

基于IMU量测信息的手机运动模态判别方法

任仁凯, 彭 晨, 钱伟行, 郑 昊

(南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 手机导航以其便捷和廉价得到广泛应用, 而其运动模态对导航精度有较大影响. 基于手机内置 IMU 的量测信息, 研究了一种运动模态判别方法. 该方法根据人体步态相位检测法和 IMU 中三轴加速度计和三轴陀螺仪的六维量测信息, 选择合适参数, 通过对试验采样数据的处理设定阈值和辨识窗口, 确定实际应用算法流程. 试验结果表明, 该方法实时判别手机运动模态的延时小, 且在相应运动模态内的判别准确率达到 100%, 为后续导航算法的使用时机与过程提供了有效判断依据.

[关键词] IMU, 量测信息, 手机导航, 运动模态判别

[中图分类号] U666.1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2016)03-0069-07

Distinguishing Method for Motion Mode of Mobile Phone Based on Measurement Information of IMU

Ren Renkai, Peng Chen, Qian Weixing, Zheng Hao

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: Mobile navigation is widely used for its convenience and low cost, but its motion mode has a great influence on navigation accuracy. A distinguishing method for motion mode is studied basing on measurement information of mobile phone's built-in IMU. The method selects appropriate parameters according to human gait phase detection and the six dimensional measurement information from three-axis accelerometer and three-axis gyroscope in IMU. It also sets threshold and identification window on the basis of tested sampling data and determines the algorithm flowchart for practical application. Experimental results show that, the method has a smaller time-delay and its accuracy rate reaches 100%, which provides a basis for the use of the following navigation algorithm.

Key words: IMU, measurement information, mobile navigation, motion mode distinguishing

随着汽车的广泛普及, 车载导航系统已成为智能交通系统重要组成部分之一. 其中, 全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)/航位推算(dead reckoning, DR)组合定位系统^[1-2]能够保证在卫星信号丢失时车辆位置信息的输出, 而 EKF、UKF、SRUKF、CEKF 等改进卡尔曼滤波法^[3-5], 以及基于车辆运动辅助的零速修正(zero velocity update, ZUPT)、速度约束、同时定位与制图等方法^[6-8], 则有效提高了车载导航的精度. 近年来, 智能手机用户迅速发展, 手机导航系统被广泛应用. 手机导航利用 GPS 和移动网络进行快速准确定位, 通过内置的惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)量测信息作为有效补偿, 相较车载导航更为便捷和廉价^[9-10].

手机运动模态对手机导航的精度有较大影响. 因此, 手机在车载固定和手持非固定两种运动模态时分别采用不同的导航算法, 可以修正实际应用中的误差. 本文基于 IMU 中三轴加速度计和三轴陀螺仪的量测信息, 根据人体步态相位检测法, 通过选择合适参数, 进行阈值和辨识窗口大小的设定, 以及实际应用算法流程的确定, 能够实时判别手机的运动模态, 为后续导航算法的使用时机与过程提供判断依据. 试验结果证实了方法的有效性.

收稿日期: 2016-05-26.

基金项目: 国家自然科学基金(61273114, 61304227)、江苏省自然科学基金(BK20131403, BK20141453).

通讯联系人: 彭晨, 博士, 教授, 研究方向: 网络控制系统, 时滞系统. E-mail: pchme@163.com

1 步态相位检测

人体行走或跑步的过程是步行周期的循环,典型的正常步行周期如图 1^[11]所示.由图 1 可以看出,人体行走的步态周期一般由站定、足尖离地、腿部摆动、足跟落地等几个基本动作构成,一般上述动作以一定时序逐次进行,因此被称为人体行走中的基本步态相位,其他复杂的足部运动通常也包含了上述基本相位^[12].

