

DOI:10.13203/j.whugis.20150400



文章编号:1671-8860(2017)06-0726-06

基于加速度量测幅值零速检测的计步算法研究

陈国良¹ 杨洲¹

¹ 中国矿业大学环境与测绘学院,江苏 徐州,221116

摘要:准确的步数统计是进行人员航位推算的关键,通过分析行人运动模型及步行姿态,设计了一种基于零速检测的加速度量测幅值计步算法,实现了载体坐标系和行人地理坐标系的转换,剔除了伪零速现象,在室内模拟环境下采用低成本的微机电机械系统(micro electro mechanical system, MEMS)惯性测量元件对人员行走进行检测,实现了行人运动姿态的有效识别和步数的精确统计。实验结果表明,该计步方法准确性高,对不同的运动环境(走廊、拐角和楼梯)具有良好的适应性,计步正确率均达到 98% 以上,并且所用的测量元件功耗低,便于携带,适合室内复杂环境。

关键词:计步;零速检测;MEMS;加速度量测幅值

中图法分类号:P208

文献标志码:A

目前,室内定位技术的研究主要集中在利用 Zigbee^[1]、RFID^[2](radio frequency identification, RFID)和 WiFi^[3](wireless fidelity, WiFi)等载波或射频进行定位,其中 WiFi 和 Zigbee 利用接收信号强度对目标进行测距定位,但室内密闭的环境极易产生电磁干扰和多路径效应,对场强信息干扰比较大;RFID 可以进行区域定位,准确性无法得到保障。国内外的一些学者^[1-3]针对室内人员定位进行了研究,提出了一种利用步长-步数模型结合行人航向信息来对室内人员进行定位的方案,在短时间内可以取得较高的定位精度^[4-6]。基于此背景,本文利用微机电机械系统(micro electro mechanical system, MEMS)惯性测量元件(inertial measurement unit, IMU)对人员运动进行检测,设计了一种基于零速检测的加速度量测幅值计步算法,将输出的加速度信息用作零速检测,识别行人运动姿态,并对处理过程中可能出现的伪零速现象进行剔除,得到了可靠的计步效果。

1 行人运动模型研究

行人行走是左右腿周期性交替摆动的过程,如图 1 所示。行人的步态周期可以分为脚部着地阶段和跨步摆动阶段。着地阶段从行人脚跟着地

开始,到脚尖离地结束;跨步摆动阶段从脚尖离地开始到脚跟着地结束,如此双腿不断交替运动^[7]。

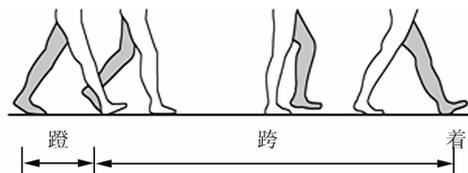


图 1 行人行走周期示意图

Fig. 1 Pedestrian Periodicity Walking Diagram

1.1 运动参数分析

从运动参数角度,行人肢体周期性地运动会导致运动参数如速度、加速度和旋转角速度等发生周期性的变化。行人正常行走进入跨步摆动阶段,脚尖离地后,加速度为正值(以行人行走方向为正),速度增大,腿部加速摆动,随后加速度减小直至为零,速度达到最大值,腿部抬至最高点;加速度继续减小为负值,速度开始减小,腿部经历减速过程直至脚部着地,此时速度和加速度都近似为零,进入脚部着地阶段。行人运动过程与运动参数对应关系如图 2 所示。

根据加速度和速度的上述对应关系,可以利用加速度的变化推理速度的变化。跨步时脚尖离地后加速度为正值速度逐渐增大,至加速度减小为零速度达到最大值;加速度为负值的时候速度减小,至脚着地时加速度为零,速度也减小为零。

