

基于优化策略的混合定位算法

郝志凯¹ 王硕¹ 谭民¹

摘要 针对无线传感器网络 (Wireless sensor network, WSN) 的应用需求提出一种基于优化策略的混合节点定位算法. 选择 1-hop 节点最多的点作为初始点, 利用多维标度 (Multi-dimensional scaling, MDS) 方法计算初始节点及其 1-hop 节点的相对坐标, 并将这些节点的坐标发送给周围未定位节点; 未定位的节点根据接收到的坐标与节点间的距离, 利用极大似然法估算自身的坐标; 最后通过坐标变换计算所有节点的绝对坐标. 在此基础上, 进一步提出将本文节点定位算法与集中式和分布式优化策略相结合来优化网络节点的估计坐标, 以提高节点定位精度. 仿真结果表明本文提出的算法是有效的, 能够较好地完成无线传感器网络节点的定位.

关键词 无线传感器网络, 定位, 优化, 多维标度

DOI 10.3724/SP.J.1004.2010.00711

Hybrid Positioning Algorithm Based on Optimization

HAO Zhi-Kai¹ WANG Shuo¹ TAN Min¹

Abstract In this paper, a hybrid positioning algorithm based on optimization is proposed for applications of wireless sensor networks (WSNs). The presented method starts from the initial node which has the most neighbors in the network. Then, the relative coordinates of the initial node and its neighbors are estimated by multi-dimensional scaling (MDS) algorithm and broadcasted. The un-localized nodes estimate their coordinates with the maximum likelihood algorithm based on their received coordinates and ranged distances to each neighbor. In the end, all nodes' absolute coordinates are obtained by coordinate translation. Furthermore, the global and distributed optimization strategies are integrated into the presented algorithm for improving the positioning precision. The simulation results show that the proposed algorithms are valid and can localize sensor nodes precisely.

Key words Wireless sensor network (WSN), localization, optimization, multi-dimensional scaling (MDS)

随着微电子机械系统 (Micro electronic mechanical system, MEMS) 技术和网络技术的发展, 传感器系统发生了深刻的改变, 大规模无线传感器网络 (Wireless sensor networks, WSNs) 节点的研究与应用得到越来越多的重视. 这些节点通常依靠电池供电, 通讯能力有限, 存储空间小, 装配有几种不同的传感器来检测周围的环境数据. 这些节点的位置或坐标通常无法预先获知, 例如节点通过设备投放到森林、水下进行各种数据检测, 或在其他环境中跟踪某一运动物体. 通过节点测量得到的数据只有与其测量位置、测量时间一一对应时才更有意义, 才能动态分析被跟踪物体的位置、轨迹. 在移动传感器网络中, 节点移动位置可以对整个移动传感

器网络的空间分布和通讯网络结构优化产生重要作用, 因此网络各个节点的位置信息对于移动无线传感器网络的控制也是至关重要的. 国内外学者对于无线传感器网络中节点的定位问题都给予了高度重视, 并开展了大量研究工作.

一般来说, 无线传感器网络中的定位方法可分为非距离式定位和距离式定位两类. 非距离式定位是利用节点间的 hop 数或求区域质心来计算节点的坐标. 文献 [1] 中提出了一种估计节点间距离的方法 DV-hop, 这种方法适用于节点均匀分布的情况. 文献 [2] 中提出了一种非距离式定位的中心算法. 传感器网络中包含参考节点和普通节点, 通过计算 k 个参考节点的中心来估计普通节点的位置或坐标. 这种方法误差较高, 要得到较高的定位精度需要很多参考节点且均匀分布在网络的外围. 文献 [3] 中提出的 APIT (Approximation point-in-triangulation test) 方法是通过计算不同三角形的重叠区域的中心来确定节点的坐标. APIT 适用于节点随机分布且不要求各节点通讯能力完全一样的情况, 定位精度在很大程度上取决于参考节点的数量和重叠区域的大小. 距离式定位一般利用节点间的距离来计算节点的相对位置, 定位精度主要取决于节点间测距的精度. 文献 [1] 中也提出了 DV-distance 方法来估

