

$$B=\{d_{i_1},d_{i_2},\dots,d_{i_m}\} \tag{16}$$

其中,

$$d_{i_j}=\sqrt{\sum_{r=1}^{n_j}(RSSI_{i_j-r}-RSSI_{test-r})^2} \tag{17}$$

$$d_{i_1}\leq d_{i_2}\leq \dots \leq d_{i_m} \tag{18}$$

其中, n_j 为序列 A 与分区指纹 RP_{i_j} 所重合的 AP 个数.

- 步骤 2:加权得到位置估计.

截取集合 B 的前 K 个元素,组成候选参考点欧氏距离集合 C .

$$C=\{d_{i_1},d_{i_2},\dots,d_{i_K}\} \tag{19}$$

将集合 C 中的每个元素替换为其所对应的 RP 位置坐标,则可得候选参考点位置集合 D .

$$D=\{(x_{i_1},y_{i_1}),(x_{i_2},y_{i_2}),\dots,(x_{i_K},y_{i_K})\} \tag{20}$$

设行人在 $t-1$ 时刻的位置估计为 (x_{t-1},y_{t-1}) ,以其为圆心、以 R_{t-1} 为半径做圆,记作圆 o .以处于圆 o 内部作为约束条件,获取集合 D 的子集 E ,即为最终参考点位置集合.

$$E=\{(x_{i_1},y_{i_1}),(x_{i_2},y_{i_2}),\dots,(x_{i_{i_0}},y_{i_{i_0}})\} \tag{21}$$

其中, i_0 为使用前点约束筛选出的参考点的个数.

相应地,可以得到集合 C 的子集 F ,即为最终参考点欧氏距离集合.

$$F=\{d_{i_1},d_{i_2},\dots,d_{i_{i_0}}\} \tag{22}$$

基于 WKNN 算法,根据公式(22)中的欧氏距离,可以计算最终参考点各自的权重:

$$\mu_j=\frac{\frac{1}{d_{i_j}}}{\frac{1}{d_{i_1}}+\frac{1}{d_{i_2}}+\dots+\frac{1}{d_{i_K}}} \tag{23}$$

则当前时刻, t 的位置估计 (x_t,y_t) 为

$$(x_t,y_t)=\sum_{j=1}^K\mu_j(x_{i_j},y_{i_j}) \tag{24}$$

对于前点约束法,有两点需要特殊说明.

- (1) 对初始位置进行估计时,由于其没有前一时刻的位置估计,因此需要采用标准的 WKNN 方法计算;
- (2) 在公式(21)与公式(22)所示的最终参考点筛选过程中,仍有小概率出现筛选结果为空集的情况,此时也采用标准的 WKNN 方法进行位置估计.

前点约束法的流程图如图 2 所示.

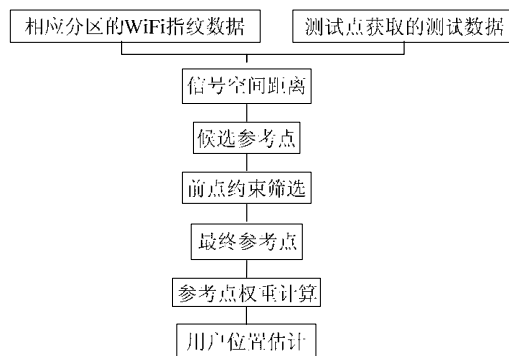


Fig.2 Former location restriction framework

图 2 前点约束框架图

3 实验与结果分析

3.1 实验设备与环境

选择北京航空航天大学新主楼 C 座 9 层环形走廊作为实验场地进行定位实验,使用 MI 5 手机(MEID: 990*****129)对参考点 RP 处的 WiFi 信号强度进行采集,通过空间特征分区算法获取指纹数据库后,实验员手持该设备沿走廊中线绕实验场一周,实时获取测试数据并与指纹数据库进行匹配,通过基于前点约束的 WKNN 算法得到室内位置的估计结果.

3.2 实验过程

(1) 设置参考点并获取原始数据

首先需要针对实验区域设置一定数量的参考点,考虑到本实验中的目标区域形状为矩形,因此采用四边形的法,以 1.2m 间隔进行参考点的获取,并在同一坐标系下记录各参考点的位置坐标,最终在目标区域内获得 158 个指纹点,如图 3 所示.



