

文章编号: 2095-2163(2020)07-0117-06

中图分类号: U666.12

文献标志码: A

基于电子罗盘航向角修正的行人航迹推算方法研究

罗远云, 艾菊梅

(东华理工大学 信息工程学院, 南昌 330000)

摘要: 针对低精度微型惯性测量单元的系统误差随时间累积、速度误差和水平姿态角可用零速修正方法较准确计算, 而航向角误差易发散且难以估计的问题, 本文提出基于电子罗盘航向角修正的行人航迹推算方法。包括静态初始对准、MIMU 导航算法、电子罗盘航向角修正方法、自适应零速检测、卡尔曼滤波等内容。对惯性测量单元的修正, 主要用罗盘航向角与陀螺仪航向角的差值、角速度、零速伪观测作为观测量, 对速度、位置和姿态误差进行估计和补偿。经 MIMU 传感器实验验证, 实际路线和导航路线的水平定位误差为 4.7 米, 高度定位误差为 1 米, 位置误差与总路程的比值为 0.6%。表明该方法能有效地抑制航向角误差发散, 有效提高行人航迹推算的精度。

关键词: MIMU; 航向角修正; 卡尔曼滤波; 行人航迹推算

Pedestrian dead reckoning method research based on electronic compass heading angle correction

LUO Yuanyun, AI Jumei

(School of Information Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330000, China)

[Abstract] Aiming at the problem that the system error of the low-precision miniature inertial measurement unit accumulates over time, the speed error and the horizontal attitude angle can be calculated more accurately by the zero-speed correction method, and the heading angle error is easy to diverge but difficult to estimate. This paper proposes pedestrian dead reckoning method based on electronic compass heading angle correction, which includes static initial alignment, MIMU navigation algorithm, electronic compass heading angle correction method, adaptive zero-speed detection, Kalman filter module, etc. The correction of the MIMU mainly uses the difference between the compass heading angle and the gyroscope heading angle, angular velocity, and zero-speed pseudo-observations as observations to estimate and compensate for speed, position and attitude errors. The MIMU sensor experiment verifies that the horizontal positioning error of the actual route and the navigation route is 4.7 meters, the altitude positioning error is 1 meter, and the ratio of the position error to the total distance is 0.6%. It shows that the method can effectively suppress the divergence of heading angle errors and can effectively improve the accuracy of pedestrian dead reckoning.

[Key words] MIMU; heading angle correction; Kalman filter; Pedestrian Dead Reckoning

0 引言

在智慧城市和 5G 时代的背景下, 伴随物联网技术发展, 位置信息在社会生活中的作用日益凸显, 人员导航关键技术成为研究热点。对于高层建筑的室内、地下室及丛林等卫星信号遮挡过多的场景, 北斗/GPS 信号会不同程度地衰减甚至完全被屏蔽, 从而导致定位信息不可靠^[1]。基础的室内定位技术日渐成熟, 如 Wi-Fi、蓝牙、RFID、UWB、Zigbee、LED 定位、二维码定位技术、地磁场技术等, 因需依赖外部设施和已知环境, 在上述场景中应用受限^[2]。行人导航系统概念提出于 20 世纪 80、90 年代, 微惯性测量单元(Micro Inertial measurement unit, MIMU)具备功耗小、体积小、成本低、可靠性强、便于携带和集成等优势; MIMU 可完全自主实施, 不受环境限制,

适用于行人自主导航研究, 具有广阔应用前景, 受到学者们广泛关注。基于 MIMU 的行人定位导航系统, 有两种解决方案: 基于运动步长模型方案与零速修正(Zero Velocity Update, ZUPT)方案, 运动步长方案中通过对人体建模而获取步长信息, 但个体差异较大, 准确性较低; 零速修正方案无需人体建模, 精度较高, 越来越引起重视。

