

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108497

基于磁力计在线校准的行人导航算法*

路永乐 王汶新 冯涛 刘宇 韩亮 杨杰

(重庆邮电大学智能传感技术与微系统重庆市高校工程研究中心 重庆 400065)

摘要: 航向角误差是行人导航中的主要误差之一,常见解决方案是将MIMU与磁力计组合使用,但磁力计误差较大,因此使用前需要进行校准。针对这一问题,提出了一种基于磁力计在线校准的行人导航算法,在行走前通过空间旋转的方式进行椭球拟合完成初步校准,之后在行进过程中使用UKF对时变误差进行实时估计并进行校准,以校准后的磁力计输出对行人航向进行修正。数据显示,基于磁力计在线校准的行人导航算法,与磁力计未校准和仅进行初始校准磁力计的行人导航算法相比,闭环误差分别下降了6.17%和2.8%。结果表明,所提出的算法有效地校准了磁力计,并抑制了行人导航中的航向角发散,提升了导航精度。

关键词: 磁力计校准;无迹卡尔曼滤波;微惯性测量单元;行人航迹推算;行人导航

中图分类号: TN967.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.35

Pedestrian navigation algorithm based on magnetometer online calibration

Lu Yongle Wang Wenxin Feng Tao Liu Yu Han Liang Yang Jie

(Chongqing Engineering Research Center of Intelligent Sensing Technology and Microsystem, Chongqing University of Post and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: The heading angle error is one of the main errors in pedestrian navigation. A common solution is to use the MIMU in combination with magnetometers, but the magnetometer has a large error, so it needs to be calibrated before use. To solve this problem, proposes a pedestrian navigation algorithm based on magnetometer online calibration. Before walking, the ellipsoid fitting through spatial rotation is used to complete the preliminary calibration, and then the UKF is used to estimate and eliminate the time-varying error in real time during the journey. Correct the pedestrian heading with the output of the calibrated magnetometer. Experiments show that the pedestrian navigation algorithm based on online magnetometer calibration has reduced the closed-loop error by 6.17% and 2.8%, respectively, compared with the pedestrian navigation algorithm where the magnetometer is not calibrated and the magnetometer is only initially calibrated. The results show that the algorithm proposed effectively calibrates the magnetometer, suppresses the divergence of the heading angle in pedestrian navigation, and improves the navigation accuracy.

Keywords: magnetometer calibration; unscented Kalman filter; miniature inertial measurement unit; pedestrian dead reckoning; pedestrian navigation

0 引言

随着微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)的快速发展,基于微惯性测量单元(miniature inertial measurement unit, MIMU)的行人导航成为了研究热点^[1]。

MIMU一般由三轴微加速度计和三轴微陀螺仪组成,仅使用加速度计与陀螺仪组合无法观测到航向角,因此基于MIMU的行人导航中航向角会随着时间发散^[2-3]。为了解决这一问题,常用方案是与三轴磁力计组合使用^[4]。由

于磁力计受制造工艺和外界磁干扰影响,精度严重下降,因此在使用前需要对其进行校准^[5]。

对于磁强计的校准,前人已提出多种方法。庞鸿锋等^[6]使用高斯牛顿迭代法求解非线性方程得到磁力计误差参数,使各个轴的误差降低了两个数量级。Deng等^[7]使用陀螺仪辅助,对磁力计输出进行线性插值来计算误差参数,经标定后,磁力计计算的航向误差降至 0.5° 。孙伟等^[8]提出了八位置系统误差,以此求取误差矩阵系数,能够满足一般应用场景下的需求。李冰等^[9]提出了基于椭圆拟合的标

