

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2020.03.018

行人导航系统中的 MEMS 误差在线修正技术

李清华¹, 于文昭¹, 谢阳光², 黄志威¹, 李新年¹

(1. 哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心, 哈尔滨 150001;
2. 飞行器控制一体化技术国防科技重点实验室, 航空工业自控所, 西安 710065)

摘要:在基于微惯性器件的行人导航系统中,陀螺仪和加速度计的偏移是降低系统定位精度的重要因素。传统的标定方法大多在实验室中进行,后续导航解算都是基于标定后的固定模型,然而 MEMS 器件长时间工作后,标定模型参数发生变化会导致系统导航性能下降。通过分析行人导航系统及 MEMS 器件的特点,提出了一种基于误差模型的 MEMS 器件参数在线修正方法。根据行人行走的特点,检测并区分行走过程中的可修正区间与不修正区间。在可修正区间基于逆向解算算法实现了对陀螺仪和加速度计零偏的在线修正,并提出了主航向反馈修正算法,提高了行人导航系统长时间导航性能。实验结果表明,40m 行走实验中,系统定位精度提升了 9.07%; 300m 行走实验中,系统定位精度提升了 13.14%。

关键词:在线修正;逆向解算;主航向反馈修正;扩展卡尔曼滤波

中图分类号:U666.1 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:2095-8110(2020)03-0134-07



MEMS Error Online Correction Technology in Pedestrian Navigation System

LI Qing-hua¹, YU Wen-zhao¹, XIE Yang-guang², HUANG Zhi-wei¹, LI Xin-nian¹

(1. Space Control and Inertial Technology Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. National Key Laboratory of Science and Technology on Aircraft Control, FACRI, Xi'an 710065, China)

Abstract: In the MEMS inertial devices based pedestrian navigation systems, the bias of the gyroscope and accelerometer is an important factor to reduce the positioning accuracy. Most of the traditional calibration methods are implemented in the laboratory, and then the fixed model after calibration will be used. However, due to the long-time running of the MEMS inertial devices, the change of calibration model parameters will lead to the degradation of system navigation performance. Based on the analysis of the characteristics of the pedestrian navigation system and MEMS inertial devices, an online correction method for MEMS device parameters is proposed based on the error model. According to the characteristics of pedestrian walking, the correctable intervals are detected and distinguished from other intervals during the walking process. In the correctable intervals, the online correction of the MEMS inertial devices bias is realized based on the inverse solution algorithm, which improves system positioning performance. The experiment results show that the system positioning accuracy is increased by 9.07% in the 40m walking experiment and

收稿日期:2020-02-03;修订日期:2020-04-07

基金项目:航空科学基金(20175877011)

作者简介:李清华(1979-)男,博士,副研究员,主要从事导航方面研究。E-mail: huahit@hit.edu.cn

13.14% in the 300m walking experiment.

Key words: Online correction; Inverse solution algorithm; Heading feedback correction; Extended Kalman filter

0 引言

行人导航系统(Pedestrian Navigation System, PNS),又名单兵导航系统,是导航中的一个重要组成部分,近年来受到越来越多的关注。由于其不受卫星信号的约束,故能被应用于商场等室内场景。惯性行人导航系统通常采用微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS),具有成本低、体积小、携带方便^[1]等优点。但目前市面上的 MEMS 精度相对较低,长时间的工作会导致误差积累,从而影响定位精度^[2]。传统的标定方法大多在实验室中进行,需要将器件从设备或载体上拆下来,用实验室的转台等设备进行标定。这种方法的过程复杂,且耗时较长^[3]。另外,经过一段时间, MEMS 的标定参数也会发生变化,影响使用性能。

为了减少随着时间推移累计误差的影响,提高行人导航系统的精度, Foxlin^[4]提出了在静止区间使用零速更新,辅助卡尔曼滤波的方法对误差进行修正,但精度有待提升。Fischer C^[5]提出了利用无迹卡尔曼滤波器(Unscented Kalman Filter, UKF)进行信息融合。时伟等提出了用 2 个微惯性测量单元(Miniature Inertial Measurement Unit, MIMU)分别固联在单兵的双脚上,利用基于假设检验和极大似然估计的零速检测器进行零速检测及修正^[6],但工作量大,操作复杂。Borestein J 等提出了启发式漂移消除算法(Heuristic Drift Elimination, HDE)^[7],将方向分成 4 个或 8 个主方向,对角速度信息进行修正,从而修正航向。A. R. Jiménez 等在此基础上进一步做了改进,提出了改进型启发式漂移消除算法^[8](Improved Heuristic Drift Elimination, iHDE),将姿态角和主方向信息加入扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF),降低航向误差。在器件在线标定方面,王海亮等^[9]提出了一种弹载捷联惯导筒易在线标定技术,利用车体做常规运动下的横滚角和俯仰角对惯导误差的激励作用实现在线标定,但是是面向弹体等可以控制固定轨迹来进行实验标定的对象,不适用于行人导航。由于 MEMS 的零偏和刻度系数受环境影响较大,而安装误差受环境影响小、稳定性好,何昆鹏