针对 MIMU 定位精度低的现象, 国内外研究者对此进行了大量研究。Foxli 首次提出零速修正可用卡尔曼滤波器(Kalman Filter, KF)实现的方法, 阐述了扩展卡尔曼滤波器(Extended Kalman Filter, EKF)算法的优势^[3]; Jimenez 等人对 Foxlin 提出的内容进行了完善; Meng 等人提出了利用 UKF 算法对原始系统状态直接滤波的方法^[4]。上述内容是

作者简介: 罗远云(1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 大数据智能计算; 艾菊梅(1966-), 女, 硕士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 算法设计及软件技术。

收稿日期: 2020-04-23

研究非线性系统的,滤波过程对系统状态、观测状态进行建模,估计系统误差及传感器误差。李佳璇提出双MIMU方案,构造二阶非线性等式约束方程,详述了等式约束卡尔曼滤波的解算过程^[5]。针对行人运动过程中,航向角误差会随时间累积发散的问题,周启帆等人提出将MIMU置于行人腰部,获取行人运动状态,融合捷联航向和磁航向计算行进方向,使用航迹递推计算轨迹^[6];郑佳瑶等人将行人在不同的步态信息得到步态序列模板与航向约束模板匹配,实时地校正航向漂移误差^[7];周广涛等人提出基于零积分航向角速率(Zero Integrated Heading Rate, ZIHR)的航向角修正算法的MEMS行人导航方法,阐述相邻零速时刻航向角差值作为量测值,以及陀螺漂移和航向误差角的关系^[8]。上述研究仍存在不足,如人体运动引起的干扰噪声无法减弱、系

统结构复杂、模型计算繁琐、零速时刻检测准确率低、航向漂移误差大等。在实际行走过程中,随着航向角误差的累积,导航轨迹与真实路线偏离程度增加,如何将航向角的误差控制在合理的范围,成为行人导航研究的热点。本文将MIMU置于人体足部,基于卡尔曼滤波算法,对MIMU进行修正,对速度、位置和姿态误差进行估计和补偿,减少误差发散,从而进行行人航迹推算(Pedestrian Dead Reckoning, PDR)。

1 MIMU与电子罗盘组合导航框架原理

在行人行走过程中,当脚落在地面时是保持静止的状态,理论上MIMU的速度和角速度几乎为0。但实际上输出的加速度和角速度并不为0,并且存在各种误差。MIMU与电子罗盘组合导航原理框架如图1所示。

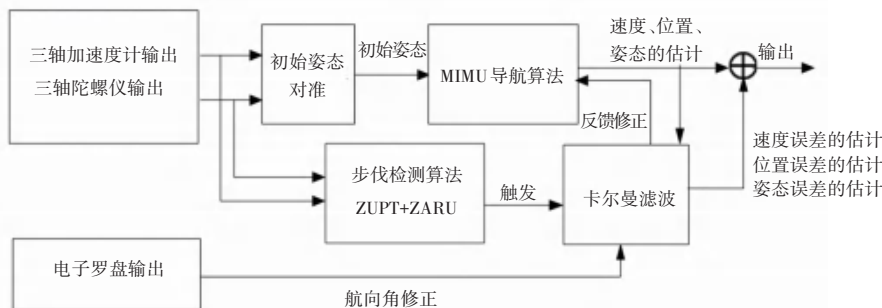


图1 MIMU与电子罗盘组合导航原理框架图

Fig. 1 The principle frame diagram of MIMU and electronic compass integrated navigation

1.1 静态初始对准

在静态条件下,初始速度为0,初始位置已知,而初始姿态通过静态初始对准来获得^[9]。静态初始对准是在静止条件下,利用加速度和罗盘三轴测量值计算姿态角为横滚角 θ ,俯仰角 φ ,航向角 φ 。行人行走过程得到较精准的初始姿态要满足两个条件:一是要在进行精对准前,对姿态矩阵进行适当的处理,使其单位正交化。采用一段时间内取测量值的平均值来减小测量误差,并且要减去传感器的偏差,因为运动过程会有载体晃动和惯性传感器漂移的影响;二是要消除电子罗盘在使用中磁性材料带来的磁场影响^[10]。本文使用十面校准法,对电子罗盘磁场数据校正后再计算罗盘的航向角。利用加速度计三轴输出数据计算横滚角 θ ,俯仰角 φ ,如式(1)、(2)所示。

