

基于地磁辅助的室内行人定位航向校正方法

马明* 宋千 李杨寰 谷阳 周智敏
(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 在基于惯性传感器的室内人员自主定位系统中, 由于陀螺仪存在随时间增长的漂移, 需要依靠地磁场对航向校正。然而, 室内场景中地磁场会受到比较严重的干扰, 磁力计自身也存在一定误差, 严重影响了地磁场辅助定位的航向校正效果。该文提出一种地磁辅助的室内定位航向校正方法, 该方法首先结合人体运动模型对磁力计进行校准, 获取相关校准系数, 提高磁力计解算航向精度。在此基础上利用改进的磁场准静态检测方法提取可用的磁力计观测量, 经校准系数校准后结合零速更新算法(Zero velocity UPdaTe, ZUPT)辅助的扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF), 对陀螺仪航向进行滤波校正。实验结果显示在长约 684 m 的轨迹下航向误差仅为 3.2° 定位误差小于 0.5 m, 定位精度优于 0.2%, 验证了该方法较传统的磁场辅助航向校正方法的优越性。

关键词: 室内行人定位; 磁场准静态检测; 航向校正; 磁力计校准

中图分类号: TN911.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)03-0647-07

DOI: 10.11999/JEIT160407

Magnetic-aided Heading Error Calibration Approach for Indoor Pedestrian Positioning

MA Ming SONG Qian LI Yanghuan GU Yang ZHOU Zhimin

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In inertial based self-contained pedestrian positioning systems, because the drifts of the gyroscopes grow with time, it relies on the earth magnetic field to suppress the heading errors. However, the earth magnetic field suffers from severe interference in indoor scenarios, and the magnetometer itself has measurement errors, the above reasons have dramatically limited the performance of the magnetometer-aided heading error calibration. This paper proposes a magnetic-aided heading error calibration approach. Firstly, the magnetometer is calibrated according to the motion model of the pedestrian and the calibration coefficients obtained are used to improve the accuracy of heading derived by the magnetometer. On this basis, a proved Quasi-Static magnetic Field (QSF) detection approach is proposed to extract the usable magnetic information fed into Zero velocity UPdaTe (ZUPT)-aided Extended Kalman Filter (EKF) algorithm to conduct the heading calibration. The experiment results show that the 684 meter long walk only has a position error of less than 0.5 meter and heading error of 3.2 degrees, and the position error is less than 0.2% of the total walking distance. The results indicate that the performance of the proposed method is superior to the existing approach.

Key words: Indoor pedestrian positioning; Quasi-static magnetic field detector; Heading calibration; Magnetometer calibration

1 引言

卫星导航定位是目前最为广泛和成熟的一种定位手段。但在一些室内的应用场景中, 由于卫星导航信号受到建筑物遮蔽及多径效应的影响, 导致卫星导航定位精度大幅下降, 无法满足室内应用需求^[1]。基于微惯导的人员自主定位技术, 利用固定在人员足部 MEMS 加速度计和陀螺仪等惯性传感器对人体运动进行测量, 积分推演获得人员运动轨迹,

无需在定位场所预先安装任何设备, 具有自主性、低功耗及便携性等优势, 已成为卫星导航定位不可靠情况下重要的“补盲”手段^[2-4]。室内定位技术可以为用户提供精准的商场导航定位、导购服务, 为商场提供客流动线, 停留时长等信息; 可以为消防员提供准确的位置信息, 减少甚至避免因在火场中迷失方向而造成的人员伤亡。基于其广阔的应用前景, 近几年来室内行人定位技术已成为国内外研究的热点^[5-9]。

由于惯性导航的积分原理, 惯导系统的解算误差随时间不断积累, 成为影响其定位精度的主要因

素。要解决这一问题,比较有效的方法是零速更新算法 ZUPT 辅助的 EKF 算法^[10],该方法利用人的行走模型,将足部着地时速度为零作为理论观测量,通过 EKF 对定位误差进行滤波更新,大大提高了定位精度。但是,ZUPT 辅助的 EKF 算法不能估计陀螺漂移误差,导致航向随时间不断漂移^[11]。针对这一问题,文献[12]提出一种结合地磁场校正航向的方法,其原理是在 ZUPT 的基础上,利用三轴磁力计测量地磁场强度信息,将解算后获得的航向作为观测量,通过设计 EKF 对陀螺仪航向漂移进行校正。该方法在室外空旷地场景下能取得较好的校正效果,但在室内环境下,考虑到地磁场受到干扰比较严重,若将其作为观测量反而会带来额外的误差,因此该方法在应用时有较大的局限性。文献[13]提出了一种准静态磁场(Quasi-Static magnetic Field, QSF)的检测方法,根据磁场幅度变化率判断磁场受干扰程度,并依此判断是否采用磁场信息校正陀螺仪航向。该方法的局限在于当磁场在短时间内受到持续且较稳定的干扰时,其变化程度同样很小,因而容易造成误判而引入额外的误差,因此该方法的实用性有待进一步验证。

