



Research on Pedestrian Navigation Algorithm Based on MEMS Inertial Devices

Chen Zhaoyi^{*}, Du Xiaojing, Li Huaijian

Aerospace Institute, Beijing Institute of Technology, Beijing, China

Email address:

lihuaijian@bit.edu.cn (Li Huaijian), 15652343466@163.com (Chen Zhaoyi)

^{*}Corresponding author

To cite this article:

Chen Zhaoyi, Du Xiaojing, Li Huaijian. Research on Pedestrian Navigation Algorithm Based on MEMS Inertial Devices. *Advances in Materials*. Vol. 5, No. 6, 2017, pp. 410-415. doi: 10.11648/j.sd.20170506.12

Received: July 8, 2017; **Accepted:** September 28, 2017; **Published:** October 27, 2017

Abstract: Pedestrian navigation system (PNS) is also known as the walker navigation system, which is mainly used to track and posit real-time position of walker, to provide walk speed and position of walker, and also be applied to military, science, sport, rescue, the blind navigation, electronic product, etc. GPS signal is unreliable and difficult to provide accurate location information in most environments such as indoor, urban streets and canyons. At this point, the autonomous navigation system based on the proposed algorithm is a good solution. This article mainly analyzes the MEMS inertial device in the actual engineering practice, the application of the low precision of MEMS inertial device used in personal navigation correction algorithm, and combines the MEMS inertial sensors and GPS receiver, satisfies the requirement of pedestrian positioning. Using the complementary filter to fuse sensor data, we can obtain information of high precision orientation.

Keywords: MEMS Inertial Devices, Air Position Calculation, Kalman Filtering

基于MEMS惯性器件的行人导航算法研究

陈焰屹^{*}, 杜小菁, 李怀建

宇航学院, 北京理工大学, 北京, 中国

邮箱

lihuaijian@bit.edu.cn (李怀建), 15652343466@163.com (陈焰屹)

摘要: 行人导航系统 (pedestrian navigation system, PNS), 又被称为步行者导航系统, 主要用于跟踪定位徒步行走人员的实时位置, 能提供行人在行走时的速度和位置, 可以应用于军事、科学、体育、救援、盲人导航、电子产品等领域。在室内、城市街道、峡谷等行人行走的大部分环境中, GPS信号是不可靠的, 难以提供准确的位置信息。此时, 基于航位推算算法的自主导航系统是一个很好的解决方案。本文主要分析MEMS惯性器件在实际工程实践中的应用, 研究低精度MEMS惯性设备用于个人导航的导航修正算法, 并将MEMS惯性传感器与GPS接收机相结合, 以满足行人定位要求。利用互补滤波器融合传感器数据, 获得高精度方位的信息。

关键词: MEMS惯性器件, 航位推算, 卡尔曼滤波

1. 引言

行人导航是导航定位领域中的一个重要的新兴分支，可以实时确定并监测行人的位置以及运动状态，有效的提高军事作战人员、抢险搜救人员的快速反应能力并同时保障行人的交通安全[1]。行人导航系统具有重量轻、体积小、价格相对低廉、便携性好等特点，因此具有广阔的军事与民用应用前景。

近年来行人导航的研究重点在于研究一种在卫星定位系统失效的环境中仍能保持较高精度的导航系统。MEMS惯性导航系统具有自主性强、更新率高、导航信息完整、便于在人体上的安装与携带等特点，是对卫星定位系统的有效补充[2]。行人航位推算就是这样一种技术，在室内环境中可以提供行人航位信息并提高定位的可靠性。要实现随时随地定位的目标离不开高品质的MEMS传感器和高性能的行人航位推算算法。

相对于传统惯性导航系统的应用载体，行人导航系统的载体较为特殊。行人导航系统利用人体生理运动特性，使用零速校正的方式，通过卡尔曼误差校正器对速度误差进行状态估计，估计出MEMS惯性器件漂移、导航解算误差，采用输出校正的方式对惯性器件测量结果、导航输出和导航结果进行校正。在不增加外在成本的前提下，提高行人导航系统定位功能的精度。