$$\theta = \text{atan2}(a(y)/a(z)), \quad (1)$$

$$\varphi = \text{asin}(-a(x)/g). \quad (2)$$

其中, $a(x)$ 、 $a(y)$ 和 $a(z)$ 分别是加速度计 x 、 y

和 z 轴上的输出, g 是本地重力加速度,取 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

考虑地球自转角速度较小等因素,此处暂不考虑地磁偏角的误差;考虑加速度计和陀螺仪传感器误差、陀螺仪的性能限制因素,可知陀螺仪计算航向角误差较大,因此利用罗盘计算航向角 φ ,如式(3)所示。

$$\varphi = -\text{atan2}(H_y/H_x), \quad (3)$$

其中, H_x 和 H_y 计算方式如式(4)和(5)所示。

$$H_x = \cos \varphi * h(x) + \sin \varphi * \sin \theta * h(y) + \sin \varphi * \cos \theta * h(z). \quad (4)$$

$$H_y = \cos \theta * h(y) - \sin \theta * h(z). \quad (5)$$

其中, $h(x)$ 、 $h(y)$ 和 $h(z)$ 为罗盘三轴测量值。由上述加速度计和罗盘三轴测量值计算得到的姿态角,获得初始IMU的姿态矩阵如式(6)和式(7)所示。

$$\mathbf{g}^n = [0 \quad 0 \quad -g]^T. \quad (6)$$

$$C_b^n = \begin{bmatrix} \hat{e} \cos \theta \cos \varphi & -\cos \varphi \sin \varphi + \sin \varphi \sin \theta \cos \varphi & \sin \varphi \sin \varphi + \cos \varphi \sin \theta \cos \varphi \\ \hat{e} \cos \theta \sin \varphi & \cos \varphi \cos \varphi + \sin \varphi \sin \theta \sin \varphi & -\sin \varphi \cos \varphi + \cos \varphi \sin \theta \sin \varphi \\ \hat{e} & -\sin \theta & \sin \varphi \cos \theta \end{bmatrix} \dot{U}. \quad (7)$$

本文选择的是北西天地理坐标系, C_b^n 表示从导航坐标系到载体坐标系的方向余弦矩阵, 也称初始姿态矩阵; n 表示导航坐标系; b 表示载体坐标系; g 是本地重力加速度; T 表示矩阵转置。

1.2 MIMU 导航算法

在已知当前时刻的位置、速度和姿态的基础上, 基于 MIMU 的陀螺仪和加速度计输出, 以及 KF 的误差状态估计, 推算下一时刻的位置、速度和姿态^[11]。主要分为以下 4 个步骤:

步骤 1 误差补偿

t 时刻陀螺仪和加速度计输出的角速度和加速度为 w_t' 和 a_t' , 利用 $t-1$ 时刻 KF 对角速度和加速度的误差估计 $\delta_{w_{t-1}}, \delta_{a_{t-1}}$ 做补偿, 式(8)和式(9)。

$$w_t' = w_t - \delta_{w_{t-1}}, \quad (8)$$

$$a_t' = a_t - \delta_{a_{t-1}}. \quad (9)$$

步骤 2 姿态更新

利用 t 时刻的角速度和 $t-1$ 时刻的姿态, 预测 t 时刻的姿态, 用方向余弦矩阵 $C_{b \text{ temp}}^n$ 表示, 称为中间姿态矩阵, 式(10)。

$$C_{b \text{ temp}}^n = C_b^n (2I_3 + S_{W_k} * T) / (2I_3 - S_{W_k} * T). \quad (10)$$

其中, I_3 是 3 阶单位矩阵; S_{W_k} 是 W_k 的斜对称矩阵; T 是 MIMU 元件采样的周期, 式(11)。

$$S_{W_k} = \begin{bmatrix} \hat{e} & 0 & -W_k(3) & W_k(2) \\ \hat{e} & W_k(3) & 0 & -W_k(1) \\ \hat{e} & -W_k(2) & W_k(1) & 0 \end{bmatrix} \dot{U}. \quad (11)$$