收稿日期:2021-12-02

* 基金项目:重庆市自然科学基金面上项目(cstc2021jcyj-msxmX0566)资助

定方法,对磁力计输出进行椭圆拟合,以此求出标定参数,能有效降低其测量误差分布。

上述算法大都在实验室环境下进行验证,或使用转台辅助,无法消除行人行走过程由动态环境产生的磁误差,因此不利于实际使用。本文提出了一种磁力计在线校准方法,在行走前通过空间旋转的方式进行椭球拟合完成初步校准,之后对动态环境产生的磁误差进行在线修正,并使用校准后的磁力计输出对行人导航航向进行修正,起到抑制航向角发散的作用,从而提高定位精度。

1 磁力计误差模型及校准

1.1 磁力计误差模型

磁力计误差根据误差来源可分为两种:传感器自身误差与外界磁干扰误差^[10]。传感器自身误差根据机理不同又可细分为零偏误差、比例因子误差和非正交误差,外界磁干扰误差可细分为软磁误差和硬磁误差。

1) 零偏误差:由于传感器电路漂移产生的输出偏置,可建模表示为:

$$b_1 = [b_x \quad b_y \quad b_z]^T \quad (1)$$

2) 比例因子误差:由于各轴传感器灵敏度不同引起的造成的误差,可建模表示为:

$$K_1 = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

3) 非正交误差:由于制造过程中三轴传感器没有两两之间完全正交而产生的误差,可建模表示为:

$$K_2 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

4) 软磁误差:软铁材料被外界磁场磁化而产生的磁干扰,可建模表示为:

$$K_3 = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

5) 硬磁误差:由硬铁材料产生的磁干扰,表现为输出偏置,可建模表示为:

$$b_2 = [b'_x \quad b'_y \quad b'_z]^T \quad (5)$$

结合上述误差,建立完整磁力计误差模型如下:

$$\hat{B} = K_1 K_2 (K_3 B + b_2) + b_1 + \epsilon \quad (6)$$

其中, B 为载体坐标系下无误差的磁力计输出, \hat{B} 为载体坐标系下的含误差的磁力计输出, ϵ 为满足均值为 0, 方差为 σ_ϵ^2 的高斯噪声。式(6)可进一步简化为:

$$\hat{B} = DB + b + \epsilon \quad (7)$$

其中,

$$D = K_1 K_2 K_3 \quad (8)$$

$$b = K_1 K_2 b_2 + b_1 \quad (9)$$

1.2 磁力计校准

在某一特定环境下,磁场强度恒定,因此无误差的磁力计输出可构成一个球面,但由于误差因素影响,使其变成椭球面,因此可进行椭球拟合来对误差参数进行初步估计^[11]。

由式(7)与椭球拟合求出的误差参数可得初步估计后的三轴磁力计输出为:

$$B' = [M_x \quad M_y \quad M_z]^T = D^{-1}(\hat{B} - b) \quad (10)$$

其次对于行进过程中外部环境的改变,可将其引起的误差等效为缓慢变化的零偏^[12]。以外界环境引起的三维零偏矢量作为估计状态,总磁场强度模值的平方作为测量量,建立状态方程与量测方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = \rho \\ y = (M_x - w_x)^2 + (M_y - w_y)^2 + (M_z - w_z)^2 + v \end{cases} \quad (11)$$

其中, $x = [w_x \quad w_y \quad w_z]^T$, 为待估计的三轴零偏状态, \dot{x} 为 x 的一阶导数, y 为观测值, ρ 和 v 为高斯噪声。

由于上述系统为非线性系统,因此使用无迹卡尔曼滤波(unscented Kalman filter, UKF)进行状态估计,相较于扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF),不需要计算雅克比矩阵,且精度更高,计算复杂度更低^[13]。计算步骤如下。

1) 系统离散化

将状态方程与观测方程进行离散化处理。

$$\begin{cases} x_k = f(x_{k-1}) = x_{k-1} + \rho_k \\ y_k = h(x_k) = (M_{xk} - w_{xk})^2 + (M_{yk} - w_{yk})^2 + (M_{zk} - w_{zk})^2 + v_k \end{cases} \quad (12)$$

