

基于启发式移动信标的无线传感器网络节点定位*

文武松¹⁺, 王璐²

¹(重庆通信学院 电力工程系, 重庆 400035)

²(重庆第二师范学院 数学与信息工程系, 重庆 400067)

Localization in Wireless Sensor Network with Heuristic Mobile Beacons

WEN Wu-Song¹⁺, WANG Lu²

¹(Department of Power Engineering, Chongqing Communication College, Chongqing 400035, China)

²(Department of Mathematics and Information Engineering, Chongqing University of Education, Chongqing 400067, China)

+ Corresponding author: E-mail: wenwusong@163.com

Wen WS, Wang L. Localization in wireless sensor network with heuristic mobile beacons. *Journal of Software*, 2012, 23(Suppl. (1)): 1-8 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/12001.htm>

Abstract: Moving the path of the beacon has an important impact on the localization performance in a wireless sensor network with mobile beacons; however, without full consideration of the influences of the distribution and density unknown nodes' when planning beacon's moving path, most of existing localization methods have lower efficiency. In this paper, the beacon model is first presented according to the theory of equal distance 3-optimal-coverage. Next, a heuristic path planning method is proposed for the ROI in which unknown nodes are distributed randomly, and the node density is limited by using the location mechanism of RSSI to locate range-free, unknown nodes. Simulation results show that the given method is effective.

Key words: wireless sensor network; localization; mobile beacon; path planning; RSSI (received signal strength indicator)

摘要: 在基于移动信标的无线传感器网络节点定位过程中,信标的移动路径对定位性能有着重要的影响.但现有的信标移动路径规划方法没有充分考虑未知节点的密度及分布的影响,计算复杂且定位效率较低.首先根据等距三重优化覆盖提出了信标模型,再针对未知节点随机分布且密度有限的 ROI(region of interest),提出了一种启发式信标移动规划方法,并利用 RSSI(received signal strength indicator)和 range-free 相结合的定位机制对节点进行定位.仿真实验结果表明,该算法可以对传感器节点进行高效、高精度的定位.

关键词: 无线传感器网络;定位;移动信标;路径规划;RSSI(received signal strength indicator)

在无线传感器网络(wireless sensor network,简称 WSN)的众多应用中,传感器节点必须明确自身位置才能实现目标的定位和追踪,不知道传感器位置而感知的数据是没有意义的.此外,利用节点位置信息还可提高网络的覆盖质量和路由效率,实现网络的负载均衡及网络拓扑的自配置^[1].然而,由于 WSN 中节点能量、存储、通信等能力有限,通常随机部署于恶劣环境区域,规模相对较大^[2],人工部署或为所有节点安装 GPS 接收器都会受

* 基金项目: 重庆市教委自然科学基金(KJ121506)

收稿时间: 2012-05-05; 定稿时间: 2012-08-17

到成本、功耗、扩展性等问题的限制,甚至在某些场合可能根本无法实现,因此需设计适合 WSN 自身特征的定位机制和算法。

现有的传感器节点定位算法可以分为两种:基于测距的(range-based)定位和无须测距的(range-free)定位。range-based 定位机制根据接收信号强度(received signal strength indicator,简称 RSSI)、到达时间(time of arrival,简称 TOA)、到达时间差(time difference of arrival,简称 TDOA)、到达角度(angle of arrival,简称 AOA)等测量未知节点(unknown node)到信标节点(beacon node)的距离或角度信息,再采用三边测量(trilateration)、三角测量(triangulation)或极大似然估计(multilateration)法计算出节点位置,其特点是定位精度较高,但需要额外的硬件支持,且计算和通信开销较大^[3]。range-free 定位无需距离和角度信息,仅根据网络连通性、信噪比、误码率等信息即可实现,它的定位精度较低,但各方面的通信开销较小,适用于低功耗、低成本、且对定位精度要求不高的应用领域,典型的 range-free 定位算法有 Centroid^[4]、DV-HOP^[5]、APIT^[6]、凸规划(convex optimization)^[7]和 MDS-MAP^[8]等。此外,RSSI 值除用来计算距离外,还可用来比较距离远近,并可以在不增加任何硬件的条件下由传感器节点测得,因此,在 range-free 定位算法基础上,充分利用 RSSI 值提供的与距离相关的信息,能够有效提高定位的精度,类似的算法有 NMDS^[9]、LeManCoR^[10]和 W-Centroid^[11]等。

