omega_{en}^n$; ω_{ie}^n 是地球自转角速度; ω_{en}^n 为地速产生的角速度; v^n 是载体速度在导航系上的投影; r^n 为行人位

置在导航系上的投影。根据 MEMS 惯性器件的精度低和人行走步态的特点, 将 ω_{ie}^n 和 ω_{en}^n 两项忽略。简化后的 MEMS 行人导航基本方程如下:

$$\dot{C}_b^n = C_b^n \Omega_{ib}^b \quad (10)$$

$$\dot{v}^n = C_b^n f^b + g^n \quad (11)$$

$$\dot{r}^n = v^n \quad (12)$$

2 零速检测技术算法

零速检测技术是为了判断一段时间内行人是否在零速状态下。目前的方法主要有两类, 一类是利用 MEMS 惯性测量元件的输出值进行检测, 主要有隐马尔科夫模型检测、广义似然比检测、加速度方差检测、加速度模值检测和角速度能量检测。另一类是借用外部辅助设备进行检测, 比如高分辨率压力传感器检测, 将其安装在行人脚跟与地面的接触处, 利用压力传感器的测量来检测零速^[15]; 磁力计检测, 将 MEMS 和永磁体分别安装两只脚上, 利用 MEMS 自带的磁力计测量的磁感应强度值来检测零速^[16]。本文使用广义似然比的方法进行零速检测, 检测融合了陀螺仪和加速度计的输出值, 使得检测精度得到大大的提高。

将零速检测看成是一个假设性检验问题, 假设某段时间内行人处于零速状态, 采样个数为 N , 即滑动窗口为 N 。如果下式成立则认为假设成立, 行人处于零速状态, 否则假设不成立, 行人处于运动状态^[17]。

$$T(f_k, \omega_k) < L \quad (13)$$

$$|f_k| = \sqrt{f_x^2(t_k) + f_y^2(t_k) + f_z^2(t_k)} \quad (14)$$

$$|\omega_k| = \sqrt{\omega_x^2(t_k) + \omega_y^2(t_k) + \omega_z^2(t_k)} \quad (15)$$

$$T(f_k, \omega_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=k}^{N+k-1} \left(\frac{1}{\sigma_f^2} \left\| f_i - g \frac{\bar{f}_i}{\|\bar{f}_i\|} \right\|^2 + \frac{1}{\sigma_w^2} \|\omega_i\|^2 \right) \quad (16)$$

式中, f_k , ω_k 为陀螺仪和速度计在 t_k 时刻的输出量, 忽略上标 b ; g 为地球重力加速度; $T(f_k, \omega_k)$ 为零速检测的检验统计量; L 为阈值; σ_f 为加速度计输出噪声的标准差; σ_w 为陀螺仪输出噪声的标准差。阈值 L 与加速度计和陀螺仪输出噪声统计特性有关, 窗口大小 N 与 MEMS 输出频率和步速有关。

从图 4 可以看出, 行人行走时加速度计与陀螺仪的输出很有规律, 为零速检测提供了条件。

零速检测实验单脚行走 32 步, 用时 40 s, 图 5 中的广义似然比方法同样检测出 32 个零速状态, 对比速度曲线图, 发现每一个零速状态都与速度曲线中的零速时刻相对应, 说明广义似然比零速检测效果很是精准。

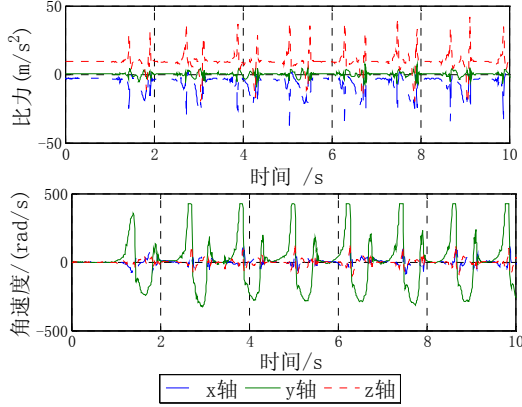


图 4 陀螺仪与加速度输出曲线图
Fig. 4 The output of gyro and acceleration

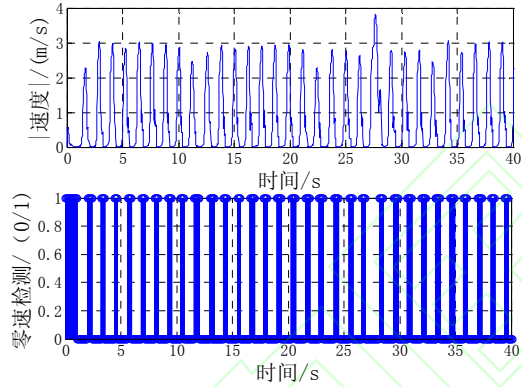


图 5 广义似然比零速检测示意图
Fig. 5 Zero velocity detection based on generalized likelihood ratio

