

基于惯性导航的平面航迹推算的研究

周 婧¹ 陈庙红² 吴豪杰²

(绵阳师范学院城乡建设与规划学院 绵阳 621000)¹ (西南石油大学计算机科学学院 成都 610500)²

摘要 提出一种基于微机电惯性测量单元的室内定位系统。在本系统中,行人在一个平面上的位置和方向通过计算对人体膝部和腰部佩戴的传感器数据来获取。提出的算法实现了对膝部佩戴陀螺仪的行人行进的步伐进行复位计算以消除角位移误差,同时实现了对腰部佩戴陀螺仪测量的角速率进行连续推算以获取行进方向。结果表明,在一个平面上,行进 62.32m 的总距离时平均误差仅为 0.1935m,标准差为 0.0512m。

关键词 惯性传感器,陀螺仪,行人导航,航迹推算

中图分类号 TP301.6 文献标识码 A

Research on Plane Dead Reckoning Based on Inertial Navigation System

ZHOU Jing¹ CHEN Miao-hong² WU Hao-jie²

(School of Urban and Rural Planning and Construction, Mianyang Teachers' College, Mianyang 621000, China)¹

(School of Computer Science, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)²

Abstract An indoor positioning system based on MEMS inertial measurement unit was presented in this paper. In this system, the position and direction of pedestrians on a plane (zero slope) are obtained by using the sensors to the waist and knees of the human body. The proposed algorithm can execute reset calculation to the moving steps of pedestrians with wearing knee gyroscope so as to eliminate the error of angular displacement, and can execute reset continuous reckoning for the angular rate obtained by testing gyroscope on the waist so as to get moving direction. The results show that, in a plane, the average trajectory error of the total distance of 62.32 meters is 0.1935 meters and the standard absolute deviation is 0.0512 meters.

Keywords Inertial sensor, Gyroscope, Pedestrian navigation, Dead reckoning

1 引言

基于位置的服务具有很好的实用价值和前景。全球定位系统为飞机、汽车和行人提供地理位置服务信息,室外位置已经被广泛使用。然而,针对室内定位,各大领域采用多种技术进行了多年研究。例如基于无线传感网络(蓝牙、WiFi、RFID)的室内定位技术,该解决方案必须在室内布设大量的无线发射,因而未被广泛推广使用。本文提出了一种基于微机电惯性测量单元的室内导航方法。

近年来,国内外一些研究者已经进行了利用惯性传感器来实现个人导航的研究。最简单的解决方案是将一个加速度计佩戴在行人的腰部,该加速度计将测量垂直方向的加速度,然后利用该加速度和行人的步长之间的关系进行行人运动轨迹的推算。但是这种方案不能提供朝向信息,且加速度和步长之间的关系是非线性的,在每个人身上都不一样。另一项研究改进了该方法,其测量行进和垂直两个方向的加速度。这种方案可以通过测量角速度获得朝向信息,但存在因以下的误差导致的不准确的距离推算:轻微的步频变化、身体姿态的变化以及身高、体重的差异。为了尽量减少这些影响,一些研究者提出了足部连接的方法,他们直接通过脚部加速度信息计算步长。也还有一些针对行人导航的其他解决方案:帕尔维·艾宁等人提出了一种采用气压差提供高度数据的方法。

他们的实验结果可以确定人处于的不同楼层。福瑞斯等人开发了一种用于行人运动航迹推算的微机电系统加速度计自动校准方法。刘涛等人采用 3 个组合的陀螺仪分别测量脚、小腿和大腿的速度,并采用一个二轴加速度计测量倾角;在该步行实验过程中,朝向信息方根(有效值)误差的最大值为 16.6,这种较大的误差是源于对脚、小腿和大腿传感器的连续测量产生漂移的影响。

一些研究人员将传感器分别佩戴到两个膝盖、两只脚、腰部和头部。但不难想象这是一个很复杂的系统,有许多繁琐的传感器和电线,不太符合个人导航系统重量轻、功耗低、提供的位置准确,同时较少地依赖于外部源(GPS)的要求。

我们追求的目标是拥有最小数量的传感器和良好的定位精度。为了实现精确的航迹推算,需要精确的距离估计和航向估计。在理论分析和大量的实验后,本研究提出了新的解决方案,该方案将一个陀螺仪佩戴在腰部,另一个佩戴在膝盖。在膝盖上的传感器测量腿摆动的角速度,而在腰部上的传感器测量人体运动的航向角。这样便可以得到距离和朝向信息。