2. MEMS惯性器件及系统

由MEMS惯性传感器组成的微型惯性测量组合（Micro Inertial Measurement Unit，简称“MIMU”）是微机械电子系统的一个重要分支，是惯性导航领域近年来发展起来的新技术[3]。惯性技术发展的一个重要标志是惯性传感器的发展，主要体现在测量原理、器件精度和加工工艺方面。

以MEMS技术为基础的微陀螺是一种重要的微惯性器件。Draper实验室于1985年就着手微机械陀螺的研制，先后研制了框架式角振动微陀螺、音叉式线振动微陀螺及振动轮式微陀螺，其漂移由1994年的4000°/h减小到2000年的10°/h[1]。中国在微陀螺领域的研究起步较晚，经过近些年的努力，在关键技术研究有长足的进步，微陀螺性能有大幅提高。清华大学、北京大学、东南大学、中北大学、上海微系统、航天时代电子公司、电子科技集团26所和13所等单位已经研制出具有一定精度的样机。

2.1. 陀螺仪误差标定

陀螺仪是惯性测量单元中的核心器件，决定了整个惯性测量单元的工作精度。由于MEMS陀螺仪的精度较低，误差来源也较多，这将对微惯性导航系统的导航精度产生很大影响[4]。因此，在使用前必须对陀螺仪进行标定，为各项误差系数建立误差模型，设计模型参数辨识算法，通过软件进行误差实时补偿以提高陀螺仪的测量精度。

MEMS陀螺仪受自身结构特点、工艺制造水平及工作原理限制，会引起质心偏移、非等惯性力矩等误差，且存在各种干扰因素。另外，陀螺仪在制造与安装的过程中，因无法保证三轴之间的绝对正交，从而会引入安装误差。

因此，MEMS陀螺仪数据输出的主要误差包括零偏、标定因数、安装误差、随机误差等。

MEMS陀螺仪采用如式（1）简化的误差数学模型：

$$\begin{cases} N_{gx} = D_{x0} + K_{gx}\Delta\theta_x + E_{gyx}\Delta\theta_y + E_{gzx}\Delta\theta_z \\ N_{gy} = D_{y0} + K_{gy}\Delta\theta_y + E_{gxy}\Delta\theta_x + E_{gzy}\Delta\theta_z \\ N_{gz} = D_{z0} + K_{gz}\Delta\theta_z + E_{gyz}\Delta\theta_y + E_{gxz}\Delta\theta_x \end{cases} \quad (1)$$

式（1）中 $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y, \Delta\theta_z$ 为采样周期内三个轴向X,Y,Z的输入角增量； N_{gx}, N_{gy}, N_{gz} 为对应三个轴X,Y,Z上陀螺采用周期内输出的脉冲信号数目； D_{x0}, D_{y0}, D_{z0} 为对应三个轴X,Y,Z上陀螺的零偏； K_{gx}, K_{gy}, K_{gz} 为对应三个轴X,Y,Z上陀螺的标度因数； $E_{gyx}, E_{gxy}, E_{gyz}, E_{gzx}, E_{gzy}, E_{gxz}$ 分别为三个轴X,Y,Z上陀螺的安装误差系数。

对MEMS陀螺仪使用速率试验的方法进行标定。MEMS陀螺仪输出的数据中存在着各种误差，主要分为确定性误差和随机误差，利用标定试验的结果对确定性误差通过误差模型逆推的算法加以补偿。MEMS的速率试验结束后，对采集到的陀螺仪输出数据进行处理，即误差模型参数辨识的过程：

1）对各轴向的MEMS陀螺仪在每个位置采集的所以数据进行累加，得到转台转动一圈的输出值。规定三轴转台逆时针转动为正，顺时针转动为反。控制转台使其在相同时间内分别绕系统OX,OY,OZ轴分别正反转动360°，将X,Y,Z陀螺累积输出脉冲分别记为 $N_{GX}^+, N_{GX}^-, N_{GY}^+, N_{GY}^-, N_{GZ}^+, N_{GZ}^-$ 。