3 ZIHR 修正方法

在零速状态下, 因为航向角误差具有不可观测性, 仅利用 ZUPT 技术进行卡尔曼滤波不能对航向角误差进行精准的估计。理论上, 零速状态下相邻时刻的真实航向角是相同的, 但是由于 MEMS 陀螺仪的漂移大, 导致 MEMS 惯导计算得到的相邻时刻的航向角并不相同。在零速状态下, 将相邻时刻航向角的差值作为量测量, 能够减小陀螺仪漂移引起的航向角误差, 从而提高行人导航定位精度。

导航坐标系依次转换 ϕ_z , ϕ_x , ϕ_y 可得到载体坐标系。具体转动顺序如下:

$$n\text{系} \xrightarrow[\phi_z]{n_z\text{轴}} n'\text{系} \xrightarrow[\phi_x]{n'_x\text{轴}} b'\text{系} \xrightarrow[\phi_y]{b'_y\text{轴}} b\text{系}$$

将载体坐标系相对于导航坐标系的旋转角速度向量 ω_{nb} 表达为:

$$\omega_{nb} = \dot{\phi}_z + \dot{\phi}_x + \dot{\phi}_y \quad (17)$$

将 ω_{nb} 分解到载体坐标系上:

$$\omega_{nb}^b = C_{b'}^b C_{n'}^{b'} \dot{\phi}_z + C_{b'}^b \dot{\phi}_x + \dot{\phi}_y \quad (18)$$

将上式展开化简得:

$$\begin{bmatrix} \omega_{nbx}^b \\ \omega_{nby}^b \\ \omega_{nbz}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \phi_y \cos \phi_x & \cos \phi_y & 0 \\ \sin \phi_x & 0 & 1 \\ \cos \phi_y \cos \phi_x & \sin \phi_y & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_z \\ \dot{\phi}_x \\ \dot{\phi}_y \end{bmatrix} \quad (19)$$

通过对上式矩阵求逆可得:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_z \\ \dot{\phi}_x \\ \dot{\phi}_y \end{bmatrix} = \frac{1}{\cos \phi_x} \cdot \begin{bmatrix} -\sin \phi_y & 0 & \cos \phi_y \\ \cos \phi_y \cos \phi_x & 0 & \sin \phi_y \cos \phi_x \\ \sin \phi_x \sin \phi_y & \cos \phi_x & -\sin \phi_x \cos \phi_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{nbx}^b \\ \omega_{nby}^b \\ \omega_{nbz}^b \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中, $\omega_{nb}^b = \omega_{ib}^b - C_n^b \omega_{in}^n$, 代入 ω_{nb}^b 得真实航向角变化率:

$$\dot{\phi}_z = \begin{bmatrix} -\sec \phi_x \sin \phi_y & 0 & \sec \phi_x \cos \phi_y \end{bmatrix} \omega_{ib}^b - \begin{bmatrix} \tan \phi_x \sin \phi_z & -\tan \phi_x \cos \phi_z & 1 \end{bmatrix} \omega_{in}^n \quad (21)$$

由上式得计算航向角的变化率为

$$\hat{\phi}_z = \begin{bmatrix} -\sec \hat{\phi}_x \sin \hat{\phi}_y & 0 & \sec \hat{\phi}_x \cos \hat{\phi}_y \end{bmatrix} \tilde{\omega}_{ib}^b - \begin{bmatrix} \tan \hat{\phi}_x \sin \hat{\phi}_z & -\tan \hat{\phi}_x \cos \hat{\phi}_z & 1 \end{bmatrix} \hat{\omega}_{in}^n \quad (22)$$

$$\tilde{\omega}_{ib}^b = \omega_{ib}^b + \varepsilon_g^b + m_g^b \quad (23)$$

式中, ε_g^b 为陀螺仪的常值漂移; m_g^b 为陀螺仪输出噪声。因为处于静止状态, 所以 $\omega_{in}^n = \omega_{ie}^n$ 。

将式 (21) 和式 (22) 相减可得:

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_z - \dot{\phi}_z &= \delta \dot{\phi}_z \\ &\approx \begin{bmatrix} -\sec \phi_x \sin \phi_y & 0 & \sec \phi_x \cos \phi_y \end{bmatrix} (\omega_{ib}^b + \varepsilon_g^b + m_g^b) - \\ &\quad \begin{bmatrix} \tan \phi_x \sin(\phi_z + \delta \phi_z) & -\tan \phi_x \cos(\phi_z + \delta \phi_z) & 1 \end{bmatrix} \omega_{ie}^n - \\ &\quad \begin{bmatrix} -\sec \phi_x \sin \phi_y & 0 & \sec \phi_x \cos \phi_y \end{bmatrix} \omega_{ib}^b + \\ &\quad \begin{bmatrix} \tan \phi_x \sin \phi_z & -\tan \phi_x \cos \phi_z & 1 \end{bmatrix} \omega_{ie}^n \\ &\approx \begin{bmatrix} -\sec \phi_x \sin \phi_y & 0 & \sec \phi_x \cos \phi_y \end{bmatrix} (\varepsilon_g^b + m_g^b) - \\ &\quad \delta \phi_z \begin{bmatrix} \tan \phi_x \cos \phi_z & \tan \phi_x \sin \phi_z & 0 \end{bmatrix} \omega_{ie}^n \end{aligned} \quad (24)$$

$$\omega_{ie}^n = \begin{bmatrix} 0 & \omega_{ie} \cos \varphi & \omega_{ie} \sin \varphi \end{bmatrix}^T \quad (25)$$

式中, φ 为当地纬度, 将 ω_{ie}^n 代入式 (24) 得到:

$$\begin{aligned} \delta \dot{\phi}_z &\approx \begin{bmatrix} -\sec \phi_x \sin \phi_y & 0 & \sec \phi_x \cos \phi_y \end{bmatrix} (\varepsilon_g^b + m_g^b) - \\ &\quad \delta \phi_z \omega_{ie} \cos \varphi \tan \phi_x \sin \phi_z \end{aligned} \quad (26)$$

当行人处于零速状态下, $\phi_{z_k} = \phi_{z_{k-1}}$, 则计算相邻时刻航向角的差值为

$$\begin{aligned} \hat{\phi}_{z_k} - \hat{\phi}_{z_{k-1}} &= \phi_{z_k} + \delta \phi_{z_k} - \phi_{z_{k-1}} - \delta \phi_{z_{k-1}} \approx \delta \dot{\phi}_{z_{k-1}} \Delta t_k = \\ &\quad \begin{bmatrix} -\sec \phi_x \sin \phi_y & 0 & \sec \phi_x \cos \phi_y \end{bmatrix} \varepsilon_g^b \Delta t_k + \\ &\quad \begin{bmatrix} -\sec \phi_x \sin \phi_y & 0 & \sec \phi_x \cos \phi_y \end{bmatrix} \int_{t_{k-1}}^{t_k} m_g^b dt - \\ &\quad \delta \phi_z (\omega_{ie} \cos \varphi \tan \phi_x \sin \phi_z) \Delta t_k \end{aligned} \quad (27)$$

将式 (27) 中的第二项由 m_g^b 引起的误差项作为卡尔曼滤波中的量测噪声项 V_4 ; $\Delta t_k = 0.01$ s 为采样周期。化简之后, 两个采样时刻航向角的差值为

$$\begin{aligned} \hat{\phi}_{z_k} - \hat{\phi}_{z_{k-1}} &= -\delta \phi_z (\omega_{ie} \cos \varphi \tan \phi_x \sin \phi_z) \Delta t_k + \\ &\quad \begin{bmatrix} -\sec \phi_x \sin \phi_y & 0 & \sec \phi_x \cos \phi_y \end{bmatrix} \varepsilon_g^b \Delta t_k + V_4 \end{aligned} \quad (28)$$

$$V_4 = \begin{bmatrix} -\sec \phi_x \sin \phi_y & 0 & \sec \phi_x \cos \phi_y \end{bmatrix} \int_{t_{k-1}}^{t_k} m_g^b dt \quad (29)$$

4 系统卡尔曼滤波模型

本小节中的卡尔曼滤波模型是基于 MEMS 惯性导航系统的误差方程建立的。选取导航坐标系中的位置误差、速度误差、姿态误差, 加速度计常值偏差和陀螺仪常值漂移组成状态矢量, 即

$X = (\delta r^n, \delta v^n, \delta \phi^n, \nabla_a^b, \varepsilon_g^b)^T$, 则 MEMS 行人

导航系统在导航坐标系下的误差模型^[18]为

$$\delta \dot{r}^n = \delta v^n \quad (30)$$

$$\delta \dot{v}^n = [f^n \times] \delta \phi^n + C_b^n \nabla_a^b + C_b^n m_a^b \quad (31)$$

$$\delta \dot{\phi}^n = -C_b^n \varepsilon_g^b - C_b^n m_g^b \quad (32)$$

$$\dot{\nabla}_a^b = B_1 \nabla_a^b + w_a^b \quad (33)$$

$$\dot{\varepsilon}_g^b = B_2 \varepsilon_g^b + w_g^b \quad (34)$$

式中, ∇_a^b 为加速度计常值偏差; m_a^b 为加速度计输出噪声; w_a^b, w_g^b 分别为在 $\nabla_a^b, \varepsilon_g^b$ 一阶马尔科夫建模下的高斯白噪声, B_1, B_2 分别为一阶马尔科夫建模的相关时间常数。