收稿日期:2016-03-10

项目资助:国家自然科学基金资助(41371423),国家重点研发计划(2016YFB0502105),江苏省自然科学基金(BK20161181)。

第一作者:陈国良,博士,教授,主要从事室内定位技术理论与方法研究。chgicm@163.com

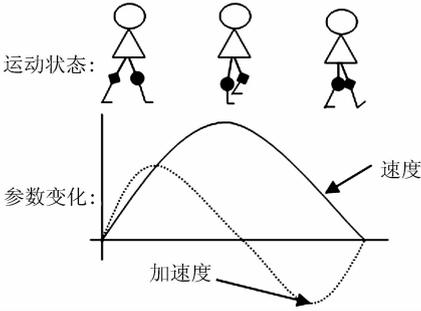


图 2 运动参数变化曲线图

Fig. 2 Curve of Motion Parameters Change

根据这些变化特征,可以判别行人是处于脚部着地阶段还是处于跨步摆动阶段,实现行人姿态的判断,完成行走步数的统计。

1.2 行人步数统计

常见的利用加速度进行计步的算法有波峰检测法^[8]、相关性分析法^[9]和零速检测法。

波峰检测法是通过检测信号波形的峰值,根据运动特征判断有效步伐,统计步数。这种检测方法通过检测加速度曲线的极值,而加速度曲线并不是严格的正弦或余弦曲线,在判别过程中由于伪波峰和伪波谷的干扰使得判别结果往往不准确(图 3)。

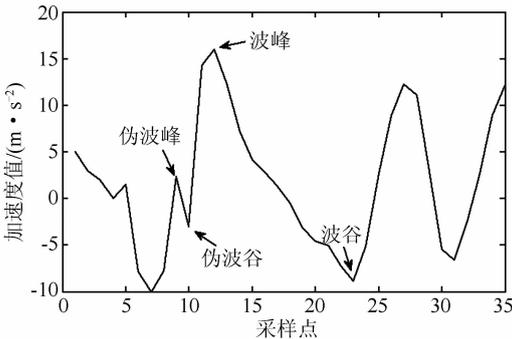


图 3 波峰检测中伪波峰的干扰

Fig. 3 Pseudo Peak in Peak Detection

自相关判别法是利用当前跨步周期和上一跨步周期的加速度值的相关性来判别行人的运动状态。这种方法依赖于严格的加速度值之间的相关性,对算法要求较高。

零速检测常用来处理惯性导航系统(inertial navigation system,INS)中累计误差问题,它的原理是载体在停止运动时速度和加速度均为零,而实际上系统仍然有输出值,将输出值当做零速误差作为外部测量值修正 INS,达到控制累积误差的目的。作者正是利用零速检测来判断行人行走过程中脚部着地阶段,作为判断行人前进一步的依据,实现步数的统计。

2 基于零速检测计步算法设计

行人运动是在地理坐标下的运动,而 IMU 输出的加速度是载体坐标系下的数值,为便于阈值的选取和方便判别实施,需要进行坐标转换,将载体坐标系下的加速度值转换到地理坐标系下;为充分利用加速度值,避免单一参数出现的模糊判别现象,将三轴加速度的模 $\|a\|$ 作为考察指标进行零速检测;针对加速度为零的现象也可能出现在跨步摆动阶段从而导致步数误判的伪零速点进行剔除,保证了计步的准确性和可靠性。

2.1 坐标转换

MEMS 输出的运动参数数据是在载体坐标系下的数据,而行人航位推算所在的坐标系是地理坐标系,因此需要将载体坐标系下的加速度、角速度等数据转换到地理坐标系下。

(1)载体坐标系

载体坐标系 $O-x_b y_b z_b$ 的原点与载体的质心重合, x 轴沿载体横轴指右, y 轴沿载体纵向指前, z 轴沿载体竖轴向并与 x 轴和 y 轴构成右手坐标系。但是载体坐标系的坐标轴朝向并不唯一,有的载体坐标系的 x 轴沿载体纵轴向前, y 轴沿载体横轴向右, z 轴沿载体竖向与 x 轴和 y 轴成右手坐标系,如图 4 所示。