步骤 3 对加速度进行重力补偿, 清除本地重力加速度的影响, 式(12)表示为 a_p 。

$$a_p = C_{b \text{ temp}}^n * a_k - [0 \ 0 \ g]^T. \quad (12)$$

步骤 4 利用 $t-1$ 时刻速度、位置的估计预测 t 时刻速度和位置, 式(13)和式(14):

$$v_{\text{temp}} = v_{t-1} + a_p * T, \quad (13)$$

$$r_{\text{temp}} = r_{t-1} + v_{\text{temp}} * T, \quad (14)$$

其中, v_{t-1} 和 r_{t-1} 分别表示 $t-1$ 时刻的速度和位置估计。 t 时刻的速度、位置和姿态的估计分别为式(15)、(16)和式(17):

$$v_t = v_{\text{temp}} - xhat_v, \quad (15)$$

$$r_t = r_{\text{temp}} - xhat_r, \quad (16)$$

$$C_b^n = (2I_3 - S_{xhat_\varphi}) / (2I_3 + S_{xhat_\varphi}) C_{b \text{ temp}}^n. \quad (17)$$

其中, v_t, r_t 分别表示 t 时刻 KF 对速度、位置的

估计; $xhat_v, xhat_r$ 是速度误差和位置误差的估计; $xhat_\varphi$ 表示姿态角误差的估计; S_{xhat_φ} 是 $xhat_\varphi$ 斜对称矩阵; S_{xhat_φ} 表示为式(18):

$$S_{xhat_\varphi} = \begin{bmatrix} \hat{e} & 0 & -xhat_\varphi(3) & xhat_\varphi(2) \\ \hat{e} & xhat_\varphi(3) & 0 & -xhat_\varphi(1) \\ \hat{e} & -xhat_\varphi(2) & xhat_\varphi(1) & 0 \end{bmatrix} \dot{U}. \quad (18)$$

1.3 电子罗盘航向角修正

电子罗盘的航向角是人体所在方向与地磁北极的夹角。对航向角进行修正主要有以下 3 个因素:

(1) 人体在运动状态时, 罗盘无法与地面保持平行, 需利用加速度计进行补偿。

(2) 减少陀螺仪漂移带来的误差, 使用陀螺仪确定航向角时误差会随着时间累积, 因此有研究者提出利用电子罗盘确定航向角。虽然电子罗盘确认航向角不会随时间累积, 但人体抖动会使得航向角的抖动幅度增大^[10]。

(3) 当行人做圆周运动时, 在 360° 和 0° 交界处会发生航向角突变(不连续), 无论是电子罗盘还是陀螺仪航向角均会发生此现象, 这样所得电子罗盘和陀螺仪的航向角差值会突变(不连续), 会导致卡尔曼滤波发散, 因此要对航向角连续化处理, 称为圆周角检测过程。

本文先对加速度和角速度进行零偏补偿, 从而将罗盘航向角与陀螺仪航向角的差值 yaw_{kalman} 作为观测量, 对航向角进行修正。航向角修正主要包括三个步骤。

步骤 1 由中间姿态矩阵 $C_{b \text{ temp}}^n$ 求解欧拉角, 利用角速度零偏补偿得到航向角 $yaw_{gro}(3)$ 求得陀螺仪的航向角, 式(19):

$$yaw_{gro \text{ new}} = yaw_{gro \text{ new}} + \det_{yaw \text{ gro}}, \quad (19)$$

其中, $yaw_{gro \text{ new}}$ 初始为零, $\det_{yaw \text{ gro}}$ 为圆周角检测得到的陀螺仪航向角。

步骤 2 由加速度零偏补偿后的一步姿态角 $Eule_{gro}(1), Eule_{gro}(2)$ 和电子罗盘三轴测量值 $h(x), h(y)$ 和 $h(z)$ 得到电子罗盘航向角, 式(20):

$$yaw_{compass \text{ new}} = yaw_{compass \text{ new}} + \det_{yaw \text{ compass}}, \quad (20)$$

