

MEMS-INS 室内行人定位三维地图匹配算法

任明荣^{1,2,3}, 孟娟^{1,2,3}, 王普^{1,2}

(1. 北京工业大学信息学部自动化学院, 北京 100124; 2. 北京工业大学数字社区教育部工程研究中心, 北京 100124;
3. 北京工业大学计算智能与智能系统北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要: 提高基于微机械 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS) 惯性导航系统 (Inertial Navigation System, INS) 的室内行人三维定位精度一直是一个研究热点和难点, 其中器件误差是影响 MEMS-INS 精度的一个棘手问题. 由于器件误差产生的机理十分复杂, 采用现有的修正技术无法准确地对误差进行估计建模, 导致 MEMS-INS 的位置精度不高. 本文从室内环境结构分析入手, 提出了一种三维地图匹配的条件随机场算法. 通过设计导航输出的位姿信息与室内状态点的数学关系, 结合最佳轨迹求取的算法建立室内三维地图匹配的算法模型. 最后通过算法求解出的最佳匹配点坐标修正惯性导航输出的位置误差.

关键词: 微机械惯性导航系统; 室内行人定位; 条件随机场; 室内地图匹配

中图分类号: U666.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021)01-0111-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20180926

MEMS-INS Based Indoor Pedestrian Localization Using Three-Dimensional Map Matching Algorithm

REN Ming-rong^{1,2,3}, MENG Juan^{1,2,3}, WANG Pu^{1,2}

(1. Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. Engineering Research Center of Digital Community, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
3. Beijing Key Laboratory of Computational Intelligence and Intelligent System, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Improving micro-electro-mechanical inertial navigation system based indoor pedestrian localization is a hot and hard topic these days. It is because random errors of MEMS gyroscopes and accelerators are very complicated, and very difficult to model using norm techniques. In this paper, a map matching method based on conditional random fields and indoor 3D map is proposed. The algorithm is designed by establishing the mathematical relationship between the inertial position and the interior points of indoor map, and the optimal trajectory algorithm is used to get the estimated locations. The position errors of inertial navigation are corrected according to the matching points solved by the algorithm.

Key words: micro-electro-mechanical system inertial navigation system (MEMS-INS); indoor pedestrian localization; conditional random fields; indoor map matching

1 引言

室外导航系统不仅关系着人们生活的质量, 还关乎一个国家的国防能力^[1]. 目前, 室外导航系统包括: 全球定位系统 (Global Positioning System, GPS)^[2]、北斗导航系统^[3]、伽利略导航系统^[4], 这些卫星导航系统保证了室外定位的精度. 而室内导航系统作为卫星导航系统的“最后一公里”, 承担着环境服务生活、室内物流、智慧病房等场所中重要的责任^[5]. 但是室内环境阻碍了卫星信号, 室外定位系统不能直接用在室内^[6]. 近些年, 室内定位技术快速发展, 室内定位方式层出不穷.

其中, 惯性传感器依据任何物体都具有惯性的原理进行器件设计, 这种传感器不依赖外界信号 (如 GPS), 也不需要室内预先搭建网络, 通过测量所附着的载体的运动信息对物体进行定位, 因此惯性导航系统具有很高的安全性能^[7,8]. 室内行人导航多采用 MEMS-INS 作为室内定位的主要技术, 但位姿求解是一个积分的过程, 微小的器件误差都会随时间快速累积最终导致定位失败^[9,10].