2) 计算 Sigma 采样点

根据 $k-1$ 时刻状态估计值与协方差生成采样点。

$$\chi_{k-1}^i = \begin{cases} \bar{x}_{k-1} + (\sqrt{(n+\kappa)P_{x,k-1}})_i, & i = 1, \dots, n \\ \bar{x}_{k-1} - (\sqrt{(n+\kappa)P_{x,k-1}})_i, & i = n+1, \dots, 2n \\ \bar{x}_{k-1}, & i = 0 \end{cases} \quad (13)$$

其中, χ_{k-1}^i 为 $k-1$ 时刻第 i 个采样点, \bar{x}_{k-1} 为 x_{k-1} 的均值, $P_{x,k-1}$ 为 $k-1$ 时刻 x 的方差, κ 为尺度参数。

3) 时间更新

将采样点通过状态转移函数生成新的采样点集,并计算转移后的均值与协方差,并将新的采样点通过量测函数转移,并计算量测值的均值。

$$\chi_{k|k-1}^i = \chi_{k-1}^i \quad (14)$$

$$\hat{x}_k = \sum_{i=0}^{2n} W_i^m (\chi_{k|k-1}^i) \quad (15)$$

$$P_{x,k}^- = \sum_{i=0}^{2n} W_i^c (\chi_{k|k-1}^i - \hat{x}_k^-)(\chi_{k|k-1}^i - \hat{x}_k^-)^T + Q_k \quad (16)$$

$$\xi_{k-1}^i = h(\chi_{k-1}^i) \quad (17)$$

$$\hat{y}_k^- = \sum_{i=0}^{2n} W_i^m (\xi_{k-1}^i) \quad (18)$$

其中, χ_{k-1}^i 为状态预测后的采样点, \hat{x}_k 和 $P_{x,k}$ 为状态预测后的均值和方差, W_i^m 与 W_i^c 分别为均值权值与方差权值, Q_k 为系统噪声的协方差矩阵, ξ_{k-1}^i 为通过量测函数转移后的采样点, \hat{y}_k^- 为其均值。

4) 量测更新

计算量测值的方差及协方差, 并求出滤波增益, 完成状态估计与方差估计。

$$P_{y,k} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^c (\xi_{k-1}^i - \hat{y}_k^-) (\xi_{k-1}^i - \hat{y}_k^-)^T + R_k \quad (19)$$

$$P_{xy,k} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^c (\xi_{k-1}^i - \hat{x}_k^-) (\xi_{k-1}^i - \hat{y}_k^-)^T \quad (20)$$

$$K = P_{xy,k} P_{y,k}^{-1} \quad (21)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K(y_k - \hat{y}_k^-) \quad (22)$$

$$P_{x,k} = P_{x,k}^- - K P_{y,k} K^T \quad (23)$$

其中, $P_{y,k}$ 为量测值的方差, $P_{xy,k}$ 为状态量与量测量的协方差, R_k 为观测噪声的协方差矩阵, K 为滤波增益, \hat{x}_k 和 $P_{x,k}$ 为 x 的状态估计与方差估计。

5) 磁力计修正

使用估计出的零偏对磁力计进行修正, 即:

$$B'' = B' - \hat{x}_k \quad (24)$$

2 基于 MIMU 的行人导航

基于 MIMU 的行人导航有多种佩戴方式^[14-16], 本文选择佩戴在腰部, 使用行人航迹推算算法 (pedestrian dead reckoning, PDR) 进行定位, 在当前位置已知的情况下, 根据行人的航向信息与步长信息来估计下一次的位罝, 其原理如图 1 所示。

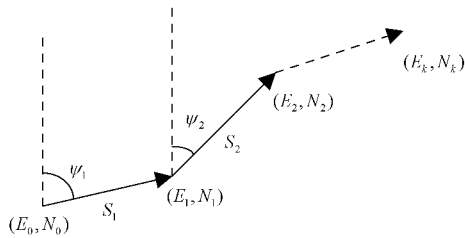


图 1 PDR 原理

假设初始位置为 (E_0, N_0) , 则经过 k 步后的位置可表示为:

$$\begin{cases} E_k = E_0 + \sum_{i=1}^k S_i \sin\psi_i \\ N_k = N_0 + \sum_{i=1}^k S_i \cos\psi_i \end{cases} \quad (25)$$