Fig.3 Map of experimental environment

图 3 实验环境示意图

随后,实验员手持 MI 5 手机在所有参考点处对 WiFi 信号进行测量,所需记录的数据包括所有接收到的 AP 的 MAC 地址及其对应的信号强度 RSSI,经编号后存储为公式(1)所示的格式.在数据获取过程中,为保证指纹数据的准确性,尽量减少 WiFi 信号波动性造成的不利影响,在每个 RP 处按照东西南北这 4 个方向各进行 10 次测量,再对 40 条数据取平均值作为最终的信号强度存入原始数据库中.

(2) 划分分区并提取指纹数据库

在参考点设置完毕的情况下对目标区域进行分区,由于实验环境为一条环形走廊,按照分区内部应当贯通的原则,在实验中将 4 条直线型的走廊作为目标区域的 4 个分区,如图 4 所示.

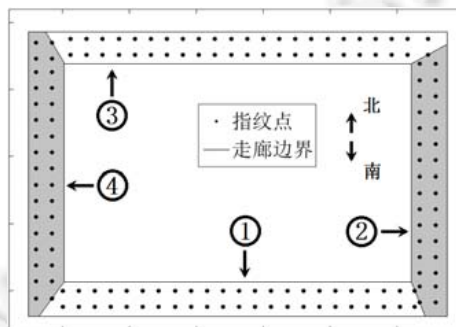


Fig.4 Target space partition

图 4 目标区域分区

在分区过程中需要注意:为了避免分区后形成定位盲区(即不被任何分区所覆盖的室内空间,如图 5 所示),相邻的分区应当共享边界处的指纹点,使分区之间达到无缝连接。

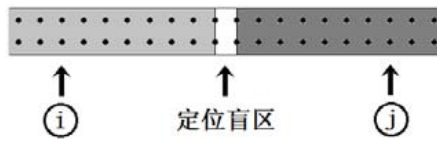


Fig.5 Blind zone caused by wrong partition

图 5 错误分区造成的定位盲区

在分区划分完成后,对各自分区内部的 WiFi 信号原始数据进行共有 AP 信息的截取,以建立分区指纹数据库(如公式(3)所示),进而提取出各分区的标识序列(如公式(7)所示).分区指纹数据库的建立过程与分区标识序列的提取过程分别详见第 1 节的步骤 1 与步骤 2,此处不再赘述。

(3) 在线测试并得到位置估计

建立分区指纹数据库后可进行在线测试阶段,在该阶段,实验员手持 MI 5 手机沿走廊中线的规划路径匀速行走一圈,当行走至测试点时,通过操作实时获取测试数据,测试数据的存储格式如公式(8)所示.实验过程中,共获得 155 个测试点,测试点间隔 0.6m,如图 6 所示。

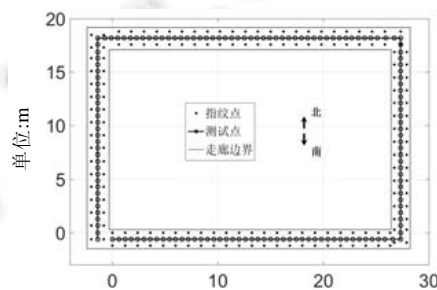


Fig.6 True trajectory of positioning experiment

图 6 定位实验真实轨迹

对于每一条测试数据,首先通过分区判别算法确定实验员当前位置所处的分区(详见第 1 节步骤 3),进而调用相应分区的指纹数据库与该条数据进行匹配,最终通过基于前点约束的 WKNN 算法计算得到位置估计结果(详见第 2 节)。

3.3 实验结果与分析

基于上述已获取的指纹数据库和测试数据,分别采用传统的 WKNN 算法、融合轨迹外推信息的 WKNN 算法与本文基于空间特征分区与前点约束的 WKNN 算法进行对比运算.实验中,对前两种算法取 $K=5$,对本文方法取 $K=10, R=2.7m$.而对于前文所述两种特殊情况, K 取值与传统 WKNN 算法保持一致,记作 K_w .为保证分区判别算法的准确性,对其所需参数取 $q=20, \Delta nums_ame=0$.用户在目标区域行进一圈,3 种方法位置估计的对比图如图 7 所示,其各自的位置估计误差见表 1。