因此, 惯性导航系统需要其他的一些算法和定位技术辅助室内行人定位. 目前主要辅助手段包括: 零速

检测与修正^[11]、粒子滤波算法^[12]、组合导航^[13]、误差标定技术^[14]等。然而,零速检测与修正只能修正俯仰角和横滚角误差,不能修正航向角误差;粒子滤波算法将位置和方位角作为状态,利用一步位移建立状态转移方程,使用一组带权值的粒子逼近状态的后验概率密度,用粒子是否穿墙作为观测对粒子的权值进行修正,将穿墙粒子的权值置零,并将粒子的加权平均作为系统状态的估计。文献中的试验结果表明采用粒子滤波进行建筑图匹配可以明显提高定位精度^[15]。但每行走一步都要将每个粒子与整个建筑图中的所有墙壁进行配对检测是否穿墙,这需要耗费大量的计算时间;组合导航虽然可以很好地修正位置误差,但室内能用于定位的传感器有限,无线定位会破坏惯性导航自主定位的优势^[16];误差标定算法被广泛的应用到导航系统中,而这种误差修正算法对器件有较高得要求。消费级惯性器件,由于误差与地球自转角速度处在同一个等量级,因此误差标定对于修正这样精度的惯性导航器件并无实质性意义。因此,上述修正算法不能很好的解决惯性导航系统误差的问题^[17]。

针对上述修正算法中出现的问题,文中设计了一种基于 MEMS-INS 的室内三维地图匹配方法。它采用条件随机场作为主要算法,结合行人行走的特征及导航输出的数据,判断行人当前时刻最大概率的行走轨迹。行人行走平面与楼梯时所展现的特征不同,建立的地图匹配模型中采用二维位置与高度分开匹配的方式,最后,根据临近时刻的方法将二维位置与高度信息进行数据融合。实验结果表明,文中提出的基于 MEMS-INS 的室内三维地图匹配方法很好的拟合了行人的三维轨迹信息。

2 地图匹配系统结构

本节是为了更好的解释所设计的匹配方法,设计了地图匹配系统的结构图,结构图如图 1 所示。从图中可以看出,该系统包括三层:度量层、匹配层和输出层。度量层是依据完整的惯性器件单元(Inertial Measurement Unit, IMU)测量出的数据,通过测漂、零速修正、捷联解算得到行人位姿信息的过程;匹配层是地图匹配模型建立的一层,它主要内容为:提取二维位置信息与高度信息观测点,结合地图信息建立特征方程,并将方程代入条件随机场(Conditional Random Field, CRF)模型,最后估计相应的行人最大概率位置序列;输出层输出行人的三维位置轨迹,行人的三维位置坐标是在二维位置估计与高度估计完成后,采用临近时刻的位置融合方式得到的,行人的三维位置信息不仅要呈现在地图上,同时匹配的二维与高度位置信息还将作为一个修正量修正度量层输出的位置信息。

度量层所涉及的算法相关文献中都有介绍,在此

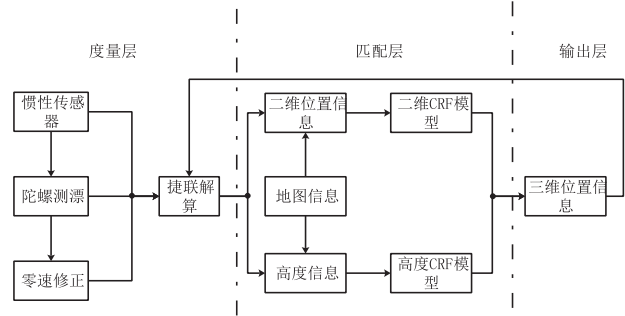


图1 地图匹配系统的结构图

不再赘述。下小节根据文章最主要的工作进行展开,主要介绍了地图预处理、特征方程、两个 CRF 模型与位置数据融合。

3 室内地图匹配模型

文中采用线性链条件随机场算法^[18]作为室内地图匹配的主要数学模型,首先介绍该模型一些基础知识。线性链条件随机场模型如图 2 所示。

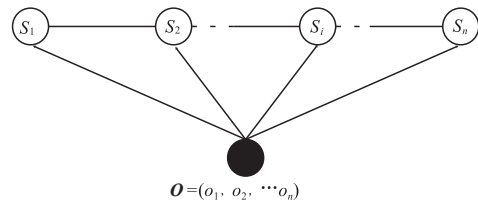


图2 线性链条件随机场

假设模型中的观测点序列为 o , 状态点序列为 s , 在观测点条件下的状态点的概率为 $p(S|O)$ 。根据条件随机场数学模型可知概率求解的数学等式如式(1)所示:

$$p(s|z, \lambda) = \frac{1}{Z(z)} \exp\left(\sum_i \lambda_i g_i(s_{k-1}, s_k, z, i)\right) \quad (1)$$

