

一种基于抗差滤波的行人导航算法研究

许睿¹, 孙永荣¹, 陈武², 刘建业¹

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 210016;

2. 香港理工大学土地测量与地理资讯系, 香港)

摘要: 行人导航系统(pedestrian navigation system, PNS)通常采用全球定位系统(global positioning system, GPS)和航位推算(dead reckoning, DR)组合导航的方式进行定位,因此其定位精度易受GPS定位误差特别是定位粗差的影响。为了减小这种影响,提高行人导航系统定位精度,采用了一种基于抗差滤波的GPS/DR组合行人导航算法。该算法首先对DR系统误差建模,获得行人导航系统卡尔曼滤波模型,再通过GPS与DR系统观测测量之差,估计当前观测噪声与先验统计特性的符合程度,利用等价权实时调整观测权值,以避免观测粗差对组合导航精度的影响。最后通过对实测数据的分析表明,在GPS定位误差较大或含粗差情况下,该方法较卡尔曼滤波算法能明显抑制定位误差的影响,将定位精度提高5 m左右,能够在不增加硬件的基础上有效提高GPS/DR组合行人导航精度。

关键词: 组合导航; 行人导航; 抗差滤波; 卡尔曼滤波; 全球定位系统; 航位推算

中图分类号: TP 274

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2010.07.036

Method of pedestrian navigation based on robust filter

XU Rui¹, SUN Yong-rong¹, CHEN Wu², LIU Jian-ye¹

(1. Coll. of Automation Engineering, Nanjing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Land Surveying and Geo-Informatics, Hong Kong Polytechnic Univ., Hong Kong, China)

Abstract: Since the positional method of pedestrian navigation system (PNS) is usually assisted by global positioning system (GPS) and dead reckoning (DR) system integrated navigation algorithm, the PNS positional accuracy tend to be diminished by the GPS positional errors, especially positional outliers. To reduce the tendency and improve the accuracy of the pedestrian navigation system, a method of GPS and DR integrated navigation algorithm based on robust filter is presented. The Kalman filter model of PNS is obtained through modeling DR systematic errors and DR sensor errors first. Then, the positional difference between GPS and DR is used to estimate the extent to which the latest observation error meets their prior statistics. Based on the extent, the observed weight is renewed by an equivalent weight to restrict the negative effect of GPS positional error on integrated navigation. Finally, the result of real data from the experimental prototype shows that, in the case of GPS performing badly, the robust method is much more effective than Kalman filter in reducing the influence of the GPS positional error and could improve the positional accuracy by about 5 m. Thus, the positional accuracy of PNS based on GPS/DR integrated navigation is improved without additional hardwares.

Keywords: integrated navigation; pedestrian navigation; robust filter; Kalman filter; global positioning system; dead reckoning

0 引言

行人导航系统(pedestrian navigation system, PNS)是一种利用手持式或可佩戴式传感器,为行人提供位置、速度等导航信息的设备。可应用于紧急救援、观光旅游等服务

行业以及军事领域,医学研究领域等。导航定位是PNS的核心,实现其他功能的基础^[1-2]。从行人导航的范围划分,行人导航分为室外导航与室内导航两种。目前主要的室外行人导航定位技术有GPS定位技术^[1-2]、航位推算(dead reckoning, DR)技术^[1-3]以及地图匹配(map matching,

收稿日期:2009-05-13; 修回日期:2009-09-11。

基金项目:香港理工大学项目基金(G-U251, G-U203)资助课题

作者简介:许睿(1983-),女,博士研究生,主要研究方向为卫星定位与组合导航。E-mail:rea_xr@nuaa.edu.cn

MM)技术^[3-5]。但由于行人活动范围广泛,较少受道路影响,MM技术目前主要用于显示行人当前位置,并不对定位误差进行修正,GPS在城市环境中,易受遮挡和干扰而导致定位误差过大甚至无法定位;而DR系统,从算法原理角度来看,定位误差随时间而发散,不适于长时间定位^[5-6]。因此,单独的系统无法满足行人随时随地对导航的需求,采用GPS/DR组合导航方式,可以结合两者之长,改善导航性能的普遍方法^[6]。

卡尔曼滤波是GPS/DR组合导航系统普遍采用的信息融合方式。利用卡尔曼滤波器估计行走的位置误差、步长误差以及航向误差,以校正导航系统输出。由于卡尔曼滤波是一种基于最小方差估计的最优滤波,它要求已知系统精确的数学模型和噪声统计特性,但在实际导航应用中,GPS观测噪声受环境影响,会出现偏离噪声统计特性的情况,使得基于经验的统计特性不能有效表征当前噪声特性,从而导致组合导航滤波精度下降^[7-9]。