在零速状态下, 如果只用 ZUPT 观测量, 则不能精确估计出航向角误差, 为了提高航向角的计算精度, 同时进行 ZUPT 和 ZIHR 修正, 则量测值 $Z = [\delta v^n, \hat{\phi}_{z_k} - \hat{\phi}_{z_{k-1}}]^T$, $\hat{\phi}_{z_k} - \hat{\phi}_{z_{k-1}}$ 为相邻时刻航向角的差值。行人导航系统的状态方程与量测方程为:

$$\dot{X}(t_k) = F(t_k) X(t_k) + G(t_k) W(t_k) \quad (35)$$

$$Z_k = H_k X_k + V_k \quad (36)$$

其中, 状态转移矩阵和观测矩阵的公式表述如下:

$$F(t_k) = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$F_{11} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & (f^n \times)_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

$$F_{12} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ (C_b^n)_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & (-C_b^n)_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

$$F_{21} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

$$F_{22} = \begin{bmatrix} (B_1)_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & (B_2)_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

$$H_k = [H_1 \ H_2 \ H_3 \ H_4] \quad (38)$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad H_3 = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(\omega_{ie} \cos \varphi \tan \phi_x \sin \phi_z) \Delta t_k \end{bmatrix}$$

$$H_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\sec \phi_x \sin \phi_y & 0 & \sec \phi_x \cos \phi_y \end{bmatrix}$$

状态方程是连续的,需要经过离散化之后才可用卡尔曼滤波器实施滤波估算。离散化之后,系统的状态方程为

$$X_k = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + \Gamma_{k-1} W_{k-1} \quad (39)$$

$$\begin{cases} \Phi_{k,k-1} = I + F(t_{k-1}) \Delta t_k \\ \Gamma_{k-1} = G(t_{k-1}) \Delta t_k \end{cases} \quad (40)$$

同时 W_k 和 V_k 满足:

$$\begin{cases} E[W_k] = 0, \text{Cov}[W_k, W_j] = E[W_k W_j^T] = Q_k \delta_{kj} \\ E[V_k] = 0, \text{Cov}[V_k, V_j] = E[V_k V_j^T] = R_k \delta_{kj} \\ \text{Cov}[W_k, V_j] = E[W_k V_j^T] = 0 \end{cases} \quad (41)$$

卡尔曼滤波具体步骤如下:

(1) 时间更新:

状态一步预测:

$$\hat{X}_{k|k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1} \quad (42)$$

一步预测误差协方差:

$$P_{k|k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k-1}^T \quad (43)$$

(2) 量测更新:

滤波增益:

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (44)$$

状态估计:

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k|k-1} + K_k (Z_k - H_k \hat{X}_{k|k-1}) \quad (45)$$

预测误差协方差:

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \quad (46)$$

式中, $\Phi_{k,k-1}$ 是 15×15 维系统矩阵; H_k 是 4×15 维的观测矩阵; W_{k-1} 是 12×1 维的系统噪声序列; Γ_{k-1} 是 15×12 维的系统过程噪声驱动阵; V_k 是 4×1 维的量测噪声序列; Q_k 是系统噪声序列方差阵, R_k 是量测噪声序列方差阵。

反馈校正就是把卡尔曼滤波器计算得到的状态值 \hat{X}_k 反馈到惯性导航的系统内部。所以在反馈校正中,应该将状态的一步预测置零。即 $\hat{X}_{k|k-1} = 0$ 。

量测信息是在零速状态下获取的,在 t_k 时

刻,如果零速检测处于运动状态,则滤波器只进行时间更新;如果检测处于零速状态,则滤波器进行完整的更新(时间更新和量测更新)。

5 实验验证

5.1 实验条件

本文实验使用的 MEMS 是由 XSENS 公司生产的 MTi-G 系列产品。其特征就在于体积小、重量轻、稳定性高并能保证一定的精度,完全符合行人导航的要求。MTi-G 型 MEMS 包括三轴陀螺仪、三轴加速度计和三轴的磁力计等器件。表 1 为 MTi-G700 传感器实测零偏稳定性。表 2 为 MTi-G700 传感器数据性能规格。

表 1 MTi-G700 传感器实测精度

Table 1 The Measured precision of MTi-G700

器件	实测精度
陀螺仪/(°/h)	(36, 28, 27)
加速度/ μg	(59, 68, 58)

