

基于隐马尔可夫模型的可见光与惯导融合室内定位系统

陈勇^{1*}, 巫杰¹, 刘焕淋², 郑瀚¹

¹重庆邮电大学工业物联网与网络化控制教育部重点实验室, 重庆 400065;

²重庆邮电大学光纤通信技术重点实验室, 重庆 400065

摘要 针对大型室内场所用户移动定位复杂度较高、定位精度较低和定位不合理等问题,提出一种基于隐马尔可夫模型的可见光与惯导融合定位算法。首先在离线建库阶段建立室内停车场地图和定位指纹图,采集每个参考节点的可见光接收信号强度和节点间的距离与角度,建立隐马尔可夫模型。其次,在在线定位阶段,根据用户最大移动速度减小状态转移候选集,并获取可见光信号和运动信息。最后,利用改进的维特比算法进行用户轨迹匹配定位。仿真结果表明:所提算法在 2500 m² 室内停车场中能准确预测用户的运动轨迹,参考节点的预测准确率约为 85%,平均定位误差约为 3.35 m;与其他 4 种定位算法相比,所提算法的定位轨迹连续、更平滑、精度更高。

关键词 光通信; 惯性导航; 隐马尔可夫模型; 融合定位; 维特比算法

中图分类号 TN92

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1206001

Visible Light and Inertial Navigation Fusion Indoor Positioning System Based on Hidden Markov Model

Chen Yong^{1*}, Wu Jie¹, Liu Huanlin², Zheng Han¹

¹Key Laboratory of Industrial Internet of Things & Network Control, Ministry of Education, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

²Key Laboratory of Optical Fiber Communication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract Aiming at the problems of high mobile positioning complexity, low positioning accuracy, and unreasonable positioning for users in large indoor places, a visible light and inertial navigation fusion positioning algorithm based on the hidden Markov model is proposed in this work. First, the indoor parking lot map and positioning fingerprint in the off-line database construction stage are established, the visible light receiving signal strength of each reference node and the distance and angle between the nodes are collected, and a hidden Markov model is established. Then, in the online positioning stage, the candidate set of state transfer is reduced according to the user's maximum moving speed, and the visible light signal and motion information are obtained. Finally, an improved Viterbi algorithm is used for user trajectory matching and positioning. Simulation results show that the proposed algorithm can accurately predict the user's trajectory in an indoor parking lot of 2500 m², the prediction accuracy of the reference node is about 85%, and the average positioning error is about 3.35 m. Compared with other four positioning algorithms, the positioning trajectory of the proposed algorithm is more continuous and smooth with higher accuracy.

Key words optical communications; inertial navigation; hidden Markov model; fusion positioning; Viterbi algorithm

OCIS code 060.4510; 350.4600

收稿日期: 2020-06-04; 修回日期: 2020-07-02; 录用日期: 2020-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(51977021)、重庆市自然科学基金面上项目(cstc2019jcyj-msxmX0613, cstc2020jcyj-msxmX0682)

* E-mail: chenrong@cqupt.edu.cn

1 引 言

统计发现,人类超过一半的活动是在室内进行,诸如图书馆、医院、超市和地下停车场等大型室内场所,因此室内定位导航服务需求日益增多^[1]。目前全球定位系统和北斗定位系统等主要应用于室外定位,卫星信号传播途中会被建筑物干扰,导致卫星信号变弱,无法实现室内定位。现今,室内定位技术普遍基于无线通信,例如 Wi-Fi、蓝牙、射频识别等,无线信号在室内环境中易受到电磁干扰,导致定位精度降低,同时设备能耗较高,有一定的局限性^[2-3]。

可见光通信(VLC)作为一种新兴的定位技术成为研究热点^[4-6]。在室内定位中,多径干扰和障碍物遮挡等因素使接收信号不准确,降低了定位精度^[7];Xu等^[8]利用可见光接收信号强度进行指纹的定位,该方法需要在离线阶段采集指纹,当环境发生改变和接收信号不准确时,定位误差较大;对此,赵楚韩等^[9]提出了一种改进的可见光指纹定位法(VLCFM),提高了室内定位精度,但对于面积较大的定位场景,随着距离的增大定位精度容易受到影响,且指纹过多会造成区分度较低;刘春燕^[10]提出改进惯性导航定位算法(INPM),提高了行人室内定位的精度,当定位场景面积较小时,累积误差不可避免;李新春和王欢^[11]提出一种基于稀疏指纹采集和改进加权K最近邻(weighted K-nearest neighbor, WKNN)的定位算法,解决了位置指纹定位算法中指纹采集工作量大、定位精度低的问题;Li等^[12]使用粒子滤波器作为融合定位算法,对可见光与惯导技术进行融合;粒子滤波融合定位与卡尔曼滤波的方法类似,但是其精度更高,该方法的缺点是需要加入地图匹配来限制不合理的粒子;Zhu等^[13]将算法与地图匹配进行融合,利用空间信息解决了定位的不合理性,

