

基于多传感器的行人航向推算算法研究

何祝青, 严 华

(四川大学 电子信息学院, 成都 610065)

摘要: 针对室内行人航位推算 (PDR) 系统中单一地以陀螺仪作为航向估计会出现误差累积和航向角偏移的问题, 提出一种由方向传感器和陀螺仪组合的航向角校正算法; 首先, 利用卡尔曼滤波 (Kalman Filter KF) 分别消除方向传感器的信号干扰和陀螺仪的动态漂移误差; 然后, 通过陀螺仪和方向传感器测量的航向角差值是否超过阈值来判断是否存在硬磁场干扰; 最后, 根据硬磁场干扰情况对航向角估计值进行相应的角度补偿得到新的航向角估计值; 实验表明, 该算法的航向推算性能优于启发式漂移消除算法和增强式启发式漂移消除算法。

关键词: 室内行人航位推算; 航向推算; 方向传感器; 陀螺仪; 硬磁场干扰; 卡尔曼滤波

Multiple Sensors Based Algorithm for Pedestrian Heading Estimation

He Zhuqing, Yan Hua

(College of Electronics Information and Engineering, Sichuan University, Chengdu 61005, China)

Abstract: Because the heading estimation in the indoor pedestrian dead reckoning (PDR) system has the problems of cumulative and course angle drifting when gyroscope is used, an course angle calibrating algorithm combined direction sensor with gyroscope is proposed. Firstly, Kalman filter is adopted to eliminate signal interference of direction sensor and dynamic drifting error of gyroscope. Then, the difference value of course angle between direction sensor and gyroscope is calculated to judge whether there existing hard magnetic interference. Finally, the new course angle is got by angle compensation according to the hard magnetic interference degree. The experimental results show that the proposed algorithm has got better performance than Heuristic Drift Elimination algorithm and Advanced Heuristic Drift Elimination algorithm in term of pedestrian dead reckoning.

Keywords: indoor pedestrian dead reckoning; heading estimation; orientation sensor; gyro; hard magnetic interference; Kalman filter

0 引言

在现代生活中, 人们对室内定位的需求日益增加, 例如在城市高楼群、医院病房、购物商场、火灾现场等都需要基于个人位置的服务。虽然 GPS 在室外环境能提供出色的定位服务, 但是 GPS 信号不能穿过墙体, 因而不适用于室内环境。在各种室内定位技术中, 基于传感器的定位技术是近年来研究的热门领域。其突出的优势是抗干扰能力强, 能够提供实时、连续、精准的位置信息。1996 年 Levi 和 Judd 首次提出行人航位推算 (pedestrian dead reckoning PDR) 根据行人步态特征, 利用加速度计信息估计步数和步长, 再利用陀螺仪采集数据计算航向, 结合 3 个信息来推算行人的位置信息。2010 年美国密歇根大学 Johann 和 Lauro 等人提出启发式漂移消除 (Heuristic Drift Elimination HDE) 算法, 利用行人走直线时航向角的变化量对陀螺仪输出进行校正。2012 年中国海洋大学洪峰等人在针对在手智能手机转向时, 陀螺仪会出现转向角不足的问题, 提出了 PSP (Pedestrian tracking system based on one smartphone residing in trousers' front Pocket) 算法, 解决智能手机在转向的时候出现陀螺仪转向角不足的问题^[1-3]。文献 [4] 同样针对陀螺仪转向角不足问题提出了基

于互补滤波的增强式启发式漂移消除算法 (Advanced Heuristic Drift Elimination AHDE) 算法, 解决了智能手机在转向时 HDE 停止校正航向角出现漂移的情况, 能很好的实现转向时航向角的校正。

以上的研究都是单一地利用陀螺仪来进行航向估计, 均基于 HDE 算法来消除陀螺仪的累积误差, 即利用反馈系统来消除陀螺仪的静态漂移和动态漂移。由于对采集的陀螺仪的数据没有进行预处理, 导致了估计的航向在实际航向左右震荡, 也就造成了航向推算精度下降。所以单一地利用陀螺仪进行航向估计会造成航向推算精度不足的问题。

针对单一采用陀螺仪存在航向推算精度不足的问题, 本文提出一种基于多传感器的行人航向推算算法。该算法组合了方向传感器和陀螺仪的优势特性, 能够准确地进行航向角推算, 大大提高了航向推算的精度。

1 相关研究

1.1 PDR 定位原理

PDR 算法是利用行人行走一步时加速度值是周期性的变化这个特点来进行步数检测, 然后采用步长模型估计步长, 再结合从角度传感器获得的方向信息推算出行人的位置信息, 位置计算如公式 (1)。式中 x_n, y_n 为当前时刻的位置信息, x_{n-1}, y_{n-1} 为前一时刻的位置信息, l 为估计的步长, θ 为估计的航向角。

$$\begin{cases} x_n = x_{n-1} + l * \cos\theta \\ y_n = y_{n-1} + l * \sin\theta \end{cases} \quad (1)$$