本文通过简化行人导航系统数学模型,对基于抗差滤波的行人导航算法进行了分析和研究。通过对实测数据的事后处理可以看出,抗差滤波在滤波精度上较普通卡尔曼滤波更优,不仅有效抑制了DR误差发散问题,而且改善了因GPS误差过大而导致组合导航精度下降问题,为PNS的实现与应用提供了可靠的导航信息。

1 行人导航系统数学模型研究

人在行走过程中步长总在不断地变化,但由于人在走路时,总是试图维持一种比较平稳的步速,这就使得当前时刻的步长总是受前一时步长的影响,而这种影响会随时间的变化而缓慢变化。因此,本文中假设步长误差为一阶马尔可夫过程^[1],即

$$P_{\epsilon(k)} = e^{-T/T_p} P_{\epsilon(k-1)} + w_{p(k)} \quad (1)$$

式中, T_p 为相关时间常数; $w_{p(k)}$ 为白噪声。

航向角误差是影响DR精度的另一因素。参与DR计算的航向角 θ 可表示为由航向角真值 θ_{true} 、航向角偏差角 B 以及测量白噪声 w_θ 组成^[1],即

$$\theta_k = \theta_{true} + B_k + w_{\theta(k)} \quad (2)$$

式中, $B_{(k)} = B_{true} - Be_{(k)}$, B_{true} 为航向角偏差真值; Be 为偏差角误差,假设其符合一阶马尔可夫过程,即

$$B_{\epsilon(k)} = e^{-T/T_b} B_{\epsilon(k-1)} + w_{b(k)} \quad (3)$$

式中, T_b 表示相关时间常数; $w_{b(k)}$ 为白噪声。

GPS/DR组合行人导航系统模型与观测模型如下

$$\begin{cases} \mathbf{X}_k = \Phi_{k,k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{W}_k \\ \mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \end{cases} \quad (4)$$

式中, \mathbf{X}_k 由DR系统误差量组成,包括东向、北向位置误差、步长误差和航向角偏差误差,即 $\mathbf{X} = [\delta E \quad \delta N \quad P_r \quad B_r]^T$ 。系统误差 \mathbf{W}_k 为白噪声; $\mathbf{W}_k \sim N(0, \mathbf{Q})$, \mathbf{Q} 为系统噪声方差阵。量测噪声 \mathbf{V}_k 也为白噪声, $\mathbf{V}_k \sim N(0, \mathbf{R})$, \mathbf{R} 是量测噪声协方差阵。则转移矩阵可表示为

$$\Phi_{k+1,k} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & n \sin \theta & n P_{(k)} \cos \theta \\ 0 & 1 & n \cos \theta & n P_{(k)} \sin \theta \\ 0 & 0 & e^{-T/T_p} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-T/T_b} \end{bmatrix} \quad (5)$$

观测量 \mathbf{Z}_{k+1} 由DR系统与GPS系统测量的东向、北向位置差与航向角之差构成,则有观测系数矩阵

$$\mathbf{H}_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

2 基于观测量的抗差滤波算法

为利用卡尔曼滤波算法,往往假设观测噪声为白噪声,即

$$E(\mathbf{V}_k) = 0, E(\mathbf{V}_k \mathbf{V}_i^T) = \mathbf{R}_k \delta_{ki} \quad (7)$$

式中, δ_{ki} 为Kronecker函数。并假设在整个导航过程中,观测误差统计特性不变,即 \mathbf{R} 阵保持不变。但在实际导航中,受多路径效应、城市环境等的影响,GPS测量值中总包含部分偏离原始统计特性的误差, \mathbf{R} 阵随环境变化而变化,基于经验的统计特性不能很好的表征当前误差特性,直接影响卡尔曼滤波效果,导致导航精度下降。

观测量 \mathbf{Z}_{k+1} 实际为GPS与DR系统误差之差,假设GPS量测误差为白噪声,且其值远远大于DR误差,即

$$E[\mathbf{V}_{GPS}] = 0, E[\mathbf{V}_{GPS} \mathbf{V}_{GPS}^T] \gg E[\mathbf{V}_{DR} \mathbf{V}_{DR}^T]$$