其中,函数 g 表示转移特征函数,表示从 $k-1$ 时刻状态到 k 时刻所有状态的可能性; λ 表示各个函数对应的权值; Z 表示归一化因子其表达式如等式(2)所示:

$$Z(z) = \sum_s \exp\left(\sum_{k=1}^n \sum_i \lambda_i g_i(s_{k-1}, s_k, z, i)\right) \quad (2)$$

假设 s^* 表示匹配的最大概率的行人轨迹,则求解的最大概率的序列可表示为:

$$p(s^*|z, \lambda) = \max(p(s|z, \lambda)) \quad (3)$$

通过建立导航输出与状态点之间的数学关系,将导航求解的问题转变成一个最优路径求解的问题,假设存取观测点的滑动窗口为 5 个,与每个观测点对应的状态点为 n 个,其图形表达如图 3 所示。

求解出的概率回溯最大的概率序列如式(4)所示:

$$\begin{aligned} s^* &= \arg \max_s p(s|o) \\ &= \arg \max_s \left(\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^k \lambda_i f_i(s_{j-1}, s_j, o, i) \right) \end{aligned} \quad (4)$$

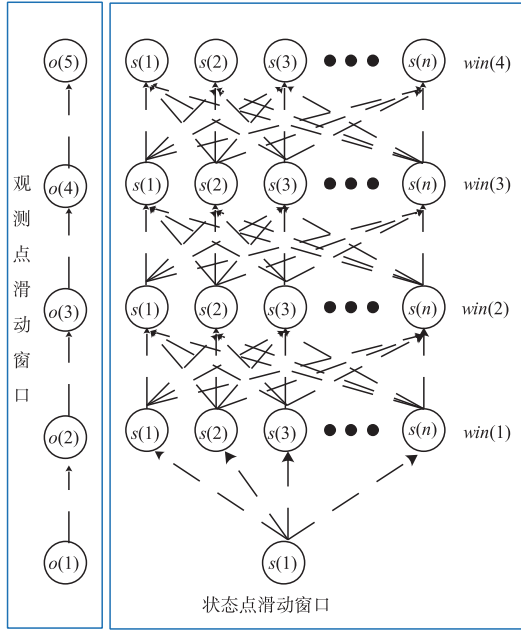


图3 观测点与状态点滑动窗口

3.1 地图预处理

地图数字化是在室内地图已知的条件下,对得到的图片格式的地图进行数字化处理,并在数字地图的基础上布置状态点.采用软件 mapinfo,根据标定、投影、描写与数据表导出得到室内结构的数字信息,数字信息格式为每一条直线的端点坐标.求取电子地图中数值最小与最大的坐标点作为状态点的取值范围以等间距的状态点覆盖整个范围,存储所有状态点坐标信息.根据最大、最小的求解方式求解电子地图中数值最小与最大的坐标点.

$$p_{\min} = (x_{\min}, y_{\min}) = \min(X, Y) \quad (5)$$

$$p_{\max} = (x_{\max}, y_{\max}) = \max(X, Y) \quad (6)$$

其中, (p_{\min}, p_{\max}) 表示状态点所覆盖范围的最小、最大位置点; (X, Y) 表示所有电子地图的坐标信息.根据最大、最小位置点可以得到状态点的分布范围为:

$$r_1 = p_{\min} = (x_{\min}, y_{\min}) \quad (7)$$

$$r_2 = (x_{\min}, y_{\max}) \quad (8)$$

$$r_3 = (x_{\max}, y_{\min}) \quad (9)$$

$$r_4 = p_{\max} = (x_{\max}, y_{\max}) \quad (10)$$

其中, (r_1, r_2, r_3, r_4) 表示状态点矩阵范围的四个顶点坐标.状态点坐标求解,选取 D 最小的坐标点作为第一个状态点,选取长度作为状态点之间的间隔,其模型如下:

$$s_1(0, 0) = r_1 \quad (11)$$

$$s_s = (i_s, j_s) = r_1 + (i_s \times D, j_s \times D) < r_4 \quad (12)$$

其中, s_s 为所有的二维状态点总称;表示 (i_s, j_s) 状态点存储的状态.

