

# 无线传感器网络中基于潜在博弈的分布式节点定位

贾 杰<sup>1,2</sup>, 张桂园<sup>1</sup>, 陈 剑<sup>1</sup>, 王兴伟<sup>1</sup>, 赵林亮<sup>1</sup>

(1. 东北大学信息科学与工程学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 沈阳理工大学, 辽宁沈阳 110159)

**摘 要:** 分布式定位是无线传感器网络研究中的热点问题. 传统的分布式定位机制存在定位精度低, 算法求解复杂等问题. 为此, 以与邻居节点集距离误差和作为效益函数, 提出基于博弈论的分布式定位模型. 给出了该博弈模型为潜在博弈的形式化证明, 并从理论上证明了纳什均衡的存在性及最终收敛解的有效性. 进一步, 仅通过与邻居节点进行策略信息交互, 提出基于潜在博弈的分布式定位算法. 最后设计了博弈策略空间的决策机制与未知节点的升级机制, 以避免陷入局部最优并加速收敛至全网最优解. 一系列仿真实验验证了所提算法的有效性.

**关键词:** 无线传感器网络; 分布式定位; 潜在博弈; 效益函数

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)09-1724-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.09.1010

## Distributed Node Localization Based on Potential Game in Wireless Sensor Networks

JIA Jie<sup>1,2</sup>, ZHANG Gui-yuan<sup>1</sup>, CHEN Jian<sup>1</sup>, WANG Xing-wei<sup>1</sup>, ZHAO Lin-liang<sup>1</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China;

2. Shenyang Ligong University, Shenyang, Liaoning 110159, China)

**Abstract:** Distributed node localization is an important issue in wireless sensor networks. However, traditional distributed localization algorithms have the drawback of low localization accuracy and high processing complexity. In response to these problems, a distributed localization model based on game theory is presented, where the utility function for each participant is defined as the sum of neighbor distance error. Formally, the proposed localization game is proved as a type of potential game. Through theoretical analysis, the existence of Nash Equilibrium and the validity of the final converged solution are testified. Furthermore, a distributed localization algorithm based on game theory is proposed, where each sensor exchanging information only with its neighbors. Finally, to avoid converging in local optimum and accelerate the convergence speed, the strategy space determination and unknown nodes elevation are developed. Extensive simulation results are performed to demonstrate the effectiveness of our proposed algorithm.

**Key words:** wireless sensor network; distributed localization; potential game; utility function

## 1 引言

无线传感器网络由部署在监测区域内大量低功耗的传感器节点组成, 通过无线通信方式形成一个自组织多跳通信网络<sup>[1]</sup>. 节点定位是大多数传感器网络应用能够顺利开展的重要前提<sup>[2,3]</sup>, 如环境监测、目标追踪、矿井信息采集、灾难救援等应用都需要能够快速准确地获

取每个传感器节点的位置信息. 另外, 精确定位还有助于增强网络覆盖质量, 提升网络自配置能力与路由效率, 并为实现负载均衡提供重要支撑<sup>[4,5]</sup>.

无线传感器网络的定位问题可大致分为两类: 粗粒度定位与细粒度定位. 前者依赖于低成本硬件, 但定位不够精确; 后者通过挖掘重构网络中节点的拓扑关系, 具有更高的定位精度, 被认为是传感器网络定位问题

收稿日期: 2013-05-16; 修回日期: 2013-08-30; 责任编辑: 覃怀银

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61173153, No. 60903159, No. 61070162, No. 71071028); 国家杰出青年科学基金(No. 61225012); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(No. N110404014, No. N110318001, No. N110204003, No. N120104001); 中国博士后科学基金(No. 20110491508, No. 2012T50248); 高等学校博士学科点专项科研基金优先发展领域资助课题(No. 20120042130003); 沈阳理工大学计算机应用技术重点学科开放基金资助课题(No. 4771004kfx06)