PDR 算法包含 4 个步骤: 步态检测、步长估计、航向估计和位置推算。

2.1 步态检测

利用行走过程中的合加速度近似为正弦曲线这一特点, 使用波峰—阈值法对步态进行检测, 即当合加速度模值为波峰且大于峰值阈值, 并且相邻波峰时间间隔大于时间阈值, 如式(26)所示。

$$\begin{cases} a_k > a_{k-1} \& a_k > a_{k+1} \\ a_k > A_{th} \\ \Delta T > T_{th} \end{cases} \quad (26)$$

其中, a_k 为 k 时刻的加速度模值, ΔT 为相邻波峰时间间隔, A_{th} 和 T_{th} 分别为峰值阈值与时间阈值。

2.2 步长估计

使用一种根据加速度模值得出步长的经验模型, 该模型具有精度高和复杂度低等优点^[17], 其表达式如式(27)所示。

$$S = \tau \sqrt{A_{max} - A_{min}} \quad (27)$$

其中, τ 为步长系数, A_{max} 、 A_{min} 分别为处于一个步态过程中的加速度模值的最大值和最小值。

2.3 航向估计

首先使用磁力计进行初始航向的确定, 其解算原理如下:

$$m_x = M_x \cos\theta - M_z \sin\theta \quad (28)$$

$$m_y = M_x \sin\theta \sin\gamma + M_y \cos\gamma + M_z \cos\theta \sin\gamma \quad (29)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{m_y}{m_x}\right) \quad (30)$$

其中, m_x 和 m_y 分别为导航坐标系(东北天)下磁力计在 x 轴与 y 轴的分量, θ 、 γ 和 ϕ 分别为横滚角、俯仰角、航向角。

然后使用陀螺仪输出对航向角进行更新, 本文采用四元数法, 其计算量小, 精度高, 并可以避免奇异性^[18], 其原理如下:

$$\dot{q}_n^b = \frac{1}{2} \omega_{nb}^b q_n^b \quad (31)$$

$$\omega_{nb}^b = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (32)$$

其中, q_n^b 为导航坐标系到载体坐标系的旋转四元数, ω_x 、 ω_y 、 ω_z 为陀螺仪输出。

在行进过程中, 使用校准后的磁力计输出解算出磁航向角 ψ_m 。由于陀螺仪短时精度高, 因此使用相邻步数陀螺仪解算出的航向之差 $\Delta\psi_g$ 作为阈值条件, 使用陀螺仪解算出的 ψ_k 与 ψ_m 进行加权得到当前步伐的航向, 如式(33)所示。

$$\psi_k = \begin{cases} \alpha\psi_{k,g} + \beta\psi_{k,m}, & \psi_{k,m} - \psi_{k-1,m} \leq \Delta\psi_g \& \psi_{k,m} - \psi_{k-1} < \lambda \\ \psi_{k-1} + \Delta\psi_g, & \psi_{k,m} - \psi_{k-1,m} > \Delta\psi_g \end{cases} \quad (33)$$

其中, α 、 β 为基于实验得到的加权系数, λ 为阈值。

2.4 位置推算

通过当前估算出的步长以及航向信息,再结合上一步得到的位置信息,即可递推得到当前的位置的信息,如式(34)所示。

$$\begin{cases} E_k = E_{k-1} + S_k \sin\phi_k \\ N_k = N_{k-1} + S_k \cos\phi_k \end{cases} \quad (34)$$