其中, $yaw_{compass \text{ new}}$ 初始为零, $\det_{yaw \text{ compass}}$ 为圆周角检测得到的电子罗盘航向角。

步骤3 yaw_{kalman} 为陀螺仪的航向角减去电子罗盘航向角的差值,式(21):

$$yaw_{kalman} = yaw_{gro}^{new} - yaw_{compass}^{new}. \quad (21)$$

以上三个步骤得到航向角修正结果如图2所示,保证航向角的持续性在 $0-360^\circ$ 。 yaw_{kalman} 即为Kalman 滤波的观测量之一。

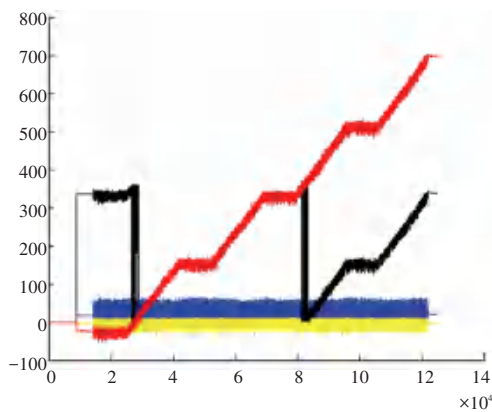


图2 电子罗盘航向角修正图

Fig. 2 Electronic compass heading angle correction diagram

其中, X 轴表示运动状态的采样时间; Y 轴表示角度值; 黄色表示横滚角; 蓝色表示俯仰角; 绿色表示角速度零偏补偿后的陀螺仪航向角; 红色表示加速度零偏补偿和罗盘三轴测量值补偿后的罗盘航向角; 黑色表示 yaw_{kalman} 值。

1.4 自适应零速检测

零速检测是零速修正的前提和关键,直接决定了导航精度。加速度幅值检测对于行人大步、步速稍快条件下,零速检测辅助效果较好。角速率能量检测主要是针对陀螺信号处理,对足部晃动引起的角速率值突变和转弯过程零速检测效果明显^[12]。本文阈值自适应调节的零速检测方案,将综合加速度计和陀螺仪数据作为检测零速时刻的两个阈值,由此降低MIMU精度低带来的导航误差漂移影响。最后通过实验分析评价所提方法的稳定性和准确性。零速定义为同时满足以下两个条件即可。

条件1 加速度计的输出合成幅值,式(22):

$$|a_{mr}| = \sqrt{a_t(x)^2 + a_t(y)^2 + a_t(z)^2}. \quad (22)$$

对于给定的加速度阈值 a_{min} 为 $9m/s^2$, a_{max} 为 $11m/s^2$ 并且满足 C_1 , 式(23):

$$C_1 = \begin{cases} 1 & a_{min} < |a_{mr}| < a_{max} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (23)$$

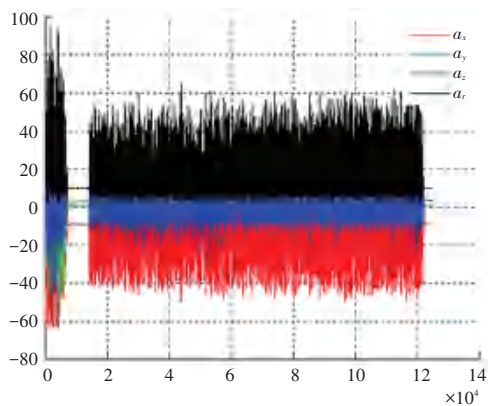
条件2 角速度的输出合成幅值,式(24)和(25):

$$|w_{mr}| = \sqrt{w_t(x)^2 + w_t(y)^2 + w_t(z)^2}, \quad (24)$$

$$C_2 = \begin{cases} 1, & |w_{mr}| < 1; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (25)$$

对条件1和2做逻辑与运算,如公式(26)所示。即只有当两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“零速时刻”。零速检测结果如图3~图6所示。