式中, \mathbf{V}_{GPS} , $\mathbf{V}_{DR(k)}$ 分别表示GPS、DR量测误差。则有

$$E[\mathbf{Z}_k] = E[\mathbf{V}_{DR(k)}] + E[\mathbf{V}_{GPS(k)}] \approx E[\mathbf{V}_{DR(k)}] = \mathbf{u}_k \quad (8)$$

$$E[(\mathbf{Z}_k - \mathbf{u}_k)(\mathbf{Z}_j - \mathbf{u}_j)^T] \approx E[\mathbf{V}_{GPS(k)} \mathbf{V}_{GPS(j)}^T] \quad (9)$$

采用测量与地球场理研究所(Institute of Geodesy and Geophysics III, IGG III)方案计算等价权函数以调节观测量的权值^[7-9]。等价权函数的具体形式如下

$$\bar{a}_i = \begin{cases} a_i, & |\tilde{z}_i| \leq k_0 \\ a_i \frac{k_0}{|\tilde{z}_i|} \left(\frac{k_1 - |\tilde{z}_i|}{k_1 - k_0} \right)^2, & k_0 < |\tilde{z}_i| \leq k_1 \\ 0, & |\tilde{z}_i| \geq k_1 \end{cases} \quad (10)$$

式中, $k_0 = 1.0 \sim 1.5$, $k_1 = 3.0 \sim 8.0$, $\tilde{z}_i = z_i^{(k)} / \sigma_{0i}^{(k)}$ 。 $z_i^{(k)}$ ∈ \mathbf{Z}_k , $\sigma_{0i}^{(k)}$ 为 k 时刻的方差因子,其估值为

$$\bar{\sigma}_{0i}^{(k)} = \sqrt{\frac{\sum_{j=k-m+1}^k (z_i^{(j)} - u_i^{(j)})^2}{m}} \quad (11)$$

等价权矩阵 $\bar{\mathbf{A}}_k = \text{diag}[\bar{a}_i] = \mathbf{R}_k^{-1}$ 。由等价权函数可以看到,当 $|\tilde{z}_i| \leq k_0$ 时,即实际的观测噪声特性与统计特性相符,此时的抗差滤波与经典卡尔曼滤波一致;而当 $k_0 < |\tilde{z}_i| \leq k_1$ 时,实际观测噪声略偏离统计特性,通过引入等价权,使得 \mathbf{R}_k 增大,从而减小观测量权值;而当 $|\tilde{z}_i| \geq k_1$,实际观测噪声基本完全偏离统计特性,等价权为0,对应 $\mathbf{R}_{k(k)} \rightarrow \infty$ 。

为避免求解 \mathbf{R}_k 时出现对0求逆的情况,将卡尔曼滤波公式等价地表示为

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_k = \Phi_{k,k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1} \\ \hat{\mathbf{P}}_k = \Phi_{k,k-1} \hat{\mathbf{P}}_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \mathbf{Q}_k \\ \hat{\mathbf{X}}_k = (\mathbf{H}_k^T \bar{\mathbf{A}}_k \mathbf{H}_k + \bar{\mathbf{P}}_k^{-1})^{-1} (\mathbf{H}_k^T \bar{\mathbf{A}}_k \mathbf{Z}_k + \bar{\mathbf{P}}_k^{-1} \hat{\mathbf{X}}_k) \\ \hat{\mathbf{P}}_k = (\mathbf{H}_k^T \bar{\mathbf{A}}_k \mathbf{H}_k + \bar{\mathbf{P}}_k^{-1})^{-1} \end{cases} \quad (12)$$

式中, $\bar{\mathbf{P}}_k$ 为预测状态误差协方差阵; $\hat{\mathbf{P}}_k$ 为状态误差协方差阵。

3 实验数据分析

为了对本文所研究的算法进行导航性能检验,2007年8月25日上午在香港尖沙嘴街区进行了实际的行走试验。根据实验中采集的实际行走数据,采取事后处理的方式进行。

假设组合导航滤波初值: $\mathbf{P}_{0/0} = \text{diag}([1 \ 1 \ 1 \ 1])$, $\mathbf{X}_{0/0} = \mathbf{0}$ 。为了能够较准确地测试组合导航算法对步长的修正情况,试验采用均步频、均步长(0.5 m~0.6 m)的行走方式。采集的实际数据分别采用经典卡尔曼滤波(方案1)与本文所述基于观测向量的抗差滤波(方案2)进行组合导航解算,其定位结果如图1和图2所示。其中,图中所示坐标为香港1980方格网坐标。