无论采用何种定位方法,信标节点的数量和布局都直接影响定位的精度,但使用的信标节点越多,网络的成本和能耗等方面的开销就会增加,不符合 WSN 各方面的约束。为此,文献[12-14]提出了基于移动信标的定位思想,利用一个或多个信标节点在“感兴趣区域(region of interest,简称 ROI)”内移动,并间隔一定时间发送当前位置信息,未知节点根据接收的不同时刻位置信息进行自身定位。在这种定位机制中,信标的移动路径对节点的定位性能有很大的影响,文献[12]首次提出了移动信标的路径选择问题,给出了一些路径规划建议,但并未给出实际解决方案。文献[13]提出了使用 SCAN、DOUBLE-SCAN 曲线的静态路径规划,但静态路径规划的假定条件难以满足,且普适性不强。文献[14]假定 ROI 内未知节点均匀分布且密度无限大,采用虚拟力和流浪旅行商算法提出了一种适用于任意形状 ROI 的信标移动路径规划方法。

本文针对未知节点随机分布且密度有限的 ROI,不考虑边界的影响,提出了一种信标移动路径规划方法,并采用 RSSI 和 range-free 相结合的方法对节点进行了定位。

1 信标模型

在文献[14]中,考虑到传感器节点位置在定位前是未知的,所设计的路径需使得信标信号覆盖整个 ROI,假定所有传感器节点均具有相同的感知半径 γ ,且各信标覆盖范围远小于 ROI 面积,将移动信标最优发射位置选择问题转化成:如何利用最少数目的半径为 γ 的圆充分覆盖整个 ROI,并使 ROI 中除边界外的每个点均至少被 3 个以上的圆覆盖,这些圆的圆心位置即为移动信标最优发射的位置。为此,提出了等距三重优化覆盖方法,即各发射位置点构成边长为 γ 的正三角形,如图 1、图 2 所示。

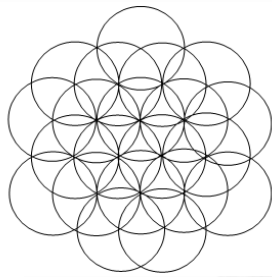


Fig.1 Equal distance 3-optimal-coverage (partial enlarged)

图 1 等距三重优化覆盖拓扑(局部)

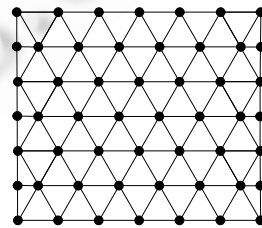


Fig.2 Equal distance 3-optimal-coverage deployment of sending position

图 2 等距三重优化覆盖的发射位置分布

在上述等距3重优化覆盖理论的基础上,本文在网络中配置7个移动信标节点,用 $N_i(i=0,1,2,\dots,6)$ 表示.各信标具有相同的感知半径 γ .7个信标节点的位置关系如图3所示. N_0 首先移动到某一位置 (x_0,y_0) ,并向其他信标节点广播自己的位置信息,其他信标节点根据 N_0 位置再分别调整自己的位置 (x_i,y_i) ,最终构成一个以信标 N_0 为中心,边长为 γ 的正六边形结构,如图3所示.

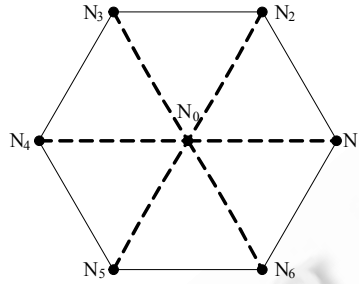


Fig.3 Beacon model

图3 信标模型拓扑

2 移动信标路径规划

针对未知节点随机分布,且覆盖率有限的网络部署,利用前面的信标模型,根据不同区域内未知节点不同分布数目,提出一种具有一定“学习”能力的启发式信标路径规划算法,分为两个步骤:信息收集和信标移动.

2.1 信息收集

(1) 正式定位前,在ROI内由 $N_1\sim N_6$ 向 N_0 发送测试数据包, N_0 接收后,记下RSSI值,再根据如下公式(1)计算出单位距离对应的RSSI的平均值 $RSSI_AVE$.

$$RSSI_AVE = \frac{\sum_{i=1}^n RSSI_i}{n\gamma} \quad (1)$$

其中, γ 为节点的感知半径, $RSSI_i$ 为 N_0 第 i 次接收到RSSI值.