收稿日期 2008-11-18 录用日期 2009-10-21
Manuscript received November 18, 2008; accepted October 21, 2009

国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2007AA041502), 国家自然科学基金 (60635010, 60725309) 资助

Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2007AA041502), National Natural Science Foundation of China (60635010, 60725309)

1. 中国科学院自动化研究所复杂系统与智能科学实验室 北京 100190
1. Laboratory of Complex Systems and Intelligence Science, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

计节点间距离. 文献 [4-5] 中提出了利用多维标度 (Multi-dimensional scaling, MDS) 计算节点坐标的方法: MDS-MAP(C)、MDS-MAP(C,R)、MDS-MAP(P) 和 MDS-MAP(P,R). 这四种方法在节点的连通度高和参考节点比例大时可取得很好的定位效果. 在文献 [6] 中也通过节点之间的距离或距离结合相对角度利用 MDS 方法来计算节点的相对位置坐标.

此外, 国内学者对无线传感器网络节点定位方法也作了大量研究: 文献 [7] 中利用分层定位的思想, 研究了一种集中与分布相结合的定位方法, 该方法适用于高连通度的网络, 用于计算框架节点和普通节点的定位. 文献 [8] 中基于 MDS 方法, 提出了一种分布式的算法 MDS-MAP(D), 该算法把节点进行分簇, 利用网络的连接关系, 在不需要高精度测距技术支持的条件下对节点坐标进行估计. 文献 [9] 中利用三维空间抽样和范围约束的方法, 提出了基于跳数和基于距离的定位方法. 文献 [10] 中提出了一种分布式基于加权多尺度分析技术的鲁棒节点定位算法, 该算法自适应选择综合性能好的邻居节点参与迭代优化, 并采用与节点相对可信度成正比的加权机制, 增加高可信度节点在定位计算中的贡献度. 文献 [11] 中对 DV-Hop 算法提出了一种改进策略, 将共线度概念引入到导标节点选择阶段, 并在此基础上提出了一种基于网络局部拓扑的自适应共线度阈值确定方法.

由于基于节点间距离的定位精度较高, 因此本文针对距离式定位方法开展研究工作. 而在距离式定位中, 节点间估计距离的偏差对节点定位精度有较大影响, 所以, 本文提出的算法利用实际测量的 1-hop 节点之间的距离和相对角度计算 2-hop 节点距离, 进而计算节点坐标, 最后通过优化进一步提高定位精度. 本文提出的算法虽然提高了对硬件的要求, 但通过混合 MDS 方法、极大似然估计法和最速下降优化算法, 在保证定位精度的情况下, 降低了算法的复杂性. 这是由于在计算时, 只有一小部分节点利用 MDS 方法定位, 其余节点通过极大似然法计算自身坐标. 这种方法适合于静态网络或移动节点数量较小的网络.

本文主要内容按如下结构进行组织: 首先提出了混合定位算法, 这是一种基于节点间距离和相对角度的递推定位算法 (Iterative positioning algorithm based on range and relative angle between nodes, IPARA), 而后给出了以 IPARA 为基础、引入优化过程的 IPARA-global optimization (IPARA-GO) 算法和 IPARA-distributed optimization (IPARA-DO) 算法, 最后给出仿真结果和结论.

1 IPARA 算法

一般来说, 无线传感器网络节点间距离的测量可以采用到达时间 (Time of arrival, TOA)、到达时间差 (Time difference of arrival, TDOA) 或接收信号强度 (Received signal strength indication, RSSI) 等测量方法; 而相对角度的测量主要通过天线阵列或多个接收机确定发射节点信号的到达方向来计算. 因此, 本文假设传感器网络中 1-hop 节点之间的距离和相对角度可测量, 且测量误差符合高斯分布.