根据上述方法,创建每一层楼的二维平面状态点.楼

梯高度状态点的创建是根据室内地图结构计算出楼道的范围,在该范围内二维状态点如式(12)所示,高度状态点为台阶的高度,所创建的状态点如后文中图5所示.

3.2 特征提取与建模

根据行人行走二维平面与台阶时的不同特征将惯性导航输出的三维位置信息分开建模.行人行走二维平面时随机性很大,步长、方向等都会影响匹配的状态点.为了限制这种随机性可能产生的匹配误差,算法中加入状态点选择的限制条件(如后文中式(13)).行人行走台阶时每一步均落在台阶上,高度变化量随机性较小.每一步跨过的高度是一个定值,此定值的范围为行人一步可跨过的台阶数.惯性导航输出的三维信息经过分解得到二维与高度两部分位置信息,依据不同的观测点的提取方式提取二维与高度信息.

3.2.1 二维位置特征提取与建模

二维位置观测点采用行人行走一定的长度作为观测点的提取方式,相对位置达到这个阈值时提取当前行人所在的位置坐标.

$$\sqrt{((x(i) - x_{n-1}^{ob1})^2 + (y(i) - y_{n-1}^{ob1})^2)} = L \quad (13)$$

其中, $(x(i), y(i))$ 表示 i 时刻惯性导航系统输出的二维位置坐标; $(x_{n-1}^{ob1}, y_{n-1}^{ob1})$ 表示 $n-1$ 个二维位置观测点坐标; L 表示上述阈值.当满足式(13)时,提取当前导航输出的位置坐标,数学表达式如下:

$$\begin{cases} x_n^{ob1} = x(i) \\ y_n^{ob1} = y(i) \end{cases} \quad (14)$$

同时,存储该信息对应的时刻,作为三维位置坐标融合依据.

$$t_1 = i \quad (15)$$

在行走距离为固定值时,下一时刻的位置还由方位角决定.因此,选取方位角作为模型的第一特征.假设 θ 表示方位角,其数学模型可表示为:

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{y_n^{ob1} - y_{n-1}^{ob1}}{x_n^{ob1} - x_{n-1}^{ob1}}\right) \quad (16)$$

根据 θ 与 $n-1$ 到 n 时刻状态点之间的方位角数学关系建立特征方程.

$$g^{ob1}(s_{n-1}, s_n, o_n^{ob1}) = \ln \frac{1}{\sigma_\theta \sqrt{2\pi}} - \frac{g(\theta)}{2\sigma_\theta^2} \quad (17)$$

$$g(\theta) = z_n^{ob1} - \delta\theta(s_{n-1}, s_n) \quad (18)$$

其中, g^{ob1} 表示方位角特征函数; (s_{n-1}, s_n) 分别表示 $n-1$, n 时刻状态点坐标; $o_n^{ob1} = \theta$; σ_θ^2 表示 o_n^{ob1} 误差的协方差.

匹配后的位置修正惯性导航输出的位置坐标,每次的修正使得估计位置更加接近真实的位置.因此,文中选择位置坐标作为第二个特征.

$$f^{ob1}(s_n, z_n^{ob1}) = \ln \frac{1}{\sigma_c \sqrt{2\pi}} - \frac{f^c(s_n, z_n^{ob1})}{2\sigma_c^2} \quad (19)$$

其中, f^{ob1} 表示位置特征函数; f^c 表示观测点与状态点之间的位置关系, 可表示为式(20):

$$f^c(s_n, z_n^{ob1}) = \sqrt{(s_n^x - z_{nx}^{ob1})^2 + (s_n^y - z_{ny}^{ob1})^2} \quad (20)$$

其中, (s_n^x, s_n^y) 表示状态点的 x, y 坐标; $(o_{nx}^{ob1}, o_{ny}^{ob1})$ 表示观测点的 x, y 坐标; σ_c^2 表示状态点与观测点之间距离误差的方差.