(2) 借鉴文献[2]的做法,在 T 时刻,信标 N_0 首先启动一个定时器,再依次由 N_0, N_1, \dots, N_6 向外广播发送包括节点标识(ID)、坐标(PosX, PosY)和RSSI平均值($RSSI_AVE$)的数据包(见表1).其1跳内的未知节点收到后,首先根据数据包内的坐标判断此包是否已经存在,若存在,则根据RSSI值判断距离是否小于已有记录,从而决定更新或丢弃,本质上是一个简单的分布式最短距离路由协议;若不存在,则按式(2)来处理:

$$Value = \begin{cases} 0, & \text{若 } RSSI \leq \alpha_1 RSSI_AVE \\ 1, & \text{若 } \alpha_1 RSSI_AVE < RSSI < \alpha_2 RSSI_AVE \\ 2, & \text{若 } RSSI \geq \alpha_2 RSSI_AVE \end{cases} \quad (2)$$

其中, α_1, α_2 为信号强度因子,且 $\alpha_1 \in (0,1), \alpha_2 \in (0,1), \alpha_2 > \alpha_1$. $Value=0$ 表示丢弃本数据包, $Value=1$ 表示需要计算定位, $Value=2$ 表示直接取信标坐标为节点位置.

若 $Value=1$,则未知节点按照表2所示格式将该数据包添加到记录中.

Table 1 Packet broadcasted from beacon

表1 信标广播数据包

ID	PosX	PosY	RSSI_AVE
----	------	------	----------

Table 2 Packet recorded by unknown node

表 2 未知节点记录数据包

ID	PosX	PosY	RSSI AVE	RSSI
----	------	------	----------	------

2.2 信标移动

如图 4 所示,信标模型中,节点 N_1 的管辖范围包含了 I, II, III 区,这里我们称信标 N_1 为 I, II, III 区内所有未知节点的信号覆盖源信标.其中 I 区被 3 个信标覆盖,II 区被 2 个信标覆盖,III 区被 1 个信标覆盖.其余信标节点的管辖范围与之类似.

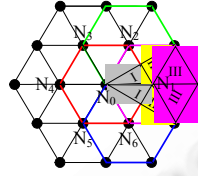


Fig.4 Jurisdiction range of beacon

图 4 信标管辖范围

信标移动决策步骤如下:

(1) 当未知节点接收到第 1 个新的数据包时,启动一个定时器,等待 ΔT 时间后,作如下判断和处理:

① 若已经收到 3 个信标数据包,则直接按照 4 所述方法进行定位,如图 4 中的 I 区所示.

② 若收到 2 个信标数据包,则比较 RSSI 的大小,取 RSSI 大者对应的信标为信号覆盖源,如图 4 中的 II 区所示.

③ 若只收到 1 个信标数据包,则直接取该信标为信号覆盖源,如图 4 中的 III 区所示.

(2) 确定信号覆盖源信标后,未知节点发送一个包括节点 ID、接收方 ID 和已接收信标数 NUM 的数据包给信号覆盖源信标,数据包格式见表 3.

(3) 各信号覆盖源信标 $N_1 \sim N_6$ 向信标 N_0 反馈一个包含节点 ID、接收方 ID、已接收 2 个信标的未知节点数 Num_2 和已接收 1 个信标的未知节点数 Num_1 的数据包(见表 4).

Table 3 Asking packet of unknown node

表 3 未知节点返回的数据包

ID	ID of receiving node	NUM
----	----------------------	-----

Table 4 Feedback packet from signal cover source to N_0 表 4 信号覆盖源信标反馈给 N_0 的数据包

ID	ID of receiving node	Num 2	Num 1
----	----------------------	-------	-------

(4) 取标度值 v_i 如下:

$$v_i = Num_1_i + Num_2_i \quad (3)$$

其中, $i=1,2,\dots,6$. 各信标标度值计算完后,选取标度值最大信标与 N_0 的连线方向作为信标模型的移动方向,方向角 θ 为

$$\theta = (i-1) \times 60^\circ \quad (4)$$

其中, $i=1,2,\dots,6$. 移动步长为 2γ .

(5) 为避免信标节点陷于已经遍历的区域,在 N_0 上设置一个回退链表,从大到小依次存储方向决策中的所有标度值及对应的移动目标位置.当信标 N_0 移动到当前位置时,通过收集信息发现其他所有信标节点的标度值均为 0 时,则查找回退链表,选择最近的未置标志的表项作为新的移动目标,并置此表项为已用.