研究中的重要内容<sup>[6]</sup>.文献[10]表明,通过获取锚节点位置并计算节点间测量距离<sup>[7-9]</sup>,细粒度定位问题属于多变量非凸优化范畴.进一步,文献[11]证明该问题属于 NP 难问题.为解决上述多变量非凸优化问题,目前主要有三种典型方法,多维标度(Multi-Dimensional Scaling, MDS)<sup>[12]</sup>方法、半定规划(Semi-Defined Programming, SDP)<sup>[13,14]</sup>方法和随机优化方法<sup>[6,11,15]</sup>.在 MDS 方法中,首先根据节点间测距和 MDS 技术生成网络所有节点的相对坐标,再根据锚节点的物理坐标将全网节点的相对坐标转化为绝对坐标.当网络规模较大、未知节点数量较多时,MDS 计算复杂度较高.SDP 通过对原始非凸优化问题进行松弛以获取近似解,由此降低计算复杂度,但这种松弛可能会增加定位误差,文献[14]提出基于梯度下降的搜索方法来提高定位精度.随机优化方法则通过将定位问题建模为优化问题,并使用遗传算法<sup>[6,11]</sup>、模拟退火<sup>[15]</sup>等智能优化算法进行求解.其中,文献[6]使用多目标进化算法 PAES 进行求解,能获得比模拟退火算法更优的性能.然而,目前算法大都依赖于集中计算,当网络规模较大时,全网消息的集中式交互易引发较大能耗.鉴于此,已有一些研究工作开始研究分布式细粒度定位问题,如 DV-hop<sup>[16]</sup>、分布式 SDP<sup>[17]</sup>、分布式 MDS<sup>[18]</sup>等,但现有的分布式算法还存在定位精度较低等问题,如何设计高精度的分布式定位方法,已成为传感器网络定位研究中亟需解决的难点问题.

基于此,本文提出一种基于潜在博弈的分布式定位机制.通过定义未知节点为博弈参与者,以最小化与邻居节点集的总距离误差为目标,设计了博弈策略及效益函数;给出了潜在博弈的形式化证明,并通过理论分析表明,使用本文的策略更新机制,仅需与邻居节点进行策略交互,能够收敛至纳什均衡.进一步,设计了博弈策略空间的决策机制与未知节点的升级机制,以加速博弈收敛.

## 2 网络模型

假设二维监测区域  $A$  中随机部署  $n$  个传感器节点,各节点使用全向天线,具有相同的通信半径  $R_c$ ,每个节点的通信范围可近似表示为以节点位置为圆心,  $R_c$  为半径的圆.将网络建模为无向通信图  $G = (V, E)$ ,其中,  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  表示传感器节点集,  $n$  个节点的位置表示为  $p_i = (x_i, y_i) \in R^2, i = 1, \dots, n$ ,其中  $v_1 \sim v_k (k \leq n)$  表示未知节点,  $v_{k+1} \sim v_n$  表示锚节点;  $E$  表示网络中链路集,仅当  $r_{ij} \leq R_c, e_{ij} \in E$ .  $v_i$  为数据发送方,  $v_j$  为数据接收方,  $r_{ij}$  表示节点  $v_i$  和  $v_j$  之间的欧氏距离,有

$$r_{ij} = \|p_i - p_j\| \quad (1)$$

其中,  $\| \cdot \|$  为 2-范数操作符.如果  $r_{ij} \leq R_c$ ,则称  $v_i$  和  $v_j$  互为邻居.对任意两个邻居节点  $v_i, v_j$ ,假设可通过测距技术获得距离测量值  $d_{ij}$ ,

$$d_{ij} = r_{ij} + e_{ij} \quad (2)$$

其中,  $e_{ij}$  为测量误差.与文献[6]类似,假设全网邻居链路的测量误差相互独立,且服从均值为 0、方差为  $\sigma^2$  的高斯分布,即  $e_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$ .此外,距离测量值呈对称分布,即  $d_{ij} = d_{ji}, \forall i, j$ .

网络部署完成后,各节点通过报文交互,能够获得各自邻居节点集.定义  $N_i$  表示  $v_i$  的邻居集,即,

$$N_i = \{v_j \in V | j' \neq i \text{ 且 } \|p_i - p_j\| \leq R_c\} \quad (3)$$

不失一般性,假设通过定位算法得到的未知节点  $v_i \in \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$  的估计位置为  $\hat{p}_i = \{\hat{x}_i, \hat{y}_i\}$ ,则根据估计位置可求得  $v_i$  和  $v_j$  之间的估计距离  $\hat{d}_{ij}$ ,表示为,

$$\hat{d}_{ij} = \begin{cases} \|\hat{p}_i - p_j\|, & \text{如果 } v_j \text{ 是锚节点} \\ \|\hat{p}_i - \hat{p}_j\|, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