2）将由过程（1）得到的MEMS陀螺仪6个位置的试验数据代入其误差模型中进行参数辨识。以系统X轴指天时，转台以5°/s的速率顺时针、逆时针分别转动一圈为例。根据测得的数据、转台的角速率及陀螺误差模型，可以得到X轴向陀螺的标度因数、零偏及其相对于Y,Z轴向陀螺安装偏角分别为（2）（3）（4）（5）所示：

$$K_{gx} = \frac{N_{GX}^+ - N_{GX}^-}{2 \times 2\pi \times 3600} \quad (2)$$

$$K_{gxy} = \frac{N_{GY}^+ - N_{GY}^-}{2 \times 2\pi \times 3600} \quad (3)$$

$$K_{gxz} = \frac{N_{GZ}^+ - N_{GZ}^-}{2 \times 2\pi \times 3600} \quad (4)$$

$$D_{x0} = \frac{N_{GX}^+ + N_{GX}^-}{2 \times 3600} \quad (5)$$

经误差补偿和小波阈值滤波后，MEMS陀螺仪的零偏、安装误差、随机漂移等均得到了改善，提高了1-2个数量级，从而提高了MEMS陀螺仪的测量精度和惯导系统的精度。

2.2. MEMS行人导航系统算法及误差分析

MEMS惯性单元用于PNS导航有两种算法方案：PDR（Pedestrian Dead-Reckoning）算法和SINS算法。其中，PDR算法将导航分解为方位计算和步长计算两部分，通过将步长在计算方位上投影获得水平面内的二维导航结果，因此该算法不能提供高度上的位置变化，适用范围有限。

与之相比, SINS捷联惯导算法通过6自由度的导航解算可以提供完备导航信息, 但由于MEMS器件精度低, 如果导航期间不能得到有效修正, 位置误差会以时间三次方的趋势发散, 最终丧失导航功能。因此, SINS算法应用于PNS的最大难点在于设计有效的修正算法。

MEMS行人导航系统的惯性解算算法采用成熟的捷联惯导算法, 由初始对准和导航解算两部分构成。初始对准为导航提供初始的姿态信息。对MEMS惯性系统而言, 由于陀螺精度太低不能感测到地球的自转角速度 ω_{ie} , 因此初始对准不能实现方位上的对准, 只能根据加速度计输出完成水平对准, 解算出俯仰角 θ 和滚转角 γ 的估计结果 $\hat{\theta}$ 和 $\hat{\gamma}$ 。而方位角 ψ 需要由外部信息给定, 如磁力计。

上述只是一种粗对准算法, 得到的 $\hat{\theta}$ 和 $\hat{\gamma}$ 还含有很大的对准误差。为得到更为精确的对准结果, 一般需要设计卡尔曼滤波器进行最优滤波估计。零速校正算法中设计的改良卡尔曼滤波器同样具有水平角精对准的功能。因此, 只要在上述过程结束后继续保持一段时间的静止(几秒钟), 就可以实现水平角的进一步精确对准。

MEMS惯性导航采用成熟的SINS算法, 由于行走过程中脚部的角机动较大且角机动和线机动耦合严重, 因此为提高导航精度, 姿态更新和速度更新采用二子样算法。此外, 由于个人导航系统的导航范围有限, 位置宜在东-北-天导航坐标系(地理坐标系) n 系下表示, 更新过程如公式(6)所示, 式(6)中E、N、U分别表示东向、北向和天向的位移, 上标T表示转置运算。在导航起始位置的地理坐标准确已知情况下, 位置也可以很方便地转化到传统的地球坐标系下, 用经度、纬度和高度的形式表示。

$$[E, N, U]_k^T = [E, N, U]_{k-1}^T + (v_{k-1}^n + v_k^n) \cdot T_s / 2 \quad (6)$$