3.2.2 高度位置特征提取与建模

人行行走台阶时, 高度变化量为台阶的整数倍, 当满足式(21)时, 提取高度信息.

$$\begin{cases} v(i) = 0 \\ v(i+1) \neq 0 \end{cases} \quad (21)$$

其中, $v(i)$ 表示 i 时刻速度, 当上述等式成立时提取该时刻的位置坐标:

$$\begin{cases} x_m^{ob2} = x(i) \\ y_m^{ob2} = y(i) \\ z_m^{ob2} = z(i) \end{cases} \quad (22)$$

同时, 存储该信息对应的时刻, 作为三维位置坐标融合依据.

$$t_2 = i \quad (23)$$

惯性导航误差导致的高度误差不可以通过误差修正技术得到很好的抑制, 但每一步所产生的误差相对较小, 根据导航输出的高度信息与状态点之间的高度信息进行高度匹配. 选取每一步行人的跨过的高度作为第一特征. 结合台阶的高度信息进行数学建模.

$$g^{ob2}(s_{m-1}, s_m, z_m^{ob2}) = b(s_{m-1}, s_m) \times g^h(s, z_m^{ob2}) \quad (24)$$

其中, g^{ob2} 表示根据高度观测点建立的特征方程; g^h 表示状态点高度与观测的高度之间的数学关系; $b(s_{m-1}, s_m)$ 表示高度的限制条件. 假设每个台阶的高度为 h , 行人能一步能跨过 N 个台阶, $b(s_{m-1}, s_m)$ 可表示为:

$$b(s_{m-1}, s_m) = \begin{cases} 1, & |s_m - s_{m-1}| < N \cdot h \\ 0, & |s_m - s_{m-1}| > N \cdot h \end{cases} \quad (25)$$

$$g^h(s, z_m^{ob2}) = \ln \frac{1}{\sigma_h \sqrt{2\pi}} - \frac{(z_m^{ob2} - h(s_{m-1}, s_m))^2}{2\sigma_h^2} \quad (26)$$

其中, $h(s_{m-1}, s_m)$ 表示 $m-1$ 时刻状态与 m 时刻状态之间的高度; σ_h^2 表示高度与状态点之间的误差方差.

为了进一步减小高度误差产生的匹配误差, 根据高度误差的特征, 结合每次误差对匹配产生的影响建立特征方程. 求取之前时刻误差协方差:

$$C = \sqrt{\sum_{j=1}^{m-1} (\delta z_j - \bar{\delta z})^2} \quad (27)$$

$\bar{\delta z}$ 表示观测点的高度与最佳匹配高度之间误差的平均值. 此协方差作为高度匹配的特征进行数学建模, 如式(28)和式(29). 根据导航输出与各个状态点之间的差, 结合当前行人跨越的高度对状态点进行选取:

$$g^{\delta h}(s_m, z_m^{ob2}, C) = \ln \frac{1}{\sigma_h \sqrt{2\pi}} - \frac{g^c(s_m, z_m^{ob2}, C)}{2\sigma_h^2} \quad (28)$$

$$g^c(s_m, z_m^{ob2}, C) = (z_m^{ob2} - s_m) - C \quad (29)$$

将上述特征带入条件随机场数学模型, 利用维特比算法求解每一个最大概率的状态点序列.

3.3 位置信息融合

利用二维位置最佳匹配的状态序列查询相应的观测序列的采样时间进行存储, 同时利用高度最佳匹配状态序列查询相应观测序列的采样时间进行存储. 利用临近时间的方法对二维最佳匹配点与高度最佳匹配点进行组合.

$$t = |t_1(n) - t_2(m)|, \quad n=1, 2, \dots, m \quad (30)$$

其中, 要求 $0 < n < m$, 找出 t 中最小的值, 并标记为 n^{\min} .

$$s(n) = s^*(n) \quad (31)$$

融合后的三维位置坐标一方面作为导航输出, 另一方面对捷联输出位置进行修正. 为了验证算法的有效性, 进行了实验验证. 以某室内办公环境为例, 实验场所包括走廊, 楼道两种室内环境.