令  $\delta_{ij}$  表示测量距离  $d_{ij}$  与估计距离  $\hat{d}_{ij}$  之差的平方,

$$\delta_{ij} = (d_{ij} - \hat{d}_{ij})^2 \quad (5)$$

若所有未知节点都能够被精确定位,则  $\delta_{ij}$  趋于 0.形式上,该定位问题可以表述为,

$$\text{Min: } \sum_{i=1}^k \sum_{v_j \in N_i} \delta_{ij} \quad (6)$$

## 3 基于潜在博弈的分布式定位

定义未知节点为博弈参与者,表示为  $K = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ .将任意未知节点  $v_i$  的估计位置映射为  $v_i$  的博弈策略,表示为  $s_i = \{\hat{x}_i, \hat{y}_i\} \in S_i, S_i$  为  $v_i$  的策略空间.定义策略组合  $\Psi$  为所有博弈参与者策略向量的笛卡尔积,表示为  $\Psi = \times_{v_i \in K} S_i = s_1 \times s_2 \times \dots \times s_k$ .特别地,定义  $s_{-i}$  为除  $v_i$  之外其他所有博弈参与者的策略集.

为了达到精确定位,对任意  $v_i$ ,效用函数定义为最小化邻居节点集的测量距离与估计距离的差值,即

$$\text{Min: } U_i(\Psi) = \sum_{v_j \in N_i} \delta_{ij} \quad (7)$$

**定义 1(纳什均衡)** 策略组合  $s^*$  是纳什均衡,若其满足

$$U_i(s^*) \leq U_i(s'_i, s_{-i}), \forall s'_i \in S, \forall i \in k \quad (8)$$

根据该定义,对任意  $v_i$ ,当其他参与者均选择并保持纳什均衡策略时,  $v_i$  选择任何策略都不能小于当前策略的效益值.

**定义 2(潜在博弈)** 如果博弈模型拥有一个潜在函数  $P$ ,使得

$$P(s_i, s_{-i}) - P(s'_i, s_{-i}) = U_i(s_i, s_{-i}) - U_i(s'_i, s_{-i}), \forall i \quad (9)$$

其中,  $s_i$  和  $s'_i$  是任意两个策略,则称该博弈为潜在博弈.

潜在博弈是一种特殊类型的博弈方法.文献[19]中证明,如果一个博弈是潜在博弈,则该博弈至少存在一个纳什均衡,且该纳什均衡为潜在函数的全局最优或局部最优.由于每个博弈参与者的效用函数只依赖于参与者本身及其邻居的策略,因而整个博弈能够以分布式方式执行,不需要任何集中式处理过程[20].

**定理 1** 未知节点的定位博弈是一个潜在博弈.

**证明** 令潜在函数  $P$  为所有未知节点的效用函数之和,表示为

$$P(s_i, s_{-i}) = \sum_{i=1}^k \sum_{v_j \in N_i} \delta_{ij} \quad (10)$$

设  $Q(s_{-i}) = \sum_{q=1, q \neq i}^n \sum_{v_j \in N_q} \delta_{qj}$ , 有

$$P(s_i, s_{-i}) = \sum_{v_j \in N_i} \delta_{ij} + Q(s_{-i}) = U_i(s_i, s_{-i}) + Q(s_{-i}) \quad (11)$$

如果  $v_i$  选择了策略  $s'_i$ , 可以得到如下潜在函数  $P$ :

$$P(s_i, s_{-i}) = U_i(s'_i, s_{-i}) + Q(s_{-i}) \quad (12)$$

则有

$$P(s_i, s_{-i}) - P(s'_i, s_{-i}) = U_i(s_i, s_{-i}) - U_i(s'_i, s_{-i}) \quad (13)$$

基于以上分析,可知所有未知节点经过博弈后一定能够收敛至纳什均衡解,且收敛后的纳什均衡解是效用函数的有效解,即收敛到纳什均衡后,每个节点的策略为节点自身位置的准确估计.为了收敛至纳什均衡,本

$$A = -2 * \begin{bmatrix} (x'_{i,1} - x'_i | N_i |) & (y'_{i,1} - y'_i | N_i |) \\ (x'_{i,2} - x'_i | N_i |) & (y'_{i,2} - y'_i | N_i |) \\ \dots & \dots \\ (x'_i | N_i |_{-1} - x'_i | N_i |) & (y'_i | N_i |_{-1} - y'_i | N_i |) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} d^2_{i,1} - d^2_{i,k} - (x'_{i,1})^2 + (y'_{i,1})^2 - (y'_{i,1})^2 + (y'_{i,1})^2 \\ d^2_{i,2} - d^2_{i,k} - (x'_{i,2})^2 + (y'_{i,2})^2 - (y'_{i,2})^2 + (y'_{i,2})^2 \\ \dots \\ d^2_{i,1} - d^2_{i,1-1} - d^2_{i,1-1} - (x'_{i,k})^2 + (y'_{i,1})^2 - (y'_{i,1-1})^2 + (y'_{i,1})^2 \end{bmatrix}$$