表 2 MTi-G700 传感器数据性能规格

Table 2 Data performance specifications of MTi-G700

器件	陀螺仪	加速度计	磁力计
量程	(-450, 450) °	(-50, -50) m/s ²	(-80, 80) μT
非线性/(%FS)	0.01	0.03	0.1
非正交性/(°)	0.05	0.05	—
零偏稳定性	10°/h	40 μg	—
带宽/Hz	415	375	—
噪音强度	0.01 °/s/(Hz) ^{1/2}	80 μg /(Hz) ^{1/2}	200 μG /(Hz) ^{1/2}
A/D 分辨率/bit	16	16	12
默认采样频率/Hz	100	100	100

5.2 实验参数设置

下面给出算法中相关参数的大小设置：

$$\sigma_f = 0.01 \text{ m/s} \quad \sigma_\omega = 0.1 * \pi / 180 \text{ rad/s}$$

$$L = 0.3 * 10^5 \quad N = 3$$

$$P_0 = \text{diag}(P_{01}, P_{02}, P_{03}, P_{04}, P_{05})_{15 \times 15}$$

$$P_{01} = \text{diag}\left((1 * 10^{-5})^2, (1 * 10^{-5})^2, (1 * 10^{-5})^2\right)$$

$$P_{02} = \text{diag}\left((1 * 10^{-5})^2, (1 * 10^{-5})^2, (1 * 10^{-5})^2\right)$$

$$P_{03} = \text{diag}\left(\left(\frac{0.1 * \pi}{180}\right)^2, \left(\frac{0.1 * \pi}{180}\right)^2, \left(\frac{0.1 * \pi}{180}\right)^2\right)$$

$$P_{04} = \text{diag}\left((0.3)^2, (0.3)^2, (0.3)^2\right)$$

$$P_{05} = \text{diag}\left(\left(\frac{0.3 * \pi}{180}\right)^2, \left(\frac{0.3 * \pi}{180}\right)^2, \left(\frac{0.3 * \pi}{180}\right)^2\right)$$

$$Q = \text{diag}(Q_1, Q_2, Q_3, Q_4)_{12 \times 12}$$

$$Q_1 = \text{diag}\left((0.5)^2, (0.5)^2, (0.5)^2\right)$$

$$Q_2 = \text{diag}\left(\left(\frac{0.5 * \pi}{180}\right)^2, \left(\frac{0.5 * \pi}{180}\right)^2, \left(\frac{0.5 * \pi}{180}\right)^2\right)$$

$$Q_3 = \text{diag}\left((1 * 10^{-7})^2, (1 * 10^{-7})^2, (1 * 10^{-7})^2\right)$$

$$Q_4 = \text{diag}\left(\left(\frac{\pi * 10^{-7}}{180}\right)^2, \left(\frac{\pi * 10^{-7}}{180}\right)^2, \left(\frac{\pi * 10^{-7}}{180}\right)^2\right)$$

$$R = \text{diag}(0.01^2, 0.01^2, 0.01^2, 0.01^2)$$

$$X_0 = [\mathbf{0}_{1 \times 3}, \mathbf{0}_{1 \times 3}, \mathbf{0}_{1 \times 3}, \mathbf{0}_{1 \times 3}, \mathbf{0}_{1 \times 3}]^T$$

5.3 实验结果分析

5.3.1 第一组实验

利用分段线性定常系统和奇异值分解法对某一时间段内施加 ZIHR 修正前后的状态变量的可观测性进行判断。

因为姿态误差角和陀螺漂移之间存在直接的联系，所以下表中只列出了施加 ZIHR 修正前后的姿态误差角和陀螺漂移可观测度的变化。

图 6 和表 3 为施加 ZIHR 修正前后的状态变量的可观测度对比，可以看出行人导航系统中，因为 MEMS 陀螺仪的精度低，所以未施加 ZIHR 修正时的航向角误差和 Z 轴的陀螺漂移都是不可

可观的。施加 ZIHR 修正之后航向角误差与 Z 轴陀螺漂移的可观测度得到一定的提高。因此施加 ZIHR 修正的行人导航系统能够准确的估计出 Z 轴陀螺漂移和航向角误差，从而对航向角进行修正，提高定位精度。

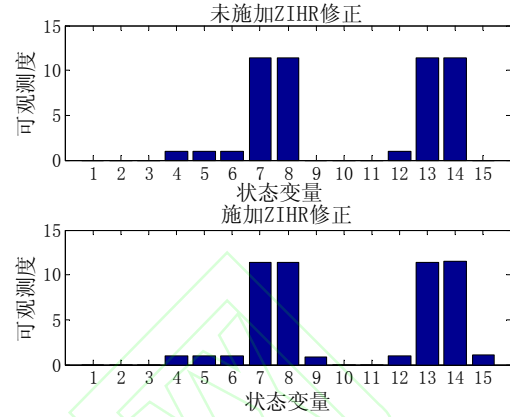


图 6 施加 ZIHR 修正前后的状态变量的可观测度
Fig. 6 Degree of observability of state variables with and without ZIHR

