

自适应零速修正辅助的微惯性定位系统研究

王云涛, 钱伟行, 徐 昊, 郑婷婷, 宋天威

(南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 针对 GNSS 失效情况下微惯性器件漂移大引起的定位精度低的问题, 研究了一种多条件辨识零速时刻, 基于速度信息构建观测方程的零速修正算法, 以提高微惯性系统的定位精度. 论文阐述了行人步态特性, 在分析行人步态的基础上设计了基于加速度量测方差、加速度量测幅值和角速度量测能量的多条件零速检测方法, 并针对室内外不同环境设置了自适应阈值. 在此基础上, 构建了速度信息为系统观测值的 Kalman 滤波器, 在零速对姿态、速度及位置误差进行估计并修正. 实验结果表明, 基于上述自适应定位修正算法可有效增强零速检测的可靠性, 抑制定位误差的累积, 定位的精度是行进距离的 1.32%.

[关键词] 微惯性器件, 零速修正, 步态分析, Kalman 滤波器

[中图分类号] U666.1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2017)04-0014-06

Research on Micro Inertial Positioning System Based on Adaptive Zero Velocity Updating

Wang Yuntao, Qian Weixing, Xu Hao, Zheng Tingting, Song Tianwei

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

Abstract: Aiming at the problem that drifts error of micro inertial sensors under the condition of GNSS failure, a zero velocity updating algorithm is proposed to construct a filter model based on velocity information for observation, so as to improve the positioning accuracy. The paper describes the pedestrian gait characteristics. Based on the analysis of pedestrian gait, a zero-velocity detection algorithm with multi-condition constraints is designed by using the acceleration measurement variance, acceleration measurement amplitude and angular velocity measurement energy as measurements, and the adaptive threshold is set for different indoor and outdoor environment. On this basis, a Kalman filter with velocity information is established to estimate and correct the attitude, velocity and position error at zero speed. The experimental results show that the localization correction algorithm can effectively enhance the reliability of zero velocity detection and suppress the accumulation of positioning error, and that the accuracy of the positioning is 1.32% of the travel distance.

Key words: MIMU, zero velocity updating, gait phase detection, Kalman filter

行人导航, 以确定行人实时地理位置为目的, 是移动定位信息服务的基础^[1]. 依据安装方式的不同, 基于微惯性器件(micro inertial measurement unit, MIMU)的行人导航主要有两种解算方法: 航迹推算^[2-3](pedestrian dead-reckoning, PDR)算法和捷联式导航算法^[4-5]. PDR 算法通过结合步长及航向信息来确定定位信息, 该算法由于样本参数的差异性及周遭环境的复杂性, 有一定的局限性. 而由于 MIMU 自身的精度较低, 采用常规的捷联式导航算法会产生较大的累积误差^[6-7], 无法满足定位的精度要求. 基于此, 本文以捷联式惯性导航算法为基础, 在分析行人步态的基础上设计了一种多条件约束的零速检测方法, 并针对室内外不同环境设置自适应阈值, 以满足室内外不同步态下的零速准确检测, 并通过零速修正^[8](zero velocity update, ZUPT), 在静止时刻估计并修正定位系统及 MIMU 的误差, 以抑制误差累积速度, 提高定位精度.

收稿日期: 2017-05-24.

基金项目: 国家自然科学基金(61304227, 61273057, 61601228)、江苏省自然科学基金(BK20141453).

通讯联系人: 钱伟行, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 惯性与组合导航技术. E-mail: 61192@ nju.edu.cn

1 系统总体算法框架

为实现系统的定位需求,首先对 MIMU 的输出值进行捷联式解算. 根据行人的步态特性设计多约束的零速检测条件,并建立了以速度误差为系统观测值的卡尔曼滤波器. 当检测到行人零速状态时,触发卡尔曼滤波器,更新速度、位置、姿态、时刻等信息;当检测到行人未在零速区间时,只更新时间;从而校正速度误差、位置误差与累计的位置,最终实现高精度的定位功能. 定位算法框架如图 1 所示.