考虑到全网节点的随机部署特点,拥有较多锚节点邻居和较大连通性的未知节点具有较快的收敛速度.为此,本文在协商之前,利用与锚邻居节点之间的连通性条件确定未知节点的策略空间,以避免陷入局部最优.并在协商之后,通过判断效益函数进而将未知节点升级为锚节点,以快速收敛到全局最优解.

对任意参与者  $v_i$  而言,在进行策略选择之前,应该处理以下几种可能情况:

(1)若邻居集中没有锚节点,则  $v_i$  的策略空间为整个部署区域.

(2)若邻居集中有 1 个锚节点  $v_m$ ,则  $v_i$  的策略空间定义为以  $v_m$  为圆心,  $R_c$  为半径的通信圆.

(3)若邻居集中有 2 个锚节点  $v_m, v_n$ ,则  $v_i$  的策略空间是以  $v_m, v_n$  为圆心,  $R_c$  为半径的通信圆的重叠区域.

(4)若邻居集中多于 2 个锚节点,则  $v_i$  的策略空间可通过式(16)计算.且  $v_i$  升级为锚节点,并退出博弈.

在博弈结束后,  $v_i$  需要实时检查自身的效益函数

文使用两种著名的策略更新方案,即较优反应技术和最佳反应技术.

在较优反应技术方案中,当轮到  $v_i$  博弈决策时,  $v_i$  随机选择一个策略,若该策略能够产生比前一个策略更好的效益,则保留这一策略,表示为

$$s_{i,t+1} = \begin{cases} s_{i,\text{rand}}, & \text{如果 } U_i(s_{i,\text{rand}}, s_{-i}) < U_i(s_{i,t}, s_{-i}) \\ s_{i,t}, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

在最佳反应技术方案中,当轮到  $v_i$  博弈决策时,  $v_i$  综合考虑所有邻居节点的策略,并从整个策略空间选择一个能够产生最好效益的策略.定义  $v_i$  的所有邻居的最新估计位置为  $\{s_{j,t} : (x'_{i,j}, y'_{i,j}) \mid j = 1, 2, \dots, |N_i|\}$ , 则最佳反应方案中的策略选择可以表述为

$$s_{i,t+1} = \arg \min_{s_i \in S_i} U_i(\Psi) \\ = \arg \min_{s_i \in S_i} \left[ \sum_{v_j \in N_i, v_j \in K} (d_{ij} - \|s - s'_j\|)^2 + \sum_{v_j \in N_i, v_j \notin K} (d_{ij} - \|s - p_j\|)^2 \right] \quad (15)$$

由于节点间测距存在误差,且接收的邻居策略与其真实位置可能不一致,导致上述优化问题无解.为此,本文使用最小二乘法[21]来搜索最优策略,基于最小二乘法,  $v_i$  的当前可策略计算为,

$$s_{i,t+1} = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (16)$$

其中

$$B = \begin{bmatrix} d^2_{i,1} - d^2_{i,k} - (x'_{i,1})^2 + (y'_{i,1})^2 - (y'_{i,1})^2 + (y'_{i,1})^2 \\ d^2_{i,2} - d^2_{i,k} - (x'_{i,2})^2 + (y'_{i,2})^2 - (y'_{i,2})^2 + (y'_{i,2})^2 \\ \dots \\ d^2_{i,1} - d^2_{i,1-1} - d^2_{i,1-1} - (x'_{i,k})^2 + (y'_{i,1})^2 - (y'_{i,1-1})^2 + (y'_{i,1})^2 \end{bmatrix}$$

值,若连续经过  $r$  轮,其效益函数值均小于预设的阈值  $\Theta_n$ ,则认为该节点已经准确定位,同时将其升级为锚节点.基于潜在博弈的分布式定位算法伪代码如下:

- (1) 设置  $t = 0, s_i = \{\emptyset\}, w_i = 0 (\forall v_i \in K)$
- (2) while  $t \leq T$
- (3) for 任意待定位节点  $v_i \in K$
- (4) 获取  $v_i$  的锚邻居节点的数量及坐标;
- (5) if 锚邻居节点数量  $< 1$
- (6) 设置坐标范围为整个目标区域;
- (7) elseif 锚邻居节点数量等于 1
- (8) 设置坐标范围为该锚邻居节点的通信圆覆盖区域;
- (9) elseif 锚邻居节点数量等于 2
- (10) 设置坐标范围为 2 个锚邻居节点的通信圆重叠区域;
- (11) elseif 锚邻居节点数量  $\geq 3$
- (12) 计算  $v_i$  的真实坐标;

- (13) 将  $v_i$  升级为锚节点;
- (14)  $K = K - \{v_i\}$ ;
- (15) break;
- (16) 使用公式(14)或(15)从节点  $v_i$  的坐标范围中更新  $v_i$  的策略;
- (17) if  $U_i(s_{i,t+1}, s_{-i}) \leq \Theta_h$
- (18)  $w_i = w_i + 1$ ;
- (19) if  $w_i \geq r$
- (20) 将  $v_i$  升级为锚节点;
- (21)  $K = K - \{v_i\}$ ;
- (22) else
- (23)  $w_i = 0$ ;
- (24)  $t = t + 1$ ;
- (25) end while

其中,  $T$  表示最大迭代次数,  $r$  为连续收敛的次数,  $\Theta_h$  表示效用阈值,  $r$  与  $\Theta_h$  由用户预先设定. 对每个节点而言, 迭代协商只涉及所有邻居节点间的策略交互, 其计算复杂度为  $O(n_c * T)$ ,  $n_c$  表示全网节点邻居集的平均大小. 因此, 基于潜在博弈的分布式定位算法的时间复杂度为  $O(N_n * n_c * T)$ .

## 4 实验结果与分析

为了评估算法的性能, 引入平均定位误差 (Mean

Localization Error, MLE), 由  $M$  表示, 则有,

$$M = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \|\hat{p}_i - p_i\| \quad (17)$$

测量误差  $e_{ij}$  的方差为  $\lambda^2 r_{ij}^2$ , 不失一般性, 在所有实验中,  $\lambda$  设置为 0.1.

**实验 1** 首先考察算法的定位性能. 在  $100 \times 100$  的区域中随机部署 165 个传感器节点, 其中, 15 个为锚节点, 其余 150 个为未知节点. 设置  $R_c = 20$ , 博弈协商分别使用较优反应技术与最佳反应技术.

图 1(a) 示意了网络初始部署及节点之间的连接情况, 图 1(b)、图 1(c) 分别给出了使用较优反应模型与最佳反应模型迭代 200 次的定位结果. 其中, 星号表示锚节点, 圆圈表示未知节点, 加号表示未知节点的估计位置, 定位误差由虚线进行量化. 从图 1(a) 可见, 仅少量未知节点有 2 个或 2 个以上锚节点邻居, 部分节点无锚节点邻居. 迭代 200 次后, 较优反应模型下的  $M = 0.08$ , 最佳反应模型下的  $M = 0.03$ , 如图 1(b) 与图 1(c) 所示, 可见在两种反应模型下, 所有未知节点基本上都能精确定位, 最佳反应模型得到的结果略优于较优反应模型.