2.3 节点定位

未知节点接收到 3 个有效信标数据包就开始自身定位.假设 3 个信标节点分别为 M_1, M_2 和 M_3 ,坐标为 (M_{ix}, M_{iy}) ,其中 $i=1,2$ 或 3 ,数据包格式见表 2,对应的接收信号强度分别为 $RSSI_1, RSSI_2$ 和 $RSSI_3$.首先比较 RSSI 的大小,比如,若 $RSSI_1 \geq RSSI_2, RSSI_1 \geq RSSI_3$ 且 $RSSI_3 \geq RSSI_2$,则未知节点所在区域如图 5 中阴影所示,其中 W_1, W_2, W_3 为等边三角形 $\triangle M_1 M_2 M_3$ 各边中点.此未知节点的定位计算步骤如下:

(1) W_0 的坐标 (W_{0x}, W_{0y}) 为

$$W_{0x} = (M_{1x} + M_{2x} + M_{3x})/3 \quad (5)$$

$$W_{0y} = (M_{1y} + M_{2y} + M_{3y})/3 \quad (6)$$

(2) W_2 的坐标 (W_{2x}, W_{2y}) 为

$$W_{2x} = (M_{1x} + M_{3x})/2 \quad (7)$$

$$W_{2y} = (M_{1y} + M_{3y})/2 \quad (8)$$

(3) 未知节点的定位坐标 (x, y) 为

$$x = (M_{1x} + W_{2x} + W_{0x})/3 = (11M_{1x} + 2M_{2x} + 5M_{3x})/18 \quad (9)$$

$$y = (M_{1y} + W_{2y} + W_{0y})/3 = (11M_{1y} + 2M_{2y} + 5M_{3y})/18 \quad (10)$$

其他未知节点的定位方法与上述方法类似.

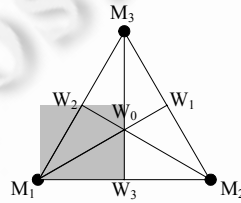


Fig.5 Localization area of node

图 5 节点定位区域

3 仿真分析

实验参数如下:ROI 为 20×20 的矩形,信标发射半径 r 为 3,待定位的未知节点共 60 个,测距噪声为均值为 0 方差为 1 的高斯分布.

将 60 个未知节点随机散布在 ROI 中,构成 C 型网络,如图 6 所示.

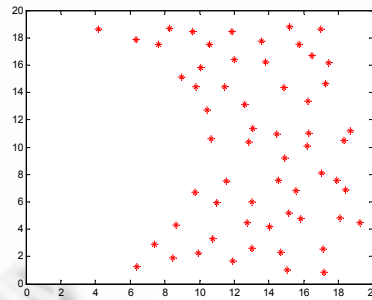


Fig.6 Distribution of nodes in the ROI

图 6 ROI 内节点分布

(1) 移动路径

分别采用文献[14]所述的 BOLAR 算法、文献[15]所述的基于图论的回溯式贪婪算法(backtracking greedy, 简称 BTG)及本文所述算法对上述 ROI 进行移动路径规划,信标节点的遍历路径分别如图 7~图 9 所示。

3 种算法中信标的移动路径长度分别为 205,78 和 67(如图 10 所示).由此可见:BTG 算法及本文所述的算法中,信标节点都能较好地根据未知节点分布进行移动,有效避免无节点分布区域的遍历,体现了在不规则网络的优势.而 BOLAR 算法中,信标移动路径与未知节点分布无关,只与 ROI 大小和形状有关.BTG 算法与本文所述算法相比,它虽能有效遍历 ROI 的边界区域,但只有在整个节点网络完全连通的情况下,才能形成图的生成树,且在同等定位参数条件下,移动路径相对较长,随着信标节点的发射半径 γ 或未知节点的分布密度变小,移动路径长度会明显增大.而对于未知节点分布均匀,且密度较大的 ROI,由于本文所述方法存在回退现象,因此,此种情况下的移动路径相对较长。