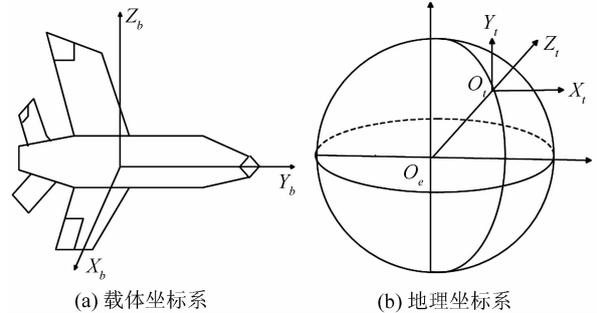


图 4 坐标系

Fig. 4 Carrier and Geographic Coordinate

(2)地理坐标系

地理坐标系用坐标 $O-x_t y_t z_t$ 表示,使用三维球面来定义地球表面位置,通过经纬度对地球表面点位引用,本文选取东北天坐标系为导航坐标系,其原点在载体的质心, x 轴沿纬线指东, y 轴沿经线指北, z 轴沿地球切面垂线指天,与 x 轴和 y 轴构成右手坐标系,其中 x 轴和 y 轴构成的平面平行于当地水平面。

载体坐标系到地理坐标系的转换可以通过载体姿态角依次绕相应的坐标轴三次旋转完成。设

载体的航向角为 ψ 、俯仰角为 θ 、横滚角为 γ ，从载体坐标系转换到地理坐标系的步骤如下：

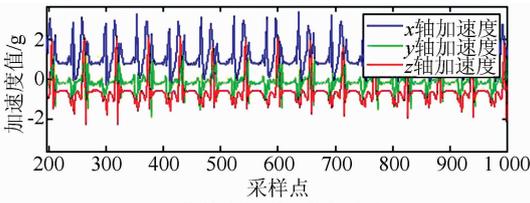
$$O-x_b y_b z_b \xrightarrow[\text{旋转 } \gamma]{\text{绕 } Y_b \text{ 轴}} O-x_2 y_2 z_2 \xrightarrow[\text{旋转 } \theta]{\text{绕 } X_2 \text{ 轴}} O-x_1 y_1 z_1 \xrightarrow[\text{旋转 } \psi]{\text{绕 } Z_1 \text{ 轴}}$$

(其中 $O-x_2 y_2 z_2$ 和 $O-x_1 y_1 z_1$ 为过渡坐标系)

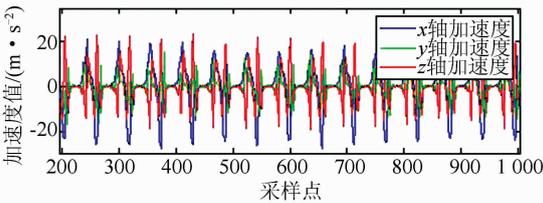
$$\mathbf{C}_b^t = \mathbf{C}_b^2 \mathbf{C}_2^1 \mathbf{C}_1^t = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma & 0 & \sin\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\gamma & 0 & \cos\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\gamma - \sin\psi\sin\theta\sin\gamma & \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\sin\gamma + \sin\psi\sin\theta\cos\gamma \\ -\cos\psi\sin\theta\sin\gamma & \cos\psi\cos\theta & \cos\psi\sin\theta\cos\gamma \\ -\cos\theta\sin\gamma & -\sin\theta & \cos\theta\cos\gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

载体坐标系的数据向量 $(x_b, y_b, z_b)^T$ 经过坐标转换后为地理坐标系的 $(x_t, y_t, z_t)^T$ ：

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} = \mathbf{C}_b^t \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} \quad (2)$$



(a) 载体坐标系下的加速度



(b) 地理坐标系下的加速度

图5 加速度坐标转换

Fig. 5 Acceleration Coordinate Transformation

图5为IMU三轴加速度由载体坐标系转换到地理坐标系。可以看出，在载体坐标系下，由于载体朝向和重力加速度在三轴上均有分量，导致行人脚步着地时 x 、 y 、 z 三轴的加速度不为零，为零速检测带来了困难，经过坐标转换后，行人脚步着地时三轴加速度曲线水平且均为零，转换后的加速度曲线便于正确统计行人前进步数。

2.2 加速度测量幅值法零速检测

行人运动时，三轴加速度值都发生周期性变化，但变化的程度和方向各不相同。如果仅利用单轴加速度作为判别行人步行姿态往往不准确，因此可以融合三轴加速度数值，将融合加速度的幅值 $\|a\|$ 作为判别指标进行零速检测，步骤如下。

$O-x_1 y_1 z_1$ 为过渡坐标系)从线性代数的角度，每一次旋转都可以用基本旋转矩阵表示，变换矩阵 \mathbf{C}_b^t 等于基本旋转矩阵的连乘^[10]，连乘顺序依基本旋转的先后顺序由右向左排列。