另外与加速度计和陀螺仪一样,磁力计自身也存在误差。磁力计的误差主要包括硬铁误差、软铁误差等^[14]。硬铁误差主要源自载体平台上邻近磁力计的电路子系统产生的额外磁场的干扰,软铁误差则是由铁磁材料如铁、镍、PCB 板等对地磁场产生干扰造成的^[15]。另外在鞋载自主定位系统中,传感器模块被置于鞋内,磁力计同样会受到足部及鞋的影响。因此,为得到较为精确的磁场强度信息,在使用磁力计时须对其进行校准。

本文提出一种磁力计校准方法,该方法结合鞋载自主定位系统的特点将三轴磁力计校准转化为双轴校准;在此基础上提出了新的磁场准静态检测方法,通过融合陀螺仪解算航向、磁力计解算航向和磁场强度的变化程度对磁场准静态进行检测。

2 磁力计校准

2.1 地磁场航向解算

磁力计解算航向基本原理如图 1,图中 \mathbf{B} 表示地磁场, \mathbf{H} 为地磁场在水平方向的投影, B_x , B_y , B_z 为地磁场的正交分量, ϕ 为 B_x 与 \mathbf{H} 的夹角, D 为地磁偏角。磁力计解算航向可表示为

$$\psi = \phi \pm D = \tan^{-1} \left(\frac{B_y}{B_x} \right) \pm D \quad (1)$$

设三轴磁力计的 k 时刻的输出为 (m_x^k, m_y^k, m_z^k) ,

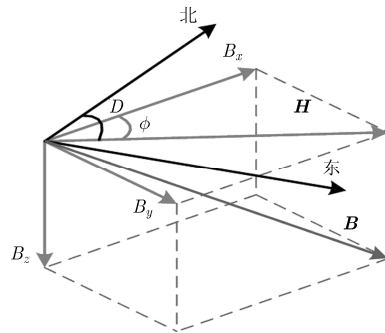


图 1 地磁场示意图

该输出为载体坐标系下的输出,在解算航向前须将其旋转到导航坐标系(即东-北-天坐标系)下。设磁力计载体坐标系与导航坐标系之间的欧拉角为 (r_k, p_k, y_k) , 则将 (m_x^k, m_y^k, m_z^k) 旋转到水平坐标系可通过式(2)实现。

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos p_k & 0 & -\sin p_k \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin p_k & 0 & \cos p_k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos r_k & \sin r_k \\ 0 & -\sin r_k & \cos r_k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_x^k \\ m_y^k \\ m_z^k \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, r_k 和 p_k 分别为横滚角和俯仰角。设 k 时刻加速度计输出为 (a_x^k, a_y^k, a_z^k) , 在足部着地时的静止时间内 r_k 和 p_k 可由加速度计数据计算得出,如式(3)所示(g 为重力加速度)。

$$\left. \begin{aligned} p_k &= -\sin^{-1}(a_x^k / g) \\ r_k &= \sin^{-1}(a_y^k \cdot (g \cdot \cos p_k)) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

当足部着地时,磁力计载体坐标系与导航坐标系之间的欧拉角中仅航向角 y_k 未知。另外,由式(1)可知,地磁场在垂直于水平面的分量 B_z 与航向角无关,因此可将其等效为水平坐标面的双轴磁力计。设等效后双轴磁力计的输出为 (m_x^k, m_y^k) , 则 (m_x^k, m_y^k) 与 (m_x^k, m_y^k, m_z^k) 对应关系由式(2)可得

$$\left. \begin{aligned} m_x^k &= m_x^k \cdot \cos p_k + m_y^k \cdot \sin p_k \cdot \sin r_k \\ &\quad + m_z^k \cdot \sin p_k \cdot \cos r_k \\ m_y^k &= m_y^k \cdot \cos r_k - m_z^k \cdot \sin r_k \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

因此磁力计的校准问题可转化为对水平坐标面双轴磁力计的校准。

2.2 磁力计校准方法

磁力计校准方法主要有两种:一种是通过全方位的旋转磁力计,分别获得三轴磁场强度的最大与最小值,并取算术平均作为磁力计轴向的偏置误差;另外一种是将磁力计放在强度已知的恒定磁场(如

赫姆霍兹线圈, Helmholtz coils)中旋转, 获取磁场强度数据后, 在建立的误差模型下利用最小二乘的方法估计磁力计校准参数^[16]。下面结合鞋载自主定位系统的特点, 给出磁力计校准方案。硬铁误差的校准步骤如下:

(1)将传感器固定到鞋尖, 行走前实验人员在原地旋转一圈, 旋转幅度尽可能小, 以便采集相对完整的磁场强度信息;