表 3 施加 ZIHR 修正前后的姿态误差角和陀螺漂移的
可观测度

Table 3 Degree of observability of attitude errors and gyro drift with and without ZIHR

状态变量	不施加 ZIHR	施加 ZIHR
$\delta\phi_x$	11.438 5	11.438 5
$\delta\phi_y$	11.438 5	11.436 5
$\delta\phi_z$	0	1.070 9
ε_x	11.394 7	11.395
ε_y	11.394 7	11.478
ε_z	0	0.877 27

5.3.2 第二组实验

将 MEMS 放在隔震台上 14 min 进行静态测试。图 7 为静态实验施加 ZIHR 修正前后航向角变化对比图，可以看出施加 ZIHR 修正的航向角在初始时刻会产生偏差，然而随着时间的增长，偏差逐渐减小，并收敛于真实值。而未施加 ZIHR 修正的航向角会以一定的斜率直线增大，与真实值相差逐渐增大。图 8 为静态实验施加 ZIHR 修正前后航向角误差的标准差对比图，可以看出施加 ZIHR 修正的航向角误差标准差相对更小。

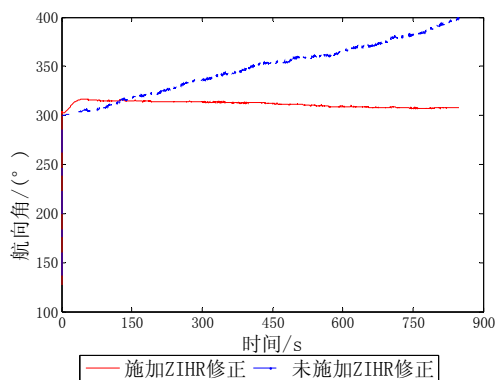


图7 静态实验施加 ZIHR 修正前后的航向角变化对比图
Fig. 7 Comparison of heading angle in static test with and without ZIHR

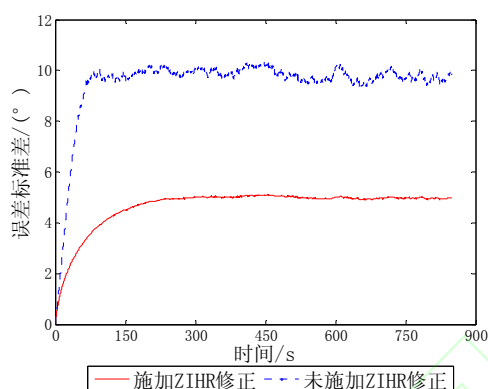


图8 静态实验施加 ZIHR 修正前后的航向角误差标准差对比图

Fig. 8 Comparison of heading angle error standard deviation in static test with and without ZIHR

5.3.3 第三组实验

连续行走两圈闭合路径, 共行走 70 m, 70 步, 行走时间为 85 s。图 9 为施加 ZIHR 修正的连续闭合两圈行走轨迹图, 可以看出两圈行走轨迹基本重合, 起点与终点也是基本重合, 两点之间的水平距离为 0.19 m。图 10 为未施加 ZIHR 修正的连续闭合两圈行走轨迹图, 可以看出随着航向角误差的累积, 前后两圈轨迹距离逐渐增大, 起点与终点之间的水平距离达到 1.65 m。图 11 为施加 ZIHR 修正后连续闭合两圈行走的航向角变化图, 可以看出每次转弯航向角变化均为 90° 。

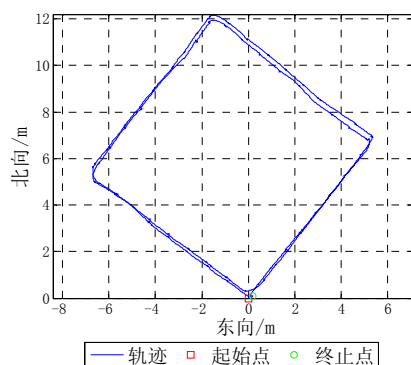


图9 施加 ZIHR 修正的连续闭合两圈行走轨迹图
Fig. 9 Continuous closed two circle walking track with ZIHR