2 定位算法设计

当使用惯性导航算法时,如果不做误差修正,速度及位置误差会随着时间不断累积,从而失去定位的意义. ZUPT 是一种简便高效的惯性导航误差补偿方法,可有效降低系统的累积误差,极大提高惯性导航的定位精度. ZUPT 辅助的行人定位利用行走过程中脚着地时刻的速度为零,将其作为观测值应用于先进的滤波算法,并将解算状态误差反馈给惯性定位计算模块进行校正,实现较高精度的实时定位.

2.1 行人步态特性分析

对步态特性分析得知,行人在行进过程中,双足步态可近似看作周期性活动. 这一周期性活动主要分为 5 个阶段:脚跟触地、脚尖及脚跟均触地、站立、脚跟离地、脚尖离地^[9]. 行人步态周期如图 2 所示.

分析步态特性便于对行人行进过程中的零速状态进行检测. 结合图 2 中步态周期的图示,本文将步态周期静态相位中行人运动脚脚掌着地时刻 T_1 至脚跟抬起时刻 T_2 间的时间段 Δt 定义为行人步态中的零速区间. 静止阶段 Δt 大约持续时间为 0.1~0.3 s,加速度的理论输出值是重力加速度,陀螺理论输出值为零.

2.2 零速检测模型

准确的零速判别为后续系统的误差修正提供保障,因此零速检测算法的选取要最优化. 本文基于加速度计和陀螺仪输出的周期特性,设计了一种多条件约束的零速检测算法. 检测算法的框架由 3 个约束条件构成:加速度量测方差、加速度量测幅值和角速度量测能量^[10-11],分别记为 f_1 、 f_2 和 f_3 . 约束条件实现如下:

(1) 加速度量测方差检测法

采用滑动窗口观测加速度平方和的方差可检测行人步态中的信号突变. 在零速时刻加速度量测方差的变化值近似于零,而其他行进状态下则存在波动性. 故可给定相应的加速度方差阈值来判断零速:

$$\sigma_{a_b}^2 = \frac{1}{2s+1} \sum_{j=k-s}^{k+s} (a_j^b - \bar{a}_k^b)^2, \quad (1)$$

$$f_1 = \begin{cases} 0 & \sigma_{a_b}^2 \geq th_{\sigma_{\max}} \\ 1 & \sigma_{a_b}^2 < th_{\sigma_{\max}} \end{cases} \quad (2)$$

式中, \bar{a}_k^b 为比力的均值; s 为窗口的大小, s 的选取主要与微惯性器件的输出频率有关; $\sigma_{a_b}^2$ 为比力模值的滑动方差; th_{σ} 为方差判别阈值.

(2) 加速度量测幅值检测法

依据处于零速状态时,足部的加速度输出应为当地的重力加速度(g)值. 故可设定加速度阈值来判断零速:

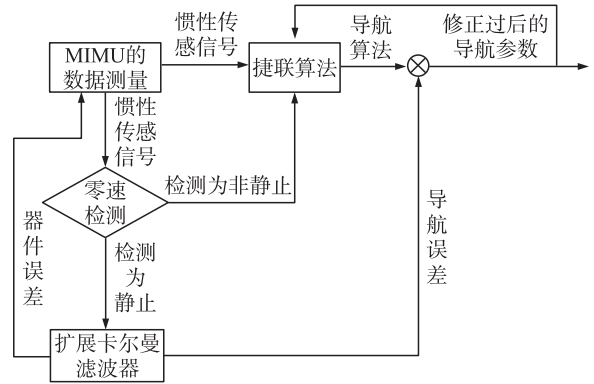


图 1 系统总体算法框架图

Fig. 1 The overall algorithm flowchart of system

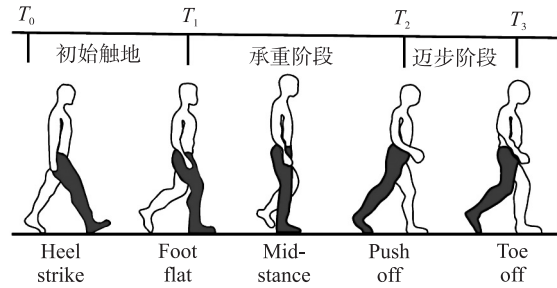


图 2 行人行走的步态周期

Fig. 2 Pedestrian gait cycle

$$|a_k^b| = [a_k^b(1)^2 + a_k^b(2)^2 + a_k^b(3)^2]^{1/2}, \quad (3)$$

$$f_2 = \begin{cases} 0 & |a_k^b| \leq th_{amin} \text{ or } |a_k^b| \geq th_{amax}, \\ 1 & th_{amin} < |a_k^b| < th_{amax}. \end{cases} \quad (4)$$

式中, $a_k^b(1)$ 、 $a_k^b(2)$ 、 $a_k^b(3)$ 分别是加表三轴方向的输出值; $|a_k^b|$ 为比力模值; th_a 为判别阈值。

(3) 角速度量测能量检测法

足部处于零速状态时,陀螺输出及变化值应近似为零。而在其他行进过程中,足部因处于转动状态,故其陀螺输出会产生变化。

$$|w_k^b| = [w_k^b(1)^2 + w_k^b(2)^2 + w_k^b(3)^2]^{1/2}, \quad (5)$$

$$f_3 = \begin{cases} 0 & |w_k^b| \leq th_{wmin} \text{ or } |w_k^b| \geq th_{wmax}, \\ 1 & th_{wmin} < |w_k^b| < th_{wmax}. \end{cases} \quad (6)$$

式中, $w_k^b(1)$ 、 $w_k^b(2)$ 、 $w_k^b(3)$ 分别为陀螺三轴方向的输出值; $|w_k^b|$ 为陀螺输出的模值; th_w 为角速度模值判别阈值。

上述 3 种条件,方法 1~3 的结果都会产生不同程度的野值。因此,判断条件单一化会产生零速检测的误判。为避免单种检测算法不能准确判断行人复杂的步行姿态,根据“与”逻辑的运算特性,将 3 个条件结果进行“与”运算,用 f 表示是否为零速时刻。 $f=1$, 表示此时是零速时刻; $f=0$, 表示此时不是零速时刻。此外,针对室内外不同环境及不同步态求取逻辑值时,采用固定的边界阈值方法通常会引入一定数量的野值,将运动点误判为零速点,对后续的定位误差修正算法产生影响。故可对室内外设置自适应阈值,依据不同环境调整边界条件,避免零速条件的误判,提高定位精度:

$$f = f_1 \& f_2 \& f_3. \quad (7)$$

2.3 卡尔曼滤波算法

为预测零速状态的误差,基于捷联式导航误差状态方程建立扩展卡尔曼滤波器^[12]。卡尔曼滤波器由 k 时刻的 15 维误差状态量构成:

$$\partial x_k = [\partial \psi_k \quad \partial r_k \quad \partial v_k \quad \partial a_k \quad \partial w_k], \quad (8)$$

式中, $\partial \psi_k$ 为数学平台误差角; ∂r_k 为位置误差; ∂v_k 为东北天三向的速度误差; ∂a_k 为三轴加速度计的一阶马尔科夫过程; ∂w_k 为三轴陀螺仪的随机常值。

以惯导误差方程作为状态方程,以系统零速时刻解算的速度与零速差值作为速度误差观测量,则系统状态方程及观测方程可表示为:

$$\begin{cases} X_k = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + W_k, \\ Z_k = H_k X_k + V_k. \end{cases} \quad (9)$$

式中, X_k 为 k 时刻的系统状态; $\Phi_{k,k-1}$ 为系统参数; Z_k 为 k 时刻的测量值; H_k 为量测矩阵; W_k 和 V_k 分别表示过程和测量的噪声。

则卡尔曼滤波过程计算过程如下:

滤波预测过程:

$$\begin{cases} X_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} X_{k-1}, \\ P_{k,k-1} = \frac{1}{\alpha_k} \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k,k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k,k-1}^T. \end{cases} \quad (10)$$

式中, $X_{k,k-1}$ 为利用上一状态预测的结果; X_{k-1} 为上一状态最优的结果; $P_{k,k-1}$ 为 $X_{k,k-1}$ 对应的均方误差; P_{k-1} 为 X_{k-1} 对应的均方误差。

滤波更新过程:

$$\begin{cases} K_k = P_{k,k-1} H_k^T [H_k P_{k,k-1} H_k^T + R_k]^{-1}, \\ X_k = X_{k,k-1} + K_k [Z_k - H_k X_{k,k-1}], \\ P_k = [I - K_k H_k] P_{k,k-1}. \end{cases} \quad (11)$$

式中, K_k 为卡尔曼滤波增益; X_k 为现状态 k 的最优化估算值; I 为单位矩阵; 当系统进入 $k+1$ 状态时, P_k 就是式(10)中的 P_{k-1} 。

系统无法获得观测值时,滤波器仅作滤波预测。当检测到零速时,滤波器将进行滤波预测和滤波更

新. 将滤波器计算得到的误差返回给导航系统,再输出修正后的导航信息.

3 定位系统平台搭建

系统平台的搭建由下位机传感器测量模块和上位机解算与显示平台构成,如图 3 所示. 下位机测量模块包括 ARM 处理器、MPU-6050 微惯性器件及 HMC-5883 磁力计,传感器通过 I2C 接口与 ARM 处理器连接. 上位机解算与显示平台搭载定位解算软件,用于接收并处理传感器测量模块的数据,并进行实时解算,得到位置信息的实时显示. 上下位机通讯通过蓝牙连接.

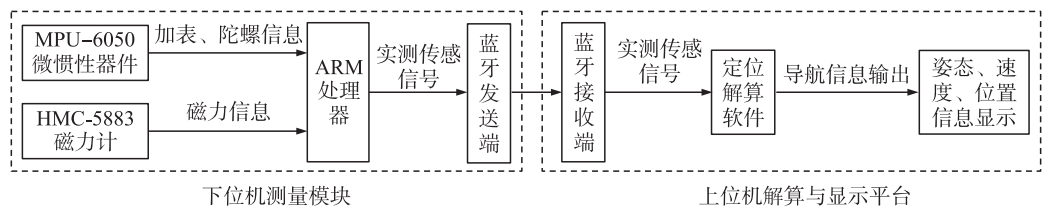


图 3 系统组成
Fig. 3 System composition

实验采用 MEMS IMU,其内部集成 ARM 处理器并搭载低成本 MPU-6050 微惯性传感器及磁传感器. 图 4 为下位机测量模块实物图. 图 5 为定位系统实物图. 实验采样频率为 200 Hz.

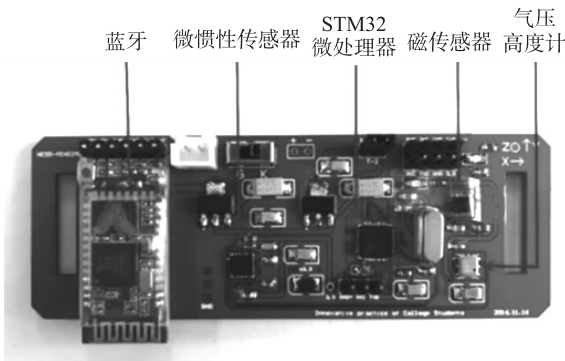


图 4 下位机测量模块实物图
Fig. 4 Measurement module picture of lower machine



图 5 定位系统实物图
Fig. 5 Picture of positioning system

4 实验结果及分析

为评估上位机与下位机的可靠性及定位算法的可行性,对原理样机进行测试. MPU-6050 中微惯性传感器的主要误差特性如表 1 所示. 为分析该系统的定位性能与误差特性,分别在同一条闭合曲线路线上进行两组行人的定位实验. 实验路径总路程约 360 m,其中行人常规步行速度约为 1.4 m/s,实验用时 257 s. 图 6 为行人定位系统原理样机进行性能测试时的行进路线.