(1)三轴加速度转换为地理坐标系下的加速度序列 $\{a_i^x(1), a_i^x(2), \dots, a_i^x(n)\}$ 、 $\{a_i^y(1), a_i^y(2), \dots, a_i^y(n)\}$ 、 $\{a_i^z(1), a_i^z(2), \dots, a_i^z(n)\}$ ，其合加速度为：

$$\|a_i(k)\| = \sqrt{a_i^x(k)^2 + a_i^y(k)^2 + a_i^z(k)^2}$$

式中， $k=1, 2, \dots, n$ 为采样点次序； a_i^x 、 a_i^y 、 a_i^z 分别为 x 轴、 y 轴和 z 轴加速度。

(2)设置阈值区间 $T=[t_{\min}, t_{\max}]$ ，则：

$$C(k) = \begin{cases} 1, & t_{\min} < \|a_i(k)\| < t_{\max} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (3)$$

式中， $C(k)$ 为 1 代表零速检测成功，即此采样点上行人速度为零，反之 $C(k)$ 为 0。

(3)经过上述步骤的处理，得到一个 n 维的 0、1 向量 (n 代表采样点个数)，计算向量中连续出现 1 的次数，连续出现说明并不是由于加速度值的噪声导致的偶然为零，而是由于行人在这段时间内脚部处于着地状态，速度一直是零，从而完成了步数的初步统计。

(4)伪零速点剔除。步骤(3)初步得到计步结果，但是其中会有干扰步数的出现。由物理学知识，脚着地静止阶段，加速度与速度均为零，而当测得加速度为零时，速度却并不一定为零，加速度为零的情况也可能出现在跨步摆动阶段加速度由正值变为负值的过程中，因此为得到准确的计步结果，必须剔除伪零速点。根据行人运动特点，脚部着地阶段大致占整个行走周期的 40% 左右，而跨步中间加速度为零的时间极短，一般不会超过整个跨步周期的 10%，跨步中间加速度为零的采样点出现的次数与采样的频率有关，因此可以将加速度为零的采样点连续出现个数小于采样频率的 10% 的情况认为是出现在跨步过程中，不作为计步依据，应当予以剔除。

根据上述步骤，可以得到行人行走过程中脚部着地阶段的次数，作为最终步数输出。整个算

法流程图 6 所示。

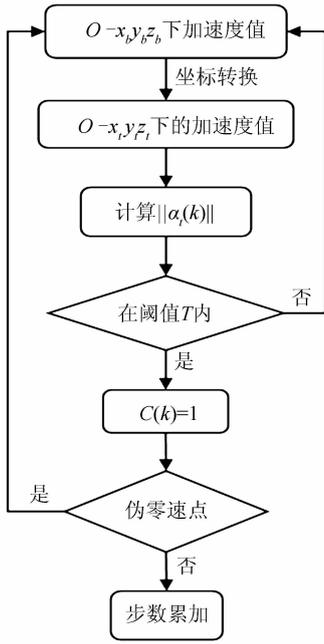


图 6 计步算法流程

Fig. 6 Step Counting Algorithm Process

3 实验与分析

实验所采用的硬件产品和元件佩戴方式如图 7 所示。该硬件产品是美国 Microstrain 公司生产的 3DM-GX3-25 微型航向参考系统,同时集成了三轴加速度计、三轴陀螺仪和三轴磁力计,所有的参数输出都经过温度补偿,保证了元件工作过程中的稳定性。3DM-GX3-25 的数据输出频率从 1 Hz 到 1 000 Hz,适用于各种运动姿态的检测,实验中使用 USB 接口实现 3DM-GX3-25 与计算机进行数据传输。



图 7 实验硬件与佩戴方式

Fig. 7 Hardware and Wearing Mode

将中国矿业大学环境与测绘学院 A 栋 3 楼走廊作为实验场地,实验时利用胶带将测量元件固定在脚面上方,数据采集频率为 50 Hz;算法采用 MATLAB 编程实现。为了验证计步算法的准确性以及对不同运动状态的适应性,开展三种不同的实验:第一种是行人沿走廊直线行走;第二种是行人行走过程中经过两个拐角;第三种是行人行走过程中经过楼梯,利用上述计步算法分别测试 3 种实验场景中的计步效果(试验场景如图 8 所示)。