(2)设转圈结束时获得的磁力计采样序列为 $\mathbf{M} = \left\{ (m_x^k, m_y^k, m_z^k) \mid 1 \leq k \leq N_s \right\}$ (N_s 为采样点数), 利用静止检测算法确定足部着地时的静止区间, 提取静止区间内的磁力计采样序列。不妨设第 i 个静止区间的起始和结束时刻分别 s_i 和 e_i , 则静止区间内提取的磁力计采样序列为

$$\mathbf{M}_s = \left\{ (m_x^t, m_y^t, m_z^t) \mid s_i \leq t \leq e_i, 1 \leq i \leq L \right\} \quad (5)$$

L 为静止区间个数, 即步数;

(3)将静止区间采样序列 \mathbf{M}_s 按照式(4)转换到水平坐标系下, 用 \mathbf{M}_h (2维)表示。

$$\mathbf{M}_h = \left\{ (m_{x_h}^t, m_{y_h}^t) \mid s_i \leq t \leq e_i, 1 \leq i \leq L \right\} \quad (6)$$

获取 \mathbf{M}_h 中 x 轴和 y 轴最大值 (m_{x_max}, m_{y_max}) 与最小值 (m_{x_min}, m_{y_min}), 计算等效双轴磁力计的硬铁误差:

$$\begin{cases} \Delta x = (m_{x_max} + m_{x_min})/2 \\ \Delta y = (m_{y_max} + m_{y_min})/2 \end{cases} \quad (7)$$

\mathbf{M}_h 的 x 轴和 y 轴分量分别减去 Δx 和 Δy , 实现消除硬铁误差。

接下来论述磁力计软铁误差的校准方法, 具体步骤如下:

(1)设经过硬铁误差校准后采样序列为

$$\mathbf{M}_c = \left\{ (m_{x_c}^t, m_{y_c}^t) \mid s_i \leq t \leq e_i, 1 \leq i \leq L \right\} \quad (8)$$

针对序列中的每一对采样点, 计算

$$R = \left\| (m_{x_c}^t, m_{y_c}^t) \right\| \quad (9)$$

找到 R 的最大值 R_{max} 和最小值 R_{min} 及与之对应的采样点 $(m_{x_c_max}^t, m_{y_c_max}^t)$ 和 $(m_{x_c_min}^t, m_{y_c_min}^t)$ 。 R_{max} 和 R_{min} 分别为椭圆的长半轴和短半轴。

(2)计算椭圆的倾角:

$$\alpha = \sin^{-1} (m_{y_c_max}^t / R_{max}) \quad (10)$$

将椭圆旋转至长轴与 x 轴重合, 旋转矩阵为

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (11)$$

设旋转后磁场强度序列为 \mathbf{M}_r , 则有

$$\mathbf{M}_r = \mathbf{C}(\alpha) \cdot \mathbf{M}_c \quad (12)$$

(3)计算比例因子 $\tau = R_{min}/R_{max}$, 将 \mathbf{M}_r 中 x 轴分量按该比例因子进行缩放 (y 轴分量不变), 将椭圆校正为圆:

$$\mathbf{M}'_r(x) = \mathbf{M}_r(x) \cdot \tau \quad (13)$$

(4)将 \mathbf{M}'_r 旋转至初始位置:

$$\mathbf{M}_t = \mathbf{C}(-\alpha) \cdot \mathbf{M}'_r \quad (14)$$

3 磁场准静态检测与 ZUPT-EKF 航向校准

室内场景中地磁场所受的干扰并不是持续的, 即存在短时间内不受干扰或干扰很小的情况, 此时磁场基本不发生变化, 称为磁场的准静态。文献[13]提出 QSF 方法仅通过磁场变化幅度检测准静态, 容易造成误判而引入额外的误差。另外对于鞋载自主定位系统, 由于人体运动相对于其他惯导平台更加复杂, 导致实际行进航向与传感器解算航向存在一定随机误差。考虑到人员在直线行走阶段每一步航向基本相同, 因此可通过加窗取平均的方法对传感器解算航向处理以减少随机误差。当直线行走时, 相邻两步陀螺仪解算航向变化量约为零, 若磁场未受干扰即处于准静态时磁力计解算航向和磁场强度的变化量约为零。结合这些特点, 本节提出一种新的磁场准静态检测方法, 通过融合陀螺仪解算航向、磁力计解算航向和磁场强度 3 个参数的变化程度对直线阶段磁场准静态进行检测, 具体如下。

设第 k 步静止区间内陀螺仪解算航向为 θ_k , 磁力计解算航向为 φ_k , 磁场强度为 $\|\mathbf{B}_k\|$ 。 θ'_k 和 φ'_k 分别为加窗平均的陀螺仪和磁力计解算航向:

$$\theta'_k = \frac{1}{W} \sum_{l \in \Phi_k} \theta_l, \quad \varphi'_k = \frac{1}{W} \sum_{l \in \Phi_k} \varphi_l \quad (15)$$