但地图匹配计算复杂,造价昂贵,不适用于普遍使用。

针对上述存在的问题,将隐马尔可夫模型(HMM)作为定位模型^[14],并将可见光定位技术与惯性导航定位技术进行融合,实现室内停车场移动用户定位。在离线建库阶段,建立室内停车场地图和定位指纹图,采集每个参考节点的可见光接收信号强度、节点间的距离与角度信息,建立隐马尔可夫模型;在在线定位阶段,根据用户最大移动速度减小状态转移候选集,利用获取的可见光信号和运动信息并采用改进的维特比算法进行用户轨迹匹配定位。

2 融合定位模型的建立

大型场所的定位和导航是紧密相关的,需要利用系统所建立的地图让用户清晰地知道自己的位置和想要到达的地方。为此,图1中以停车场为例,以采集可见光接收信号强度(VLC-RSS)为基础并结合惯导数据,建立隐马尔可夫模型的室内指纹地图,图1中可到达区域和不可到达区域是分开的,所有标志处都对应一个参考节点,其覆盖的区域为有效区域,每个参考节点的指纹为

$$S = \{L, I, R_{RSS}\}, \quad (1)$$

式中: L 为节点在真实环境的二维位置点; I 为该节点的空间信息,如车位号、出入口、电梯号等; R_{RSS} 为可见光接收信号强度。

每个参考节点之间的距离 D 和角度 θ 分别为

$$D = \{d_{ij} \mid i, j \in S\}, 1 \leq i, j \leq N, \quad (2)$$

$$\theta = \{\theta_{ij} \mid i, j \in S\}, 1 \leq i, j \leq N, \quad (3)$$

式中: d_{ij} 为节点 i 到节点 j 的距离; θ_{ij} 为节点 i 到节点 j 的角度; S 为隐藏节点集合; N 为所有节点的数量; i, j 为自然数。

传统的指纹定位方法的复杂度较高,且较难实现对大型场所中用户的移动定位,对此本文提出采

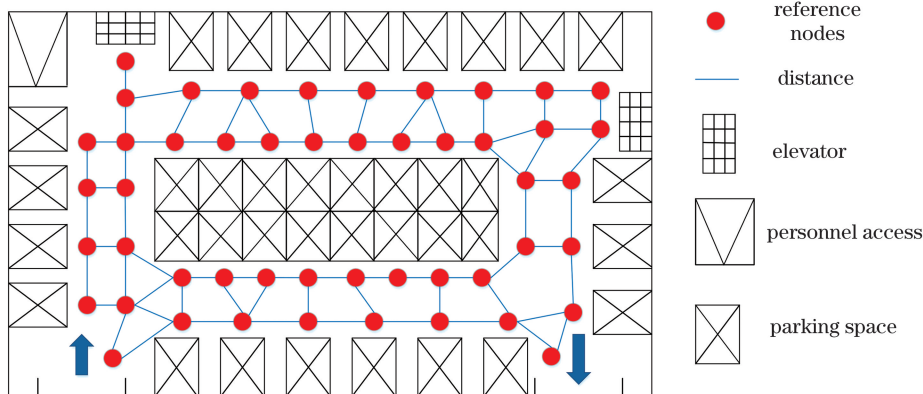


图1 室内定位指纹地图

Fig. 1 Indoor positioning fingerprint map

用 HMM 在有效定位区域布置参考节点方式。根据 HMM 的原理,其定位遵循两个规律:1)任意时刻的隐藏状态只依赖于前一时刻,即每个时刻定位节点之间转移的可能性就是状态转移概率;2)任意时刻的观测状态只依赖当前时刻的隐藏状态。图 2 是以图 1 为对象建立的 HMM 示意图,其中: S 为隐藏状态,即系统中的定位点; O 为观测状态,即系统可以接收的 VLC 和运动信息; $P(S_t | S_{t-1})$ (t 为时间)为转移概率,表示每个时刻定位点之间的转移可能性; $P(O_t | S_t)$ 表示用户在某个参考定位点接收到信号的概率。