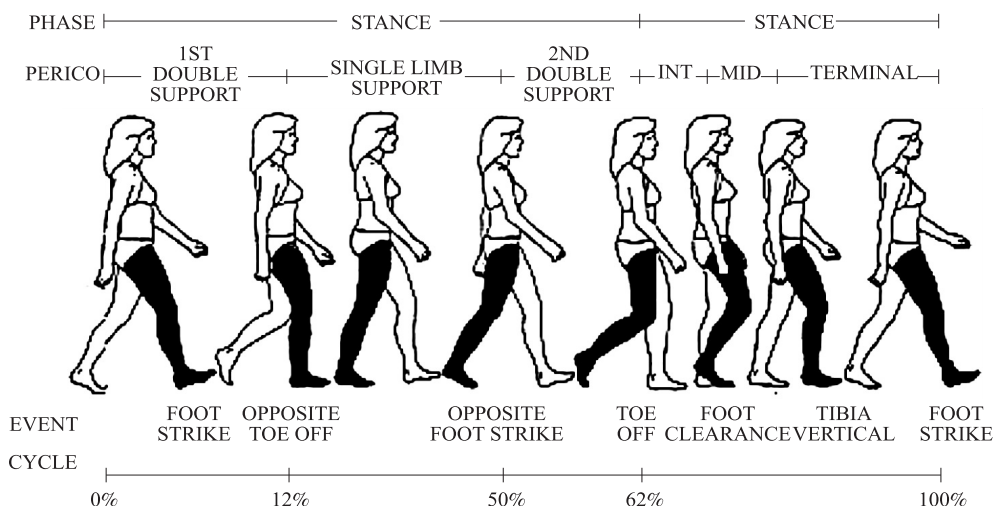


图1 典型正常步行周期

Fig.1 Typical normal walking cycle

当持手机行走时,手机跟随人体作周期性运动,其内置的 IMU 量测信息也相应作周期性变化;而当手机通过支架固定在车辆上时,运动则较为平缓,IMU 量测信息变化不大.因此,通过对 IMU 量测信息的有效处理,可以对手机运动模态进行实时判别.

IMU 内含三轴加速度计和三轴陀螺仪,其量测信息共有六维.定义

$$\begin{cases} Z = |a_z - g|, \\ W = \sqrt{w_x^2 + w_y^2 + w_z^2}. \end{cases} \quad (1)$$

式中, a_z 为加速度计的竖直方向输出, g 为重力加速度, w_x 、 w_y 、 w_z 为陀螺仪的三轴输出.通过参数 Z 和 W 可检测出人体步态相位,判别手机车载与手持两种不同运动模态.

2 运动模态判别

试验手机中 IMU 的采样频率为 50 Hz,实际使用时若逐次判别,则会导致计算量大且有随机误差.因此,本文采用 1 s 积分的方法,即每 1 s 内对 50 组 IMU 数据求积分,如式(2)所示:

$$\begin{cases} \int Z(t)dt = \sum_{i=1}^{50} (Z_i \times T), \\ \int W(t)dt = \sum_{i=1}^{50} (W_i \times T). \end{cases} \quad (2)$$

式中, Z_i 、 W_i 是每次采样后所得参数, T 是采样周期, $T=0.02$ s.既能满足正常判别需求,且可大大减少计算量,有效消除随机误差.

2.1 阈值设定

阈值设定依据试验手机内 IMU 的实际量测信息.试验手机分别在车载和手持运动模态下采样 t 时间,对其采样值的 1 s 积分取平均值,如式(3)所示:

$$\begin{cases} \overline{\int Z(t)dt} = \frac{1}{t} \sum_{j=1}^t \int Z_j(t)dt, \\ \overline{\int W(t)dt} = \frac{1}{t} \sum_{j=1}^t \int W_j(t)dt. \end{cases} \quad (3)$$

为使阈值在不同车载与手持模式下具有更好的适应性,对其采样值的 1 s 积分的平均值,分别取两者加权平均为阈值,如式(4)所示:

$$\begin{cases} \int Z_{\text{threshold}}(t)dt = f_1 \int Z_{\text{vehicle}}(t)dt + f_2 \int Z_{\text{hand}}(t)dt, & f_1 + f_2 = 1, 0 \leq f_1, f_2 \leq 1, \\ \int W_{\text{threshold}}(t)dt = f_3 \int W_{\text{vehicle}}(t)dt + f_4 \int W_{\text{hand}}(t)dt, & f_3 + f_4 = 1, 0 \leq f_3, f_4 \leq 1. \end{cases} \quad (4)$$