式中, $\Phi_k = \{l \in N: k - (W - 1)/2 \leq l \leq k + (W - 1)/2\}$, W 为窗口长度(取值为奇数)。磁场准静态检测观测模型为

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{s}_k + \mathbf{v}_k \quad (16)$$

其中, $\mathbf{s}_k = [s_k^\theta \ s_k^\varphi \ s_k^B]^\top$, $s_k^\theta = |\theta'_k - \theta'_{k-1}|$ 为相邻两步陀螺仪解算航向变化量, $s_k^\varphi = |\varphi'_k - \varphi'_{k-1}|$ 为相邻两步磁力计解算航向变化量, $s_k^B = \|\mathbf{B}_k\| - \|\mathbf{B}_{k-1}\|$ 为相邻两步磁场强度变化量, $\mathbf{v}_k = [v_k^\theta \ v_k^\varphi \ v_k^B]^\top$ 为观测噪声, 此处假设 \mathbf{v}_k 为独立同分布零均值高斯白噪声, 噪声协方差矩阵为

$$\mathbf{C} = \mathbf{E} \{ \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^\top \} = \begin{bmatrix} \sigma_\theta^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\varphi^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_B^2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$\sigma_\theta^2, \sigma_\varphi^2$ 及 σ_B^2 分别为 s_k^θ, s_k^φ 和 s_k^B 的噪声方差。

当直线行走时, 若陀螺仪与磁力计解算航向以及磁场强度未发生变化, 此时 $\mathbf{s}_k = [0 \ 0 \ 0]^T$, 则认为磁场处于准静态, 否则为非准静态。因此可将磁场准静态检测问题转化为二元假设检验, 两种假设用 \mathbf{s}_k 可表示为

$$\left. \begin{aligned} H_0 : & \exists k \in \Omega_n, s_k^\theta \neq 0 \text{ 或 } s_k^\varphi \neq 0 \text{ 或 } s_k^B \neq 0 \\ H_1 : & \forall k \in \Omega_n, s_k^\theta = 0 \text{ 且 } s_k^\varphi = 0 \text{ 且 } s_k^B = 0 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

H_0 表示非准静态, H_1 为准静态, $\Omega_n = \{\ell \in N: n \leq \ell \leq n + N - 1\}$ 。两种假设下的概率密度函数分别为 $p(\mathbf{y}; \mathbf{s}_k, H_0)$ 和 $p(\mathbf{y}; \mathbf{s}_k, H_1)$, $H_i (i = 0, 1)$ 对应的概率密度函数可表示为

$$\begin{aligned} p(\mathbf{y}; \mathbf{s}_k, H_i) &= \prod_{k \in \Omega_n} p(\mathbf{y}_k; \mathbf{s}_k, H_i) \\ &= \prod_{k \in \Omega_n} p(y_k^\theta; s_k^\theta, H_i) p(y_k^\varphi; s_k^\varphi, H_i) \\ &\quad \cdot p(y_k^B; s_k^B, H_i) \end{aligned} \quad (19)$$

式中,

$$\left. \begin{aligned} p(y_k^\theta; s_k^\theta, H_i) &= \frac{1}{(2\pi\sigma_\theta^2)^{3/2}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_\theta^2}(y_k^\theta - s_k^\theta)^2\right) \\ p(y_k^\varphi; s_k^\varphi, H_i) &= \frac{1}{(2\pi\sigma_\varphi^2)^{3/2}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_\varphi^2}(y_k^\varphi - s_k^\varphi)^2\right) \\ p(y_k^B; s_k^B, H_i) &= \frac{1}{(2\pi\sigma_B^2)^{3/2}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_B^2}(y_k^B - s_k^B)^2\right) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

在假设 H_1 条件下 $\mathbf{s}_k = [0 \ 0 \ 0]^T$, 则有

$$\begin{aligned} p(\mathbf{y}; \mathbf{s}_k, H_1) &= \frac{1}{(2\pi\sigma_\theta^2)^{3N/2}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_\theta^2} \sum_{k \in \Omega_n} (y_k^\theta)^2\right) \\ &\quad \cdot \frac{1}{(2\pi\sigma_\varphi^2)^{3N/2}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_\varphi^2} \sum_{k \in \Omega_n} (y_k^\varphi)^2\right) \\ &\quad \cdot \frac{1}{(2\pi\sigma_B^2)^{3N/2}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_B^2} \sum_{k \in \Omega_n} (y_k^B)^2\right) \end{aligned} \quad (21)$$

在假设 H_0 条件下概率密度函数包含了未知矢量参数 \mathbf{s}_k , 设其最大似然估计为 $\hat{\mathbf{s}}_k$, 则根据矢量参数的最大似然估计知识可知 $\hat{\mathbf{s}}_k$ 满足:

$$\left. \frac{\partial \ln p(\mathbf{y}; \mathbf{s}_k, H_0)}{\partial \mathbf{s}_k} \right|_{\mathbf{s}_k = \hat{\mathbf{s}}_k} = \mathbf{0} \quad (22)$$