等^[10]提出了一种野外标定 MEMS 器件参数的方法,对微组合导航系统的 3 个轴分别进行位置摆放,通过方程标定零偏和标度因数,实现组合导航系统的野外在线标定,但因行人导航系统中,器件始终固定在脚上,因此也不适用于行人导航系统。

本文在分析了上述问题的基础上,通过研究行人导航和微惯性器件的特点,提出了一种基于 MEMS 器件模型的在线修正算法。该方法基于微惯性器件的误差模型,对陀螺仪和加速度计的零偏进行修正。初始时,利用误差模型进行初步修正,从而达到修正初始姿态角的目的;在行走过程中,搜索判定行走过程中的修正区间,进行在线修正,并对修正之后的数据进行主航向角反馈修正,综合提高了行人导航系统长时间定位性能。

1 基于微惯性的导航系统误差模型

1.1 微惯性器件误差模型

考虑陀螺仪和加速度计的刻度因数、安装误差和零偏误差,误差模型如下

$$\delta\boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta K_{gx} & \delta L_{xy} & \delta L_{xz} \\ \delta L_{yx} & \delta K_{gy} & \delta L_{yz} \\ \delta L_{zx} & \delta L_{zy} & \delta K_{gz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\delta\boldsymbol{f} = \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta K_{ax} & \delta L'_{xy} & \delta L'_{xz} \\ \delta L'_{yx} & \delta K_{ay} & \delta L'_{yz} \\ \delta L'_{zx} & \delta L'_{zy} & \delta K_{az} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, B_x 、 B_y 、 B_z 为陀螺仪三轴向的零偏误差, D_x 、 D_y 、 D_z 为加速度计三轴向的零偏误差; δk_{gx} 、 δk_{gy} 、 δk_{gz} 为陀螺仪三轴向的刻度因数误差, δk_{ax} 、 δk_{ay} 、 δk_{az} 为加速度计三轴向的刻度因数误差; δL_{ij} ($i=x, y, z; j=x, y, z$) 和 $\delta L'_{ij}$ ($i=x, y, z; j=x, y, z$) 分别为陀螺仪及加速度计三轴之间的安装误差变化; ω_x 、 ω_y 、 ω_z 、 f_x 、 f_y 、 f_z 分别为陀螺仪和加速度计的理想输出。

1.2 误差模型的简易处理

由于陀螺仪和加速度计集成在一个芯片上,安装误差的长期稳定性较好,因此可将其安装误差看作常值,使用事先标定好的参数加入捷联惯导系统中,进而达到简化误差模型的目的,简化后的模型

如下^[11]

$$\delta\boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta K_{gx} & 0 & 0 \\ 0 & \delta K_{gy} & 0 \\ 0 & 0 & \delta K_{gz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\delta\boldsymbol{f} = \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta K_{ax} & 0 & 0 \\ 0 & \delta K_{ay} & 0 \\ 0 & 0 & \delta K_{az} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

2 基于误差模型的 MEMS 器件在线修正算法

为了实现陀螺仪和加速度计的在线修正,首先需要判断出行人步行的零速区间,即零速检测。零速检测^[12]指当行人行走脚落地过程或者行人静止状态下,绑有惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)的脚在落地期间,理论上,其角速率和加速度均为零。通过检测落脚瞬间,可以人为消除陀螺仪和加速度计输出值的累积误差。在此基础上,选择可修正区间,利用在线修正算法修正陀螺仪和加速度计的参数,进而优化导航解算的位置信息。