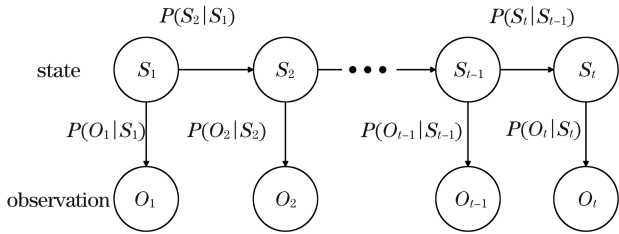


图 2 HMM 示意图
Fig. 2 Diagram of HMM

3 融合定位算法的设计

3.1 离线阶段的建库

在离线阶段,根据室内指纹地图建立定位模型,将定位参考节点作为隐藏状态 O ,将 VLC 接收信号和运动信息作为观测状态 V ,由状态转移概率组成状态转移矩阵 A ,状态转移概率表示一个状态转换到另一个状态的可能性。根据已经测量好的距离矩阵和角度矩阵,再加上惯导模块测得的位移和角度变化,建立节点 i 到其余所有节点的概率矩阵。从状态 S_i 转移到 S_j 的转移概率定义为

$$P_1(S_i | S_j, m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_m} \exp\left[-\frac{(m - d_{ij})^2}{2\sigma_m^2}\right], \quad (4)$$

$$P_2(S_i | S_j, \theta_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\theta} \exp\left[-\frac{(\theta_i - h_{ij})^2}{2\sigma_\theta^2}\right], \quad (5)$$

式中: S_i 与 S_j 分别为节点 i 和 j 的状态; m 为位移; d_{ij} 为节点之间的距离; σ_m 为测量位移的平均误差; θ_i 为角度; h_{ij} 为航向角; σ_θ 为测量角度的平均误差。

状态发射概率组成发射矩阵 B ,它表示每一个隐藏状态都对应着一个观测状态,定位系统的发射概率表示为

$$P(R | S_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{ix}} \prod_{x=1}^q \exp\left[-\frac{(r_x - f_{ix})^2}{2\sigma_{ix}^2}\right], \quad (6)$$

式中: R 为实时测量的指纹信息; σ_{ix} 为节点 i 处的

标准接收信号强度偏差; q 为 AP 数量; f_{ix} 和 r_x 分别是参考指纹和实时指纹; x 为 AP 编号。

初始概率分布 π 就是定位开始阶段用户所处位置的概率分布,定位算法中所有节点的初始概率都选为 1。

3.2 候选集的选择

在隐马尔可夫模型中进行参考节点的预测时通常采用维特比算法^[15]。传统的维特比算法是在每个采样时间根据转移概率和发射概率匹配概率最大的路径作为定位结果,其复杂度为 $O(N^2 K_n)$,其中, N 为参考节点数量, K_n 为采样时间,复杂度过高且候选集过多会影响定位精度。对此,将用户最大移动速度引入状态转移矩阵,设定用户的最大移动速度为 V ,采样间隔为 π ,将二者相乘得到最大移动距离 M ,以 M 为半径画一个圆,该圆则是用户从 t 时刻到 $t+1$ 时刻可能到达的范围,将圆内的参考节点 Q_t 或 Q_{t+1} 作为候选节点,圆以外的节点则为无效节点,无需对其进行候选匹配,如图 3 所示。此时状态转移概率矩阵的维度从 $n \times n$ 降到 $k \times l$ (其中, k 为采样时刻, l 为当前节点的候选集数量),计算复杂度得到降低。

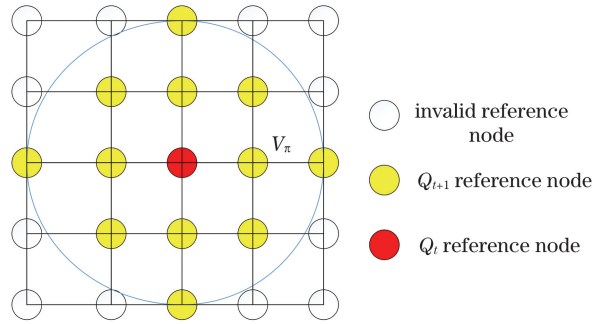


图 3 用户最大速度限制候选集示意图
Fig. 3 Diagram of candidate set of user maximum speed limit

3.3 在线定位阶段的轨迹匹配

在在线定位阶段,根据 A 、 B 和 π 并利用用户携带的接收器和惯导模块采集观测数据,采用改进的维特比算法建立预测定位轨迹:

$$\delta_t(j) = \max[\delta_{t-1}(i) \cdot P(A) \cdot P(B)], \quad (7)$$

式中: $\delta_t(j)$ 为前向概率; $\delta_{t-1}(i)$ 为上一时刻参考节点概率; $P(A)$ 为状态转移概率; $P(B)$ 为发射概率。用户轨迹匹配定位步骤如下。

当 $t=1$ 时,用节点的初始概率和发射概率的乘积作为前向概率,即

$$\delta_1(i) = \pi_i \cdot P(R_i | S_i), \quad (8)$$

式中: $\delta_1(i)$ 为 $t=1$ 时刻在 i 节点的前向概率; π_i 为

节点 i 的初始概率; $P(R_i | S_i)$ 为发射概率, 与 VLC 接收信号强度相关; R_i 为当前时刻测量的指纹信息。

在 $t > 1$ 时, 节点 i 的概率为上一时刻 $t - 1$ 位置处的前向概率乘以状态转移概率和发射概率:

$$\delta_t(j) = \max[\delta_{t-1}(i) \cdot P_1(S_i | S_j, m) \cdot P_2(S_i | S_j, \theta) \cdot P(R_i | S_j)] \quad (9)$$