本文第 2 节将描述该导航系统中距离和朝向信息的计算,然后在不同的位置(膝盖和腰部)分别佩戴两个陀螺仪进行航迹推算实验并展示该行人导航系统的性能数据;第 3 节给出实验结果和讨论;最后总结全文。

周 婧(1983—),女,硕士,主要研究方向为定位算法、位置隐私保护;陈庙红(1996—),男,主要研究方向为嵌入式系统开发;吴豪杰(1996—),男,主要研究方向为移动端应用开发。

2 行人导航系统

结果表明,附着在膝关节的陀螺仪能够得到最佳的距离估计,而腰部连接的陀螺仪能够提供最佳的朝向数据^[19]。因此,设计了这样一个行人导航系统,一个陀螺仪连接在腰上以获取朝向数据,另一个连接在膝盖上以获取距离数据。然后,展示了系统的精确度。

2.1 系统硬件组成

所提出的行人导航系统的硬件有两个陀螺仪,它们通过蓝牙模块与智能手机进行数据通信,智能手机进行数据融合和航迹推算以确定行走的人的位置和方向。表 1 列出了系统硬件使用的原件型号。

表 1 本系统组成模块列表

元件	模块型号	功耗	生产商名称
微处理器 I 和 II	RCM 3100	75mA @ 3.3V	Rabbit 半导体
陀螺仪	ADXRS610	3.5mA @ 5.0V	ADI
多路复用器	MAX4617CUE	10 1A @ 5.0V	MAXIM-Dallas Semiconductor
A/D 转换器	LTC1864	0.85mA @ 5.0V	Linear Technology 公司
GPS 模块	GPS15L	85mA @ 5.0V	Garmin 国际公司
RF 模块	AC4490-200M	68mA @ 5.0V	ETC
PDA	Galaxy S5	220mA @ 3.7V	Samsung

2.2 行走距离算法研究

一个三轴陀螺仪佩戴到行人的腿部膝盖以上 3cm 的位置,如图 1 所示。该陀螺仪被用来测量腿运动的角速度。通过对腿部运动每一步的角速度进行积分确定角位移 α 和 β 。在这种情况下,一个正常人的步行功能简化为单平面运动(见图 2)。将一个行人的步长定义为 S ,利用余弦定律得到公式:
 $D^2 = C^2 + C^2 - 2C \times C \times \cos(\alpha + \beta)$,然后解算出步幅长度 D :

$$D = C \sqrt{2 \cdot [1 - \cos(\alpha + \beta)]} \quad (1)$$

其中, α 和 β 是角位移, L 是腿的长度。注意到,因为 L 是一个常数,这是一个等腰三角形,所以 α 等于 β 。

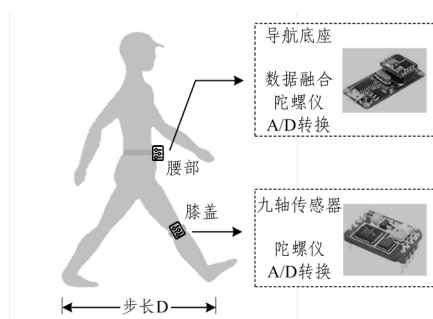


图 1 本导航系统的构造

必须对角速度进行积分才能获得角位移。但是,只要进行积分运算,误差就会积累。为避免该误差,引入一个新的零角位移更新(ZADU)算法。ZADU 的关键思想在于将一个时间周期内的位移值复位到零,这一周期恰好是一个步长。ZADU 算法中的积分单独进行,在每一个时期,这相当于一个单跨。每次积分的初始值总是零,下一步的计算将不包括以前计算中的误差。因此,在随后的计算中误差将永远不会累积超过一个周期。在 ZADU 算法中通过检测出一个完整的跨步周期中角速度的最大值作为角位移的零点。图 3 显示了