**实验 2** 考察分别采用较优反应模型和最佳反应模型时, 平均定位误差随迭代次数的变化情况.

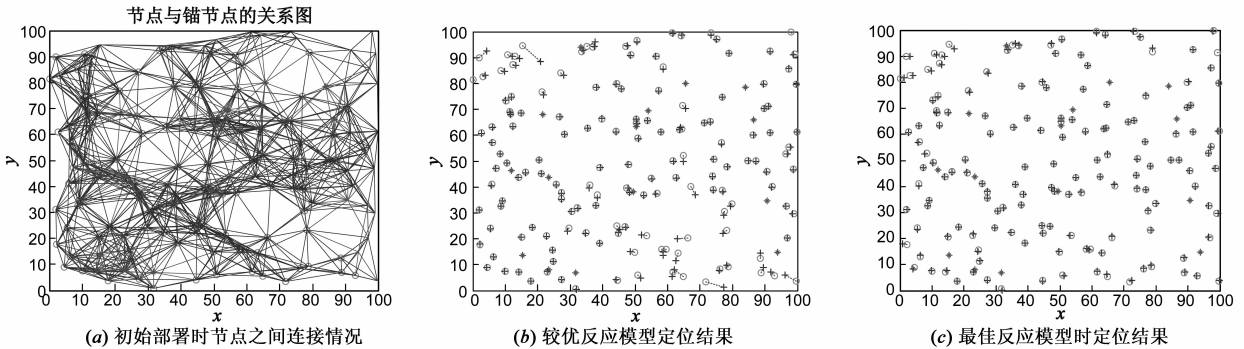


图1 节点初始分布及最终定位结果

图 2 给出了使用不同反应模型时平均定位误差的对比情况. 可见, 使用两种反应策略都能够快速收敛到最优解, 且如预期一样, 使用最佳反应策略时, 具有更快的收敛速度. 而且在定位博弈中, 通过使用博弈策略空间决策机制与未知节点升级技术, 能够大大加快算法的收敛, 表现为平均定位误差曲线的直线下降.

**实验 3** 将本文算法与 PAES、DV-hop 及 MDS-MAP 算法进行对比. 其中, PAES 算法采用遗传算法迭代寻找全网节点的估计位置. DV-hop 算法则基于跳数距离与三点定位计算所有待定位节点的位置. MDS-MAP 算法则通过多维标度方法进行节点间定位. 本文采用最佳

反应技术对博弈参与者的策略进行更新.

图 3 给出了不同锚节点数量下不同算法平均定位误差的对比情况. 从图 3 可见, 当锚节点数量增加时, 四种定位算法的性能都得到改善, 且本文算法性能优于 PAES、MDS-MAP 及 DV-hop 算法. 主要因为, MDS-MAP 采用最小跳数方法来计算任意两个节点间的距离, 这会导致较大的定位误差; 而 PAES 则因不能避免节点位置翻转现象, 会导致较大的误差; 由于 DV-hop 在与锚节点距离估计过程中存在较大的误差, 导致其定位效果最差; 而本文算法仅需估计邻居节点间的有效距离, 能够有效降低节点间距离估计误差的影响; 另外, 本文使用

博弈策略空间的策方法,能够极大地避免节点位置翻转现象;进一步,未知节点的升级机制能够不断增加全网的锚节点数量,当初始部署的锚节点较少时,本文算法的定位效果仍然很好.

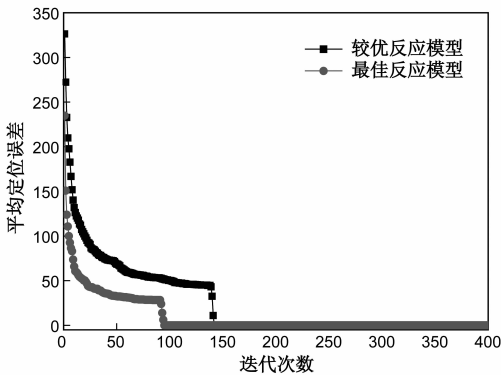


图2 不同反应模型时平均定位误差的对比情况

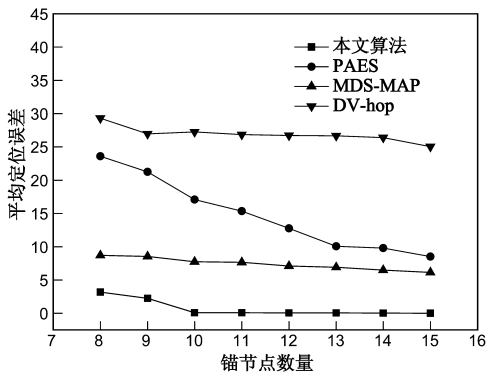


图3 不同锚节点情况下平均定位误差性能对比

图4给出了不同节点规模下平均定位误差性能对比情况,锚节点数量均设置为未知节点数量的10%。从图4可见,当部署节点增加时,所有定位算法的性能都得到了改善.这主要由于部署密度越高,任意节点间的最小跳数连接越趋近直线,这会减少距离的估计误差值,使得MDS-MAP及DV-hop的定位精度都得到提升.在PAES算法中,节点翻转现象会因节点部署密度的提升而减少,这也会减少定位误差.由于本文算法具有最

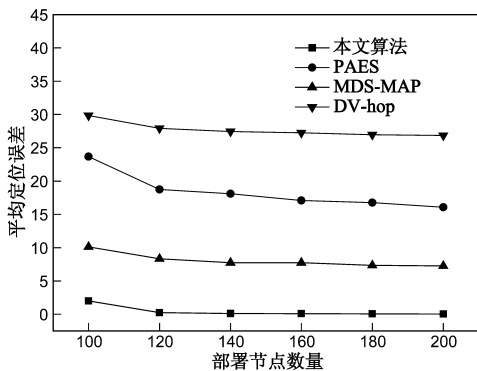


图4 不同节点规模条件下MLE性能对比

小的距离估计误差值,且采用的方法能够有效避免节点翻转,因而在任意部署密度下,均具有最小的定位误差.