导航误差方程是零速校正算法建立卡尔曼滤波模型的理论基础, SINS导航算法简化后的误差模型如式(7)所示[5]:

$$\begin{cases} \dot{\varphi}^n = -((\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times) \varphi^n - C_b^n (\varepsilon^b + w_g^b) \\ \dot{\delta v}^n = ((C_b^n f_{sf}^b) \times) \varphi^n - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta v^n \\ \quad + C_b^n (\nabla^b + w_a^b) \\ \dot{\delta pos} = \delta v^n \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中, φ^n 表示平台误差角, δv^n 表示速度误差, δpos 表示东、北、天三个方向的位置误差; f_{sf}^b 表示比力矢量, ε^b 和 ∇^b 表示陀螺和加速度计的随机常值零偏, 微分导数为0, w_g^b 和 w_a^b 表示陀螺仪和加速度计的输出噪声, C_b^n 表示捷联惯导的姿态矩阵; ω_{en}^n 表示导航系相对地球的旋转角速度在导航系的投影, 由于人行走速度很低, 因此 ω_{en}^n 远远小于 ω_{ie}^n , 计算时可以忽略。

2.3. 静止检测算法

静止检测的判断依据来自惯性器件的测量输出, 根据实测人行走时脚部比力模值的变化情况, 可以看出, 静止时比力模值稳定在重力附近, 运动时比力模值变化明显且变化幅度很大。因此可知, 通过分析比力的模值和方差可以对运动状态进行检测。具体方法为: 设计一个长度固定

的时间窗口, 随着时间的变化窗口向前滑动, 以时间窗口内比力的模值和模值方差作为静止检测的判断依据, 简称为比力模值+滑动方差检测算法。检测过程如下:

1) 在MEMS惯性输出的每个离散时刻 $t_1, t_2, \dots, t_N, t_{N+1}, \dots$, 计算当前 t_N 时刻加速度计输出的比力幅值, 即公式(8)[7]

$$|f_N| = \sqrt{f_x^2(t_N) + f_y^2(t_N) + f_z^2(t_N)} \quad (8)$$

2) 计算两个判断指标: 比力幅值与重力加速度幅值的偏差 $Bias_N$ 和比力幅值的滑动方差 Var_N 。为避免判断延迟, 方差 Var_N 的计算区间取为 (t_{N-M1}, t_{N+M2}) , 即公式(9):

$$\begin{cases} Bias_N = ||f_N| - |g|| \\ Var_N = variance(|f_{N-M1}|, \dots, |f_N|, \dots, |f_{N+M2}|) \end{cases} \quad (9)$$

3) 根据加速度计的统计特性, 设计比力模值判断阈值 $Gate_v$ 。静止检测方法为: 首先假设当前 t_N 时刻运动状态为静止, 即默认为静止状态; 然后比较判断, 若 $Var_N \geq Gate_v$ 或 $Bias_N \geq Gate_B$, 则判断运动状态为运动, 否则维持原假设。

判断阈值的选取与加速度计输出噪声的方差特性有关, 需要在试验前分析加速度计的噪声特性。区间长度参数M1和M2的选取主要与IMU的输出频率有关。

2.4. 零速校正算法

静止检测触发零速校正, 在检测为静止的时间内将速度置为0。为利用静止检测估计更多误差参数, 根据导航误差模型设计了零速校正卡尔曼滤波器。将状态量选取为 $X = [\varphi^{nT} \delta v^{nT} \delta pos^T \varepsilon^{bT} \nabla^{bT}]^T$, 量测量取为检测为静止时刻的解算速度误差 δv^T , 即 $H_k = [0_{3 \times 3} \quad I_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 3}]$, 卡尔曼滤波器可以表示为公式(10): [6]

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = F(t)X(t) + W(t) \\ Z_k = H_k X_k \end{cases} \quad (10)$$

考虑到量测量 δv^n 只在检测为静止的时刻才能获取, 且量测噪声与具体运动和干扰相关, 事先并不能准确获知, 因此卡尔曼滤波器需作如下改良: 1) 卡尔曼滤波更新时刻 t_k , 若静止检测为运动, 则滤波器只做时间更新; 2) 卡尔曼滤波更新时刻 t_k , 若静止检测为静止, 则滤波器做完整更新, 同时将估计结果反馈回系统; 3) 量测噪声方差采用自适应算法求取, 以进一步提高滤波精度。