由式(22)可得

$$\hat{s}_k^\theta = \frac{1}{N} \sum_{k \in \Omega_n} y_k^\theta, \hat{s}_k^\varphi = \frac{1}{N} \sum_{k \in \Omega_n} y_k^\varphi, \hat{s}_k^B = \frac{1}{N} \sum_{k \in \Omega_n} y_k^B \quad (23)$$

广义似然比检测(GLRT):

$$T_G(\mathbf{z}_n) = \frac{p(\mathbf{y}; \mathbf{s}_k, H_1)}{p(\mathbf{y}; \hat{\mathbf{s}}_k, H_0)} > \gamma \quad (24)$$

$$\begin{aligned} T_G(\mathbf{z}_n) &= \left\{ \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_\theta^2} \sum_{k \in \Omega_n} (y_k^\theta)^2\right) \right. \\ &\quad \cdot \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_\varphi^2} \sum_{k \in \Omega_n} (y_k^\varphi)^2\right) \\ &\quad \cdot \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_B^2} \sum_{k \in \Omega_n} (y_k^B)^2\right) \left. \right\} \\ &\quad \left/ \left\{ \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_\theta^2} \sum_{k \in \Omega_n} \left(y_k^\theta - \frac{1}{N} \sum_{k \in \Omega_n} y_k^\theta\right)^2\right) \right. \right. \\ &\quad \cdot \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_\varphi^2} \sum_{k \in \Omega_n} \left(y_k^\varphi - \frac{1}{N} \sum_{k \in \Omega_n} y_k^\varphi\right)^2\right) \\ &\quad \cdot \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_B^2} \sum_{k \in \Omega_n} \left(y_k^B - \frac{1}{N} \sum_{k \in \Omega_n} y_k^B\right)^2\right) \left. \right\} \end{aligned} \quad (25)$$

化简后可得

$$\begin{aligned} T_G(\mathbf{z}_n) &= \exp\left(-\frac{1}{2N\sigma_\theta^2} \left(\sum_{k \in \Omega_n} y_k^\theta\right)^2\right) \\ &\quad \cdot \exp\left(-\frac{1}{2N\sigma_\varphi^2} \left(\sum_{k \in \Omega_n} y_k^\varphi\right)^2\right) \\ &\quad \cdot \exp\left(-\frac{1}{2N\sigma_B^2} \left(\sum_{k \in \Omega_n} y_k^B\right)^2\right) \end{aligned} \quad (26)$$

取自然对数可得

$$\begin{aligned} &-\left(\frac{1}{2N\sigma_\theta^2} \left(\sum_{k \in \Omega_n} y_k^\theta\right)^2 + \frac{1}{2N\sigma_\varphi^2} \left(\sum_{k \in \Omega_n} y_k^\varphi\right)^2\right) \\ &+ \frac{1}{2N\sigma_B^2} \left(\sum_{k \in \Omega_n} y_k^B\right)^2 > \ln \gamma \end{aligned} \quad (27)$$

令 $\gamma' = -2 \ln \gamma$, 则有

$$\begin{aligned} &\frac{1}{N} \left(\frac{1}{\sigma_\theta^2} \left(\sum_{k \in \Omega_n} y_k^\theta\right)^2 + \frac{1}{\sigma_\varphi^2} \left(\sum_{k \in \Omega_n} y_k^\varphi\right)^2 + \frac{1}{\sigma_B^2} \left(\sum_{k \in \Omega_n} y_k^B\right)^2 \right) \\ &< \gamma' \end{aligned} \quad (28)$$

γ' 为磁场准静态检测的门限, 当式(28)成立时, 则假设 H_1 成立, 即磁场处于准静态。当检测到磁场为准静态时, 磁力计航向可作为观测结合 ZUPT 辅助的 EKF 方法对陀螺仪航向进行校正。ZUPT 辅助的 EKF 在文献[8]中有详细论述, 本文不再赘述。

4 实验验证

4.1 磁场校准实验验证

为验证本文所提磁力计校准方案的有效性, 实验人员设计了两组实验, 实验地点在某典型办公楼。

第 1 组实验采用本文所提校准方法，实验时将系统固定在鞋跟处，系统开启后绕走廊内某一地点原地踏步转两圈后停止，获取第 1 组实验数据。第 2 组实验采用文献[16]中所提最小二乘校准方法，将定位

系统固定于三轴转台全方位旋转获取第 2 组实验数据。两组实验数据按相应的校准方法处理后得到校准参数分别如表 1 及表 2 所示，其中表 2 中 K_c 为软铁干扰系数， B_c 为硬铁干扰系数。

表 1 第 1 组实验磁力计校准参数

校准参数	Δx (μT)	Δy (μT)	α (rad)	比例系数	C
第 1 组实验	7.1507	-42.315	1.082	0.894	$\begin{bmatrix} 0.469 & 0.882 \\ -0.882 & 0.469 \end{bmatrix}$