本文提出的 IPARA 算法利用测量获得 1-hop 节点之间的距离和相对角度信息, 进而估算 2-hop 节点之间的距离; 而后依据连通度信息选择初始点, 以初始点及其 1-hop 节点距离信息利用古典 MDS 方法计算这组节点的坐标, 并建立相对坐标系; 获得自身相对坐标位置的已定位节点向它的未确定坐标位置的邻居节点广播其坐标信息, 未定位的节点利用接收到已定位的 1-hop 和 2-hop 节点的坐标信息, 并结合节点之间的距离通过极大似然法估计自身的坐标, 并将其估计坐标再向其邻居节点进行广播, 而其邻居节点采用与其相同的计算方法估计自身坐标, 当全部节点完成定位或达到系统停止条件时, 结束传感器网络节点基于相对坐标系的定位; 最后利用传感器网络中参考节点的绝对坐标信息, 将各个节点的相对坐标转换为绝对坐标. 下面各节将详细介绍 IPARA 算法的各个步骤.

1.1 2-hop 节点间距离的估算

依据本文假设, 1-hop 节点之间的距离和相对角度可测量, 因此依据此信息可以估算 2-hop 节点间距离. 如图 1 所示, 节点 A 和节点 C 都是节点 B 的 1-hop 节点, 节点 A 和节点 C 互为 2-hop 节点, 因此通过 1-hop 节点间的距离和相对角度, 利用余弦定理可以估算出 2-hop 节点间的距离.

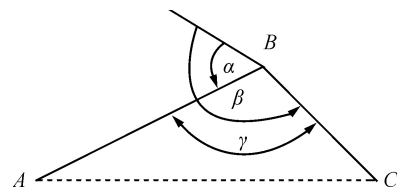


图 1 2-hop 节点间的距离

Fig. 1 The distance between 2-hop nodes

节点 B 接收到的节点 A 发射信号的到达角度为 α , 节点 B 接收到的节点 C 发射信号的到达角度为 β (如图 1 所示), 则有

$$\gamma = \begin{cases} |\alpha - \beta|, & |\alpha - \beta| \leq \pi \\ 2\pi - |\alpha - \beta|, & |\alpha - \beta| > \pi \end{cases} \quad (1)$$

由于 1-hop 节点间距离可测, 由余弦定理可计算出 2-hop 节点 A 和 C 间的距离. 因此, 传感器网络内的所有 2-hop 节点的距离都可以计算, 而利用这些距离信息可以计算各节点的相对坐标.

1.2 初始点的选取及其 1-hop 节点的定位

在计算出无线传感器网络内全部 2-hop 节点间的距离后, 选取无线传感器网络中的某个节点作为初始点. 一般来说, 初始点的选择有很多方法, 如随机选择等. 本文采用了选择 1-hop 邻居节点最多的节点作为初始点的方法, 以保证尽可能多的网络节点参与相对坐标系的建立, 有利于整个网络节点的递推定位. 在初始点及其 1-hop 邻居节点组成的子网络中, 任意两个节点的距离都已知, 依据古典 MDS^[4] 方法可以求出这组节点的相对坐标并建立相对坐标系, 具体的计算方法为通过对节点间距离组成的矩阵进行分解求出所有节点的相对坐标.

在一个 r ($r = 2$ 或 3) 维空间中, 假设任意两个节点 i 和 j 的距离都已知, 则距离矩阵 D 是一个主对角线上元素都为 0, 其他元素都不为 0 的对称矩阵, $D^{(2)}$ 是由距离的平方构成的矩阵, 如下式所示

$$D^{(2)} = \begin{bmatrix} 0 & d_{12}^2 & \cdots & d_{1n}^2 \\ d_{21}^2 & 0 & \cdots & d_{2n}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1}^2 & d_{n2}^2 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, d_{ij}^2 表示节点 i 和 j 间距离的平方. 根据文献 [6] 有 $B = -0.5 \times JD^{(2)}J$, 其中 $J = I_{n \times n} - n^{-1}1_{n \times n}$, $I_{n \times n}$ 为单位矩阵, $1_{n \times n}$ 为全 1 矩阵. 对 B 进行奇异值分解, 可得 $B = QAQ^T$, 则节点的相对坐标 $X = QA^{1/2}$. 在计算过程中, B 的奇异值可能存在负值或 0, 此时选取 B 的最大的 r 个奇异值及对应的奇异向量计算相对坐标

$$X_r = Q_r A_r^{1/2} \quad (3)$$

当距离矩阵 D 没有误差或误差很小时, X_r 基本反映了节点在网络中的相对位置.