2.1 在线修正区间的判定

为了判定在线修正区间,在四条件法零速检测的基础上,进行长度检测与识别。取数据窗口的长度为 L ,半窗口的长度为 s , $L = 2s + 1$ 。

加速度阈值条件为

$$|a_k| = \frac{1}{L} \sum_{i=k-s}^{k+s} \sqrt{a_i^b(x)^2 + a_i^b(y)^2 + a_i^b(z)^2} \quad (5)$$

$|a_k|$ 即为判断窗口内的加速度的均值,若处于给定的阈值区间,则判断此时脚部处于静止状态。用 C_1 来表示人行走的状态, C_1 为 1 时表示零速状态, C_1 为 0 时表示非零速状态,即

$$C_1 = \begin{cases} 1, & th_{a\min} < |a_k| < th_{a\max} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

角速度阈值条件为

$$|\omega_k| = \frac{1}{L} \sum_{i=k-s}^{k+s} \sqrt{\omega_i^b(x)^2 + \omega_i^b(y)^2 + \omega_i^b(z)^2} \quad (7)$$

$|\omega_k|$ 即为判断窗口内的角速度的均值,若处于给定的阈值区间,则判断此时脚部处于静止状态。用 C_2 来表示人行走的状态, C_2 为 1 时表示零速状态, C_2 为 0 时表示非零速状态,即

$$C_2 = \begin{cases} 1, & th_{\omega\min} < |\omega_k| < th_{\omega\max} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

加速度方差条件为

$$\sigma_{a_k}^2 = \frac{1}{2s+1} \sum_{j=k-s}^{k+s} (a_j^b - \overline{a_k^b})^2 \quad (9)$$

$$\overline{a_k^b} = \frac{1}{2s+1} \sum_{q=k-s}^{k+s} a_q^b \quad (10)$$

$\sigma_{a_k}^2$ 为当前窗口内的加速度方差值, $\overline{a_k^b}$ 为窗口内加速度均值, 阈值 $th_{\sigma a\max}$ 。若小于该阈值, 则判断行人处于零速状态, $C_3 = 1$; 若大于该阈值, 则认为行人处于非零速状态, $C_3 = 0$, 即

$$C_3 = \begin{cases} 1, & \sigma_{a_k}^2 < th_{\sigma a\max} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

角速度方差条件为

$$\sigma_{\omega_k}^2 = \frac{1}{2s+1} \sum_{j=k-s}^{k+s} (\omega_j^b - \overline{\omega_k^b})^2 \quad (12)$$

$$\overline{\omega_k^b} = \frac{1}{2s+1} \sum_{q=k-s}^{k+s} \omega_q^b \quad (13)$$

$\sigma_{\omega_k}^2$ 为当前窗口内的加速度方差值, $\overline{\omega_k^b}$ 为窗口内加速度均值, 阈值 $th_{\sigma \omega\max}$ 。若小于该阈值, 则判断行人处于零速状态, $C_4 = 1$; 若大于该阈值, 则认为行人处于非零速状态, $C_4 = 0$, 即

$$C_4 = \begin{cases} 1, & \sigma_{\omega_k}^2 < th_{\sigma \omega\max} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

当上述 4 个条件都满足时, 即 $C = C_1 \& C_2 \& C_3 \& C_4 = 1$ 时, 表示为零速时刻。

取 th_{cor} 为判断零速区间长度阈值, $L_{k\text{-zero}}$ 为第 k 个零速区间的长度, 在零速区间检测之后, 利用公式进行判定, 判断关系式如下

$$\begin{cases} L_{k\text{-zero}} \geq th_{\text{cor}}, & \text{修正区间} \\ L_{k\text{-zero}} < th_{\text{cor}}, & \text{非修正区间} \end{cases} \quad (15)$$

2.2 基于模型的在线修正算法

由于传感器的精度问题, 可以忽略地球自转带来的影响。选取右-前-上为载体坐标系 (b 系), 东-北-天为地理坐标系 (n 系)。初始时刻航向角 (yaw) 为 0, 初始俯仰角 (pitch) 和滚转角 (roll) 由初始时刻各轴加速度的关系确定。设地球上任意一点在载体坐标系内的坐标为 (x_b, y_b, z_b) , 在地理坐标系内的坐标为 (x_n, y_n, z_n) , 则由 n 系到 b 系的坐标转换矩阵 C_n^b 为

$$C_n^b = C_2^b C_1^b C_n^1 \quad (16)$$

其中, C_n^b 与 C_n^1 互为转置, 即 $C_n^b = C_n^1{}^t$ 。 C_2^b, C_1^b, C_n^1 分别是由 n 系转到 b 系的三次旋转矩阵, 转换关系图如图 1 所示。