表 2 第 2 组实验磁力计校准参数

校准参数	K_c	B_c
第 2 组实验	$\begin{bmatrix} 1.027 & 0.037 & 0.046 \\ 0 & 1.018 & -0.002 \\ 0 & 0 & 1.062 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 74.362 \\ -39.758 \\ 21.406 \end{bmatrix}$

图 2 展示了第 1 组数据校准前后磁场强度(单位微特斯拉, μT)的对比结果。在未受干扰的情况下，磁力计测得自由空间磁场强度图为球心在坐标原点的圆球，而硬铁误差的存在会使该圆球的球心产生偏移，软铁误差则会导致该圆球变为椭球。由图 2 中曲线可知硬铁误差对磁力计的影响要远大于软铁误差，即硬铁误差是磁力计误差的主要来源。

图 3 为分别用本文方法及最小二乘方法校准后磁力计解算航向对比图。由于陀螺仪漂移是缓变的，因而在短时间内陀螺仪解算航向精度较高，可作为参考值对两种方法校准效果进行评价。由图 3 知，经最小二乘方法校准后磁力计解算航向与参考值差异较大，最大误差约 15° ；经本文方法校准后磁力计解算航向误差与参考值基本相同，最大误差小于 5° 。结果说明本文所提磁力计校准方法性能优于最小二乘校准方法。

4.2 磁场准静态检测验证

为验证本文所提磁场准静态检测方法，实验人

员沿办公楼某楼层所有房间内墙按相同路径行走两圈后回到原点，统计行走步数为 527 步(设备固定在一只脚上，统计步数为单脚步数)，路径全长约 684 m。实验结果如图 4-图 7 所示。

式(28)中磁场准静态检测窗口长度 $N = 3$ ，实验测得噪声方差分别为： $\sigma_\theta = 0.056 \text{ rad/s}$ ， $\sigma_\varphi = 0.04 \text{ rad/s}$ ， $\sigma_B = 0.554 \mu\text{T}$ 。式(28)中 γ' 可通过接收机工作特征曲线 (Receiver Operating Characteristics curve, ROC) 确定。图 4 为实验测得接收机特性曲线，可知当检测概率大于 0.8 时，虚警概率的增速要明显大于检测概率的增速。因此我们选取 0.8 作为磁场准静态检测器的检测概率，此时对应的检测门限为 170。图 5 为磁场准静态持续步数的分布结果，可以看出其主要集中在 1 至 3 步，最长持续步数为 9 步，说明磁场准静态持续时间比较短，侧面反映了室内磁场所受干扰比较严重。对获取的实验数据进行轨迹解算(两圈)，将基于磁场准静态检测的 ZUPT 辅助的 EKF 方法解算轨迹与原始轨迹及 QSF 方法对比，结果如图 6 所示。

图 6 中灰色粗实线表示墙体，图 6(a) 为原始轨迹结果，即仅利用 ZUPT 辅助的 EKF 方法解算轨迹，由于 ZUPT 辅助的 EKF 方法不能校正陀螺仪漂移引起的航向误差，随着时间推移航向漂移愈发明显，