将上述 4 个概率相乘, 概率最大的一个节点即为 t 时刻的定位结果。

可得, 用户最大速度下候选集数量得到降低, 维特比算法复杂度从 $O(N^2 K_n)$ 降为 $O(K_1 K_n)$, 这为提高定位精度提供了依据。

经对维特比算法进行分析, 并对比图 4(a)、(b)

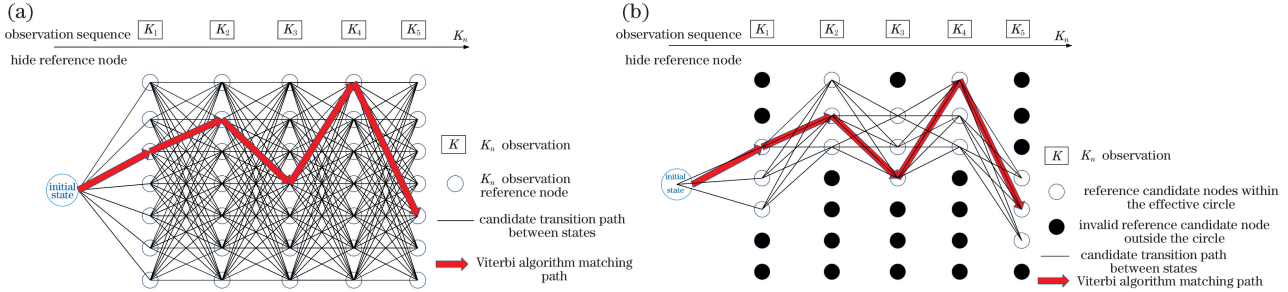


图 4 用户最大速度下维特比算法示意图。(a)传统维特比算法;(b)改进的维特比算法

Fig. 4 Schematic diagrams of Viterbi algorithm based on user maximum speed. (a) Traditional Viterbi algorithm; (b) improved Viterbi algorithm