从图 7 中的对比可以看出,使用本文方法的位置估计轨迹更加平顺.与使用传统 WKNN 方法的位置估计轨迹相比,往复跳动的现象得到了很好地抑制,也更加贴合图 6 所示用户真实的行进轨迹.结合表 1 所示两种方法位置估计误差的数值,其最小估计误差都保持在 0.02m,但是 WKNN 方法的最大估计误差达到了 7.92m,而本文方法的最大估计误差只有 2.63m。

从全程的平均误差来看,本文方法的平均估计误差保持在 1m 以内,达到了 0.88m,与 WKNN 方法 1.66m 的平均误差相比,估计精度提升了 47%.融合轨迹外推信息的 WKNN 方法则是在传统 WKNN 方法结果的基础上,

通过对前两个时刻的位置估计外推得到当前时刻位置估计的预测值,再将该预测值与 WKNN 方法所得当前时刻的位置估计进行融合,从而得到最终的估计结果.该方法由于在估计过程中利用了用户的历史位置信息,因此精度与传统的 WKNN 方法相比有小幅度的提升,但是与本文方法的位置估计精度相比仍有非常巨大的差距(如表 1 所示),这说明本文方法对于历史位置信息的挖掘和应用更加深入和充分.此外,通过对 155 个测试点分区判定结果的统计,由识别序列与信号空间距离所组成的两级分区判别算法,其准确率达到了 96.4%,显示出判别算法在实际应用中的可靠性.

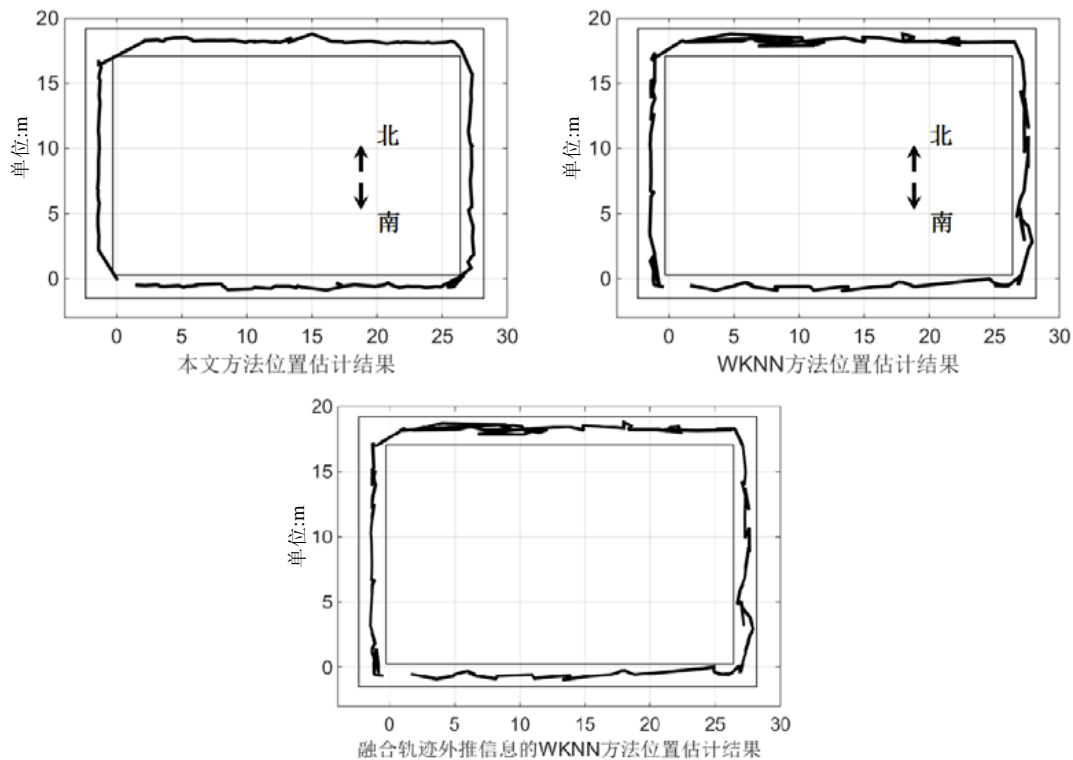


Fig.7 Comparison of estimated trajectories

图 7 位置估计对比

Talbe 1 Comparison of estimation errors

表 1 估计误差对比

方法	位置估计误差(m)		
	最小值	最大值	平均值
本文方法	0.02	2.63	0.88
WKNN 方法	0.02	7.92	1.66
融合轨迹外推信息的 WKNN 方法	0.02	7.62	1.64