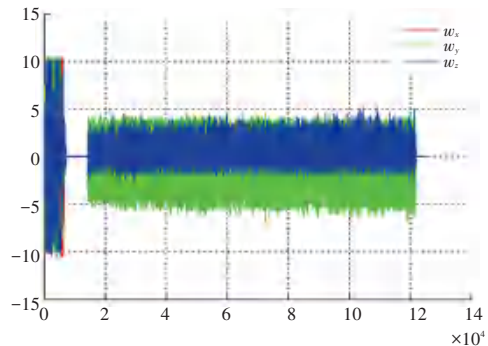
$$C = C_1 \& C_2. \quad (26)$$



a_x 红线, a_y 绿线, a_z 蓝线分别表示加速度 X, Y, Z 三轴的测量值, a_r 黑线表示合成输出值

图3 加速度计三轴的测量值和合成输出值

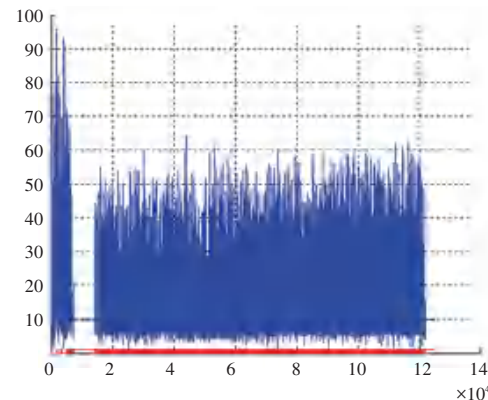
Fig. 3 The measured value and composite output value of the three axes of the accelerometer



w_x, w_y, w_z 分别表示角速度 X, Y, Z 三轴的测量值

图4 陀螺仪三轴的测量值

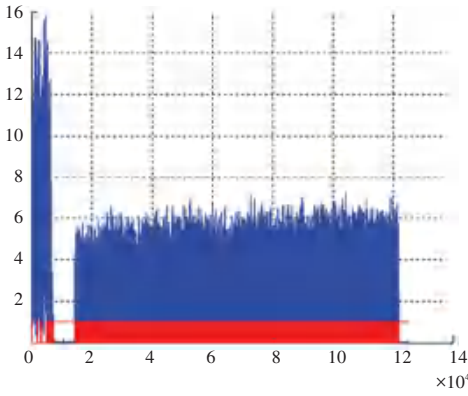
Fig. 4 The measured values of the three axes of the gyroscope



蓝色表示角速度合成输出值,红色表示对应的零速区间

图5 加速度合成输出值和检测到的零速区间

Fig. 5 The acceleration composite output value and the detected zero-speed interval



蓝色表示角速度合成输出值,红色表示对应的零速区间

图 6 角速度合成输出值和检测到的零速区间

Fig. 6 Angular velocity synthesized output value and detected zero-speed interval

1.5 卡尔曼滤波

PDR 系统是一个非线性系统,但是可以通过线性化来近似描述 KF 的误差状态,如式(27)所示,共包含 9 个元素。

$$x_{hat} = [\delta_{\varphi_t}, \delta_{r_t}, \delta_{v_t}], \quad (27)$$

其中, x_{hat} 表示 $t-1$ 时刻的误差状态,分别为姿态角、位置和速度的三维误差估计值。姿态角按顺序依次是横滚角、俯仰角和航向角。系统的状态预测方程(28)为:

$$x_{temp} = P_{hi} * x_{hat}, \quad (28)$$

其中, x_{temp} 表示 t 时刻的预测误差状态; P_{hi} 是 9 阶误差状态转移矩阵,表示如何从上一时刻状态推测当前状态; x_{hat} 是 $t-1$ 时刻的估计误差状态; P_{hi} 表示为式(29):

$$P_{hi} = \begin{bmatrix} \hat{e} & I_3 & zeros(3) & zeros(3) \\ \hat{e} & zeros(3) & I_3 & T * I_3 \\ \hat{e} & T * S_{a_{\varphi}} & zeros(3) & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u} \\ \hat{u} \\ \hat{u} \\ \hat{u} \end{bmatrix}, \quad (29)$$