1.3 无线传感器网络中其他节点的定位

当初始点及其 1-hop 节点计算出自身坐标后, 向它们的 1-hop 节点广播自身的坐标, 接收到坐标的节点再向其 1-hop 节点广播其坐标. 这样一个已定位节点的坐标最远传播到它的 2-hop 节点为止. 传感器网络中的其他节点则根据接收到的坐标进行定位.

初始点的 n -hop ($n \geq 2$) 节点接收到初始点的 $(n-1)$ -hop 和 $(n-2)$ -hop 节点的坐标, 利用极大似然法^[12] 估算自身坐标. 假设在 2D 环境中, 未知

节点坐标为 $X(x, y)$, 收到的 k ($k \geq 3$) 个坐标分别为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_k, y_k)$, 它们到未知节点的距离分别为 d_1, d_2, \dots, d_k , 则使用最小均方差估计方法可以得到节点的坐标为

$$\hat{X} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (4)$$

$$\text{其中, } A = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_k) & 2(y_1 - y_k) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{k-1} - x_k) & 2(y_{k-1} - y_k) \end{bmatrix},$$

$$b = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_k^2 + y_1^2 - y_k^2 + d_k^2 - d_1^2 \\ \vdots \\ x_{k-1}^2 - x_k^2 + y_{k-1}^2 - y_k^2 + d_k^2 - d_{k-1}^2 \end{bmatrix}.$$

在 2D 环境中, 未知节点接收到 3 个坐标就可以计算自身的相对坐标, 由于距离测量存在误差, 这样得到的坐标容易偏离其他节点. 极大似然估计利用 k 个已知坐标的点到未知节点的距离计算未知节点的坐标, 可以降低这种偏离程度, 从而提高定位精度.

当初始点的 n -hop ($n \geq 2$) 节点计算出自身坐标后开始向周围的节点广播该坐标, 最远传播到其 2-hop 节点, 则传感器网络中其他节点就可以利用相同的方法估算自身坐标. 以初始点及其 1-hop 节点为核心, 节点定位算法逐步向外扩展, 直到所有节点都定位或达到系统停止条件时结束. 通过这一过程, 传感器网络中的节点将获得其在相对坐标系中的坐标位置信息.

1.4 相对坐标到绝对坐标的变换

在得到所有节点的相对坐标后, 利用同时具备绝对坐标位置信息和相对坐标位置信息的参考节点建立坐标变换方程, 将各节点的相对坐标转换为绝对坐标. 为了简化计算, 考虑 2D 环境下 3 个参考节点的情况. 假设 $T = [T_1, T_2, T_3, \dots, T_n]_{2 \times n}$ 表示绝对坐标系下 n 个节点的绝对坐标, $R = [R_1, R_2, R_3, \dots, R_n]_{2 \times n}$ 表示相对坐标系下对应的 n 个节点的相对坐标, 节点 1, 2, 3 为参考节点, 根据线性变换, 存在 $Q_{2 \times 2}$ ^[13], 使得

$$\begin{bmatrix} T_1 - T_1 & T_2 - T_1 & T_3 - T_1 \end{bmatrix} = Q \begin{bmatrix} R_1 - R_1 & R_2 - R_1 & R_3 - R_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由上式可以求出 Q

$$Q = \frac{\begin{bmatrix} T_2 - T_1 & T_3 - T_1 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} R_2 - R_1 & R_3 - R_1 \end{bmatrix}} \quad (6)$$

则节点 4, 5, \dots , n 的绝对坐标为

$$[T_4, T_5, \dots, T_n] = Q[R_4 - R_1, R_5 - R_1, \dots, R_n - R_1] + b \quad (7)$$

其中, $b = [T_1, T_1, \dots, T_1]$.