卡尔曼滤波器除实现速度修正外, 还可以估计水平姿态误差角实现水平姿态修正[7]。此外, 通过将位置误差 δpos 加入系统状态中, 根据速度误差可以大致估计出一步运动期间累积的位置误差: 即零速修正作用, 一步运动开始时刻 t_s 速度误差为 $\delta v^n(t_s) = 0$, 一步运动结束时刻 t_g 速度误差为捷联解算的当前速度 $\delta v^n(t_g) = v^n(t_g)$, 因此一步运动期间的位置误差可以近似为 $\delta pos = v^n(t_g) * (t_g - t_s) / 2$ 。

至此, 设计的卡尔曼滤波器主要实现以下三种功能: 修正速度误差, 修正水平姿态误差, 修正运动期间的累积位置误差。

3. 行人航迹推算

移动设备中的MEMS传感器因受到数据漂移和噪声的影响，会引起基于积分运算方法的传统惯性导航系统出现难以处理的位移和姿态误差。在行人航位推算应用中，传统积分运算导航方法效果不理想，因为与人体运动相关的复杂动力学很难建模，将其运用于运算有不小的难度。在过去十年中，业内主要开发出两种很有前景的室内环境行人导航方法，一种是基于零速更新的INS-EKF-ZUPT (IEZ)惯导方法，另一种是包括步伐检测、步长估算和航向算法的基于人类步行动力学的惯导方法。基于零速更新的(ZUPT)的方法基于一个假设和一个物理现象，即假设惯性传感器是安装在脚上，且每迈一步后都是暂时静止状态。

从通用导航方程式可以推出行人航迹推算过程的数学表达式。在进行两次积分运算后，平台加速度变成了在东北坐标系下的位置，可以写为公式(11)：

$$\begin{cases} E(t) = E(0) + \int_0^t s(t) \sin(\psi(t)) dt \\ N(t) = N(0) + \int_0^t s(t) \cos(\psi(t)) dt \end{cases} \quad (11)$$

在行人步伐间隔期间，假设速度和航向是常量。考虑到折线法，方程式可改写为公式(12)：

$$\begin{cases} E_t = E_{t-1} + \hat{s}_{[t-1,t]} \sin \psi_{t-1} \\ N_t = N_{t-1} + \hat{s}_{[t-1,t]} \cos \psi_{t-1} \end{cases} \quad (12)$$

方程式表示航迹推算(DR)算法，该方法是基于步数计算，而不是加速度和角速度的积分运算。方程式的航迹推算过程有三个要素：1) 在 $t-1$ (E_{t-1} , N_{t-1}) 时最后一次已知的用户绝对位置(用东北坐标系表示)；2) 从 $t-1$ 到 t ($\hat{s}_{[t-1,t]}$) 的步长；3) 从时间 $t-1$ 开始的航向(ϕ)可以算出新位置相对已知位置(E_{t-1} , N_{t-1}) 的坐标(E_t , N_t)。

行人航迹推算精度取决于两个要素：1) 行走距离的计算；2) 用户航向(或方向)。在行人航位推算原理中，行走距离的计算方法是检测估算行人每行走一步的步长，然后累计步长估算值[8]。惯性传感器数据通过校准监视逻辑处理，以保持对加速度计和陀螺仪测量偏差和标度系数的精确估算。磁力计数据监视的另一个目的是确定测量数据有无磁性干扰数据，防止磁干扰影响校准参数。

步伐检测算法利用模式匹配法与人类步态模型特征匹配。加速度模式随着设备携带位置不同而变化。载物位置确定模块用于确定设备常用存放位置，例如，手里拿着摆臂走路，举在头部附近，或者放在裤子口袋、衬衫口袋、腰带包、双肩背包里。

用户航向是行人航迹推算方程式的第二个术语，包括设备航向和用户行走方向。计算设备航向需要使用经过倾斜校正的罗盘测量值。不过因为外部磁扰会影响罗盘的性能，完全依赖罗盘的测量值不可信，这是我们采用一个数据整合滤波器(又称姿态滤波器)整合磁力计、陀螺仪和加速度计数据的主要原因。姿态滤波器可以计算设备在人体坐标系相对大地参考坐标系的方向。因为这个数学表达式比较紧凑，所以设备方向用四元数表示，与Euler角度或