3.4 算法流程的设计

程: 在离线阶段, 建立室内停车场地图, 包含停车位、出入口、电梯等标志, 然后将定位点加入到地图中,

图 5 为根据上述分析所设计的融合定位算法流

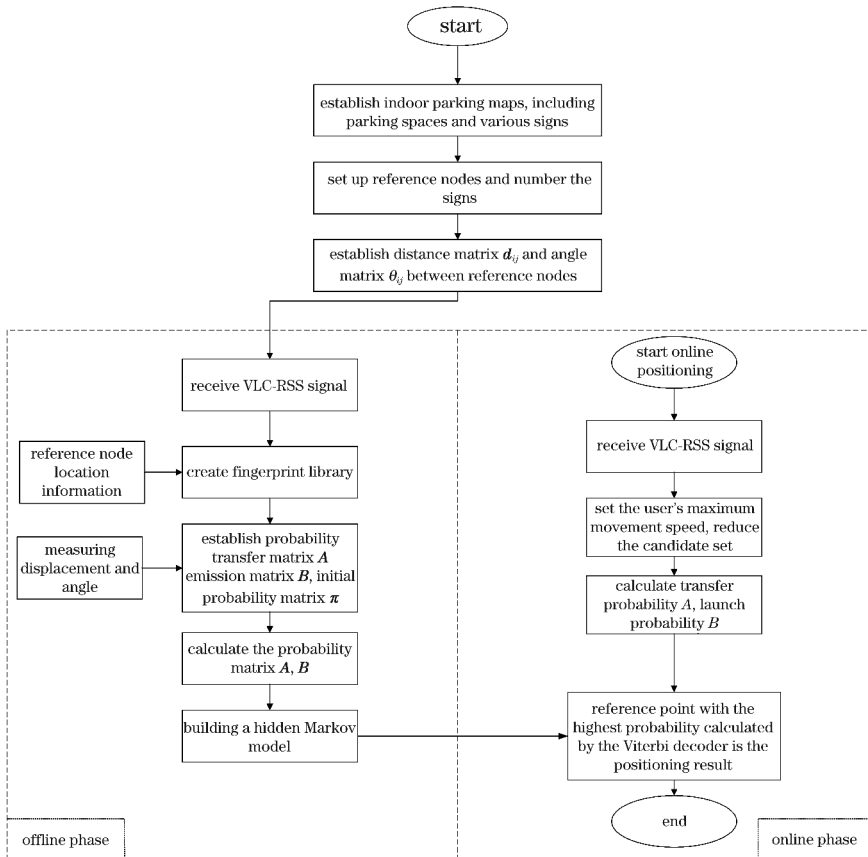


图 5 融合定位算法流程图

Fig. 5 Flow chart of fusion positioning algorithm

设立定位指纹图,指纹包含可见光接收信号信息和惯性导航信息,并建立各参考节点间的距离矩阵和角度矩阵,计算每个参考节点的发射矩阵和节点间的状态转移矩阵;在线定位阶段,根据用户的最大移动速度确定候选集数量,根据采样时间内用户接收到的 VLC 信号强度和惯导模块接收到的角度与位移,计算用户状态转移概率和发射概率,在维特比解码器中求得的概率最大的节点即为定位点。

4 仿真与结果分析

4.1 仿真环境与条件

为了评估本文定位算法对大型室内场所用户移

动定位的效果,对某高校内一个室内停车场进行仿真。停车场长度为 100 m,宽为 25 m,总面积约为 2500 m²,停车场包括 3 个出入口、2 条车道、82 个停车位、1 个供电房、2 个楼梯和 4 个电梯。

在离线建库阶段,建立 HMM 的参考节点(共 162 个节点),并测量每个节点之间的距离矩阵 D 和角度矩阵 θ 。室内停车场所建立的 HMM 指纹地图如图 6 所示,仿真参数由表 1 所示。

4.2 仿真效果与分析

根据停车场内的道路情况,结合行人和车辆用户的移动速度,设置用户的最大移动速度为 5 m · s⁻¹,采样频率为 1 Hz,每次模拟用户移动 5 min,总共采

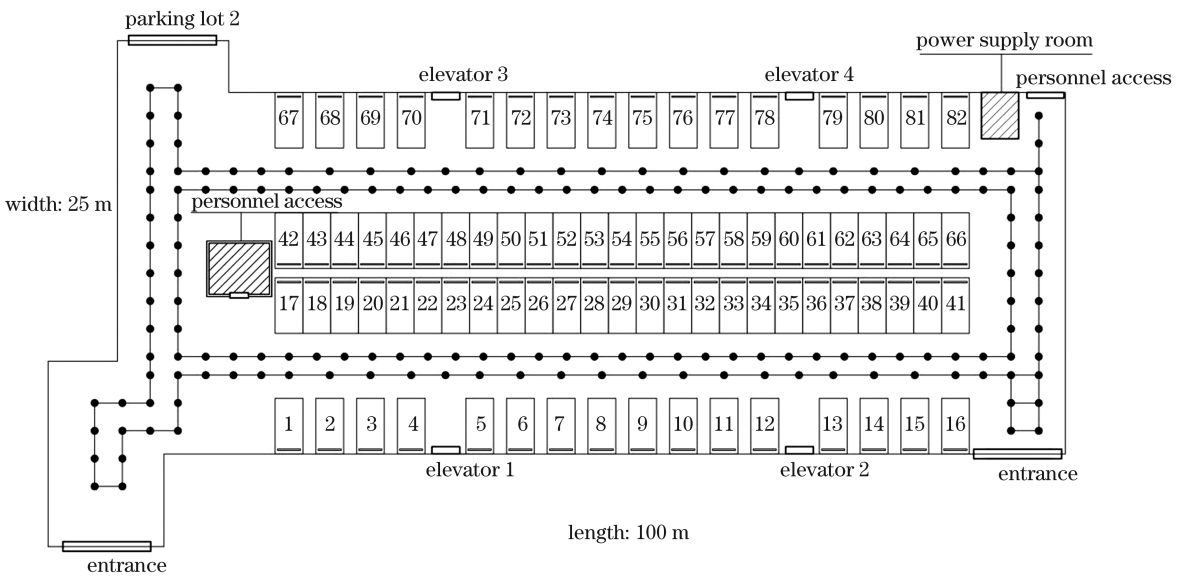


图 6 室内停车场指纹地图

Fig. 6 Fingerprint map of indoor parking lot

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Symbol	Parameter	Value
S	Room size /m ²	2500
H_{PD}	Receiving height /m	1
H_{LED}	LED height /m	4
N_{Led}	Number of LEDs in each lamp	26
P_{Pt}	Transmitted power of lamp /W	5-10
$T_{Ts}(\Psi)$	Gain of optical filter	1
$g(\Psi)$	Gain of optical concentrator	1
F_{FOV}	Field-of-view /($^{\circ}$)	55
A	Physical area of photo-detector /cm ²	1
N_{nodes}	Number of nodes	162
V_{max}	Maximum speed /($m \cdot s^{-1}$)	5