3 实验验证

本文选择在重庆邮电大学风华运动场进行实验验证。初始时,将MIMU的在空中进行任意旋转,尽可能使磁力计输出值覆盖整个椭球面,完成初始校准,校准前后的磁力计输出分布如图2所示。

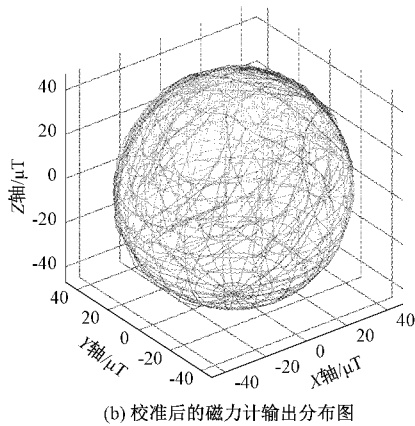
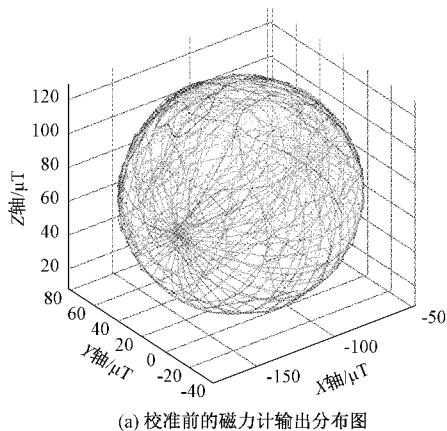


图2 磁力计输出分布图

设定起点坐标为(0,0),然后沿着图3的路线行走一圈,终点与起点坐标重合,路径总长度为350m,以终点定位误差作为衡量算法效果的依据。

本文设计了如下3种实验方案,分别使用未校准磁力计、仅初始校准磁力计和在线校准磁力计作为对比,轨迹结果如图4所示,轨迹误差结果如表1所示。实验结果表明,磁力计未校准时,轨迹误差较大,闭环误差达到6.51%;经过初始校准后,航向得到修正,误差减小至3.14%;而使用在线校准后,误差进一步减小,减小至0.34%,定位精度较高。

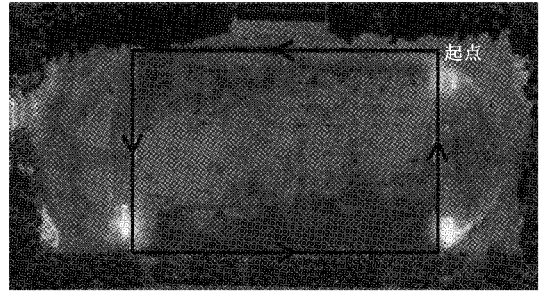


图3 实验路线

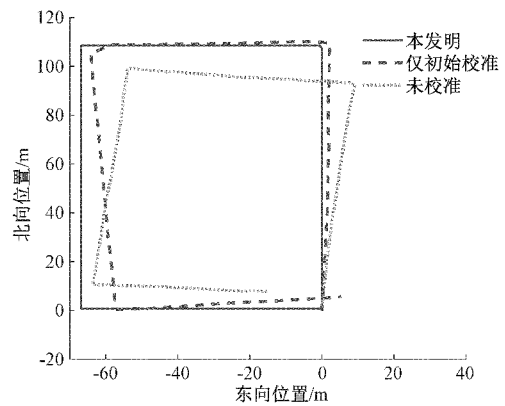


图4 实验轨迹

表1 各实验方案误差比较

| 方案 | 终点坐标/m | 闭环误差/% |
|-------|-----------|--------|
| 未校准 | (-15,7.8) | 6.51 |
| 仅初始校准 | (5.3,5.7) | 3.14 |
| 在线校准 | (0.4,0.8) | 0.34 |