zadu 算法的简化流程图,图 4 展示了行人腿部运动的角位移。

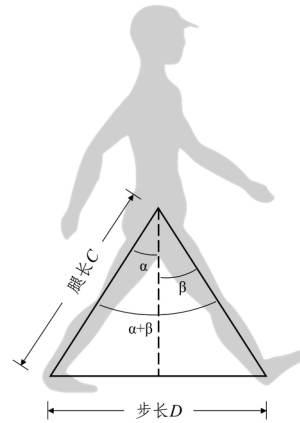


图 2 步行者腿部参数与三角参数

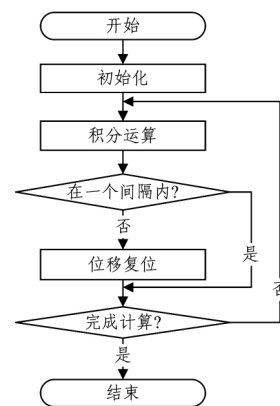


图 3 ZADU 算法简化流程图

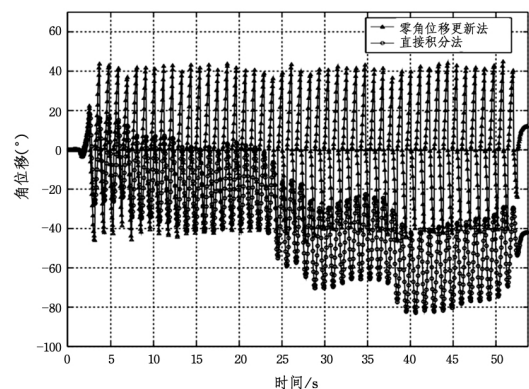


图 4 行人腿部运动角位移

图 5 展示了直接积分法和 ZADU 算法计算的角位移结果。

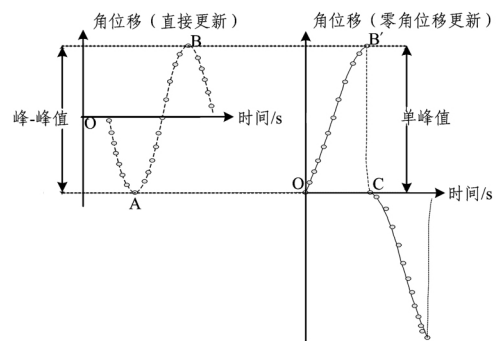


图 5 直接积分法和 ZADU 算法计算的角位移结果

在图4中展示的是腿部运动角位移 $\alpha+\beta$ 的值,使用了直接积分的方法和ZADU算法。因此ZADU算法解得的角位移 $\alpha+\beta$ 值大约是直接积分法值的两倍。为了看到直接积分方法中角位移的变化(带圆圈的线条),需要计算最高峰值,而在ZADU(带三角形的线条)直接积分曲线中位移变化的峰-峰值等于ZADU算法曲线中的单-峰值(见图5)。

从图4中还可以看到,ZADU算法不具有漂移效应,而直接积分法会较大程度偏离零值。因此在所有的实验中,将ZADU算法应用到腿部角位移变化的推算中。最后,便可以通过式(1)计算出行人的步长,再结合总步数 n ,可以计算出行人走过的距离 S :

$$S = \sum_{n=1}^N stride(n) = C \sum_{n=1}^N \sqrt{2 \cdot [1 - \cos(\alpha_n + \beta_n)]} \quad (2)$$

本文进行了20次实验,测试者在膝部佩戴陀螺仪,采用ZADU算法进行路线的距离计算(第四层,明理楼,西南石油大学),规划路线如图6所示。测试结果如表2所列,该测试路线总距离为62.32m(包含两个垂直弯道)。

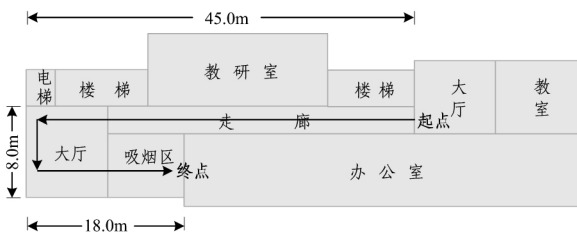


图6 西南石油大学明理楼4楼测试路线

表2 测试者膝部佩戴陀螺仪进行20次距离计算的结果

编号	实验条件	真实步数	测试结果		结果分析	
			步数	距离/m	平均值/m	标准差/m
01		80	80	61.02		
02		80	80	62.31		
03		81	82	62.83		
04		80	80	63.32		
05	恒定速度	80	81	61.89	62.40	0.6465
06		79	78	62.42		
07		81	82	62.51		
08		81	81	62.65		
09		82	82	63.22		
10		80	80	61.83		
11	恒定速度(两次停止)	81	89	63.20	62.61	0.4253
12		81	89	62.33		
13		80	88	62.44		
14		81	89	62.75		
15		81	88	62.30		
16	变化速度	80	80	63.20	61.92	0.3519
17		78	78	61.75		
18		78	78	61.68		
19		78	77	61.85		
20		79	78	62.20		