9×9 方向矩阵相比，四元数更具有数字稳定性，姿态滤波器基于扩展卡尔曼滤波器(EKF)概念，以解决外部磁场强度不断变化和用户在常用情况下导致的设备动态运动对航向的影响。因为航向对总体定位精度的影响巨大，所以必须认真考虑传感器随机噪声、偏差、偏差的不稳定性、非线性以及其它的可能降低系统性能的因素。

3.1. 跨步探测及步长估计

行人行走时在每个跨步周期中，脚的水平速度均经历平稳、加速、减速、再次平稳的周期性变化过程。可通过检测加速度信号峰值探测跨步。计算三轴总加速度信号峰值，将其与预定义的阈值进行比较并根据最小时间间隔进行跨步探测。若加速度信号峰值大于预定义的最小值，则探测到跨步。跨步的结束点由过零点确定。由于行人行走存在复杂的动力学机制，行人每次跨步对应的加速度输出信号具有多个峰值。行人正常行走时频率低于3Hz，可利用低通滤波器对加速度信号进行平滑。滤波器的输出为公式(13)：

$$\bar{a}_k = \frac{1}{L} \sum_{i=k-L+1}^k a_i \quad (13)$$

公式(13)中， L 为滑动窗口宽度。跨步探测程序由有限状态机结构实现。

步长随时间变化，而不是一个常数，因此为每个用户设定平均步长是不恰当的。通常情况下，步长随步频变快而变大，可根据与步频间的线性关系来估计。当步频介于1.35与2.45之间时，步长可表示为公式(14)：

$$S = 0.4504f - 0.1656 \quad (14)$$

其中： f 为频率， S 为步长。

3.2. 方位计算

数字罗盘可直接提供方位信息。然而，数字罗盘易受建筑物中的磁场干扰如电梯和楼梯的金属栏杆等。陀螺仪能克服磁场干扰。但低成本的陀螺仪易受漂移影响。而数字罗盘可补偿漂移误差。利用互补滤波器将陀螺仪与数字罗盘及加速度计相结合，提供可靠的行人方位信息。互补滤波器输出的四元数每10ms更新一次。更新结束后将其转化为欧拉角用于计算行人方位及位置。

3.3. 位置计算

从一已知点开始，行人的当前位置可表示为公式(15)：

$$\begin{aligned} E_{k+1} &= E_k + S_k \sin(\varphi_k) \\ N_{k+1} &= N_k + S_k \cos(\varphi_k) \\ H_{k+1} &= H_k + \Delta H_k \end{aligned} \quad (15)$$

其中：下标 k 表示第 k 步， E 表示东坐标， N 表示北坐标， H 表示高度坐标， φ 为相对于磁北方向的方位角， ΔH 为高度差， S 为步长。

气压及高度间满足公式(16)：

$$P = P_0 \left(1 - \frac{H}{44330} \right)^{5.255} \quad (16)$$

公式(16)中: P_0 为标准大气压, 值为1013.25mbar; H 为高度, 单位为米; P 为行人所处位置的气压值, 单位为mbar。根据气压计测得的气压可以算出行人当前所处的高度。

4. GPS和PDR混合定位模式算法研究

在很多从室外到室内的导航场景中, GPS接收机不是直接从信号很好跳变到彻底无信号, 而是有一个性能逐渐退化的过程, 即GPS信号时好时坏, 最后彻底无信号[9]。这种GPS信号质量逐渐退化的情况经常在城市峡谷中出现。尽管在这类情况下, 可以如前两节介绍的方法当作无GPS信号的情况对待, 计算PDR结果作为最终定位信息, 但是考虑到PDR误差累积的特点和GPS在城市峡谷环境中有时可能会有好的定位结果, 研究GPS和PDR在此类环境下的混合定位模式算法可以充分利用各传感器的测量值, 通过数据融合进一步提高定位的质量。