式中, f_1 、 f_2 、 f_3 和 f_4 分别为车载和手持运动模式的权值,根据实际情况进行设定。

试验手机分别在车载和手持运动模式下进行 10 min 采样,所得数据根据式(1)–(4)处理后如图 2 所示。

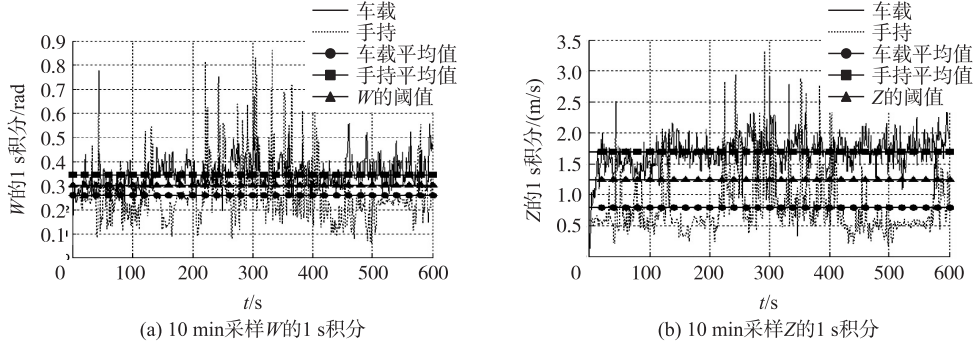


图2 试验数据的阈值设定

Fig.2 Threshold setting of test data

由图 2 可以看出,试验手机实际测试时 IMU 量测信息噪声较多,但处理后参数 W 和 Z 的 1 s 积分在车载和手持运动模式下仍有较大区别,可用于后续判别。设定权重 $f_1=f_2=f_3=f_4=0.5$ 时,分别求得

$$\int W_{\text{threshold}}(t)dt = 0.3018 \text{ rad}, \quad \int Z_{\text{threshold}}(t)dt = 1.2422 \text{ m/s}.$$

运用以上阈值对两次试验数据进行手机运动模式判别测试。若每秒积分结果小于阈值,判定处于车载模式,标志位置 0;反之,判定处于手持模式,标志位置 1。统计在总时间内,标志位 0 和 1 的个数,可得手机运动模式判别的准确率。判别采用 3 种方式:(1)单独采用 W 的 1s 积分;(2)单独采用 Z 的 1s 积分;(3)同时采用 W 和 Z 的 1s 积分。判别结果如图 3 所示。