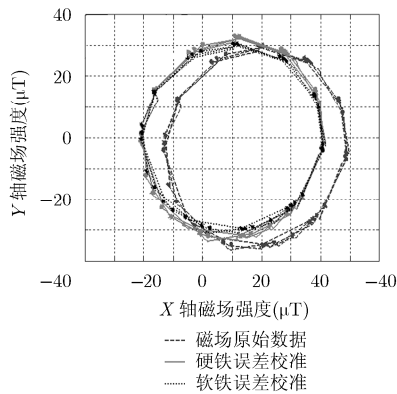


图 2 校准前后磁场强度对比

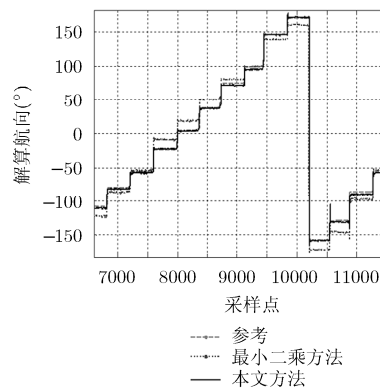


图 3 磁力计解算航向对比图

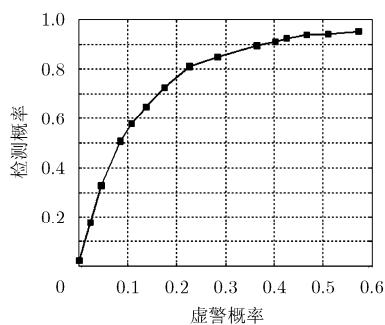


图4 接收机特性曲线

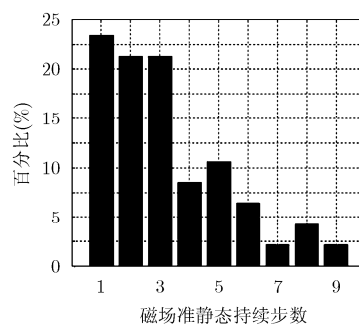
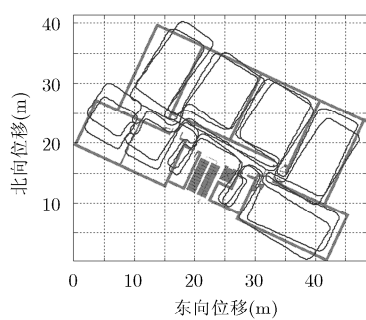
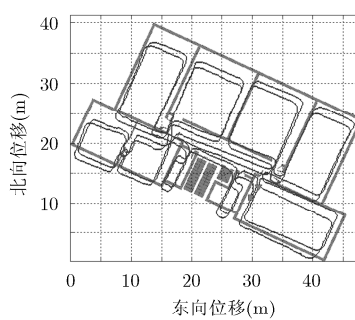


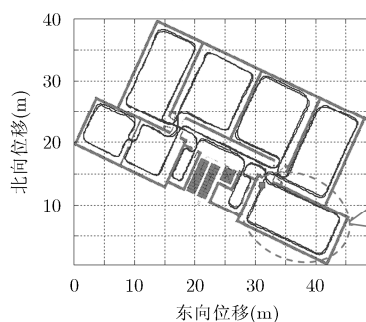
图5 磁场准静态持续步数分布图



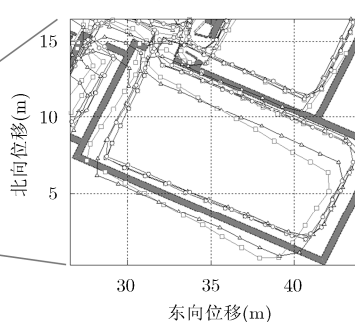
(a)原始轨迹



(b) QSF方法轨迹



(c)本文方法轨迹



(d)轨迹局部放大对比

图6 轨迹曲线

当到达终点时,航向误差达到 13.9° ,定位误差为 1.36 m 。图6(b)为QSF方法解算轨迹,该方法校准后轨迹效果稍优于原始轨迹。该方法利用磁场解算航向校正陀螺仪航向,一定程度上消除了陀螺仪漂移的影响,达到终点时航向误差仅为 5.1° ,但是定位误差达到 2.21 m ,在图6(b)中表现为两圈轨迹发生“平行偏移”,即航向相同,但位置偏移。造成这一现象的原因是QSF方法磁场准静态检测虚警较高,当受干扰磁场被检测为“准静态”时,利用其解算航向进行校正会导致航向漂移,误差增加;而当真实准静态磁场被检测出时,航向误差被校正,但此时位置误差不能校正,从而导致位置偏移。图6(c)为本文方法校正后轨迹结果,可看出两圈轨迹重合度较

好,航向误差 3.2° ,定位误差 0.46 m 。该方法根据所提磁场准静态检测方法对磁场所受干扰程度进行分析,仅当磁场满足准静态条件时才利用其对陀螺仪航向校正,避免了QSF方法中出现的位置“平行偏移”现象,使得定位精度得到较大程度的提高。图6(d)为3种方法解算轨迹局部对比结果,该图能直观的反应出本文所提方法的有效性。

另外,实验时在行走路径上依次设定了多个观测点,以计算解算轨迹与理论轨迹之间的误差,3种方法的误差曲线如图7。从图7中可以看出,初始轨迹和QSF方法解算轨迹的误差随时间发散比较快,两者最大误差分别达到 4 m 和 3 m ,而本文所提方法校正后的轨迹误差基本不随时间发散,最大误

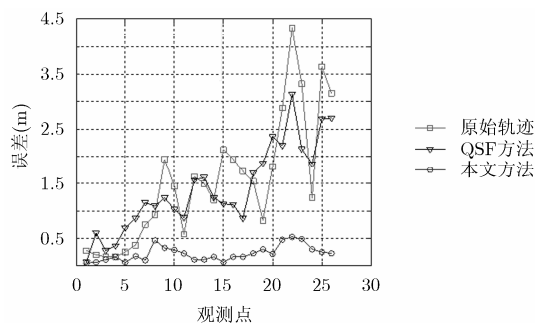


图7 误差曲线

差不超过0.5 m。以上实验结果验证了本文方法的有效性。

5 结束语

在室内惯性定位系统中，磁力计常被运用于校正陀螺仪航向漂移，但在室内场景中地磁场会受到比较严重的干扰，磁力计自身也会受到硬铁及软铁干扰的影响，导致航向解算精度不高。针对这一问题，本文提出一种地磁辅助的室内定位航向校正方法，该方法首先结合人体运动模型对磁力计进行校准，降低了计算量和复杂度，提高了磁力计解算航向精度。在此基础上对传统磁场准静态检测方法进行改进，通过融合陀螺仪与磁力计解算航向以及磁场强度等信息检测磁场的准静态，提升了检测的准确性与鲁棒性。经检测后获得可用磁场信息结合ZUPT辅助的EKF方法对惯性定位的航向误差进行校正，提高了航向精度和定位精度。