图 8 进一步给出了本文方法和传统 WKNN 方法位置估计误差的累计概率对比图.从图中可以看出,在采用本文方法对全程 155 个测试点进行位置估计时,有 80% 以上的估计结果精度都保持在 1.5m 以内;而在同样的精度范围内,传统 WKNN 方法估计结果达到标准的还不足 60%.这也可以从另一个方面说明,本文方法相对于 WKNN 方法的提升是全方位的.

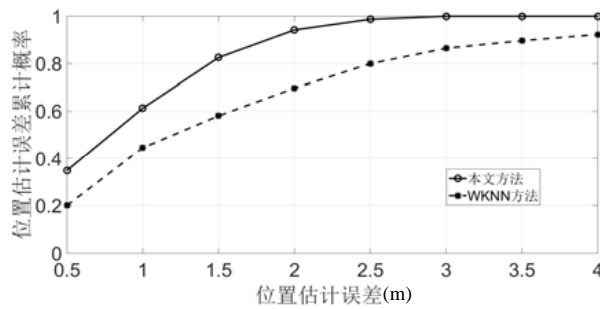


Fig.8 Cumulative probability of location estimation errors
图 8 位置估计误差的累计概率

3.4 参数优化

在第 3.2 节中已知,对本文方法所需要的参数取 $K=10, R=2.7m, K_W=5$. 对于一个确定的目标区域,选取不同的参数值得到最终的估计结果也有所不同.为了最大限度地发挥本文方法的优势,实验中对参数进行了最优化计算.具体考虑了 $K_W \in \{4, 5, 6\}, R \in \{2.5, 2.6, \dots, 3\}, K \in \{5, 6, \dots, 15\}$ 下所有的组合方案,得到的计算结果如图 9~图 11 所示.

在这 3 种情况下,最优参数组合均为 $K=10, R=2.7m$.而其中以 $K_W=5$ 时的位置估计精度最高,因此在本实验环境下,选取其作为实验参数.需要说明的是,该参数组合仅在当前目标区域下为最优参数,当实验环境、测量工具发生变化时,需要重新运行参数优化过程以获得相应条件下的最优参数.

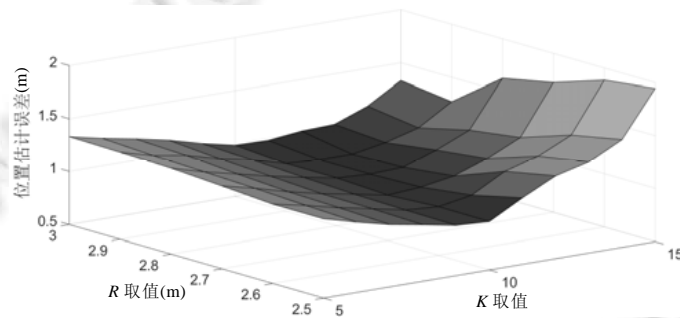


Fig.9 Average estimation error distribution when $K_W=4$
图 9 $K_W=4$ 时平均估计误差分布

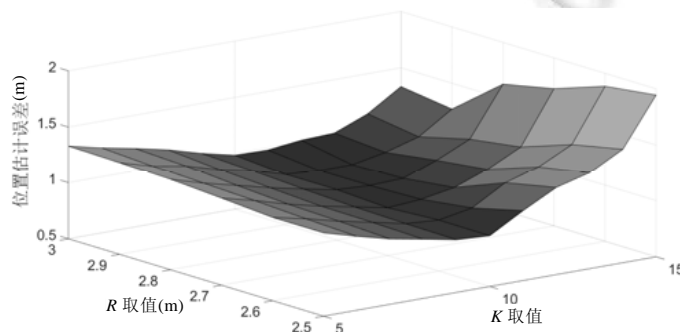
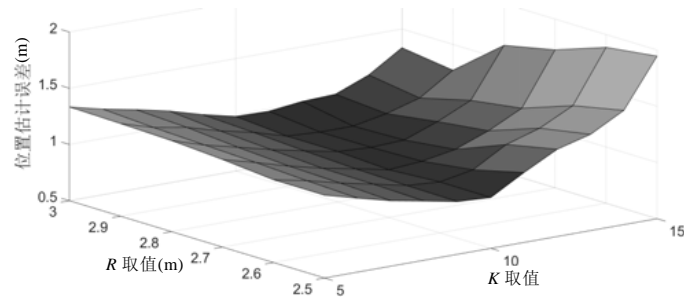