该算法包含 4 个核心步骤: 步数检测、步长估计、航向推

收稿日期: 2017-09-08; 修回日期: 2017-10-18。

作者简介: 何祝青 (1991-), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事室内定位、智能控制方向的研究。

严 华 (1971-), 男, 四川渠县人, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事嵌入式系统、模式识别与智能系统方向的研究。

算和位置计算。

1.2 步数检测

本文使用智能手机的加速度计测量的 3 个方向的合加速度 a 作为检测信号。

$$a = \sqrt{a_x + a_y + a_z} \quad (2)$$

采用一阶线性高通滤波方程^[5]滤除重力加速度的影响。为了平滑加速度波形,方便进行步数检测,参考文献 [6-7] 再将高通滤波后的加速度信号进行 6 阶低通巴特沃斯滤波。

常用的步数检测方法有:峰值检测、过零检测法和平区检测法。为了提高步数检测的准确性,采用文献 [8] 中改进的峰值检测算法。

1.3 步长估计

现有的步长估算算法模型主要采用线性步长模型和非线性步长模型。由于线性步长模型中统计特征量与步长的之间的线性关系还没有得到充分的理论证明,因此可靠性不高。非线性步长模型是利用行人行走过程中的加速度值采用统计分析的方法来建立数学模型。非线性的估计方法中有一些通用的模型^[9-10],这些通用的模型并不适用于同一个人使用不同步长行走的情况,而文献 [11] 提出了改进的步长估计算法来适应不同步长行走的情况。为此,采用文献 [11] 中提出的步长估计模型 (3) 来进行步长估计。

$$l_{step} = k * ((a_{max} - a_{min}) * 3.5 + \sqrt{a_{max} - a_{min}}) \quad (3)$$

式中, l_{step} 为估计的步长; a_{max} 、 a_{min} 分别为一个步态周期中最大加速度和最小加速度; k 为比例因子,利用训练数据经最小二乘法拟合得到。

1.4 方向角的卡尔曼滤波

在行人运动中,方向传感器的测量值会有噪声干扰导致测量值跟实际值有偏差,所以需要消除这种噪声的干扰。由于 KF 器能够利用运动目标的动态信息,去掉噪声的影响,得到一个关于目标位置的准确的估计值,而方向传感器的噪声符合高斯正态分布且与状态量相互独立。因此可以引入 KF 消除方向传感器的噪声干扰。

KF 的数学模型为:

$$\begin{cases} x_n = \Phi_{n|n-1} * x_{n-1} + B_n u_n + \omega_n \\ y_n = H_n x_n + v_n \end{cases} \quad (4)$$

式中, x_n 为 n 时刻系统的状态量; y_n 为 n 时刻系统的观测值; u_n 为系统的控制量; ω_n 为输入噪声; v_n 为观测噪声; $\Phi_{n|n-1}$ 为状态转移矩阵; B_n 为系统的输入系数; H_n 为观测矩阵。

KF 分为预测和校正两个过程。预测过程是利用上一时刻最优状态量来估计出当前时刻状态量预测值,同时更新状态量预测值和状态量测量值的置信比重。而校正过程则是将状态量预测值和状态量测量值依据置信比重进行融合,估计出最优状态量,即得到最终的结果。

1.5 方向角的硬磁场校正

针对单一采用方向传感器会存在硬磁场干扰导致方向传感器测量值跟实际值有很大偏差的问题,同时陀螺仪不受硬磁场的影响,可以引入陀螺仪来校正这种硬磁场干扰。与此同时,陀螺仪也会存在误差累积问题。

2 基于多传感器的航向推算系统

针对方向传感器会受到硬磁场干扰的问题,引入陀螺仪。同时通过方向传感器来更新陀螺仪的绝对角度消除误差累积。

设计了一个基于多传感器的航向推算系统 (图 1)。该系统首先利用方向传感器和陀螺仪分别采集方向角信号和角速度信号,然后将采集到的信号进行滤波处理,并且利用滤波后的信号来进行硬磁场检测和转向判断。最后将滤波后的方向传感器的角度值作为新的航向角,同时根据硬磁场检测的结果和转向判断的结果来对航向角进行补偿。