根据角度转换关系, 可得 n 系下的比力 $(0, 0, f_g)'$ 与 b 系下的比力 $(f_x, f_y, f_z)'$ 之间的转换关系为

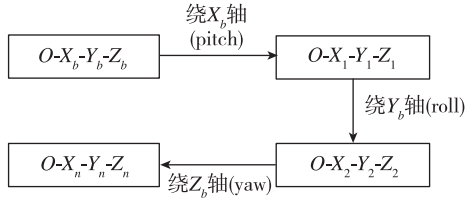


图 1 导航系-载体系坐标变换示意图

Fig. 1 Coordinate transformation between navigation and body frame

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} = \mathbf{C}_n^b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f_g \end{bmatrix} \quad (17)$$

根据式(16)和式(17),可以计算求得初始的俯仰角和滚转角分别为

$$\theta = \arctan \frac{f_y}{\sqrt{f_x^2 + f_z^2}} \quad (18)$$

$$\gamma = \arctan \left(-\frac{f_x}{f_z} \right) \quad (19)$$

在修正区间中,由于理想角速度和加速度分别为 $(0 \ 0 \ 0)'$ 和 $(0 \ 0 \ f_g)'$,故不考虑刻度因数的变化部分,仅考虑陀螺仪和加速度计的零偏误差。

确认了 $\mathbf{C}_b^n \mathbf{C}_b^n$ 之后,采用逆向解算的方法将陀螺仪和加速度计的数据进行处理。选取采样长度为 l ,则

$$\begin{bmatrix} f'_x \\ f'_y \\ f'_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} - \mathbf{C}_b^n \cdot \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \left(\mathbf{C}_b^n \begin{bmatrix} f_{ix} \\ f_{iy} \\ f_{iz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f_g \end{bmatrix} \right) \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} \omega'_x \\ \omega'_y \\ \omega'_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} - \mathbf{C}_b^n \cdot \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \left(\mathbf{C}_b^n \begin{bmatrix} \omega_{ix} \\ \omega_{iy} \\ \omega_{iz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) \quad (21)$$

其中, f'_x 、 f'_y 、 f'_z 、 ω'_x 、 ω'_y 、 ω'_z 为初步修正后的加速度计和陀螺仪的输出值, f_x 、 f_y 、 f_z 、 ω_x 、 ω_y 、 ω_z 分别为加速度计和陀螺仪的输出值, f_g 为当地重力加速度,即在地理坐标系中的加速度。 \mathbf{C}_b^n 是 b 系到 n 系的姿态转移矩阵,由于姿态转移矩阵是正交矩阵,故 \mathbf{C}_b^n 是 n 系到 b 系的姿态转移矩阵。

初步修正之后,根据 2.1 节提到的方法进行可修正区间的判别,选择出符合条件的几个可修正区间。取可修正区间内窗口长度为 S ,根据

$$\begin{bmatrix} \omega'_x \\ \omega'_y \\ \omega'_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} - \mathbf{C}_b^n \cdot \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S \left(\mathbf{C}_b^n \begin{bmatrix} \omega_{ix} \\ \omega_{iy} \\ \omega_{iz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} f'_x \\ f'_y \\ f'_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} - \mathbf{C}_b^n \cdot \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S \left(\mathbf{C}_b^n \begin{bmatrix} f_{ix} \\ f_{iy} \\ f_{iz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f_g \end{bmatrix} \right) \quad (23)$$

可将后续加速度和角速度的值进行进一步优化。优化后的加速度值通过式(23)即可重新计算该区间内俯仰角和滚转角。

3 主航向反馈修正算法

在足绑式行人导航系统中,俯仰角和横滚角可以通过加速度计输出计算得到,但是航向角的误差存在不可观性,所以会导致航向角的漂移和误差累积^[13]。为了实现修正航向角的目的,提出了主航向角误差反馈修正算法,将行走过程中的航向角变化进行在线计算,判断直行与转弯两种状态。将航向角误差作为观测量反馈到 EKF 中。

3.1 航向估计

对于足绑式行人导航系统,由于 IMU 器件绑在脚面上,且脚面运动比较复杂,所以其航向角的变化很快。规定行人行走时的状态为直线和转弯两种,那么在行走两步之间的航向角变化为

$$\psi_{\text{step}}^j = \arctan \left(\frac{\delta S_{\text{R}}^j}{\delta S_{\text{F}}^j} \right) \quad (24)$$