Fig.10 Average estimation error distribution when $K_W=5$
图 10 $K_W=5$ 时平均估计误差分布

Fig.11 Average estimation error distribution when $K_w=6$ 图 11 $K_w=6$ 时平均估计误差分布

4 结 论

传统的 WKNN 方法无法解决一套指纹数据库覆盖整个目标区域的难题,同时还存在估计结果跳动跨度较大的问题,严重影响室内定位精度.针对上述问题,本文提出了一种基于空间特征分区和前点约束法的 WKNN 室内定位方法.通过将面积较大的目标区域按照其空间特征划分为多个分区,同时引入识别序列和欧氏距离的组合分区判据,解决了指纹数据库无法实现全域覆盖的问题;又通过考虑行人在相邻时刻所处位置之间的空间约束关系,缩小了最终参考点的筛选范围,很好地提升了位置估计的精度.在北京航空航天大学新主楼 C 座 9 层环形走廊进行的室内定位实验结果表明,与传统的 WKNN 方法相比,本文方法极大地提升了位置估计轨迹的平顺性,分区判别正确率达到 96.4%,室内定位精度则提升了 47%,达到了 0.88m,进而证明了本文方法的有效性.

References:

- [1] Perusco L, Michael K. Control, trust, privacy, and security: Evaluating location-based services. *IEEE Technology & Society Magazine*, 2007,26(1):4–16. [doi: 10.1109/MTAS.2007.335564]
- [2] Bellavista P, Küpper A, Helal S. Location-based services: Back to the future. *IEEE Pervasive Computing*, 2008,7(2):85–89. [doi: 10.1109/MPRV.2008.34]
- [3] Castro P, Chiu P, Kremenek T, Muntz R. A probabilistic room location service for wireless networked environments. In: Abowd GD, ed. *Proc. of the Int'l Conf. on Ubiquitous Computing*. Atlanta: Springer-Verlag, 2001. 18–34.
- [4] Kuo SP, Tseng YC. A scrambling method for fingerprint positioning based on temporal diversity and spatial dependency. *IEEE Trans. on Knowledge & Data Engineering*, 2008,20(5):678–684. [doi: 10.1109/TKDE.2007.190730]
- [5] Gu YY, Lo A, Niemegeers I. A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2009,11(1):13–32. [doi: 10.1109/SURV.2009.090103]
- [6] Chang TH, Wang LS, Chang FR. A solution to the ill-conditioned GPS positioning problem in an urban environment. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 2009,10(1):135–145. [doi: 10.1109/TITS.2008.2011709]
- [7] Sun LN, Zhou ZY, Zhou ZB. The development status of MEMS and the thinking on China's development strategy of MEMS. *Robot Technology and Applications*, 2002,15(2):2–4 (in Chinese with English abstract).
- [8] Tan XL. Research on improved model of inertial navigation aided seamless positioning [Ph.D. Thesis]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [9] Sun Y, Fan PZ. RFID technology and its application in indoor positioning. *Computer Applications*, 2005,25(5):1205–1208.
- [10] Wang M. Design of analog-to-digital converter for the RFID location system based on AOA [MS. Thesis]. Tianjin: Tianjin University, 2010 (in Chinese with English abstract).
- [11] Kee CD, Yun DH, Jun HY. Precise calibration method of pseudolite positions in indoor navigation systems. *Computers & Mathematics with Applications*, 2003,46(10):1711–1724. [doi: 10.1016/S0898-1221(03)00397-3]
- [12] Liu JN, Zhai CR, Song DE, Hu H. Indoor pseudolites precise point positioning based on improved time-satellites difference. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009,34(1):105–108 (in Chinese with English abstract).