图 8 三种不同运动状态实验场景

Fig. 8 Three Different Motion State

图 9 显示了 3 种不同运动状态下加速度波形的相应变化,可以看出不同运动状态下的加速度曲线各不相同。直线行走状态由于运动状态比较稳定,加速度呈现出明显的周期性,并且曲线变化比较稳定;行走过程中遇到拐角时,由于脚踝和腿部的旋转,三轴加速度会产生变化,波形也表现出

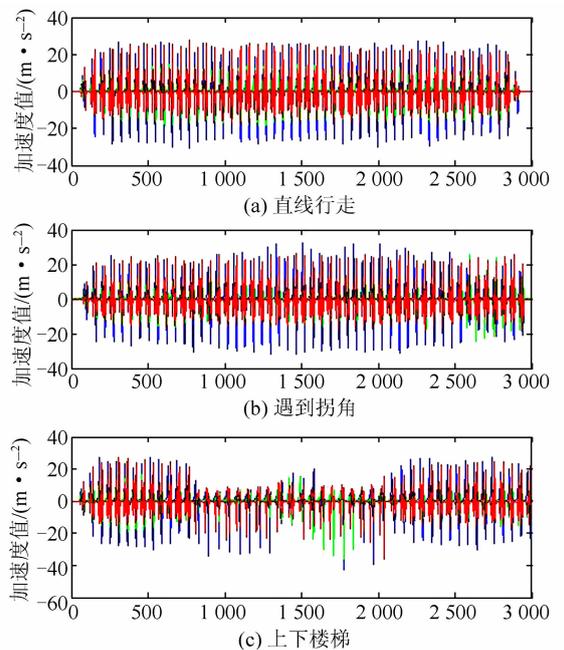


图 9 三种状态下的加速度变化曲线

Fig. 9 Acceleration Curve of Three States

相应的变化;而在行人上下楼梯中加速度变化比较明显,特别是竖轴加速度,如图9所示。

三种状态分别做5次实验,每次实验行走100步,具体的实验结果如表1所示。

表1 计步实验结果

Tab. 1 Step Counting Result

状态	实验次数	实际步数	实验步数	误差步数
直线行走状态	1	100	100	0
	2	100	100	0
	3	100	101	1
	4	100	100	0
	5	100	100	0
经拐角行走状态	1	100	100	0
	2	100	99	-1
	3	100	100	0
	4	100	101	1
	5	100	100	0
经过楼梯行走状态	1	100	99	-1
	2	100	98	-2
	3	100	100	0
	4	100	100	0
	5	100	101	1

虽然三种运动状态差异较大,相应的加速度曲线也各不相同,但是利用加速度量测幅值零速检测进行计步的算法仍然可以准确的统计出行人行走的步数。直线行走状态下几乎可以完全统计出行人行走的步数,计步正确率达到99%以上,经过拐角和楼梯的运动状态也具有较为准确的统计结果,达到了98%以上,实验结果表明该计步算法具有良好的准确性和稳定性。

4 结 语

目前,人员定位技术中利用传统的载波或脉冲信号定位会受到室内环境的影响,导致定位结果不尽人意。本文利用自包含的MEMS惯性测量元件采集加速度信息,设计了基于加速度量测幅值法零速检测的计步算法,并对行人运动状态发生改变时的效果进行实验测试。测试结果表明,该计步算法简单有效,对不同的运动状态具有良好的适应性和稳定性,为人员定位提供了可靠的辅助信息。

参 考 文 献

[1] Luoh Leh. ZigBee-based Intelligent Indoor Positioning System Soft Computing[J]. *Soft Computing*, 2014, 3(18): 443-456

[2] Ye Chencheng, Xiao Jingzhong, Xiao Li. Personnel Positioning System of Underground Mines Based on RFID[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2010(15):146-149(叶晨成, 校景中, 肖丽. 基于RFID的井下人员定位系统[J]. 武汉理工大学学报, 2010(15):146-149)