4 实验验证

实验之前, 首先介绍惯性导航器件数据采集系统. 采集系统包括硬件和软件两个部分. 硬件选用荷兰 Xsens 公司的集成 MTI 系统, 数据采集软件选用该公司提供的 MT Manager 软件. 根据文中地图匹配算法所针对的室内环境进行实验设计, 实验场所选取北京工业大学科学楼内的十层到十二层.

4.1 地图数字化处理与设计

地图数字化是在室内地图已知的条件下, 对得到的图片格式的地图进行数字化处理, 并在数字地图的基础上布置状态点. 采用软件 mapinfo, 根据标定、投影、描写与数据表导出得到室内结构的数字信息, 数字信息格式为每一条直线的端点坐标. 数字地图与图片格式点图如图 4 所示.

图 4 的红色轨迹也是北京工业大学科学楼 10 层平面结构图, 实验中行人从 10 层走廊行走一圈经过楼梯到达 12 层再行走一圈. 12 层室内结构与 10 层的结构基本相同. 根据室内数字化地图与台阶高度, 结合论文中状态点与电子地图的关系进行状态点设计, 如图 5 所

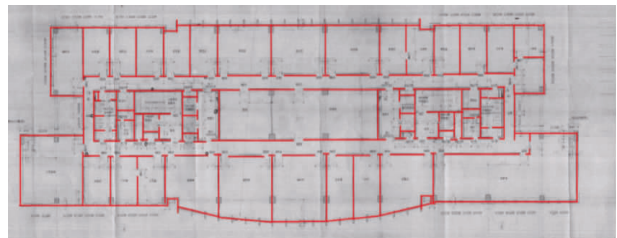


图4 数字地图与图片格式点图对比图

示. 图中红色线为室内结构图, 蓝色标记为状态点.

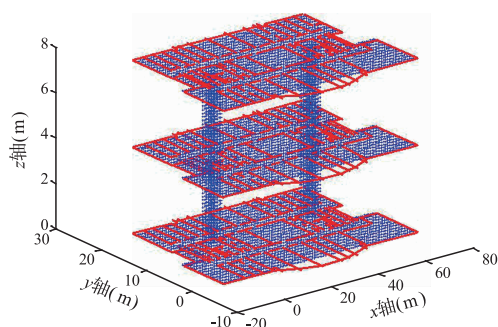


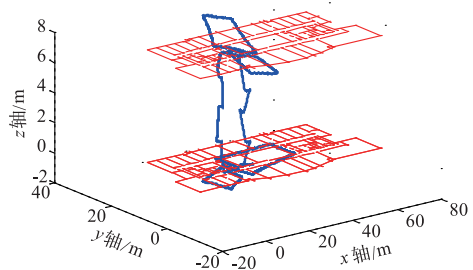
图5 文中三维状态点设计

4.2 室内地图匹配实验设计

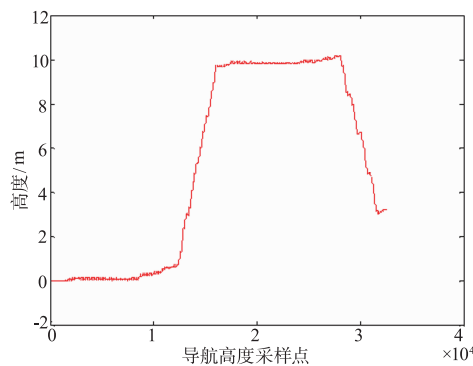
为了验证文中设计的高度信息匹配算法的正确性设计了以下实验, 实验场地选取科学楼 10 层到 12 层环境包括了楼层与楼道的环境. 采用 MTI 器件采集行人

信息. 图 7 为导航系统输出的结果, 由图 6(a)可以看出无论水平定位还是高度定位, 惯性导航输出的位置信息与实际行走的路线严重不符, 定位结果发散; 单独将高度信息提取出来如图 6(b)所示, 起始高度与终点高度. 单从终止的时刻的高度信息就可发现高度位置信息存在很大的误差, 因此误差修正是必要的. 图 6(c)给出了气压计测得的相对高度, 通过观察此图发现气压计求解的高度位置信息会在一个值的附近波动, 气压计的值在平均值的周围波动幅度为 $\pm 1.5\text{m}$, 求取此段时间的高度的方差 0.26m , 由于台阶的高度为 0.16m , 这样的精度不能识别一个台阶的高度变化, 不能满足高度匹配的要求.