2 基于优化策略的改进 IPARA 算法

IPARA 算法是通过递推逐步获取全部网络节点定位信息的. 首先获取初始节点及其 1-hop 节点的坐标, 然后向外扩展, 获取初始节点的 n -hop 节点坐标, 直到所有的节点都定位或达到设定停止条件为止. 在这个过程中, 距离测量误差、计算误差使节点的定位误差逐渐积累, 离初始节点越远的节点, 其定位误差积累越大, 从而导致该节点的估计坐标偏离真实坐标越大. 为了获取更为准确的网络节点坐标, 必须采取优化算法对这些误差进行修正. 因此, 本文在 IPARA 算法的基础上, 引入了基于实测距离信息的相对坐标估计优化过程, 提出了基于集中式优化的 IPARA 算法 (IPARA-GO) 和基于分布式优化的 IPARA 算法 (IPARA-DO). IPARA-GO 算法和 IPARA-DO 算法采用了相同的优化策略, 是为了适应不同的应用环境和需求而设计的.

2.1 节点相对坐标估计的优化

节点相对坐标估计的优化过程通过建立目标函数, 利用目标函数计算坐标估计的修正值, 从而不断调整节点的坐标. 本文利用节点的估计坐标计算节点间的估计距离, 通过节点间估计距离与实测距离的偏差来修正节点的估计坐标. 节点的估计坐标通过 IPARA 算法求得, 再通过这些估计坐标计算节点间的估计距离; 1-hop 节点间的实测距离通过测量直接得到, 2-hop 节点间的实测距离通过 1-hop 节点间的距离和相对角度计算得到. 由于在利用 IPARA 算法计算节点估计坐标时, 每个节点 (除初始点) 只用了与部分邻居节点的距离信息, 这样节点间的估计距离与实测距离存在一些差异, 通过修正这些差异提高节点的定位精度. 在 2D 环境中, 若 (x_i, y_i) 为节点 i 的估计坐标, (x_j, y_j) 为节点 j 的估计坐标, p_{ij} 为节点 i 和 j 间的估计距离, d_{ij} 表示节点间的实测距离, 则目标函数为

$$f = \sum_{i,j} (d_{ij} - p_{ij})^2 \quad (8)$$

其中, 节点 i 和 j 均为无线传感器网络中的节点且互为 1-hop 或 2-hop 节点. 式 (8) 给出了一种衡量节点定位精度的目标函数, 通过使目标函数 f 最小化就可以找到在整个网络意义上的各节点相对坐标的最优估计

$$\min \sum_{i,j} (d_{ij} - p_{ij})^2 \quad (9)$$

在对式 (9) 的求解过程中, 本文采用了最速下降法. 由目标函数 f 对节点 i 的坐标 x_i, y_i 分别求导, 可得节点 i 相对坐标的第 $k+1$ ($k \geq 0$) 次估计值 $(x_i(k+1), y_i(k+1))$, 可表示为

$$\begin{cases} x_i(k+1) = x_i(k) + \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta \\ y_i(k+1) = y_i(k) + \frac{\partial f}{\partial y_i} \Delta \end{cases} \quad (10)$$

其中, Δ 表示修正系数, 可依据不同的网络结构和测距误差选择, 也可以根据目标函数动态分配, 但要保证目标函数的递减性. $((x_i(k), y_i(k)))$ 表示节点 i 相对坐标的第 k 次估计值.

$$|f(k) - f(k+1)| \leq \varepsilon \quad (11)$$

上式中, $f(k), f(k+1)$ 分别为目标函数第 k 次和第 $k+1$ 次的计算值, ε 为一个小的正实数值. 如果目标函数满足式 (11), 则停止对节点坐标估计值的修正, 否则继续修正. 设定值 ε 越小, 通过优化过程获得的节点坐标估计精度越高, 但同时也增加了系统的计算量. 因此, ε 的取值要权衡定位精度要求和计算量, 根据系统定位精度的要求, 选取适当的数值.