其中, $j \geq 2$, δS_{R}^j 是第 j 步与第 $j-1$ 步之间右向距离的变化, δS_{F}^j 是第 i 步与第 $j-1$ 步之间前向距离的变化,即 $\delta S_{\text{R}}^j = S_{\text{R}}^j - S_{\text{R}}^{j-1}$, $\delta S_{\text{F}}^j = S_{\text{F}}^j - S_{\text{F}}^{j-1}$ 。

在每次判定转弯前的直线路径中,取该路径段开始的一段窗口大小 n ,窗口中第 1 个数据在所有行走数据中的排序为 m 。将第 k 条直线路径的主航向角用 ψ_{cardinal}^k 表示,则

$$\psi_{\text{cardinal}}^k = \frac{1}{n} \sum_{j=m}^{n+m-1} \psi_{\text{step}}^j \quad (25)$$

由此可知,在第 k 个直线行走的路径中,经过一段时间,在行走第 j 步时,对应的主航向角变化值为

$$\delta \psi^j = \psi_{\text{step}}^j - \psi_{\text{cardinal}}^k \quad (26)$$

设定一定的角度阈值 th_{turn} ,判断是否处于转弯状态

$$\begin{cases} \delta \psi^j < th_{\text{turn}}, & \text{直线} \\ \delta \psi^j \geq th_{\text{turn}}, & \text{转弯} \end{cases} \quad (27)$$

引入权重系数 μ ,对行人行走的状态进行进一步的描述,即

$$\mu = \begin{cases} \frac{\delta \psi^j}{th_{\text{turn}}}, & |\delta \psi^j| < th_{\text{turn}} \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (28)$$

其中, ψ_{step}^j 为第 j 步的航向角变化。当 $|\delta\psi^j| < th_{\text{turn}}$ 时, 认定行人为直线行走状态, 否则为转弯状态。

3.2 主航向反馈滤波修正

为了实现预测行走过程中零速时刻的误差并进行修正, 使用 EKF, 状态方程和量测方程如式(29)所示。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_k &= \boldsymbol{\Phi}_{k|k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{W}_{k-1} \\ \mathbf{Z}_k &= \mathbf{H} \delta \mathbf{X}_{k|k} + \mathbf{V}_k \end{aligned} \quad (29)$$

选取卡尔曼滤波的状态向量为 $\delta \mathbf{x}_k = [\delta\varphi_k \quad \delta\omega_k^b \quad \delta r_k \quad \delta v_k \quad \delta a_k^b]$ 。其中, $\delta\omega_k^b$ 和 δa_k^b 分别表示陀螺仪和加速度计的估计误差量, $\delta\varphi_k$ 、 δr_k 、 δv_k 分别表示姿态角、位置和速度的误差量^[14]。

在时间更新部分, 设加速度计和陀螺仪修正后的输出分别为 a_k^b 和 ω_k^b , ΔT 为采样时间, $\mathbf{C}_{b_{k-1}|k-1}^n$ 为 $k-1$ 时刻 b 系到 n 系的坐标转换矩阵, $\mathbf{C}_{b_k|k-1}^n$ 为 k 时刻 b 系到 n 系的坐标转换矩阵的估计矩阵, $a_k^{b'} = a_k^b - \delta a_k^b$ 。可知状态转移矩阵 $\boldsymbol{\Phi}_{k|k-1}$ 为

$$\boldsymbol{\Phi}_{k|k-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \Delta T \cdot \mathbf{C}_{b_k|k-1}^n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{I} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{I} & \Delta T \cdot \mathbf{I} & 0 \\ -\Delta T \cdot \text{St}(\mathbf{a}_k^{n'}) & 0 & 0 & \mathbf{I} & \Delta T \cdot \mathbf{C}_{b_k|k-1}^n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\text{其中, } \text{St}(\mathbf{a}_k^{n'}) = \begin{bmatrix} 0 & -a_{z_k} & a_{y_k} \\ a_{z_k} & 0 & -a_{x_k} \\ -a_{y_k} & a_{x_k} & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{a}_k^{n'} = \mathbf{C}_{b_k|k-1}^n \cdot \mathbf{a}_k^{b'} = (a_{x_k}, a_{y_k}, a_{z_k})。$$