测得实验路线总长度为62.32m。实验1—实验10在恒定速度条件下进行,实验结果的相对误差是0.13%。实验11—实验15在恒定的步行速度(包含两次停止)的条件下进行,实验结果的相对误差是0.47%。实验16—实验20在步行速度变化的条件下进行,实验结果的相对误差是0.64%。实验的采样率为每秒19.7组数据。从表2中的结果可以分析出每个实验条件下的标准差都小于1m。

注意:在表2的第二种条件下的行走过程中伴随着两次停止,其测量步数比真实步数稍多。ZADU算法的一些错误

是由于步伐停止后又以正向的加速度启动或者负加速度停止导致的。但是实验结果并没有因为角位移偏差而引起较大的平均距离误差,因此通过设置一个阈值来改进ZADU算法以排除该种情况的干扰。

2.3 腰部佩戴陀螺仪的航向信息

测试者将一个陀螺仪佩戴在腰部以进行航向信息测试,佩戴在腰部的陀螺仪提供了角速率数据(见图7)。航向角可通过式(3)得出。

$$\Phi(K+1) = \Phi(K) + \frac{1}{2} [\omega(K) + \omega(K+1)] \frac{1}{f_s} \quad (3)$$

其中, Φ 为航向角($^\circ$), ω 是角速度($^\circ/s$), K 代表任意一个时间点, f_s 为采样率。在芯片上使用一个外部电容器和电阻组合形成一个低通滤波器进行滤波。

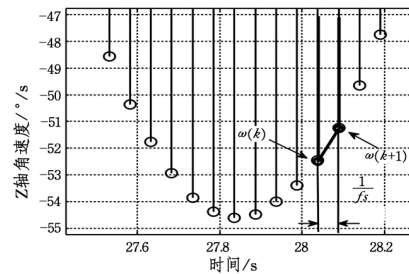


图7 腰部陀螺仪Z轴的角速度

在该系统中不需要绝对航向,因为通过获得的相对测量角速度数值计算出来的是初始航向的相对航向。换句话说,我们的计算方向总是相对于初始航向。测试者在腰部佩戴陀螺仪的航向测试结果如表3所列。

表3 腰部陀螺仪的航向计算的实验结果

实验编号	垂直弯道个数	期望朝向值	实际朝向值	误差	平均一次弯道误差
D01	4	360	366	6	1.5
D02	4	360	353	7	1.8
D03	4	360	368	8	2.0
D04	4	360	351	9	2.3
D05	4	360	355	5	1.3
D06	4	360	355	5	1.3
平均值	4	360	358	6.67	1.7

由于陀螺仪的漂移误差,因此式(3)将在一个连续行走运动中积累误差。表3中的实验结果表明,每转向一次的平均误差为1.7°。此外,误差随着转向次数的增加而累积。

2.4 航迹推算

正如2.2节和2.3节所述,距离和航向角的计算依赖于膝部和腰部佩戴的陀螺仪来实现。距离和角度参数联合估计一个人在xOy平面内位置的X和Y坐标,原点O定义为人的初始位置。Y轴定义为人的初始行进方向,因此一个人的行进方向作为y轴的正方向,其Y轴正方向的右边作为x轴的正半轴,如图8所示。

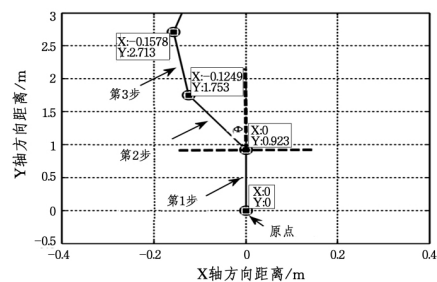


图8 行人的位置

将 i 定义为行走的步数,定义每一步的步幅为 $D(i)$ 和每一步的航向角为 $\phi(i)$, 一个行人的位置可以通过式(4)来确定:

$$\begin{aligned} x(i+1) &= x(i) + D(i+1) \cdot \sin(\Phi(i+1)) \\ y(i+1) &= y(i) + D(i+1) \cdot \cos(\Phi(i+1)) \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $x(0)=Y(0)=0, L(0)=0, H(0)=0$ 。

图 8 显示了航迹推算的一个例子。测试者的初始位置为 $(0,0)$, 第一步结束后, 航向角的结果改变了 0° , 结合第一步的步幅, 使用式(4)得出第一步后的新位置为 $(0, 0.923)$; 在第二步结束后航向角变成 Φ , 根据式(4)更新后的位置为 $(0.1249, 1.753)$; 根据在第三步结束时新航向角的变化值和第三步的步幅更新的位置为 $(0.1578, 2.713)$; 利用本文系统连续计算即可得出行人的航迹。