集 30 条路径轨迹,轨迹长度范围为 200~700 m。图 7 为在室内停车场进行实验得到的轨迹图,图 8 为经过仿真得到的 30 次运动定位误差累积分布函数(CDF)。

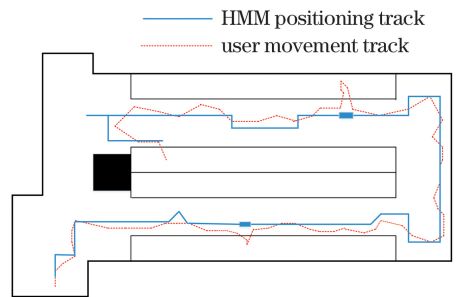


图 7 室内停车场实验轨迹图

Fig. 7 Experimental trajectory of indoor parking lot

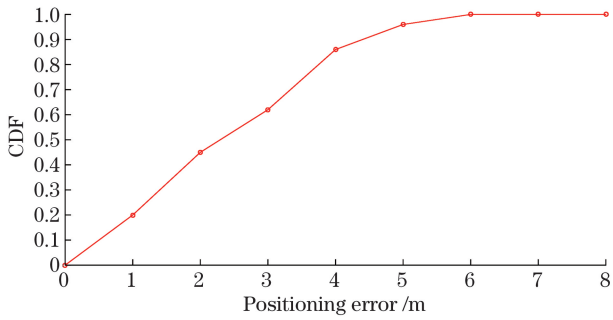


图 8 误差累积分布函数

Fig. 8 Cumulative error distribution function

表 2 给出了 30 次运动实验的定位误差统计。测试 3000~9000 个节点(次),节点准确率约为 85%,最大定位误差为 5.5 m,最大均方根误差为 4.42 m,最小定位误差为 0.2 m,最小均方根误差为 3.95 m,平均定位误差约为 3.6 m。3 m 以内的定位误差主要是来自网格内的随机移动和参考节点之间的距离差,3 m 以上的定位误差来源于节点转移判断错误。通过分析可知,所提算法可以满足用户在室内停车场实现移动定位的需求。

表 2 定位误差统计

Table 2 Positioning error statistics

Number of experiments	Forecast number of nodes	Accuracy of node prediction /%	Maximum error /m	Minimum error /m	Average error /m	Root mean square error /m
10	3000	82	5.1	0.6	3.85	4.42
20	6000	85	5.4	0.3	3.47	3.95
30	9000	84	5.5	0.2	3.56	4.17

4.3 算法对比实验

为了验证本文算法的优越性,选择可见光指纹定位(VLCFM)^[9]、传统 HMM 可见光定位(VLC-

HMM)、惯性导航定位(INPM)^[10]和基于卡尔曼滤波的可见光与惯导融合定位(KF VLC-IN)^[11]4 种室内定位对比算法,其仿真结果如图 9 所示。