图5给出了本文算法与PAES、DV-hop及MDS-MAP算法在不同节点数量规模下达到收敛所需的运行时间,其中锚节点数量设置为未知节点数量的10%。仿真使用PC机的主频为i7-2600 3.4GHz,内存为4GB.考虑到PAES及本文算法采用迭代方式执行,在算法执行过程中,实时记录全网的总误差函数,当总误差值小于0.5时,认为全网已准确定位,输出并记录总运行时间.

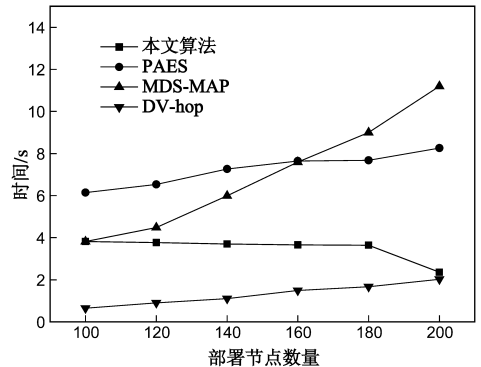


图5 不同算法的求解时间对比情况

从图5可见,本文算法收敛所需的时间远远小于PAES与MDS-MAP,稍大于DV-hop算法. PAES与MDS-MAP的计算时间随着未知节点数量的增加而增加,这主要是因为定位计算中,由于几何约束,需要更多的时间来计算未知节点的估计位置. DV-hop在定位过程中,不需要与邻居节点迭代交互信息,因而定位时间更短.博弈定位的计算时间随节点数量增加而减少,这主要是因为相同感知区域下,更多的节点意味着更大的网络连通性,因此会加快博弈算法的收敛速度.

## 5 结语

本文研究了无线传感器网络的分布式定位问题.通过理论分析给出了全网博弈定位模型,定义各未知节点为博弈参与者,设计了基于邻居节点距离误差和的效益函数.形式化证明了该博弈模型为潜在博弈,并从理论上证明了纳什均衡的存在性.仅使用邻居节点协商交互,提出一种基于潜在博弈的分布式节点定位算法.进一步,利用参与者收敛速度的差异性来解决局部最优纳什均衡问题,提出了新的策略空间决策机制与未知节点升级机制以加快定位算法的收敛.大量仿真结果表明,本文算法能够快速、有效地定位传感器节点的准确位置,在高密度、少量锚节点部署的环境中同样表现良好,具有较好的可扩展性.