3 实验结果

实验中行人的位置是根据膝关节陀螺仪得到的距离信息和腰部陀螺仪得到的朝向信息进行推算而得到的。为了验证行人膝盖和腰部佩戴惯性传感器在室内的应用, 进行了一系列的室内实验。在一条有两个弯道的直路上进行测试来验证结果的准确性。测试路线如图 6 所示。

3.1 航迹误差比较

将传感器佩戴在身体的不同部位以进行航迹推算结果比较。在相同的路线分别测试佩戴在脚、腰、膝关节的航迹推算。

结果表明, 膝部连接的 IMU 是最接近真实的距离, 其相对误差为 0.74% ; 腰部 IMU 具有最高的误差, 其与真实值的相对误差为 9.5% 。相比于 IMU 在脚或腰部佩戴 IMU 能够提供最佳的距离数据。我们还得出加速度计将引入显著的漂移误差。总结的结果如图 9 所示。

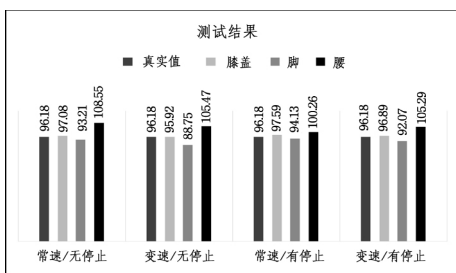


图 9 3 种方案进行距离计算的平均误差比较

拥有 4 个柱形的 3 个测试方案(恒定的速度不停止、可变速度不停止、恒定的速度停止)如图 9 所示。最左边的柱形值是正确的, 所以最接近左边柱形的值就是最好的测试方案。因此在所有情况下, 膝部佩戴的 IMU 提供了最佳的精度、均值以及方差。

3.2 航迹推算误差实验

行人航迹推算实验在一个楼层进行, 在测试者的腰部和膝关节佩戴陀螺仪。图 10 显示了真实轨迹和推算航迹。

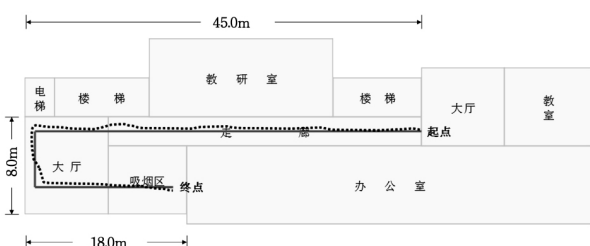


图 10 实际轨迹与推算轨迹比较

表 4 列出了 20 次实验的结果。航迹推算误差是指计算的航迹结果和“真实航迹”之间的平均距离。正如以表 2 中所观察到的, 步行速度的停止或者不停止对最终结果的影响不大, 因此所有的实验都是以恒定的速度进行, 没有停止。

表 4 行人航迹推算实验结果

实验编号	真实步数	实际步数	实际距离/m	航迹误差/m	标准差/m
T1	84	84	61.33	0.1668	
T2	84	83	62.21	0.2107	
T3	83	86	60.63	0.1610	
T4	84	86	61.10	0.2101	
T5	84	87	62.10	0.0761	
T6	84	86	63.27	0.2164	
T7	84	90	63.45	0.1250	
T8	84	85	63.40	0.2334	
T9	84	85	62.56	0.2299	平均误差: 0.1935
T10	84	86	63.12	0.2148	
T11	84	84	61.65	0.2467	
T12	84	83	60.46	0.1534	标准差: 0.0512
T13	84	86	60.10	0.2381	
T14	84	86	62.31	0.2594	
T15	84	86	60.24	0.1566	
T16	84	86	61.02	0.1293	
T17	84	89	62.36	0.2668	
T18	84	85	62.85	0.2128	
T19	84	85	61.90	0.1687	
T20	84	86	62.17	0.1668	

实验路线从图 6 右边为起点, 穿过一条笔直的走廊, 沿着一个矩形进行两个垂直的转弯, 最后穿过另一条笔直的走廊到终点。总的距离为 62.32m , 总的步数约为 84。从图 10 和表 4 可知, 膝关节和腰部佩戴陀螺仪的绝对平均航迹误差为 0.1935m , 标准偏差为 0.0512m , 相对平均航迹误差为 0.31% 。