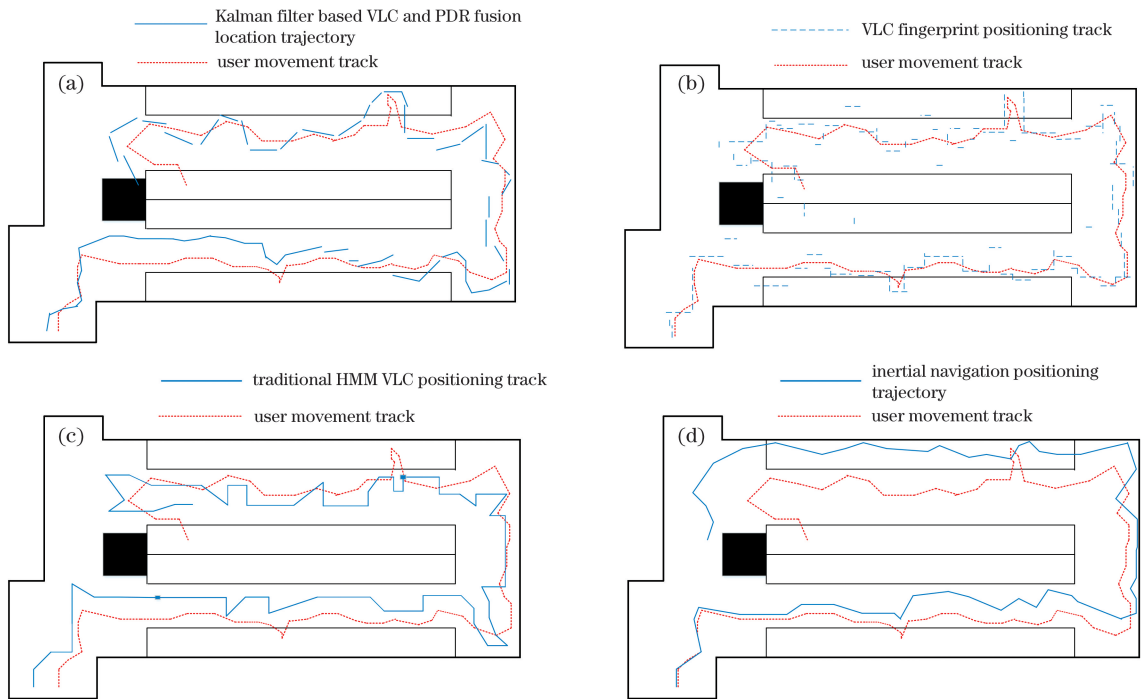


图 9 4 种算法的定位轨迹图。(a)基于卡尔曼滤波的 VLC 与 PDR 融合定位轨迹图;(b)可见光指纹定位轨迹图;(c)传统 HMM 可见光定位轨迹图;(d)惯性导航定位轨迹图

Fig. 9 Positioning track maps of four contrast algorithms. (a) Kalman filter based VLC and PDR fusion location trajectory map; (b) visible light fingerprint positioning trajectory; (c) traditional HMM VLC positioning trajectory; (d) inertial navigation positioning trajectory

图 10 给出了所提算法与 4 种定位算法的定位误差累积分布函数图。分析可知:1)基于卡尔曼滤波的 VLC-PDR (Pedestrian Dead Reckoning) 融合定位得到的 92% 的定位误差在 6 m 以内,其缺点是每一时刻都要利用两种定位方法同时采集数据并同时进行算法融合,复杂度较高,在停车场的边缘和角落处的定位精度不高,如图 9(a)所示;2)VLC 指纹定位法的定位轨迹不连续[图 9(b)],因噪声引起定位点的偏移,95% 的定位误差在 7 m 以内;3)将可见光信号作为观测量的传统 HMM 定位方法的误差较大,其主要原因是观测量太少,VLC 信号不稳定很容易造成预测点偏移 [图 9(c)],并影响后续的节点预测,其 96% 的定位误差在 7 m 以内,该方法还存在候选节点太多的问题;4)惯性导航定位的轨迹一开始比较准确,随着时间的推移,累计误差越来越大,轨迹也随之发生偏移,如图9(d)所示;5)本文算法(图10)得到的

95% 的定位误差在 5 m 以内,其平均定位误差相比其他对比算法更小,定位更加连续且接近真实运动轨迹,如图 7 所示。为直观地体现本文算法的优越性,表 3 列出所提算法与对比算法的各项指标,可以看出,本文方法的整体指标优于 4 种对比算法。

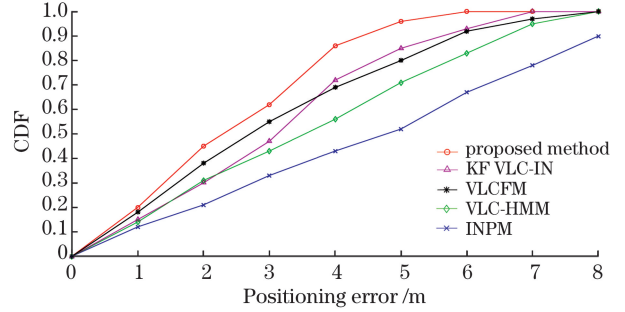


图 10 对比算法的定位误差累积分布函数图

Fig. 10 CDF of positioning error of compared algorithms

表 3 对比算法的定位误差统计

Table 3 Positioning error statistics of compared algorithms

Positioning method	Maximum error /m	Minimum error /m	Average error /m	Root mean square error /m	Median error /m
VLFCFM ^[9]	7.3	0.10	4.61	5.10	4.22
VLC-HMM	7.4	0.30	5.52	6.13	5.04
INPM ^[10]	9.6	0.05	6.62	7.14	5.56
KF VLC-IN ^[11]	6.5	0.60	4.27	4.85	3.74
Proposed method	5.5	0.20	3.35	3.88	2.92

4.4 用户最大速度下候选集的确定

根据 3.2 节所提方法,以图 6 的场景为例设定其移动速度为 $0.1 \sim 5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,所对应的候选节点数量为 1~8。通过仿真分析候选节点数量对定位误差的影响。图 11 为不同候选节点数量对应的定位误差,可以看出,随着候选集数量的增加,定位误差减小。在开始阶段,定位误差随着候选节点数

量的增加而急剧下降,这是因为增加候选节点的数量将扩大寻找最佳路径的搜索区域。当候选节点的数量达到特定值时,即当最大移动速度为 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、候选集为 6 个节点时,搜索范围已经覆盖了所有可能的搜索区域,定位误差将降为最小。若继续增加节点,搜索范围会超出搜索区域,导致误差的增加。