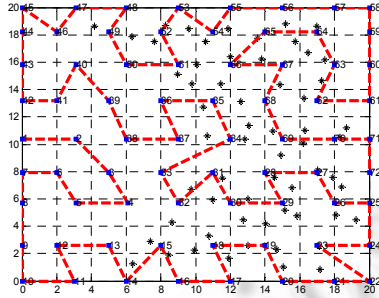


Fig.7 Traverse path of beacon using algorithm of BOLAR

图 7 BOLAR 算法信标移动轨迹

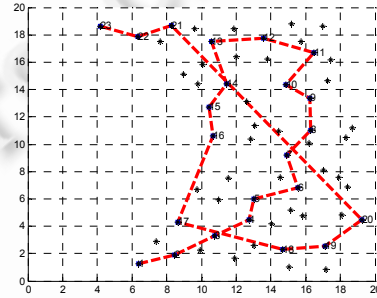


Fig.8 Traverse path of beacon using algorithm of BTG

图 8 BTG 算法信标移动轨迹

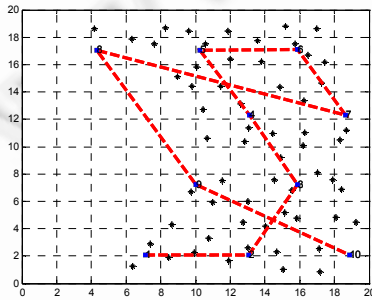


Fig.9 Traverse path of beacon using this algorithm

图 9 本文算法信标移动轨迹

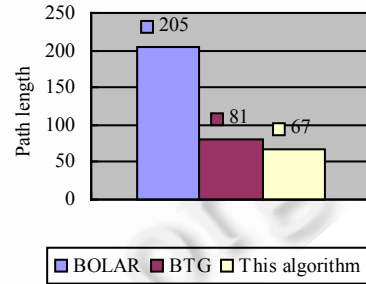


Fig.10 Contrast for the traverse path length of beacon among this three algorithms

图 10 3 种算法中信标移动路径长度对比

(2) 定位精度

假设第 i 个待定位节点的真实坐标为 (x_i, y_i) , 其定位坐标为 (x_{ie}, y_{ie}) , 则

$$\delta_i = \sqrt{(x_i - x_{ie})^2 + (y_i - y_{ie})^2} \quad (11)$$

定义第 i 个待定位节点的定位误差为

$$\alpha_i = \delta_i / \gamma \quad (12)$$

节点平均定位误差为

$$\delta = \sum_{i=1}^m \delta_i / (m\gamma) \quad (13)$$

针对前述实验条件,采用本文所述方法的定位效果及定位误差如图 11、图 12 所示。选择平均定位误差作为评价标准,3 种不同算法下,平均定位误差与 γ 的关系如图 13 所示。

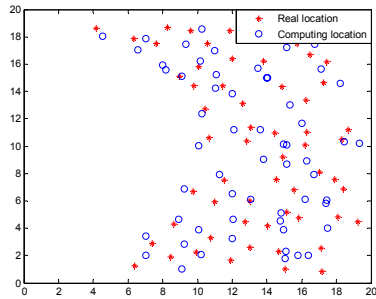


Fig.11 Localization effect of this algorithm

图 11 本文算法定位效果

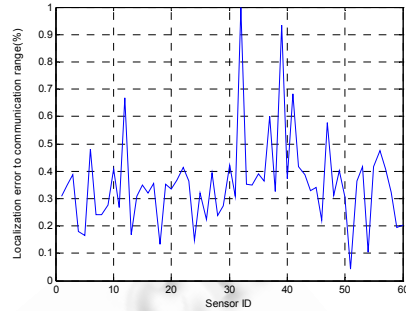


Fig.12 Localization error of this algorithm

图 12 本文算法定位误差

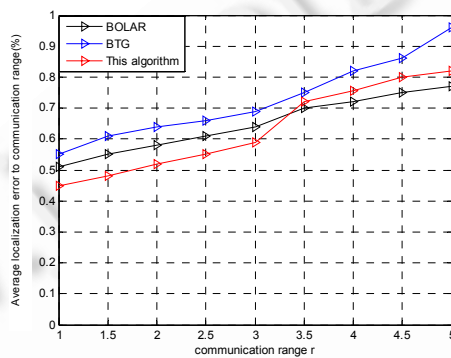


Fig.13 Relationship between the average localization error and the communication radius of node

图 13 平均定位误差与节点通信半径关系

BOLAR 和 BTG 算法均利用实验预先修正 RSSI 值和距离的关系,再结合三边测量法对未知节点定位,这种定位方法对 RSSI 的准确性要求较高,但预先修正的 RSSI 值不能自动适应外界环境的影响,且 BTG 算法不能确保每个未知节点都能被 3 个以上的移动锚节点覆盖,定位精度相对较差.而本文所述的 RSSI 和 range-free 相结合的定位方法,对 RSSI 值的精度没有苛刻的要求,在 γ 较小时,定位性能明显优于 BOLAR 和 BTG 算法。