4.1. GPS定位质量的判断原则

评价GPS信号在复杂环境中的定位质量, 结合GPS定位原理和试验经验, 可以通过以下四个指标判断:

1) 每秒定位结果的有效性: 即判断该秒GPS定位结果是否由新接收的信号计算所得, 只选择有效的数据帧评价定位质量。

2) 位置解算使用卫星数: 即计算当前位置所用伪距测量值来源于几颗卫星; 使用卫星数量越多, 代表计算的位置越精确。

3) 卫星水平几何分布因子HDOP (Horizontal Dilution Of Precision): 表征GPS卫星在水平面上的分布情况, HDOP越小, 代表当前精度越高。

4) 定位残差: 其数值的大小直接表明了当前估计位置的精确程度, 残差越大, 表明越不精确。

4.2. 融合滤波器的设计和实现

由于GPS接收机的位置和速度信息分别通过不同的算法计算, 两者之间并不完全相关, 这意味着GPS定位质量好, 不代表其速度和航向信息的精度就高。在GPS定位性能欠佳的阶段, 根据试验经验, 速度和航向由PDR来提供相对比较准确[10], 在滤波器状态向量和测量向量的选择上, 综合考虑算法的效率, 具体设计如下:

状态向量如公式(17)所示:

$$X = [E \ N \ S \ \varphi]^T \quad (17)$$

式(17)中 E 为ENU坐标系中的东向坐标, N 为北向坐标, S 为行走速度, φ 为航向。

观测向量如公式(18)所示:

$$Z = [Z_{GPS} \ Z_{PDR}]^T \quad (18)$$

式(18)中 $Z_{GPS} = [E_{GPS} \ N_{GPS}]$, E_{GPS} 和 N_{GPS} 分别由GPS输出的东向和北向位置坐标; $Z_{PDR} = [S_{PDR} \ \varphi_{PDR}]$, S_{PDR} 为由步长模型估计的行走速度, φ_{PDR} 为数字罗盘读取的经过修正的航向。

状态方程如公式(19)所示:

$$\begin{cases} E_{k+1} = E_k + S_k \cdot \sin\varphi_k + w_E \\ N_{k+1} = N_k + S_k \cdot \cos\varphi_k + w_N \\ S_{k+1} = S_k + w_S \\ \varphi_{k+1} = \varphi_k + w_\varphi \end{cases} \quad (19)$$

式(19)中位置坐标的动态噪声满足 $w_E \sim N(0, \delta_E^2)$, $w_N \sim N(0, \delta_N^2)$, 速度的动态噪声满足 $w_S \sim N(0, \delta_S^2)$, 航向的动态噪声满足 $w_\varphi \sim N(0, \delta_\varphi^2)$ 。

测量方程如公式(20)所示:

$$\begin{cases} E_{GPS} = E_k + w_{EGPS} \\ N_{GPS} = N_k + w_{NGPS} \\ S_{PDR} = S_k + w_{SPDR} \\ \varphi_{PDR} = \varphi_k + w_{\varphi PDR} \end{cases} \quad (20)$$

因为状态方程为非线性方程组, 根据扩展卡尔曼滤波的原理, 其状态转移矩阵如公式(21)所示:

$$\Phi_k \approx \left. \frac{\partial f_k}{\partial X} \right|_{X=X_k} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \sin\varphi & S \cdot \cos\varphi \\ 0 & 1 & \cos\varphi & -S \cdot \sin\varphi \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{X=X_k} \quad (21)$$

观测矩阵如公式(22)所示:

$$H_k = \begin{bmatrix} H_{GPS} \\ H_{PDR} \end{bmatrix} \quad (22)$$

式(22)中 H_{GPS} 是表征GPS观测量与状态变量关系的GPS观测矩阵:

$$H_{GPS} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

H_{PDR} 是表征PDR观测量与状态变量关系的PDR观测矩阵:

$$H_{PDR} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

动态噪声矩阵如公式(25)所示:

$$Q_k = \begin{bmatrix} \delta_E^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \delta_N^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_S^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \delta_\varphi^2 \end{bmatrix} \quad (25)$$