在量测更新部分, 取主航向角误差量 $\delta\psi$ 和速度变化向量 $\delta \mathbf{v}_k$ 为观测量, 即

$$\mathbf{Z}_k = [\delta\psi, \delta \mathbf{v}_k] \quad (31)$$

对应地

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} [0 \quad 0 \quad 1] & \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (32)$$

设置量测噪声 \mathbf{R}_k 中对应主航向角误差的部分为 $R'_{k\text{-head}}$, 对应速度变化的部分为 R_{k-v} , 即

$$\mathbf{R}_k = \begin{bmatrix} R'_{k\text{-head}} & 0 \\ 0 & R_{k-v} \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$R'_{k\text{-head}} = \mu^2 R_{k\text{-head}} \quad (34)$$

计算当前的卡尔曼增益, 并把速度信息作为系统的量测值, 通过状态方程对信息进行时间更新,

再通过量测更新得到更新后修正的速度、位置和姿态角等信息。

4 实验验证与结果分析

针对本文提出的在线修正与主航向反馈修正算法, 分别在学校建筑物走廊和学校操场设计进行了直线实验及环形实验。实验使用的微惯性测量单元为荷兰 Xsens 公司的 MTi-G-710。该元件内部包括三轴加速度计、三轴陀螺仪和磁力计。加速度计量程为 $\pm 50 \text{m/s}^2$, 零偏稳定性 $40 \mu\text{g}$, 零偏重复性 0.03m/s^2 , 陀螺仪量程为 $\pm 450 (^{\circ})/\text{s}$, 零偏稳定性 $10 (^{\circ})/\text{h}$, 零偏重复性 $0.2 (^{\circ})/\text{s}$, 采样频率为 100Hz , 固定于脚面, 如图 2 所示。

直线实验部分在学校建筑物走廊进行, 路程为 40m , 开始时在原地静止 3s , 在前进到 26m 处左右时暂停 5s , 再走到终点。环形实验部分在学校操场进行, 路程为 300m , 开始时在原地静止 3s , 在每前进 60m 左右时暂停 5s , 直到走到终点。使用本文提到的在线修正技术及主航向反馈修正算法前后的轨迹分别如图 3 和图 4 所示, 实验结果如表 1 所示。从中可以看出, 直线行走实验误差从 11.08% 降低至 2.01% 。环形行走实验的误差从 14.79% 降低至 1.65% , 误差有了很大程度降低。



图 2 MEMS 器件及穿戴方式

Fig. 2 MEMS devices and wearing methods

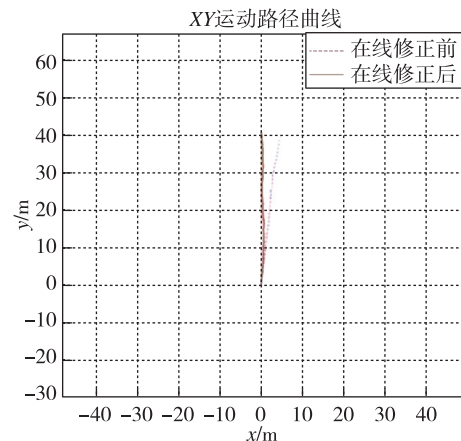


图 3 直线行走轨迹

Fig. 3 Linear walking trajectory

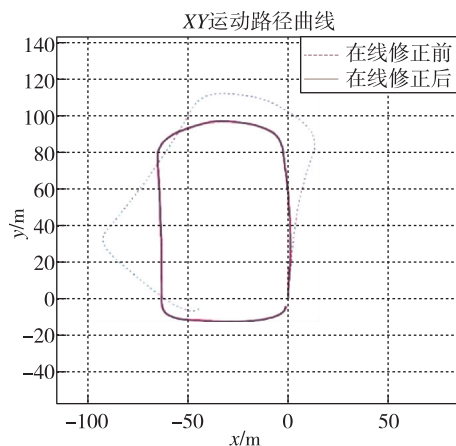


图 4 操场环形实验轨迹

Fig. 4 Circular walking trajectory on the playground

表 1 实验验证结果

Tab. 1 Experiments results

实验类别	起点位置 (x/m, y/m)	实际终点位置 (x/m, y/m)	解算出的终点 位置(x/m, y/m)	误差/%
室内-在线 修正前	(0, 0)	(0, 40)	(4.25, 38.75)	11.08
室内-在线 修正后	(0, 0)	(0, 40)	(0.77, 40.23)	2.01
室外-在线 修正前	(0, 0)	(0, 0)	(-43.97, -5.86)	14.79
室外-在线 修正后	(0, 0)	(0, 0)	(-0.92, -4.87)	1.65