其中, $S_{a_{\varphi}}$ 是 a_{φ}^n 的斜对称矩阵,式(31)。

$$a_k^n = C_{b temp}^n * a_k. \quad (30)$$

$$S_{a_{\varphi}} = \begin{bmatrix} \hat{e} & 0 & -a_k^n(3) & a_k^n(2) \\ \hat{e} & a_k^n(3) & 0 & -a_k^n(1) \\ \hat{e} & -a_k^n(2) & a_k^n(1) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u} \\ \hat{u} \\ \hat{u} \\ \hat{u} \end{bmatrix}. \quad (31)$$

KF 的观测方程(32)为:

$$Z_k = H * x_{hat} + n_k, \quad (32)$$

其中, Z_k 为观测值; H 为当前状态和观测状态的转换关系; n_k 为观测噪声。 t 时刻的估计误差状态更新,式(33):

$$x_t = x_{temp} + K * (Z_k - H * x_{temp}). \quad (33)$$

卡尔曼滤波增益方程(34):

$$K = \frac{P_{temp} * H^T}{H * P_{temp} * H^T + R}. \quad (34)$$

一步预测的协方差传递方程(35):

$$P_{temp} = P_{hi} * P * P_{hi}^T + Q. \quad (35)$$

其中, P_{temp} 表示由 $t-1$ 时刻到 t 时刻的预测值; P 表示系统噪声的方差阵; Q 表示观测噪声方差阵。

对预测状态协方差的更新,式(36):

$$P_t = (I_9 - K * H) * P_{temp}. \quad (36)$$

其中, P_t 表示 t 时刻协方差的估计值。对位置、速度和姿态补偿后,需要将 δ_{r_t} , δ_{v_t} 和 δ_{φ_t} 归零。

当脚落地静止时,将 yaw_{kalman} 、角速度、零速伪观测值作为卡尔曼滤波观测值,零速修正。观测值和观测矩阵为式(37)和式(38):

$$z_k = [yaw_{kalman}, [w_x(i), w_y(i), w_z(i)], v_{temp}], \quad (37)$$

$$H = \begin{bmatrix} \hat{e} & [0, 0, 1] & zeros(1, 3) & zeros(1, 3) \\ \hat{e} & zeros(3) & zeros(3) & zeros(3) \\ \hat{e} & zeros(3) & zeros(3) & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u} \\ \hat{u} \\ \hat{u} \\ \hat{u} \end{bmatrix}. \quad (38)$$

当脚落地静止时,将 yaw_{kalman} 作为卡尔曼滤波的观测值,观测值和观测矩阵为式(39)和式(40):

$$z_k = [yaw_{kalman}], \quad (39)$$

$$H = [[0, 0, 1] \quad zeros(1, 3) \quad zeros(1, 3)]. \quad (40)$$

2 实验数据及结果分析

本文采用 MPU6050 传感器,包含了一个三轴的加速度计和陀螺仪;传感器 HMC5883 为三轴磁力计,按照三维坐标系安装,测出目标物体空间磁场的三维磁感应强度,通过算法求解分析出目标物体的姿态信息;同时该传感器内置自检功能,罗盘航向精度可精确到 2° 左右。将传感器置于左脚鞋部,采样频率是 100 Hz,卡尔曼滤波的周期为采样频率的倒数。实验的线路是闭合的,采用一圈为 400 m 的操作进行实验,总共步行了 2 圈,共 800 m。完整的行走轨迹如图 7 所示,起点坐标为 $[0, 0]$,终点坐标为 $[4.7, 1]$ 。图 8 为图 7 中起点和终点放大图。

从实验数据可以看出,水平定位误差为 4.7 m,高度定位误差为 1 m,位置误差与总路程的比值为 0.6%。说明本文提出的基于电子罗盘航向角修正的行人航迹推算方法有效提高了行人自主导航定位精度,实现可商业化的便携式室内外、无缝、低功耗、高精度人员定位导航系统。