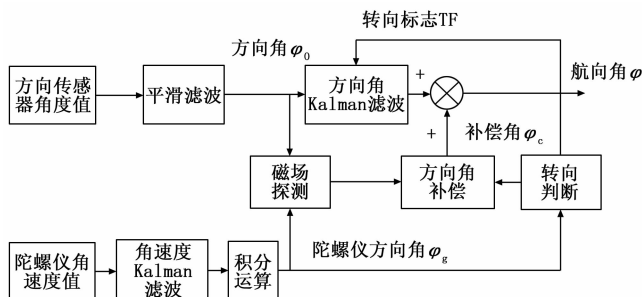


图 1 基于多传感器的航向推算系统结构

2.1 平滑滤波

在行人行走的过程中,从抬脚到落脚的过程称为一个步态周期。在一个步态周期中,由于传感器的不稳定性 and 人步行时产生的随机噪声,可能会造成方向传感器的值出现很大瞬时干扰。此时需要加入一个平滑滤波,对这种瞬时干扰进行初步的滤波处理,即去除一个步态周期中方向序列中的最大值和最小值。这样可以提高后续的对方向传感器的值的 KF 的精度。

2.2 角速度卡尔曼滤波

在行走过程中,陀螺仪存在动态漂移,会影响测量的准确度。建立陀螺仪角速度 ω 的 Kalman 数学模型,进行滤波处理,消弱陀螺仪的动态漂移。 ω 的数学模型为:

$$\begin{cases} \omega_n = \Phi_{n|n-1} * \omega_{n-1} + \omega_n \\ \omega_n^z = B_n \omega_n + v_n \end{cases} \quad (10)$$

式中, ω_n 为 n 时刻 ω 的状态量; ω_n^z 为 n 时刻 ω 的测量值; ω_n 为输入噪声; v_n 为观测噪声; $\Phi_{n|n-1}$ 为状态转移矩阵; B_n 为观测矩阵。其中, ω_n 、 v_n 的协方差分别为 Q_1 、 R_1 。

2.3 硬磁场探测

硬磁场探测部分主要是用来检测当前步态周期中是否有硬磁场干扰。在当前步态周期中,通过判断陀螺仪测量的角度和方向传感器测量的角度差是否超过阈值,来判断是否有硬磁场干扰。判断的公式为:

$$DF = \begin{cases} 0, & |\varphi_n - \varphi_g| < \varphi_d \\ 1, & |\varphi_n - \varphi_g| \geq \varphi_d \end{cases} \quad (11)$$

式中, DF 为判断硬磁场干扰的标志位, 1 为有硬磁场干扰, 0 为无硬磁场干扰; φ_n 为方向传感器的角度; φ_g 为陀螺仪的角度值; φ_d 为判断是否有硬磁场干扰的阈值。

2.4 转向判断

使用 KF 处理后陀螺仪数据来进行转向判断。判断的公式为:

$$TF = \begin{cases} 0, & |\varphi_n - \varphi_{n-1}| + |\varphi_{n-1} - \varphi_{n-2}| < \varphi_t \\ 1, & |\varphi_n - \varphi_{n-1}| + |\varphi_{n-1} - \varphi_{n-2}| \geq \varphi_t \end{cases} \quad (12)$$

式中, TF 为判断转向的标志位, 1 为转向, 0 为没有转向; φ_n 为当前时刻陀螺仪的角度; φ_{n-1} 为前一个时刻陀螺仪的角度值; φ_{n-2} 为前两个时刻陀螺仪的角度值; φ_t 为判断是否转向的阈值。

2.5 方向角卡尔曼滤波

通过转向环节的输出可以判断行人是在直行阶段还是转向阶段。在直行时, 对方向传感器的测量值进行 KF 能够很好的消除噪声干扰。建立方向传感器角度 θ 的 Kalman 数学模型为:

$$\begin{cases} \theta_n = \Phi_{n|n-1} * \theta_{n-1} + \omega_n \\ \theta_n^* = C_n \theta_n + v_n \end{cases} \quad (13)$$

式中, θ_n 为 n 时刻 θ 的状态量; θ_n^* 为 n 时刻 θ 的测量值; ω_n 为输入噪声; v_n 为观测噪声; $\Phi_{n|n-1}$ 为状态转移矩阵; C_n 为观测矩阵。其中, ω_n 、 v_n 的协方差分别为 Q_2 、 R_2 。

2.6 方向角补偿

通过硬磁场检测环节和转向判断环节传递过来的值, 对角度进行相应的补偿。在直行阶段, 如果没有硬磁场干扰, 则对方向传感器的测量值进行 KF, 此时补偿角度值 φ_c 为 0; 如果有硬磁场干扰, 则 φ_c 为前一时刻的角度值 φ 来和当前方向传感器的测量值 φ_o 的差值。当在转向阶段时, 如果没有硬磁场干扰, 则使用方向传感器的值做为角度值。此时 φ_c 为 0; 当有硬磁场干扰的时候使用陀螺仪的角度值, 作为方向角。补偿角计算公式为:

$$\varphi_c = \begin{cases} 0TF = 0, DF = 0 \\ \varphi - \varphi_o TF = 0, DF = 1 \\ 0TF = 1, DF = 0 \\ \varphi_k - \varphi_o TF = 1, DF = 1 \end{cases} \quad (14)$$