结束语 本文提出了一个低成本的行人惯性导航系统的设计方案。本文系统将角位移与零角位移更新算法应用于行人的每一步, 利用精确的周期检测算法减小角位移误差。本系统用于室内(包含两个 90° 弯道路线)来测试系统航迹推算精确度。在腰部佩戴陀螺仪以检测航向信息, 并在膝关节佩戴陀螺仪检测距离信息。每转一次弯道, 腰部传感器航向数据仅产生 1.7° 的误差, 而膝部传感器检测的距离仅产生 0.31% 的平均相对误差。进行行人航迹推算的结果与真实位置轨迹的误差来自于陀螺仪的误差。实验结果表明, 在一个平坦的表面上进行行人航迹推算的平均航迹误差为 0.1935m , 标准偏差为 0.0512m 。

参考文献

- [1] AFOXLIN E. Pedestrian tracking with shoe-mounted inertial sensors[J]. Computer Graphics and Applications, IEEE, 2005, 25(6): 38-46.
- [2] JIMÉNEZ A R, SECO F, PRIETO J C, et al. Indoor Pedestrian Navigation using an INS/EKF framework for Yaw Drift Reduction and a Foot-mounted IMU[C]// 2010 7th Workshop on Positioning Navigation and Communication (WPNC). IEEE, 2010: 135-143.
- [3] SAGAWA K, INOOKA H, SATOH Y. Non-restricted measurement of walking distance[C]// IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. 2000: 1847-1852.

[4] SECO F, PRIETO J, GUEVARA J, et al. Indoor pedestrian navigation using an INS/EKF framework for yaw drift reduction and a foot-mounted IMU[C]// Proceedings of 2010 7th Workshop on Positioning Navigation and Communication (WPNC). IEEE, 2010; 135-143.

[5] TITTERTON D, WESTON J L. Strapdown Inertial Navigation Technology[M]. Institution of Electrical Engineers, 2004.

[6] BEBEK O, SUSTER M, RAJGOPAL S, et al. Personal navigation via shoe mounted inertial measurement units[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2010; 1052-1058.

[7] DEN BOGER V, TON A J, et al. Personal navigation via shoe mounted inertial measurement units[C]// Proceedings of 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2010; 1052-1058.

[8] LADETTO Q. On foot navigation: continuous step calibration using both complementary recursive prediction and adaptive Kalman filtering[C]// Proceedings of ION GPS 2000. Alexandria, VA, 2000; 1735-1740.

[9] LEPPÄKOSKI H, KÄPPI J, SYRJÄRINNE J, et al. Error Analysis of Step Length Estimation in Pedestrian Dead Reckoning[C]// Proceedings of ION GPS 2002. Alexandria, VA, 2002; 1136-1142.

[10] 胡正群, 张丽荣. 差分气压测高在室内定位系统中应用的性能分析[J]. 传感技术学报, 2012, 25(10): 1463-1467.

[11] 李昊. 基于三轴加速度传感器的动作分类和步数检测[D]. 天津: 天津大学, 2010.

[12] WAYNE S, WES H. Prototype personal navigation system[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2008, 23(4): 10-18.

(上接第 576 页)



图 4 地图首页



图 5 POI 检索



图 6 规划线路



图 7 定位目的地

结束语 本系统基于 Struts2 框架服务端, 储存用户信息并显示地图所必须的静态信息, 具有完成地图操作、定位和路线的定制等功能, 具有开源性和基于 Linux 的自由性及开放源代码操作功能。该系统主要用于移动设备, 满足特定手机用户等对地图服务的要求, 具有可扩展性和易用性, 系统界面 UI 设计简单明了, 普通移动设备用户很快就能直接操作该程序, 系统程序响应速度快, 安全性高, 信息处理速度快。

本系统为个性化旅游地图导航的发展及应用提供了良好的支持, 适合应用在精准旅游景点导航、旅游城市路径规划、自驾游车辆导航等方面, 具有较好的实用意义和经济价值。

参 考 文 献

[1] 李刚. 疯狂 Android 讲义[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.

[2] 周彩兰, 孙琳, 李素芬. AJAX 在电子地图二次开发中的应用[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2007, 29(7): 49-52.

[3] Clifton. 用户界面设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.

[4] 月影. JavaScript 王者归来[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

[5] PHILLIPS B, HARDY B. 编程指南[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.

[6] 王家林. 大话企业级 Android 应用开发实战[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.