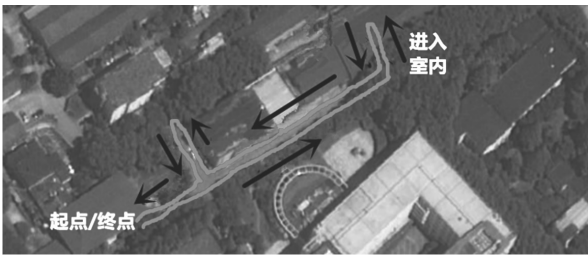


图 6 行进路线的卫星地图
Fig. 6 Satellite map of the walking route

表 1 MPU-6050 中微惯性传感器的主要误差特性

Table 1 Main error characteristics of micro inertial sensors in MPU-6050

传感器 误差特性	陀螺			加表		
	X 轴/(°/h)	Y 轴/(°/h)	Z 轴/(°/h)	X 轴	Y 轴	Z 轴
零偏	-2 967.203 19	-4 686.482 88	-7 403.076 44	0.018 760 00 g	0.026 230 00 g	0.967 400 00 g
零偏稳定性	27.036 18	10.736 85	19.825 46	0.000 158 24 g	0.000 159 85 g	0.000 300 89 g

注: g 为当地重力加速度.

图 7 所示为行人定位性能对比曲线. 图 7(a) 曲线为常规步行速度中采用零速修正辅助的捷联式算法

进行行人定位解算的位置曲线,该曲线表明,在屏蔽自适应阈值算法的前提下采用零速修正方法无法得到较理想的定位曲线.图 7(b)曲线为常规步速行进中采用自适应阈值算法进行零速修正得到的行人定位解算的位置曲线,该曲线表明,即便采用的是精度较低的微惯性传感组件,经过较为精准的误差标定补偿及自适应阈值的约束,仍可有效实现行人定位,定位误差为 4.76 m,占总行进路程的 1.32%.

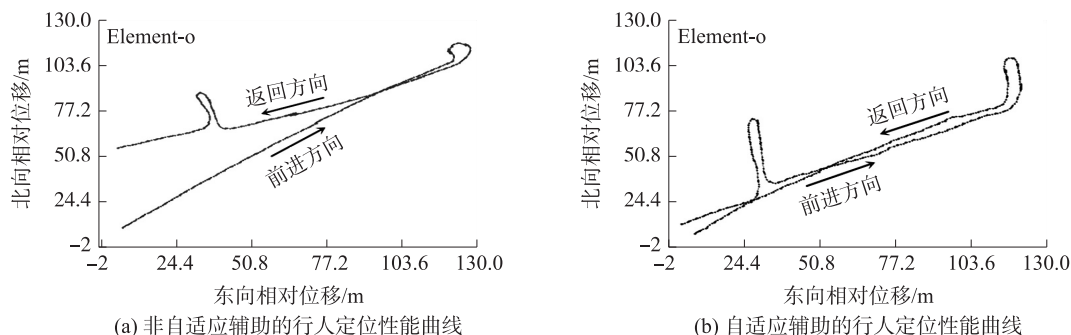


图 7 行人定位性能对比曲线

Fig. 7 Comparison curves of pedestrian positioning performances

由此可见,通过自适应 ZUPT 方法,可对定位系统的姿态误差、速度误差及位置误差进行估计并反馈,从而有效抑制误差的累积,提高系统的定位精度.针对消防救援、矿井勘探、单兵作战等应用背景,该微惯性定位系统能够在 GNSS 失效情况下实时确定工作或作战人员的位置信息,对于保证人员安全、提高救援速度、增强作战能力等具有重要意义.