参考文献

- [1] LI Binghao, GALLAGHER T, DEMPSTER A, *et al.* How feasible is the use of magnetic field alone for indoor positioning[C]. 2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Sydney, Australia, 2012: 1-9. doi: 10.1109/IPIN.2012.6418880.
 - [2] HIDE C, BOTTERILL T, and ANDREOTTI M. Low cost vision-aided IMU for pedestrian navigation[J]. *Global Positioning Systems*, 2011, 10: 3-10. doi: 10.1109/UPINLBS.2010.5653658.
 - [3] SKOG I, NILSSON J, and HANDEL P. Pedestrian tracking using an IMU array[C]. International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies, Bangalore, India, 2014: 1-4. doi: 10.1109/CONECCT.2014.6740346.
 - [4] GU Yang, SONG Qian, LI Yangchuan, *et al.* Foot-mounted pedestrian navigation based on particle filter with an adaptive weight updating strategy[J]. *The Journal of Navigation*, 2015, 68(1): 23-38. doi: 10.1017/S0373463314000496.
 - [5] REN Mingrong, PAN Kai, LIU Yanhong, *et al.* A novel pedestrian navigation algorithm for a foot-mounted inertial-sensor-based system[J]. *Sensors*, 2016, 16(1): 139. doi: 10.3390/s16010139.
 - [6] RUPPELT J, KRONENWETTIG N, and TROMMER F. A novel finite state machine based step detection technique for pedestrian navigation systems[C]. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Alberta, Canada, 2015: 1-7. doi: 10.1109/IPIN.2015.7346771.
 - [7] ANGERMANN M and ROBERTSON P. Foot-slam: Pedestrian simultaneous localization and mapping without exteroceptive sensors-hitchhiking on human perception and cognition[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100: 1840-1848. doi: 10.1109/JPROC.2012.2189785.
 - [8] BASIRI A, PELTOLA P, FIGUEIREDO P, *et al.* Indoor positioning technology assessment using analytic hierarchy process for pedestrian navigation services[C]. International Conference on Localization and GNSS, Gothenburg, Sweden, 2015: 1-6. doi: 10.1109/ICL-GNSS.2015.7217157.
 - [9] GU Yang, MA Ming, LI Yangchuan, *et al.* Accurate height estimation based on *a priori* knowledge of buildings[C]. Proceedings of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Montbeliard, France, 2013: 28-31. doi: 10.1109/IPIN.2013.6817891.
 - [10] FOXLIN E. Pedestrian tracking with shoe-mounted inertial sensors[J]. *Computer Graphics and Applications*, 2005, 30(5): 20-26. doi: 10.1109/MCG.2005.140.
 - [11] NILSSON J, SKOG I, and HANDEL P. A note on the limitations of ZUPTs and the implications on sensor error modeling[C]. Proceedings of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Sydney, Australia, 2012: 20-22.
 - [12] JIMENEZ A, SECO F, PRIETO J, *et al.* Indoor pedestrian navigation using an INS/EKF framework for yaw drift reduction and a foot-mounted IMU[C]. Workshop on Positioning Navigation and Communication, Dresden, Germany, 2010: 135-143. doi: 10.1109/WPNC.2010.5649300.
 - [13] AFZAL M, RENAUDIN V, and LACHAPELLE G. Use of Earth's magnetic field for mitigating gyroscope errors regardless of magnetic perturbation[J]. *Sensors*, 2011: 11(12): 11390-11414. doi: 10.3390/s111211390.
 - [14] BUSATO A, PACES P, and POPELKA J. Magnetometer data fusion algorithms performance in indoor navigation: Comparison, calibration and testing[C]. IEEE Metrology for Aerospace, Benevento, Italy, 2014: 388-393. doi: 10.1109/MetroAeroSpace.2014.6865955.
 - [15] RENAUDIN V, AFZAL M, and LACHAPELLE G. New method for magnetometers based orientation estimation[C]. Position Location and Navigation Symposium, 2010: 348-356. doi: 10.1109/PLANS.2010.5507301.
 - [16] FENG Wenguang, LIU Shibin, LIU Shiwei, *et al.* A calibration method of three-axis magnetic sensor based on ellipsoid fitting[J]. *Journal of Information & Computational Science*, 2013, 10(6): 1551-1558. doi: 10.12733/jics20101833.
- 马明：男，1989年生，博士生，研究方向为室内人员定位技术。
宋千：男，1973年生，研究员，研究方向为先进探测理论及系统技术。
李杨寰：男，1982年生，讲师，研究方向为室内人员定位技术。