[3] Zhou Baoding, Li Qingquan, Mao Qingzhou, et al. User Activity Awareness Assisted Indoor Pedestrian Localization[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(6):719-723(周宝定, 李清泉, 毛庆洲, 等. 用户行为感知辅助的室内行人定位[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(6):719-723)

[4] Jimenez A R, Seco F, et al. A Comparison of Pedestrian Dead-Reckoning Algorithms Using a Low-cost MEMS IMU[C]. *IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing*, Washington D C, USA, 2009

[5] Ficco M, Palmieri F, Castiglione A. Hybrid Indoor and Outdoor Location Services for New Generation Mobile Terminals [J]. *Personal and Ubiquitous Computing*, 2014, 18(2):271-285

[6] Lee S, Kim B, Kim H, et al. Inertial Sensor-based Indoor Pedestrian Localization with Minimum 802.15.4a Configuration[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2011, 7(3): 455-466

[7] Pang Han. Design and Realization of a Pedestrian Navigation Device with MEMS Inertial Sensors[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012(庞晗. 基于MEMS惯性器件的徒步个人导航仪设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012)

[8] Han Wenzheng, Feng Di, Li Peng, et al. Design of Pedometer Sensor Based on Acceleration LIS3DH [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2012,31(11):97-99(韩文正, 冯迪, 李鹏, 等. 基于加速度传感器 LIS3DH的计步器设计[J]. 传感器与微系统, 2012,31(11):97-99)

[9] Rai A, Chintalapudi K K, Padamanadhan V N, et al. Zee: Zero-effort Crowd Sourcing for Indoor Localization[C]. *The 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, Singapore, 2012

[10] Yang Hui. Research of High-accuracy Pedestrian Navigation Algorithm Based on MEMS Sensor[D]. Xiamen: Xiamen University, 2014(杨辉. 基于MEMS传感器的高精度行人导航算法研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2014)

automatically obtains the grey threshold through histogram fitting by the Gaussian Mixture Model. The algorithm obtains initial parameters automatically from the image histogram; and then it adjusts these parameters by iteration based on the Expectation Maximum principle. It automatically obtains the grey threshold between cloud and clear sky in a chosen image, in line with the distribution features of the components in the Gaussian Mixture Model. Experimental results show that this method has strong advantages, as the range of the spectral bands are not a limit and thus is suitable for both cloudy and cloudless images. In addition, the proposed method needs no auxiliary information or manual intervention. It has high computational accuracy and efficiency meeting the requirements for automatic engineering production.

Key words: Chinese high resolution satellite imagery; cloud detection; Gaussian mixture model; threshold

First author: KANG Yifei, PhD candidate, specializes in digital photogrammetry. E-mail: 2217707@163.com

Corresponding author: PAN Li, PhD, professor. E-mail: panli@whu.edu.cn

Foundation support: The Major State Basic Research Development National of China (973 Program), No. 2012CB719900; the National Natural Science Foundation of China, No. 41301519.

.....
(上接第 730 页)

Step Counting Algorithm Based on Zero Velocity Update

CHEN Guoliang¹ YANG Zhou¹

¹ School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

Abstract: A variety of indoor positioning technologies have emerged, such as ultrasound, infrared, wireless local area network, bluetooth, radio frequency identification, and ultra wideband. These systems require additional hardware devices and complicated deployment. Pedestrian Dead Reckoning can provide motion information at a high update rate and achieve high precision over a short time duration. However, without external aids, the system suffers from local anomalies and cumulative error after positioning for a longer length of time. Many researchers use a step length model combined with direction information to calculate the displacement of indoor pedestrians with accuracy step counting method. A step counting algorithm based on zero-velocity update was proposed. By analyzing the pedestrian's moving character and posture, acceleration amplitude measurement used to detection the movement stage of pedestrian was employed to calculate steps with Micro Electro Mechanical System (MEMS). The experimental results show that the scheme proposed in this paper was high precise and had good adaptability to different motion state, reporting accurately more than 98% overall, which is appropriate for complex indoor environment.

Key words: step counting; zero-velocity update; MEMS; acceleration amplitude measurement

First author: CHEN Guoliang, PhD, professor, specializes in the theories and methods of indoor position. E-mail: chglcumt@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41371423; the National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFB0502105; the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, No. BK20161181.