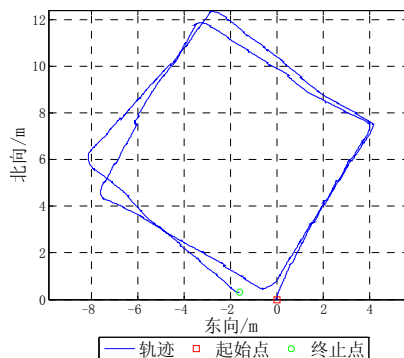


图10 未施加 ZIHR 修正的连续闭合两圈行走轨迹图
Fig. 10 Continuous closed two circle walking track without ZIHR

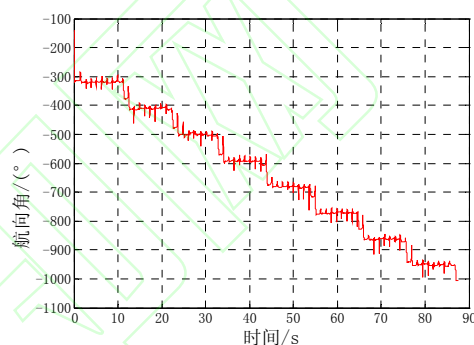


图11 施加 ZIHR 修正的连续闭合两圈行走的航向角变化图

Fig. 11 Heading angle change of continuous closed two circle walking with ZIHR

5.3.4 第四组实验

实验地点为哈尔滨工程大学 61 号楼, 行走的轨迹为闭合矩形, 行走距离为 415 m, 图 12 中蓝色和红色线分别为施加 ZIHR 修正前后的行走轨迹图, 可以看出施加 ZIHR 修正前后的行走轨迹有较大的偏差, 尤其是在行程的最后阶段。图 13 为以百度地图作为真实轨迹参考的闭合矩形行走轨迹对比图, 可以看出解算出来的轨迹和 61 号楼在百度地图中的位置十分吻合, 表明解算出的轨迹没有发生整体的偏移。图 14 为施加 ZIHR 修正的闭合矩形行走的航向角变化图, 可以看出每次转弯航向角变化均为 90° 。

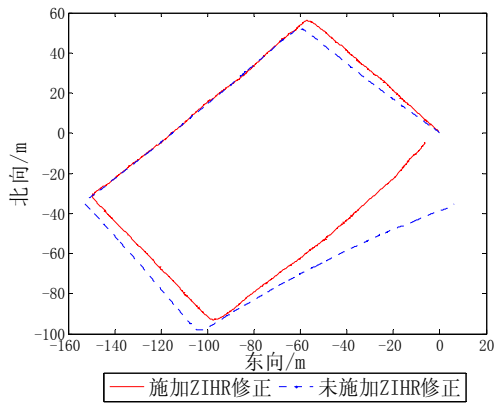


图 12 施加 ZIHR 修正前后的闭合矩形行走轨迹对比图
Fig. 12 Comparison of closed rectangle walking track with and without ZIHR



图 13 以百度地图为参考的闭合矩形行走轨迹对比图

Fig. 13 Comparison of closed rectangle walking track on the map of Baidu

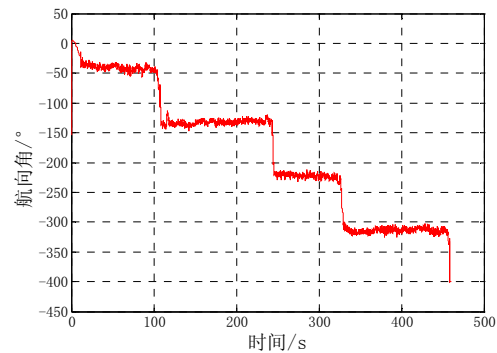


图 14 施加 ZIHR 修正的闭合矩形行走的航向角变化图
Fig. 14 Heading angle change of closed rectangle walking with ZIHR

表 4 为第三、四组实验施加 ZIHR 修正前后的行走结果对比,可以看出施加 ZIHR 修正后的定位误差均小于 2%。实验中起点坐标均为 (0,0), 定位误差计算公式如下:

定位误差=(起点和终点之间的距离)/(总行程)

表 4 施加 ZIHR 修正前后的行走实验结果对比

Table 4 Comparison of walking experiment with and without ZIHR

行走路径	连续两圈 (施加 ZIHR 修正)	连续两圈 (不施加 ZIHR 修正)	61 号楼半圈 (施加 ZIHR 修正)	61 号楼半圈 (不施加 ZIHR 修正)
终点的位置/m	(0.176, 0.072)	(-1.614, 0.324)	(6.54, 4.795)	(-6.271, 35.39)
总行程/m	70	70	415	415
定位误差/%	0.20	2.35	1.95	8.66