最终, 行人的航向角为 $\varphi = \varphi_o + \varphi_c$, 然后在更新陀螺仪的参考角度为 φ , 更新方向传感器的前一时刻角度为 φ_o 。

3 实验与结果分析

为了验证算法的有效性, 选择 Samsung Galaxy S III 智能手机作为测试设备, 该手机内嵌了加速度计、陀螺仪和方向传感器。实验中, 设置加速度计、陀螺仪和方向传感器的采样频率为 100 Hz。航向推算系统中的各个环节的参数设置如表 1 所示。参考文献 [12] 设定转向阈值 φ_r 的值为 20° 。通过多次实验结果比较, 当磁场判断阈值 φ_d 小于 15° 时会出现硬磁场误判的情况, 即实际没有硬磁场干扰时, 系统会判定存在硬磁场干扰; 当 φ_d 大于 15° 的时候, 系统会对硬磁场干扰判断有延迟, 即实际存在硬磁场干扰但是系统没有检测到。基于以上两种情况都会导致硬磁场探测环节误差增大, 因此选择 φ_d 为 15° 。

表 1 参数设置

参数名	参数值	参数名	参数值	参数名	参数值
$\Phi_{n n-1}$	1	φ_d	15°	Q1	10^{-6}
B_n	1	φ_r	20°	Q2	10^{-5}
C_n	1	R1	10^{-1}	R2	10^{-2}

3.1 硬磁场干扰实验

为了验证算法中硬磁场检测和方向角补偿环节的有效性, 实验选用一段直行的路线作为测试环境, 路线长度为 18 m, 中间设置了两次硬磁场干扰。原始的方向角和校正后的方向角如图 2 所示, 具体的角度值变化如表 2 所示。

在图 2 中行人沿着固定的方向角行走, 实际的方向角变化轨迹应该是一条平行于水平方向的直线, 从图 2 可知校正后的方向角轨迹更接近于直线。

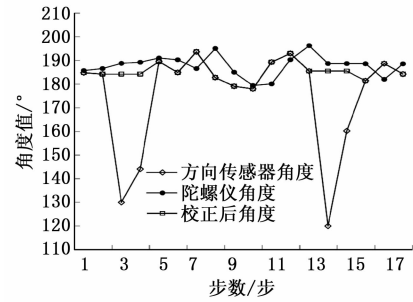


图 2 硬磁场干扰下角度变化情况

表 2 硬磁场干扰下角度变化值

行走步数 / 步	方向传感器角度 / °	陀螺仪角度 / °	校正后角度 / °
1	184.8	185.7	184.8
2	184.2	186.6	184.2
3	130.0	188.8	184.2
4	144.1	189.2	184.2
5	189.5	191.0	189.5
6	184.9	190.3	184.9
7	193.6	186.6	193.6
8	182.8	195.1	182.8
9	179.1	185.0	179.1
10	178.0	179.4	178.0
11	189.3	180.1	189.3
12	193.0	190.3	193.0
13	185.5	196.3	185.5
14	120.0	188.7	185.5
15	160.2	188.7	185.5
16	181.4	188.6	181.4
17	188.7	182.0	188.7
18	184.2	188.6	184.2

由表 2 可知, 在没有受到硬磁场干扰的时候利用方向传感器的值作为系统的航向角能够很好的反应实际航向角, 同时可以校正陀螺仪的绝对角度来消除陀螺仪的累积误差。而在第 3 步、第 4 步、第 14 步和第 15 步时方向传感器受到硬磁场干扰, 其测量值与实际值有很大的误差, 此时可以根据当前的陀螺仪的角度值来校正方向传感器的角度值。校正后的角度值和实际的方向值基本没有偏差。

3.2 航位推算实验

为了验证本文提出的算法的总体性能, 在室内环境中搭建了一条 45 m 的封闭路线, 分别采用 HDE 算法、AHDE 算法和本文提出的算法进行航向推算, 再结合步数检测值和步长估计值进行整体的航位推算。三种算法的轨迹图如图 3 所示, 具体数据如表 3 中所示。

由图 3 可知, 在刚开始的直行阶段, 由于 HDE 算法和 AHDE 算法是通过反馈的方式来消除陀螺仪的动态偏移, 它们的轨迹在实际航向的左右震荡, 并且刚开始就偏离了实际方向, 而本文提出的算法的轨迹则和实际轨迹基本重叠。而在多次转向后, 由于陀螺仪会出现转向角不足的问题, HDE 算法的轨迹会偏离实际的轨迹, 而 AHDE 算法能部分修正转向角不足的问题, 本算法在转向时同样能表现出更好的性能。

(下转第 192 页)