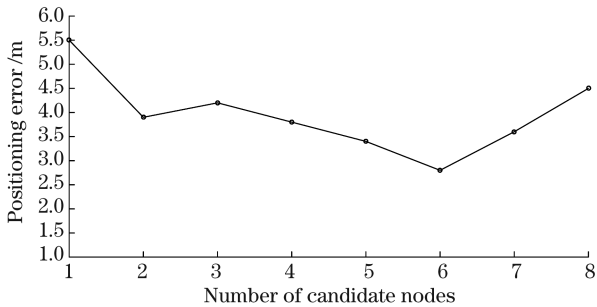


图 11 不同数量候选节点对应的定位误差图

Fig. 11 Location error graph corresponding to different numbers of candidate nodes

5 结 论

选取隐马尔可夫模型作为定位模型,设计可见光与惯导融合定位算法。在离线阶段建立室内停车场指纹图,采集可见光信号和运动信息。在在线定位阶段,根据用户的最大移动速度减少候选集数量,从而提高定位速度;设计改进的维特比算法用于预测用户的运动轨迹。仿真结果表明,所提算法能准确连续地预测用户运动轨迹,并且其定位复杂度较低。与其他几种定位算法相比,所提算法在大型室内场所的移动定位误差更低,为大型室内场所的定

位与导航提供参考。

参 考 文 献

- [1] Tao Y, Zhao L. A novel system for WiFi radio map automatic adaptation and indoor positioning [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(11): 10683-10692.
- [2] Zhou M, Liu Y Y, Wang Y, et al. Anonymous crowdsourcing-based WLAN indoor localization [J]. Digital Communications and Networks, 2019, 5(4): 226-236.
- [3] Jia B, Huang B Q, Gao H P, et al. Selecting critical WiFi APs for indoor localization based on a theoretical error analysis[J]. IEEE Access, 2019, 7: 36312-36321.
- [4] Zhang J, Wang H. An improved SNR uniformity optimization scheme for VLC system [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2015, 27(1): 78-82.
张健, 王辉. 一种改进的可见光通信系统 SNR 均匀性优化方法 [J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2015, 27(1): 78-82.
- [5] Khan L U. Visible light communication: applications, architecture, standardization and research challenges [J]. Digital Communications and Networks, 2017, 3(2): 78-88.
- [6] Liu H Y, Ma J H, Huang Q. Construction method of fingerprint database based on improved Kriging interpolation for indoor location [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2017, 29(6): 751-757.
刘辉元, 马金辉, 黄琼. 基于改进克里金插值的室内定位指纹库构建方法 [J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2017, 29(6): 751-757.
- [7] Chen Y, Li Y C, Liu H L. Moving target positioning method based on visible light communication in time division multiplexing network [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 1006003.
陈勇, 李逸超, 刘焕淋. 基于可见光通信的时分复用组网下移动目标定位方法 [J]. 中国激光, 2017, 44(10): 1006003.
- [8] Xu S W, Wu Y, Su G D. Fingerprint matching and localization algorithm based on orthogonal frequency division multiplexing modulation for visible light communication [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(9): 090601.
徐世武, 吴怡, 苏国栋. 基于正交频分复用调制的可见光通信指纹匹配定位算法 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(9): 090601.
- [9] Zhao C H, Zhang H M, Song J. Fingerprint based visible light indoor localization method [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0806002.
赵楚韩, 张洪明, 宋健. 基于指纹的室内可见光定位方法 [J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0806002.
- [10] Liu C Y. Indoor localization method based on pedestrian dead reckoning aided by multi-source fusion [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24(2): 208-214.
刘春燕. 基于多源信息融合的行人航位推算室内定位方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(2): 208-214.
- [11] Li X C, Wang H. Fingerprint location using sparse fingerprint acquisition and improved WKNN [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2019, 31(4): 451-459.
李新春, 王欢. 基于稀疏指纹采集和改进 WKNN 的定位算法 [J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2019, 31(4): 451-459.
- [12] Li X C, Feng L H, Yang A Y. Fusion based on visible light positioning and inertial navigation using extended Kalman filters [J]. Sensors, 2017, 17(5): 1093-1099.
- [13] Zhu N, Zhao H B, Feng W Q, et al. A novel particle filter approach for indoor positioning by fusing WiFi and inertial sensors [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(6): 1725-1734.
- [14] Adams S, Beling P A, Cogill R. Feature selection for hidden Markov models and hidden semi-Markov models [J]. IEEE Access, 2016, 4: 1642-1657.
- [15] Liu C X, Lu G Q, Tang H B, et al. Adaptive deployment method for virtualized network function based on viterbi algorithm [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(11): 2922-2930.
刘彩霞, 卢干强, 汤红波, 等. 一种基于 Viterbi 算法的虚拟网络功能自适应部署方法 [J]. 电子与信息学报, 2016, 38(11): 2922-2930.