由图 3 可得 3 种判别方式的准确率,如表 1 所示。

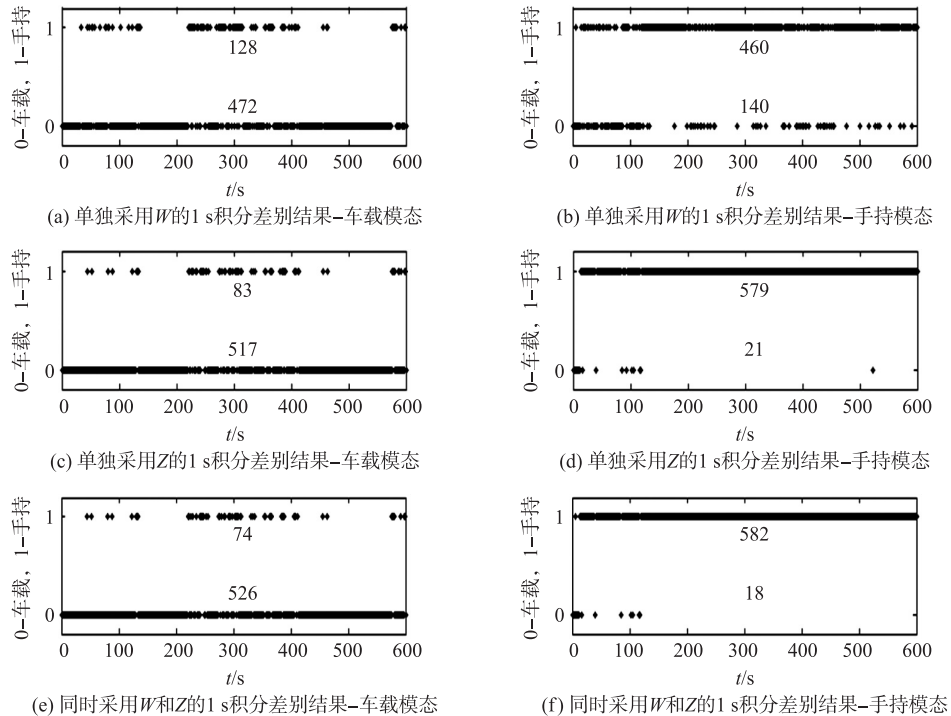


图3 3种判别方式结果

Fig.3 The result of three distinguishing methods

表 1 3 种判别方式的准确率
Table 1 The accuracy of three distinguishing methods

判别方式	车载模态的判别准确率	手持模态的判别准确率
W 的 1 s 积分	78.67%	76.67%
Z 的 1 s 积分	86.17%	96.50%
W 和 Z 的 1 s 积分	87.67%	97.00%

由表 1 可以看出,同时采用 W 和 Z 的 1 s 积分,手机运动模态的判别准确率都在 85% 以上。

2.2 辨识窗口设定

辨识窗口即运动模态判别的时长,合适的辨识窗口能够有效提高判别的准确性,防止手机导航算法在不同运动模态下的频繁切换。分别设定车载模态的辨识窗口参数 T_{vehicle} ,手持模态的辨识窗口参数 T_{hand} 。标志位为 1 时,若连续出现 T_{vehicle} 次标志位为 0,则切换成车载模态导航算法;标志位为 0 时,若连续出现 T_{hand} 次标志位为 1,则切换成手持模态导航算法;其他情况则维持不变。

一般情况下,进入车载模态导航算法需要保守谨慎,可以考虑适当增大辨识窗口即 T_{vehicle} ;而进入手持模态导航算法则需要及时快速,可以考虑适当减小辨识窗口即 T_{hand} 。对试验手机分别在车载和手持运动模态下进行 10 min 采样的数据采用不同辨识窗口:(1) $T_{\text{vehicle}}=2, T_{\text{hand}}=1$; (2) $T_{\text{vehicle}}=3, T_{\text{hand}}=1$; (3) $T_{\text{vehicle}}=4, T_{\text{hand}}=1$ 。判别结果如图 4 所示。