## 参考文献

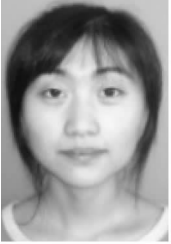
- [1] AKYILDIZ IF, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, CAYIRCI E. Wireless sensor networks: a survey[J]. *Computer Networks*, 2002, 38(4): 393 – 422.
- [2] 沙超, 王汝传, 孙力娟, 黄海平. 无线传感器网络中一种信标节点可迁移的协作定位方法[J]. *电子学报*, 2010, 38(11): 2625 – 2629.  
SHAO Chao, WANG Ruchuan, SUN Lijuan, HUANG Haijing. A cooperating localization method based on beacon transfer in wireless sensor networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(11): 2625 – 2629. (in Chinese)
- [3] VEMPATY A, OZDEMIR O, AGRAWAL K, et al. Localization in wireless sensor networks: byzantines and mitigation techniques[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(6): 1495 – 1508.
- [4] MAO GQ, FIDAN B, ANDERSON BDO. Wireless sensor network localization techniques[J]. *Computer Networks*, 2007, 51(10): 2529 – 2553.
- [5] REDONDI A, CHIRICO M, BORSANI L. An integrated system based on wireless sensor networks of patient monitoring, localization and tracking[J]. *Ad Hoc Networks*, 2013, 11(1): 39 – 53.
- [6] VECCHIOA M, LÓPEZ R, MARCELLONIB F. A two-objective evolutionary approach based on topological constraints for node localization in wireless sensor networks[J]. *Applied Soft Computing*, 2012, 15(7): 1891 – 1901.
- [7] LI X. RSS-based location estimation with unknown pathloss model[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, 5(12): 3626 – 3633.
- [8] SAVVIDES A, HAN CC, SRIVASTAVA M. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors[A]. *Proceedings of the 7th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)* [C]. Rome, Italy: ACM Press, 2001. 166 – 179.
- [9] LI X, PAHLAVAN K. Super-resolution TOA estimation with diversity for indoor geolocation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2004, 3(1): 224 – 234.
- [10] DOHERTY L, PISTER K, GHAOUI LE. Convex position estimation in wireless sensor networks[A]. *Proceedings of the IEEE INFOCOM* [C]. Anchorage, Alaska, USA: IEEE Press, 2001. 1655 – 1663.
- [11] DIANA M, JAVIER DS, SERGIO G, et al. On the design of a novel two-objective harmony search approach for distance-and connectivity-based localization in wireless sensor networks[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013, 26(2): 669 – 676.
- [12] SHANG Y, RUMMLER W, ZHANG Y, et al. Localization from connectivity in sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2004, 15(11): 961 – 974.
- [13] BISWAS P, YE Y. Semidefinite programming for ad hoc wireless sensor network localization[A]. *Proceedings of the International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)* [C]. Berkeley, California, USA: IEEE Press, 2004. 46 – 54.
- [14] BISWAS P, LIANG TC, TOH KC, et al. Semidefinite programming approaches for sensor network localization with noisy distance measurements[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2006, 3(4): 360 – 371.
- [15] KANNAN AA, MAO G, VUCETIC B. Simulated annealing based wireless sensor network localization with flip ambiguity mitigation[A]. *Proceedings of the 63rd IEEE Vehicular Technology Conference* [C]. Melbourne, Australia: IEEE Press, 2006. 1022 – 1026.
- [16] DRAGOS N, BADRI N. DV Based Positioning in Ad Hoc Networks[J]. *Telecommunication Systems*, 2003, 22(1 – 4): 267 – 280.
- [17] BISWAS P, LIANG TC, WANG TC, et al. Semidefinite programming based algorithms for sensor network localization[J]. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2006, 2(2): 188 – 220.
- [18] COSTA JA, PATWARI N, HERO III AO. Distributed weighted-multidimensional scaling for node localization in sensor networks[J]. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2006, 2(1): 39 – 64.
- [19] CANALES M, GALLEGUO JR. Potential game for joint channel and power allocation in cognitive radio networks[J]. *Electronics Letters*, 2010, 46(24): 1632 – 1634.
- [20] YANG S, STARSKY HYW, KANG WL. Optimal gateway selection in multi-domain wireless networks: a potential game perspective[A]. *Proceeding of the 17th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom)* [C]. New York. ACM Press, 2011. 325 – 336.
- [21] WANG C, WU D, SHU F. Design and implementation of a decentralized positioning system for wireless sensor networks[A]. *Proceedings of the Wireless Communications & Networking Conference (WCNC)* [C]. Sydney: IEEE Press, 2010. 1 – 6.

## 作者简介



贾杰(通信作者) 女, 1980年出生于辽宁省鞍山市. 现为东北大学计算机应用技术研究所副教授, 主要从事无线网络、压缩感知和认知无线电技术等方面的研究工作.

E-mail: jiajie@ise.neu.edu.cn



**张桂园** 女,1989 年出生于山东省菏泽市. 硕士研究生,主要从事无线传感器网络方面的研究工作.

E-mail: taxuetuan@163.com



**王兴伟** 男,1968 年出生于内蒙古包头市. 现为东北大学计算机应用技术研究所教授、博士生导师,主要从事下一代互联网、自组织网络和移动互联网等方面的研究工作.

E-mail: wangxingwei@ise.neu.edu.cn



**陈 剑** 男,1980 年出生于湖南省邵阳市. 博士,东北大学讲师,主要从事多媒体无线通信系统、网络管理及视频信号建模技术等方面的研究工作.

E-mail: chenjian\_-2002cn@163.com



**赵林亮** 男,1956 年出生于山东省青岛市. 现为东北大学计算机应用技术研究所教授,主要从事无线自组织网络和移动计算等方面的研究工作.

E-mail: zhaolinliang@ise.neu.edu.cn