6 结论

针对基于 ZUPT 行人导航系统中航向角误差不可观测的问题,提出 ZIHR 修正方法。采用广义似然比检测零速状态,将零速状态下的速度和相邻时刻航向角差值作为量测建立卡尔曼滤波模型,并且对滤波估算出的误差量进行反馈校正。实验表明,广义似然比能够准确的检测出行人导航系统的零速状态,施加 ZIHR 修正能够提高航向角误差和 Z 轴陀螺漂移的可观测性,解决了低精度 MEMS 行人导航中航向角误差极易发散的问题,提高了行人导航的定位精度。

参考文献

- [1] BANCROFT J, LACHAPELLE G. Performance of pedestrian navigation systems as a function of sensor location[C]// Proc. of the NATO Symposium Navigation Sensors and Systems in GNSS Denied Environments, 2012: 1-10.
- [2] JIMENEZ A R, SECO F, PRIETO J C, et al. Indoor pedestrian navigation using an INS/EKF framework for yaw drift reduction and a foot-mounted IMU[C]// Proc. of the IEEE 7th Workshop on Positioning Navigation

- and Communication, 2010: 135-143.
- [3] BORENSTEIN J, KWANMUANG L. Heuristic reduction of gyro drift for personnel tracking systems[J]. *Journal of Navigation*, 2009, 62(1): 41-58.
- [4] 黄欣, 熊智, 许建新, 等. 基于零速/航向自观测/地磁匹配的行人导航算法研究[J]. *兵工学报*, 2017, 10(38): 2031-2040.
HUANG X, XIONG Z, XU J X, et al. Research on pedestrain navigation alogrithm based on zero velocity update/heading error self-observation/geomagnetic matching[J]. *Ordnance Science and Technology*, 2017, 10(38): 2031-2040.
- [5] 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*, 2011, 10(1): 30-38.
- [6] CHEN G, MENG X, WANG Y, et al. Integrated WIFI/PDR/SmartPhone using an unscented Kalman filter algorithm for 3D indoor localization[J]. *Sensors*, 2015, 15(9): 24595-24614.
- [7] CHO S Y, CHAN G P. MEMS based pedestrian navigation system[J]. *Journal of Navigation*, 2006, 59(1): 135-153.
- [8] NILSSON J O, SKOG I, HNDEL P. A note on the limitations of ZUPTs and the implications on sensor error modeling[C]// *Proc. of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, 2012: 20-22.
- [9] 张晓东. 基于 MEMS 惯性器件的个人导航系统研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
ZHANG X D. Study on personal navigation system based on MEMS inertial devices[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015.
- [10] SHIN E. Estimation techniques for low-cost inertial navigation[D]. Calgary: University of Calgary, 2005.
- [11] 张金亮, 秦永元, 梅春波. 基于 MEMS 惯性技术的鞋式个人导航系统[J]. *中国惯性技术学报*, 2011, 19(3): 253-256.
ZHANG J L, QIN Y Y, MEI C B. Shoe-mounted personal navigation system based on MEMS inertial technology[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2011, 19(3): 253-256.
- [12] ZHANG S, YU S, LIU C, et al. A dual-liner Kalman filter for real-time orientation determination system using low-cost MEMS sensors[J]. *Sensors*, 2016, 16(2): 264.
- [13] CHEN W, CHEN R, CHEN Y, et al. An effective pedestrian dead reckoning algorithm using a unified heading error model[C]// *Proc. of the IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, 2010: 340-347.
- [14] LI Y, ZHANG Y, LAN H, et al. Self-contained indoor pedestrain navigation using smartphone sensors and magnetic features[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(19): 1-1.
- [15] BEBEK O, SUSTER M A, RAJGOPAL S, et al. Personal navigation via high-resolution gait-corrected inertial measurement units [J]. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 2010, 59(11): 3018-3027.
- [16] NORRDINE A, KASMI Z, BLANKENBACH J. Step detection for ZUPT-aided inertial pedestrian navigation system using foot-mounted permanent magnet[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16 (17): 6766-6773.
- [17] 杨建通. 基于 MIMU/GPS 紧组合的单兵导航算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
YANG J T. Research on Integrated Navigation Algorithm of the Pedestrain Navigation System Based on MIMU/GPS[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [18] DIAZ E M, MULLER F D P. Use of the Magnetic field for improving gyroscopes' biases estimation[J]. *Sensors*, 2017, 17(4): 832.

作者简介

周广涛（1981-），男，讲师，博士，主要研究方向为单兵导航技术、MEMS 传感器的导航技术。

E-mail: zhougt@hrbeu.edu.cn

王晴晴（1993-），女，硕士研究生，主要研究方

向为惯性导航。

E-mail: 18745036083@163.com

高远（1994-），男，硕士研究生，主要研究方向为卫星导航。

E-mail: 15546060078@163.com