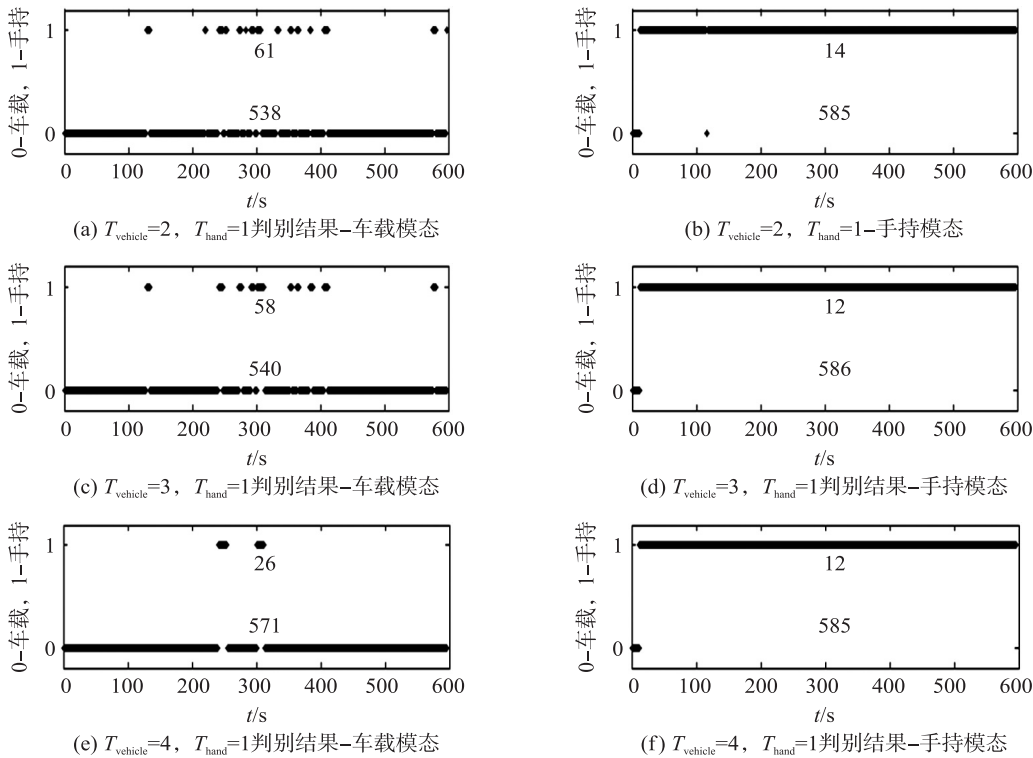


图 4 不同辨识窗口判别结果

Fig.4 The distinguishing result of different identification windows

由图 4 可得不同辨识窗口下判别的准确率,如表 2 所示。

表 2 不同辨识窗口判别的准确率
Table 2 The distinguishing accuracy of different identification windows

辨识窗口	车载模态的判别准确率	手持模态的判别准确率
$T_{\text{vehicle}}=2, T_{\text{hand}}=1$	89.82%	97.66%
$T_{\text{vehicle}}=3, T_{\text{hand}}=1$	90.30%	97.99%
$T_{\text{vehicle}}=4, T_{\text{hand}}=1$	95.64%	97.99%

由表 2 可以看出,模式判别的准确率随辨识窗口的增大而逐步提高.当 $T_{\text{vehicle}}=4, T_{\text{hand}}=1$ 时,手机运动模式判别的准确率都在 95% 以上.继续增大辨识窗口,能够提高判别的准确率,但提升有限且延时过长,考虑到实际工程应用,采用辨识窗口 $T_{\text{vehicle}}=4, T_{\text{hand}}=1$ 即可.

3 试验结果与分析

实际工程应用时,需要对手机运动模式进行实时判别,即延时不能过长,且越接近辨识窗口效果越好.设定相应参数:模式标志位 sign ,车载模式计数 P_{vehicle} ,手持模式计数 P_{hand} . 算法伪代码如下:

(1)开始;

(2)设定阈值 $W_{\text{threshold}}$ 和 $Z_{\text{threshold}}$, 辨识窗口 T_{vehicle} 和 T_{hand} , 初始化模式标志位 $\text{sign}=1$ (0-车载, 1-手持, 初始设置为手持模式);

(3)判断 IMU 数据是否读取结束,若结束,转至(7);反之,则读取 1 s 内 50 组 IMU 数据,分别计算 W 和 Z 的 1 s 积分;

(4)若 $\text{sign}=1$, 即上一时刻为手持模式,转至(5);反之,则转至(6);

(5)若 W 和 Z 的 1 s 积分都在阈值内,即本时刻是车载模式,车载计数加 1,否则将车载计数置 0;如果此时 $P_{\text{vehicle}}=T_{\text{vehicle}}$,则判定本时刻为车载模式,设置 $\text{sign}=0, P_{\text{vehicle}}=0$,否则本时刻维持上一时刻判定的模式 $\text{sign}=1$;输出保存本时刻的判别结果 sign ,转至(2);

(6)若 W 和 Z 的 1 s 积分都在阈值内,即本时刻是车载模式,手持计数置 0,否则将手持计数加 1;如果此时 $P_{\text{hand}}=T_{\text{hand}}$,则判定本时刻为手持模式,设置 $\text{sign}=1, P_{\text{hand}}=0$,否则本时刻维持上一时刻判定的模式 $\text{sign}=0$;输出保存本时刻的判别结果 sign ,转至(2);

(7)绘制整个试验过程中手机运动模式判别的结果图;

(8)结束.

流程如图 5 所示.