根据文献[6]取 $\delta_S = 0.1m/s$, $\delta_\varphi = 5^\circ$, 而 δ_E 和 δ_N 的数值, 采用动态自适应调整。如一开始PDR的定位结果受误差累计效应较小, 所以其取值可以均为1m甚至为0, 当滤波器连续PDR的次数逐渐增大时, 如连续PDR更新超过200次, 则取为6m; 超过600次, 取为15m; 遇到GPS定位质量好的情况下, 为了当前时刻的状态能得到更多的GPS更新, 甚至采用更大的数值, 如100m。当然, 为了提高滤波算法的适应性, 还可以采用GPS的实时滤波的结果进一步调整其测量噪声, 这里就不再深入[11]。

测量噪声矩阵如公式(26)所示:

$$R_k = \begin{bmatrix} R_k^{GPS} & 0 \\ 0 & R_k^{PDR} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\text{式 (26) 中 } R_k^{GPS} = \begin{bmatrix} (3m)^2 & 0 \\ 0 & (3m)^2 \end{bmatrix}, \quad R_k^{GPS} = \begin{bmatrix} (0.1m/s)^2 & 0 \\ 0 & (5^\circ)^2 \end{bmatrix}.$$

在K时刻, 当从GPS获取质量良好的定位结果时, 则采用全部更新的方法; 如果当前时刻无法从GPS获取准确的定位位置, 则采用部分更新的方法。

5. 结论

MEMS个人导航系统的实现主要利用了零速校正技术, 提前需要准确的静止检测。本文利用行走过程脚部的运动规律设计了基于比力模值的检测算法。而现实生活中人的运动形式多种多样, 除了正常的走动, 还有跑动、跳动、攀登、滑行以及爬行等。若要扩大静止检测算法的适用性, 还需引入其他运动参数, 如角速度、速度等。此外, 由于卡尔曼滤波器的量测更新只在静止时刻进行, 这样就会限制滤波器的估计效果, 主要体现在方位误差角不能得到有效估计。这样, 随着导航时间的延长, 方位误差的影响就会逐渐取代器件误差, 成为MEMS个人导航系统的主要误差源。

参考文献

- [1] 陈尚, 张世军, 穆星科. MEMS陀螺技术国内外发展现状简述[J]. 技术与应用2016 (2):19-23.
- [2] 王勇, 张斌, 冯运辉. 微工程与惯性测量组件微型化发展研究[J]. 导航与控制2011 (5):64-68.
- [3] Kwakkel S, Lachapelle G, Cannon M E. GNSS aided in situ human kinematics during running [C]. Proceedings of GNSS08. The Institute of Navigation, 2008.
- [4] Renaudin V, Yalak O, Tome P, et al. Indoor navigation of emergency agents [J]. European Journal of Navigation, 2007, 5 (3).
- [5] 崔潇, 秦永元, 周琪. 鞋式个人导航系统算法和试验研究[J]. 测控技术2013 (32):138-142.
- [6] 张金亮, 秦永元, 梅春波. 基于MEMS惯性技术的鞋式行人导航系统[J]. 中国惯性技术学报2011 (6):253-256.
- [7] Foxlin E. Pedestrian tracking with shoe-mounted inertial sensor [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2005, 25 (6): 38-46.
- [8] 许睿, 孙永荣, 陈武, 刘建业. 一种基于抗差滤波的行人导航算法研究[J]. 系统工程与电子技术2010(7):1506-1508.
- [9] Retscher G. Test and integration of location sensors for a multisensory personal navigation [J]. The Journal of Navigation, 2007, 60 (1): 107-117.
- [10] C. Huang, Z. Liao, and L. Zhao. Synergism of INS and PDR in self-contained pedestrian tracking with a miniature sensor module [J]. IEEE Sensor J, 2010, 8 :1349-1359.
- [11] Renaudin, V, Yalak, O, and Tome, P. Hybridization of MEMS and Assisted GPS for Pedestrian Navigation [J]. Inside GNSS, 2007, 1, 34-42.