4 结束语

本文主要针对文献[14]的 BOLAR 算法的不足,根据未知节点的分布提出了一种启发式信标移动路径规划方法,再利用 RSSI 和 range-free 相结合的定位机制对节点进行定位,并通过仿真验证了算法的有效性.但本文未考虑 ROI 边界因素的影响,这将作为下一步研究的主要工作。

致谢 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的同行表示感谢。

References:

- [1] Wang FB, Shi L, Ren FY. Self-Localization systems and algorithms for wireless sensor networks. Journal of Software, 2005,16(5): 857-868 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/857.htm> [doi: 10.1360/jos160857]

- [2] Wei YH, Li RF, Chen HL, Luo J. Path planning of mobile beacon for localization in wireless sensor network. *Journal of System Simulation*, 2009,21(22):7258–7261 (in Chinese with English abstract).
- [3] Niculescu D, Nath B. Position and orientation in ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 2004,2(2):133–151.
- [4] Bulusu N, Heidemann J, Estrin D. GPS-Less low cost outdoor localization for very small devices. *IEEE Personal Communications Magazine*, 2000,7(5):28–34.
- [5] Niculescu D, Nath B. DV based positioning in ad hoc networks. *Journal of Telecommunication Systems*, 2003,22(1-4):267–280.
- [6] He T, Huang CD, Blum BM, Stankovic JA, Abdelzaher T. Range-Free localization schemes in large scale sensor networks. In: *Proc. of the 9th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking*. San Diego: ACM Press, 2003. 81–95.
- [7] Doherty L, Pister KSJ, Ghaoui LE. Convex position estimation in wireless sensor networks. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM 2001*. 1655–1663.
- [8] Shang Y, Ruml W, Zhang Y, Fromherz MPJ. Localization from mere connectivity. In: *Proc. of the 4th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. Annapolis: ACM Press, 2003. 201–212.
- [9] Xiao L, Li RF, Luo J. A sensor localization algorithm in wireless sensor networks based on nonmetric multidimensional scaling. *Journal of Computer Research and Development*, 2007,44(3):399–405 (in Chinese with English abstract).
- [10] Pan SJ, Kwok JT, Yang Q, Pan JJ. Adaptive localization in a dynamic WiFi environment through multi-view learning. In: *Proc. of the AAAI 2007*. Vancouver, 2007. 1108–1113.
- [11] Shen XF, Wang Z, Jiang P, Lin RZ, Sun YX. Connectivity and RSSI based localization scheme for wireless sensor networks. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Intelligent Computing (ICIC)*. Hefei, 2005. 578–587.
- [12] Sichertiu ML, Ramadurai V. Localization of wireless sensor networks with a mobile beacon. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems*. IEEE Press, 2004. 174–183.
- [13] Koutsonikolas D, Das SM, Hu YC. Path planning of mobile landmarks for localization in wireless sensor networks. *Computer Communications*, 2007,30(13):2577–2592.
- [14] Li SJ, Xu CF, Yang Y, Pan YH. Getting optimized beacon path for sensor localization. *Journal of Software*, 2008,19(2):455–467 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/455.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.00455]
- [15] Li HJ, Bu YL, Xue H, Li X, Ma HX. Path planning for mobile anchor node in localization for wireless sensor networks. *Journal of Computer Research and Development*, 2009,46(1):129–136 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

- [1] 王福豹,史龙,任丰原.无线传感器网络中的自身定位系统和算法. *软件学报*,2005,16(5):857–868. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/857.htm> [doi: 10.1360/jos160857]
- [2] 魏叶华,李仁发,陈洪龙,罗娟.无线传感器网络定位中动态信标移动路径规划. *系统仿真学报*,2009,21(22):7258–7261.
- [9] 肖玲,李仁发,罗娟.基于非度量多维标度的无线传感器网络节点定位算法. *计算机研究与发展*,2007,44(3):399–405.
- [14] 李石坚,徐从富,杨畅,潘云鹤.面向传感器节点定位的移动信标路径获取. *软件学报*,2008,19(2):455–467. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/455.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.00455]
- [15] 李洪峻,卜彦龙,薛晗,李迅,马宏绪.面向无线传感器网络节点定位的移动锚节点路径规划. *计算机研究与发展*,2009,46(1):129–136.



文武松(1982—),男,湖北公安人,讲师,主要研究领域为智能控制,嵌入式系统,无线传感器网络.



王璐(1980—),女,讲师,主要研究领域为人工智能,物联网技术.