4 结论

本文对于行人导航中航向角无法被观测而导致航向角随时间发散这一问题,使用磁力计组合,在进行导航前,使用手动旋转的方式进行椭球拟合估计误差参数完成初步校准,将行走过程中的时变误差等效为零偏残差,使用UKF进行估计完成在线校准,辅助修正航向,达到提高导航精度的目的。实验结果表明,磁力计在线校准方案与未校准方案相比,闭环误差下降了6.17%,与仅初始校准方案相比,闭环误差下降了2.8%,本文提出的方案能够有效地校准磁力计,并抑制行人导航中的航向角发散,提升了导航精度,具有一定的工程应用价值。

参考文献

- [1] HSU Y L, WANG J S, CHANG C W, et al. 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] 程建华, 王诺, 尚修能. 基于改进 UKF 的组合导航系统航向角估计方法研究[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(3): 112-119.
- [3] MUHAMMAD N M, SALCIC Z, WANG K I, et al. Indoor pedestrian tracking using consumer-grade inertial sensors with PZTD heading correction [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(12): 5164-5172.
- [4] BOUZID A, VASARHELYI J, BARTOK R, et al. Implementation of INS/MAG/GNSS hybridisation technique for pose determination based on soc and low cost sensors; Theoretical approach and synthesis[C]. Carpathian Control Conference, IEEE, 2016: 97-100.
- [5] GAO Q, CHENG D, WANG Y, et al. A calibration method for the misalignment error between inertial navigation system and tri-axial magnetometer in three-component magnetic measurement system[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(24): 12217-12223.
- [6] 庞鸿锋, 潘孟春, 王伟, 等. 基于高斯牛顿迭代算法的三轴磁强计校正[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(7): 67-72.
- [7] DENG Y, ZHENG Y, BIN L, et al. Complete tri-axis magnetometer calibration with a gyro auxiliary[J]. Sensors, 2017, 17(6): 1223-1243.
- [8] 孙伟, 杨一涵, 王野. 基于椭球拟合的磁力计误差校正方法研究[J]. 传感技术学报, 2018, 31(9): 77-80.
- [9] 李冰, 雷泷杰, 陈超. 基于椭圆拟合的双轴磁传感器标定方法[J]. 探测与控制学报, 2020, 42(3): 20-23.
- [10] 李海涛, 刘奎芹. 基于最小二乘椭圆拟合改进算法的磁力计校正[J]. 电子测量技术, 2018, 41(15): 145-148.
- [11] 于向前, 刘斯, 肖池阶, 等. 基于椭球拟合的三轴磁强计两步校准法[J]. 仪表技术与传感器, 2021(4): 52-56.
- [12] 张新喜, 张嵘, 郭美凤, 等. 基于足绑式 INS 的行人导航三轴磁强计在线校准[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016, 56(2): 211-217.
- [13] CHEN L, LI X, WANG J, et al. Moving sensor nodes' tracking by WT-UKF in wireless sensor networks[C]. 2015 5th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication(ICEIEC), IEEE, 2015: 91-94.
- [14] ZHAO H, WANG Z, QIU S, et al. Adaptive gait detection based on foot-mounted inertial sensors and multi-sensor fusion [J]. Information Fusion, 2019, 52: 157-166.
- [15] IJIMA H, TAKAHASHI M. State of the field of waist-mounted sensor algorithm for gait events detection; a scoping review [J]. Gait & Posture, 2020, 79: 152-161.
- [16] AHMED D B, DIAZ E M, KAISER S. Performance comparison of foot and pocket-mounted inertial navigation systems[C]. International Conference on Indoor Positioning & Indoor Navigation, IEEE, 2016: 1-7.
- [17] LU Y L, CHEN Y W, DI K, et al. High-precision step-length estimation method based on MEMS inertial sensor[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2018, 26(2): 167-172.
- [18] 丁国强, 徐洁, 周卫东, 等. SINS/CCD 系统四元数中心差分姿态估计算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, 9(42): 19-23.

作者简介

路永乐, 博士, 副教授, 主要研究方向为惯性传感器件与系统集成研究。

E-mail: luy1@cqupt.edu.cn