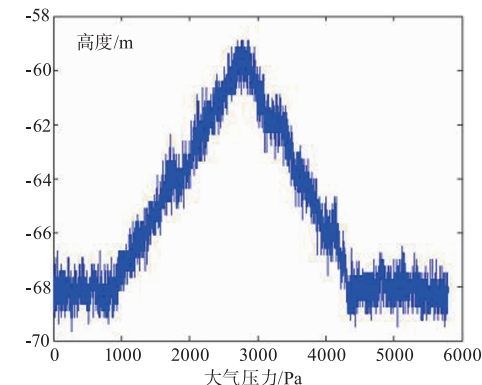
图 7 为地图匹配输出结果图, 根据图 7(a), 在室内三维环境下经过误差修正与地图匹配后的行人轨迹不存在不合理的点, 为了更加清晰的分析匹配效果将高



(a) 惯性导航输出行人轨迹

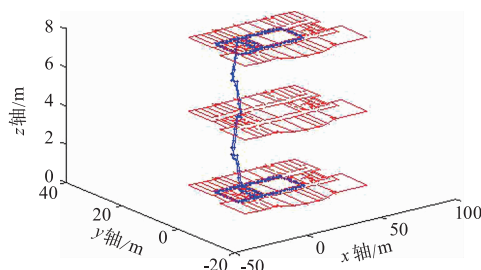


(b) 惯性导航输出高度信息

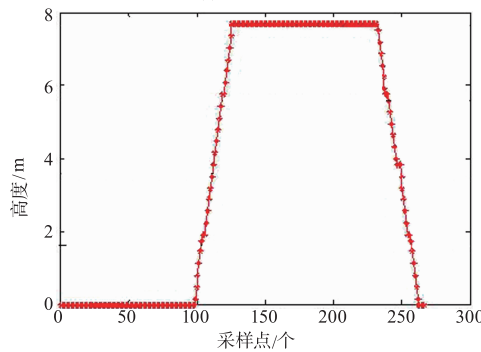


(c) 气压计求解高度信息

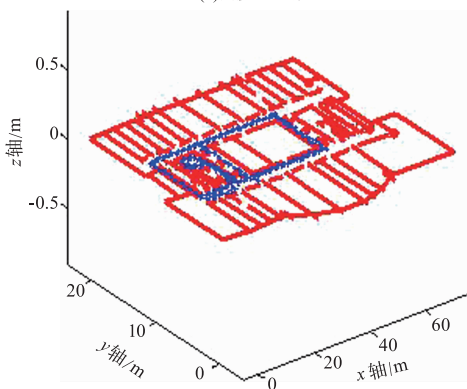
图6 高度信息求解结果



(a) 三维匹配效果



(b) 高度匹配效果



(c) 二维位置匹配效果

图7 高度匹配结果

度与二维位置信息分开分别如图 7(b) 与图 7(c) 所示. 根据每一个高度最初与最终的位置可知高度匹配可以完全得到了修正, 由于楼层的内部结构相似, 因此可以将三个楼层直接叠加到一块, 将三维的信息压缩成二维信息如图 7(c) 所示, 得到的结果可以看出, 每一次的匹配都在合理的区域.

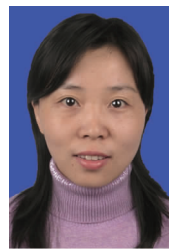
5 总结与展望

本文提出了一种基于条件随机场的地图匹配算法. 采用二维位置与高度分开匹配的方式, 将惯性导航解算出的位置信息与经过处理后的地图信息应用到条件随机场的模型之中. 充分利用了行人行走不同区域的特点, 采用不同观测点的提取方式. 二维平面行走时, 以定长的行走距离作为条件随机场观测量选取的依据; 行走楼梯时, 以步长作为条件随机场观测量选取的依据, 并为每个观测点提供可能的状态点. 采用 Viterbi 算法找出窗口内最佳的匹配点, 最后根据临近时刻的方法对二维位置与高度进行融合. 本文结合实际的室内环境, 对算法进行实验验证. 实验结果表明了本文提出的地图匹配算法具有良好的地图匹配效果.