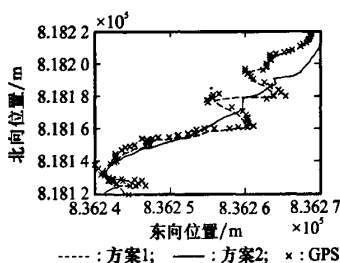


图1 GPS误差较小时导航定位曲线比较

图1所示为GPS误差较小时,两种滤波方案的组合导航定位曲线与GPS定位曲线。其中,实线所示为采用基于观测向量的抗差滤波的组合导航定位曲线,虚线所示为采用经典卡尔曼滤波的组合导航定位曲线。实际行走轨迹近似直线。从图中可以看到,在GPS定位误差较小(3 m~5 m)的情况下,经典卡尔曼滤波定位精度较GPS定位精度略有提高,整体定位精度相当。而基于观测向量的抗差滤波有效地提高了组合导航的定位精度,组合导航定位结果基本消除了GPS定位点突变的影响,定位曲线更为平滑,与实际行走情况更为相符。

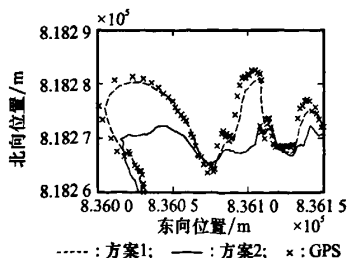


图2 GPS误差较大情况下导航定位曲线比较

图2所示为GPS误差较大时,两种滤波方案的定位曲线与GPS定位曲线,实际行走轨迹近似为直线。从图中可以看到,采用经典卡尔曼滤波的组合导航算法其定位精度受GPS定位精度影响很大,当GPS定位误差过大(>10 m)时,组合导航精度受GPS误差影响,精度大大降低,从图中可以看到GPS/DR组合导航定位曲线几乎与GPS定位曲线重合。而采用本文所述算法后,组合导航精度受GPS误差的影响明显降低,GPS大误差对组合导航精度的影响较经典卡尔曼滤波有明显改善,组合导航定位误差在5 m左右。

从实验结果可见,本文所述滤波方法较经典卡尔曼滤波算法不仅能够抑制DR误差随时间发散问题,而且能够有效抑制观测误差对组合导航精度的影响,提高导航精度。

4 结束语

本文建立了行人导航系统GPS/DR组合导航算法的数学模型,讨论了基于观测量的抗差滤波算法,通过对实测行走数据事后处理验证了该简化的抗差滤波算法不仅能够克服DR系统与GPS系统各自的缺陷,而且算法简单,并能有效地提高组合导航精度,特别在GPS误差过大时能够有效抑制观测噪声对组合导航精度的影响。

参考文献:

- [1] Jirawimut R, Ptasinaki P, Garaj V, et al. A method for dead reckoning parameter correction in pedestrian navigation system [J]. *IEEE Trans. on Instrument and Measurement*, 2003,52(1):209-215.
- [2] Cho Seong Yun. MEMS based pedestrian navigation system [J]. *The Journal of Navigation*, 2006,59:135-153.
- [3] Ladetto Q, Gabaglio V, Merminod B. Combining gyroscopes magnetic compass and GPS for pedestrian navigation [C] // *Proc. of International Symposium on Kinematics Systems in Geodesy, Geometrics and Navigation*, 2001:205-212.
- [4] Jirawimut R, Shah M A, Ptasinaki P, et al. Integrated DGPS and dead reckoning for a pedestrian navigation system in signal blocked environments [C] // *Proc. of ION GPS*, 2000: 1741-1747.
- [5] Retscher G. Test and integration of location sensors for a multi-sensor personal navigation [J]. *The Journal of Navigation*, 2007,60(1):107-117.
- [6] Ladetto Q, Gabaglio A, Merminod B. Kalman filter approach for augmented GPS pedestrian navigation [C] // *Proc. of Global Navigation Satellite Systems Conference*, 2001.
- [7] 富立, 范耀祖. 车辆定位导航系统 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004:135-160.
- [8] 张双成, 杨元喜, 张勤. 一种基于抗差自校 Kalman 滤波的 GPS 导航算法 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2005,30(10):882-884.
- [9] 李浩军, 唐诗华, 黄杰. 抗差估计中几种选权迭代法常数选取的探讨 [J]. *测绘科学*, 2006,31(6):70-76.
- [10] 徐天河, 杨元喜. 改进的 Sage 自适应滤波算法 [J]. *测绘科学*, 2000,25(3):22-25.