5 结论

本文提出了一种基于误差模型的 MEMS 器件参数在线修正技术,对陀螺仪和加速度计的零偏进行在线修正。根据行人行走的特点,检测并区分行走过程中的可修正区间,使用逆向解算算法进行数据的解算和修正补偿,并提出了主航向角反馈修正算法,以提高行人导航系统长时间定位性能。从实验验证的结果可以看出,直线实验的误差降低了 9.07%,环形实验的误差降低了 13.14%,效果很好。该方法提高了行人导航系统的定位精度,其思路和方法对于行人自主导航系统的优化具有很好的应用价值。

参考文献

[1] Hsu Y L, Wang, J S, Chang C W. A wearable inertial pedestrian navigation system with quaternion-

based extended Kalman filter for pedestrian localization[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(10): 3193-3206.

[2] 徐江颖,熊剑,郭杭,等. 室内外行人导航系统研究[J]. 压电与声光, 2017, 39(3): 442-447.

Xu Jiangying, Xiong Jian, Guo Hang, et al. Study on indoor-outdoor pedestrian navigation system[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2017, 39(3): 442-447 (in Chinese).

[3] 严恭敏,秦永元. 激光捷联惯组的双轴位置转台标定仿真[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(1): 123-127.

Yan Gongmin, Qin Yongyuan. Calibration simulation for laser strapdown IMU with two-axis turntable[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(1): 123-127(in Chinese).

[4] Foxlin E. Pedestrian tracking with shoe-mounted inertial sensors[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2005, 25(6): 38-46.

[5] Fischer C, Sukumar P T, Hazas M. Tutorial: implementing a pedestrian tracker using inertial sensors[J]. IEEE Pervasive Computing, 2013, 12(2): 17-27.

[6] Shi W, Wang Y, Wu Y. Dual MIMU pedestrian navigation by inequality constraint Kalman filtering[J]. Sensors, 2017, 17(2): 427.

[7] Borenstein J, Ojeda L, Kwanmuang S. Heuristic reduction of gyro drift for personnel tracking systems[J]. Journal of Navigation, 2009, 62(1): 41-58.

[8] Jimenez A R, Seco F, Zampella F, et al. Improved heuristic drift elimination (iHDE) for pedestrian navigation in complex buildings[C]// Proceedings of International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. IEEE, 2011: 1-8.

[9] 王海亮,石志勇,李国璋,等. 弹载捷联惯导简易在线标定方案研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2018, 39(4): 6-10+15.

Wang Hailiang, Shi Zhiyong, Li Guozhang, et al. Research on simple online calibration scheme of missile SINS[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2018, 39(4): 6-10+15(in Chinese).

[10] 何昆鹏,于玖成,何应云. 微型组合导航系统中的传感器野外标定方法[J]. 应用科技, 2012, 39(6): 9-13.

He Kunpeng, Yu Jiucheng, He Yingyun. Field calibration for transducers in a micro-integrated navigation system[J]. Applied Science and Technology, 2012, 39(6):9-13(in Chinese).

[11] 杨晓霞,黄一. 激光捷联惯导系统的一种系统级标

- 定方法[J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(1): 1-7.
- Yang Xiaoxia, Huang Yi. Systematic calibration method for laser gyro SINS[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2008, 16(1): 1-7(in Chinese).
- [12] 张新喜, 张嵘, 郭美凤, 等. 足绑式行人导航偏航角误差自观测算法(英文)[J]. 中国惯性技术学报, 2015, 23(4): 457-466.
- Zhang Xinxi, Zhang Rong, Guo Meifeng, et al. Yaw error self-observation algorithm for pedestrian navigation via foot-mounted inertial navigation system[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2015, 23(4): 457-466(in Chinese).
- [13] Abdulrahim K, Hide C, Moore T, et al. Aiding low cost inertial navigation with building heading for pedestrian navigation[J]. The Journal of Navigation, 2011, 64(2): 219-233.
- [14] Bird J, Arden D. Indoor navigation with foot-mounted strapdown inertial navigation and magnetic sensors [Emerging Opportunities for Localization and Tracking] [J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(2): 28-35.