5 结语

本文设计并实现了一种基于自适应 ZUPT 辅助的微惯性定位系统.基于加速度计和陀螺仪输出的周期特性,总结并实现了一种多条件约束的零速检测算法,并对室内外的零速判别设置自适应阈值,依据不同环境调整边界条件,避免零速条件的误判.在此基础上,将静止时刻的速度误差作为滤波器的观测值估计系统误差,提高定位精度.将静止时刻的速度误差作为滤波器的观测值并建立了卡尔曼滤波方程,对系统姿态误差、速度误差及位置误差进行估计,有效修正了微惯性器件零偏带来的累积误差,提高了定位精度.

[参考文献] (References)

- [1] 钱伟行,曾庆化,万骏炜,等.基于人体下肢运动学机理的行人导航方法[J].中国惯性技术学报,2015,23(1):24-28.
QIAN W X,ZENG Q H,WAN J W,et al. Pedestrian navigation method based on kinematic mechanism of human lower limb[J]. Journal of Chinese inertial technology,2015,23(1):24-28. (in Chinese)
- [2] 孙璧文,樊启高,武亚恒,等.基于 PDR/UBW 紧耦合的足绑式行人导航技术[J].传感器与微系统,2017,36(3):43-48.
SUN B W,FAN Q G,WU Y H,et al. Foot-mounted pedestrian navigation technology based on tightly coupled PDR/UBW[J]. Transducer and microsystem technologies,2017,36(3):43-50. (in Chinese)
- [3] LIU Y,LI S L,MU C,et al. Step length estimation based on D-ZUPT for pedestrian dead-reckoning system[J]. Electronics letters,2016,52(11):923-924.
- [4] JOHN-OLOF N,ISAAC S,PETER H,et al. Foot-mounted INS for everybody—an open-source embedded implementation[C]// Position,Location and Navigation Symposium(PLANS). Myrtle Beach,SC,USA:IEEE/ION,2012.
- [5] BIRD J,ARDEN D. Indoor navigation with foot-mounted strapdown inertial navigation and magnetic sensors[J]. IEEE wireless communications,2011,18(2):28-35.
- [6] 张新喜,张嵘,郭美凤,等.足绑式行人导航偏航角误差自观测算法[J].中国惯性技术学报,2015,23(4):457-466.
ZHANG X X,ZHANG R,GUO M F,et al. Yaw error self-observation algorithm for pedestrian navigation via foot-mounted inertial navigation system[J]. Journal of Chinese inertial technology,2015,23(4):457-466. (in Chinese)
- [7] FELIPE O S,ELDER M H,WALDEMAR C L F. Error analysis of analytical coarse alignment formulations for stationary SINS[J]. IEEE transactions on aerospace and electronic systems,2016,52(4):1 777-1 796.
- [8] ABDELMOUMEN N,ZAKARIA K,JORG B,et al. Step detection for ZUPT-aided inertial pedestrian navigation system using

- foot-mounted permanent magnet[J]. IEEE sensors journal,2016,16(17):6 766–6 773.
- [9] GHAZALEH P,NASSER M,ARNE L,et al. Continuous hidden markov model for pedestrian activity classification and gait analysis[J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement,2013,62(5):1 073–1 083.
- [10] 张晓东. 基于 MEMS 惯性器件的个人导航系统研究[D]. 北京:北京工业大学,2015.
- ZHANG X D. Study on personal navigation system based on MEMS inertial devices[D]. Beijing:Beijing University of Technology,2015.(in Chinese)
- [11] 田晓春,陈家斌,韩勇强,等. 多条件约束的行人导航零速区间检测算法[J]. 中国惯性技术学报,2016,24(1):1–5.
- TIAN X C,CHEN J B,HAN Y Q,et al. Zero-velocity interval detection algorithm with multi-condition constraint for pedestrian navigation[J]. Journal of Chinese inertial technology,2016,24(1):1–5.(in Chinese)
- [12] YUAN Z,NASER E S. Tightly-coupled integration of WiFi and MEMS sensors on handheld devices for indoor pedestrian navigation[J]. IEEE sensors journal,2016,16(1):224–234.

[责任编辑:严海琳]