- [13] Zhang MH. Study on WLAN based indoor location estimation technology [Ph.D. Thesis]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009 (in Chinese with English abstract).
- [14] Pei L, Chen RZ, Liu JB, Kuusniemi H, Tenhunen T, Chen YW. Using inquiry-based bluetooth RSSI probability distributions for indoor positioning. *Journal of Global Positioning Systems*, 2010,9(2):122-130122. [doi: 10.5081/JGPS.9.2.122]
- [15] Shum KCY, Cheng QJ, Ng JKY, Ng D. A signal strength based location estimation algorithm within a wireless network. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Advanced Information Networking and Applications. Biopolis: IEEE Computer Society, 2011. 509-516. [doi: 10.1109/AINA.2011.80]
- [16] Deng ZA. Research on learning based WLAN indoor positioning techniques [Ph.D. Thesis]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012 (in Chinese with English abstract).
- [17] Chen M. The research of indoor positioning and tracking system based on signal strength using WLAN [Ph.D. Thesis]. Wuhan: Wuhan University, 2012 (in Chinese with English abstract).
- [18] Klingbeil L, Wark T. Demonstration of a wireless sensor network for real-time indoor localisation and motion monitoring. In: Proc. of the Int'l Conf. on Information Processing in Sensor Networks. St. Louis: IEEE Computer Society, 2008. 543-544. [doi: 10.1109/IPSN.2008.16]
- [19] Zhang WX. The fingerprint location algorithm based on RSSI of WiFi [MS. Thesis]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [20] Le Dortz N, Gain F, Zetterberg P. WiFi fingerprint indoor positioning system using probability distribution comparison. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing. Kyoto: IEEE, 2012. 2301-2304. [doi: 10.1109/ICASSP.2012.6288374]
- [21] Bahl P, Padmanabhan VN. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system. In: Proc. of the 19th Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies. Vol.2. Tel Aviv: IEEE, 2000. 775-784. [doi: 10.1109/INFCOM.2000.832252]
- [22] Ni LM, Liu YH, Lau YC, Patil AP. LANDMARC: Indoor location sensing using active RFID. *Wireless Networks*, 2004,10(6): 701-710. [doi: 10.1109/PERCOM.2003.1192765]

附中文参考文献:

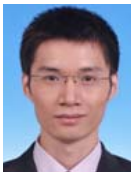
- [7] 孙立宁,周兆英,龚振邦. MEMS 国内外发展状况及我国 MEMS 发展战备的思考. *机器人技术与应用*, 2002,15(2):2-4.
- [8] 谭兴龙. 惯性导航辅助的无缝定位改进模型研究[博士学位论文]. 徐州:中国矿业大学, 2014.
- [9] 孙瑜,范平志. 射频识别技术及其在室内定位中的应用. *计算机应用*, 2005,25(5):1205-1208.
- [10] 王淼. 用于 RFID 信号到达角度(AOA)定位系统中的 ADC 设计[硕士学位论文]. 天津:天津大学, 2010.
- [12] 刘峻宁,翟传润,宋嫡儿,胡华. 基于改进时星差分的室内伪卫星精密单点定位研究. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2009,34(1): 105-108.
- [13] 张明华. 基于 WLAN 的室内定位技术研究[博士学位论文]. 上海:上海交通大学, 2009.
- [16] 邓志安. 基于学习算法的 WLAN 室内定位技术研究[博士学位论文]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012.
- [17] 陈淼. 基于信号强度的 WLAN 室内定位跟踪系统研究[博士学位论文]. 武汉:武汉大学, 2012.
- [19] 张文学. 基于 WiFi 的 RSSI 指纹定位算法研究[硕士学位论文]. 成都:电子科技大学, 2015.



杨海峰(1993—),男,河北吴桥人,博士生,主要研究领域为室内定位,滤波算法,深空探测,导航方案.



黄裕梁(1992—),男,硕士生,主要研究领域为室内定位,小样本技术,可靠性.



张勇波(1984—),男,博士,讲师,主要研究领域为室内定位,小样本可靠性,滤波算法,生物力学.



傅惠民(1956—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为小样本技术,可靠性,导航算法,室内定位.