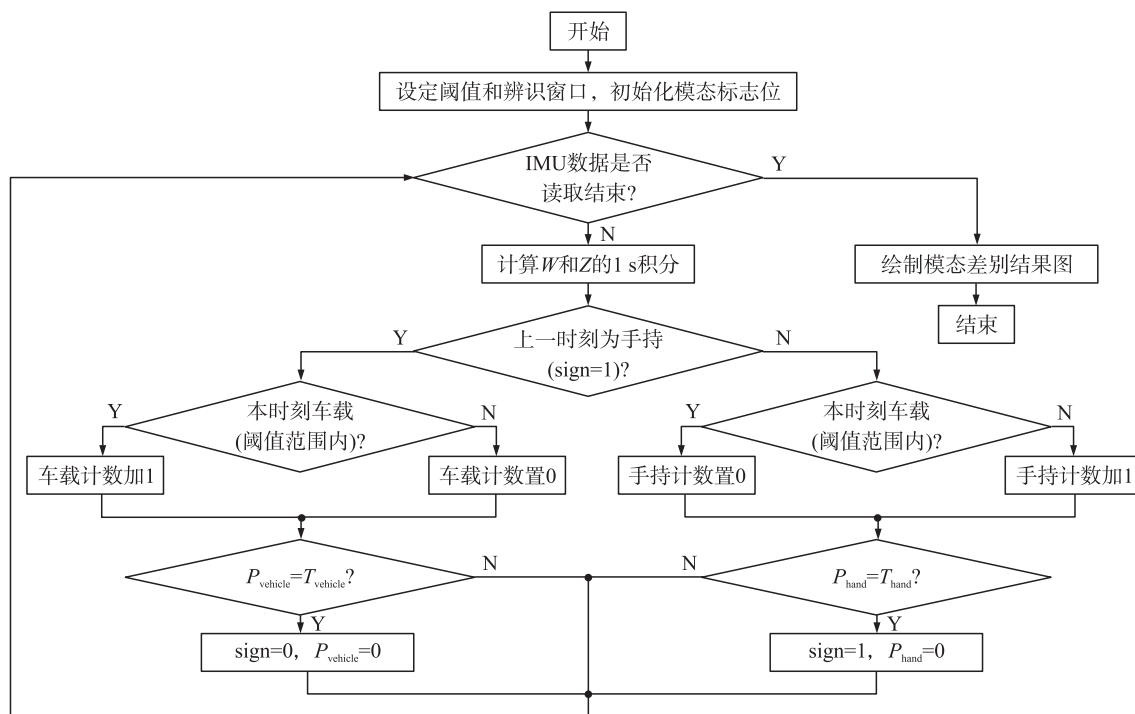


图5 模式判别算法流程图

Fig.5 Algorithm flowchart of mode distinguishing

试验手机进行 15min 实际测试,运动模式分别为:车载-手持-车载-手持-车载,模式切换的时间点分别为:0 s、120 s、310 s、435 s、633 s. 设定 $T_{\text{vehicle}}=4, T_{\text{hand}}=1$,采用手机运动模式判别算法,结果如图 6 所示.

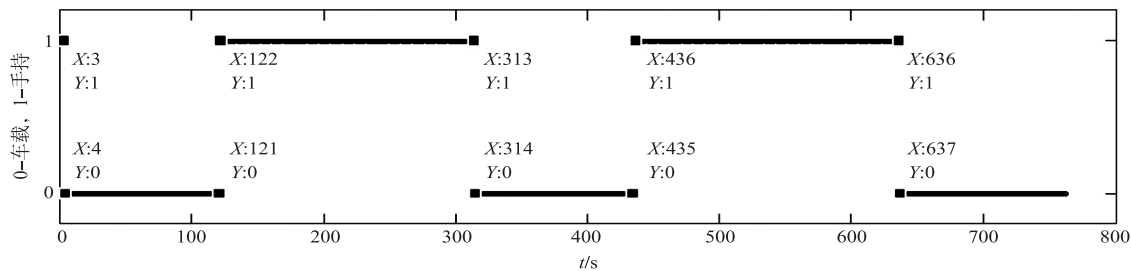


图 6 试验运动模式判别结果
Fig.6 The distinguishing result of tested motion mode

由图 6 可得试验手机运动模式判别的延时和准确率,如表 3 所示.

表 3 试验运动模式判别的延时和准确率
Table 3 The time-delay and distinguishing accuracy of tested motion mode

运动模式切换/时间点	模式判别延时/时间点	模式的判别准确率
车载/0 s	4 s/4 s	100%
车载-手持/120 s	2 s/122 s	100%
手持-车载/310 s	4 s/314 s	100%
车载-手持/435 s	1 s/436 s	100%
手持-车载/633 s	4 s/437 s	100%

由表 3 可以看出,试验手机运动模式判别的延时基本等于辨识窗口,且在相应运动模式内的判别准确率均为 100%,达到了实际工程应用的要求.