参考文献

- [1] Wang X, Zhang Q, Zhang S. Azimuth selection for sea level measurements using geodetic GPS receivers[J]. *Advances in Space Research*, 2018, 61(6): 1546 – 1557.
- [2] Li Z, Pei Q, Markwood I, et al. Location privacy violation via GPS-agnostic smart phone car tracking[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(6): 5042 – 5053.
- [3] Jin S, Qian X, Wu X. Sea level change from bei dou navigation satellite system-reflectometry (BDS-R): First results and evaluation[J]. *Global & Planetary Change*, 2017, 149: 20 – 25.
- [4] Huang G, Cui B, Xu Y, et al. Characteristics and performance evaluation of Galileo on-orbit satellites atomic clocks during 2014-2017[J]. *Advances in Space Research*, 2018, 63(9): 2899 – 2911.
- [5] Rehman U, Cao S. Augmented-reality-based indoor navigation: a comparative analysis of handheld devices versus google glass[J]. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2017, 47(1): 140 – 151.
- [6] Diakité A A, Zlatanova S. Spatial subdivision of complex indoor environments for 3D indoor navigation[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2018, 32(4): 1 – 23.
- [7] Fan Q, Sun B, Sun Y, et al. Performance enhancement of MEMS-based INS/UWB integration for indoor navigation applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(10): 3116 – 3130.
- [8] Goel S, Kealy A, Gikas V, et al. Cooperative localization of unmanned aerial vehicles using GNSS, MEMS inertial, and UWB sensors[J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2017, 143(4): 04017007. 1-04017007. 18.
- [9] Nourmohammadi H, Keighobadi J. Decentralized INS/GNSS system with MEMS-grade inertial sensors using QR-factorized CKF[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(11): 3278 – 3287.
- [10] EL Hinüber V, C Reimer, T Schneider, et al. INS/GNSS integration for aerobatic flight applications and aircraft motion surveying[J]. *Sensors*, 2017, 17(5): 941.
- [11] Ren M, Pan K, Liu Y, et al. A novel pedestrian navigation algorithm for a foot-mounted inertial-sensor-based system[J]. *Sensors*, 2016, 16(1): 139.
- [12] Alexandros B, Dan C, Ajay J, et al. A stable particle filter for a class of high-dimensional state-space models[J]. *Advances in Applied Probability*, 2017, 49(1): 24 – 48.
- [13] Jaradat M A K, Abdel-Hafez M F. Non-linear autoregressive delay-dependent INS/GPS navigation system using neural networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(4): 1105 – 1115.
- [14] Wagner R P, Fick S E. Pressure reciprocity calibration of a MEMS microphone. [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2017, 142(3): EL251 – EL257.
- [15] Yu C, El-Sheimy N, Lan H, et al. Map-based indoor pedestrian navigation using an auxiliary particle filter[J]. *Micromachines*, 2017, 8(7): 225.
- [16] Lyubopytov V S, Porfirev A P, Gurbatov S O, et al. Simultaneous wavelength and orbital angular momentum demultiplexing using tunable MEMS-based fabry-perot filter[J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 9634 – 9646.
- [17] Sun Z, Li G, Chen L, et al. A High-consistency broadband MEMS-based electrochemical seismometer with integrated planar microelectrodes[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2017, 64(9): 1 – 7.
- [18] Truyen T T, Phung D Q, Bui H H, et al. Hierarchical semi-markov conditional random fields for recursive sequential data[J]. *Artificial Intelligence*, 2017, 1: 1657 – 1664.

作者简介



任明荣 (通信作者) 女, 1977 年出生. 毕业于北京理工大学, 获工学博士学位, 现为北京工业大学自动化学院讲师, 主要从事室内机器人导航定位、计算机视觉等方面的研究工作.
E-mail: bjut_renmingrong@sohu.com