4 结语

本文以手机导航为研究背景,研究了一种基于 IMU 量测信息的手机运动模式判别方法.该方法通过选择合适参数,设定阈值和辨识窗口,确定算法流程,能够实时判别手机运动模式,试验结果证明了方法的有效性,从而为后续导航算法的使用时机与过程提供了判断依据.此外,对于手机固定安装的复杂情况下的模式判别,还可做进一步研究.

[参考文献](References)

[1] 杨兆升,王伟,董升,等. GPS/DR 组合定位系统信息融合技术[J]. 吉林大学学报(工学版),2008,38(3):508-513.
YANG Z S, WANG W, DONG S, et al. Information fusion technology of GPS/DR integrated positioning system[J]. Journal of Jilin university(engineering and technology edition), 2008,38(3):508-513. (in Chinese)

[2] 王励扬,何文涛,马成炎,等. 一种新型车载 GPS/DR 组合定位方法[J]. 计算机仿真,2015,32(7):164-167,172.
WANG L Y, HE W T, MA C Y, et al. New method of GPS/DR data fusion for land vehicle[J]. Computer simulation,2015,32(7): 164-167,172. (in Chinese)

[3] ZHANG C B, TIAN W F, JIN Z H. Application of unscented Kalman filter in state estimation for land vehicle navigation system[J]. Journal of system simulation, 2005, 17(6):1 456-1 458.

[4] 刘旭,张其善,杨东凯. 一种用于 GPS/DR 组合定位的非线性滤波算法[J]. 北京航空航天大学学报(自然科学版), 2007,33(2):184-187.
LIU X, ZHANG Q S, YANG D K. Nonlinear filter algorithm for GPS/DR integrated positioning[J]. Beijing university of aero-nautics and astronautics(nature science edition), 2007,33(2):184-187. (in Chinese)

[5] 陈阳舟,孙章固,马海波. 基于平方根 UKF 的车辆组合导航[J]. 系统工程与电子技术,2008,33(5):926-928.
CHEN Y Z, SUN Z G, MA H B. Vehicle integrated navigation based on square root UKF[J]. Journal of systems engineering and electronics, 2008,33(5):926-928. (in Chinese)

[6] 高宗余,李德胜,王跃宗. 基于 ZUPT 的车载 MEMS 惯性系统的混合滤波[J]. 电机与控制学报,2010,14(2):31-35.
GAO Z Y, LI D S, WANG Y Z. Combining ZUPT with hybrid particle filter for vehicle MEMS-INS[J]. Electric machines and

- control, 2010, 14(2):31-35. (in Chinese)
- [7] 付强文,秦永元,李四海,等. 车辆运动学约束辅助的惯性导航算法[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(6):640-643.
FU Q W, QIN Y Y, LI S H, et al. Inertial navigation algorithm aided by motion constraints of vehicle[J]. Journal of Chinese inertial technology, 2012, 20(6):640-643. (in Chinese)
- [8] 程见童,张为华,江振宇. 同时定位与制图辅助的 GPS/DR 组合导航[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(3):72-76.
CHENG J T, ZHANG W H, JIANG Z Y. GPS/DR integrated navigation aided by simultaneous localization and mapping[J]. Journal of national university of defense technology, 2014, 36(3):72-76. (in Chinese)
- [9] 任克强,李晓亮,谢斌. 基于 Android 的手机导航系统设计与实验[J]. 实验技术与管理, 2014, 31(5):131-135.
REN K Q, LI X L, XIE B. Design and experiment of mobile navigation system based on Android[J]. Experimental technology and management, 2014, 31(5):131-135. (in Chinese)
- [10] 李丹,程耕国. 基于 Android 平台的移动增强现实的应用与研究[J]. 计算机应用与软件, 2015, 32(1):16-19, 23.
LI D, CHENG G G. Application and research on android platform-based mobile augmented reality[J]. Computer applications and software, 2015, 32(1):16-19, 23. (in Chinese)
- [11] ROSS G S. Development of a pedestrian navigation system using shoe mounted sensors[D]. Edmonton: University of Alberta, 2004.
- [12] 钱伟行,朱欣华,苏岩. 基于足部微惯性/地磁测量组件的个人导航方法[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(5):567-572.
QIAN W X, ZHU X H, SU Y. Personal navigation method based on foot-mounted MEMS inertial/magnetic measurement unit[J]. Journal of Chinese inertial technology, 2012, 20(5):567-572. (in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]