将上述优化过程引入 IPARA 算法, 提出了基于集中式优化的 IPARA 算法 IPARA-GO 和基于分布式优化的 IPARA 算法 IPARA-DO. IPARA-GO 算法的特点在于将无线传感器网络全部节点进行定位后, 利用优化方法对全部节点的相对坐标估计进行整体优化; 而 IPARA-DO 算法的特点在于随着无线传感器网络节点的逐层定位过程逐层进行相对坐标估计的优化.

2.2 IPARA-GO 算法和 IPARA-DO 算法工作流程

IPARA-GO 算法是在所有节点的相对坐标计算完成后, 利用式 (10) 对节点的相对坐标进行修正, 算法流程如图 2 所示.

在对所有节点进行全局优化时, 每个节点基于其 1-hop 节点和 2-hop 节点的相对坐标建立目标函数, 利用式 (10) 对各节点的相对坐标估计进行优化, 当满足式 (11) 时转入下一步.

在节点数量较少时, 使用 IPARA-GO 算法可以获得比较好的节点定位精度. 但当节点数量很大时, 同时对所有节点的坐标进行修正, 计算量非常大. 而采用分布式的优化策略则将有效地降低计算量, IPARA-DO 算法就是由此提出的. IPARA-DO 算法是配合节点定位算法逐步进行节点坐标估计优化的, 算法流程如图 3 所示.

与 IPARA-GO 算法中的优化方法类似, 节点在优化自身相对坐标时, 只利用其 1-hop 节点和 2-hop

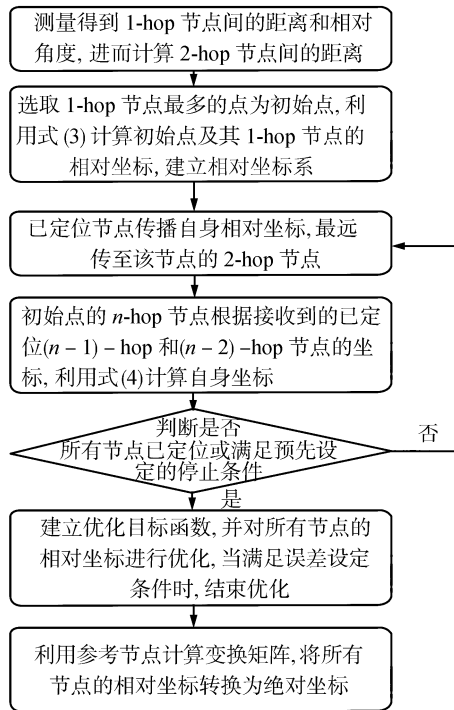


图 2 IPARA-GO 算法流程

Fig.2 Algorithm flow of IPARA-GO

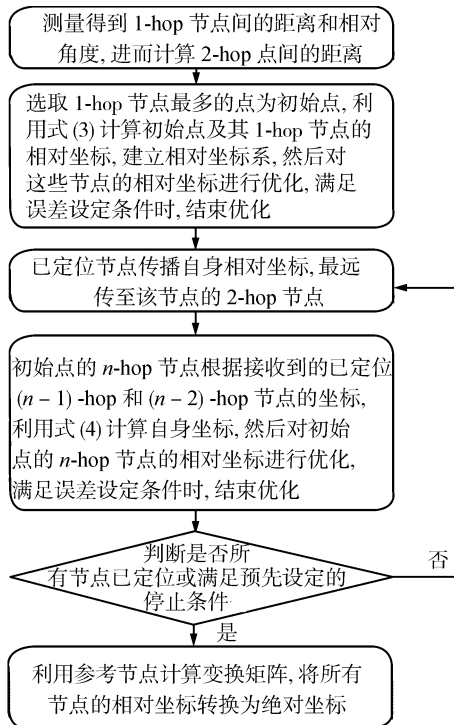


图 3 IPARA-DO 算法流程

Fig.3 Algorithm flow of IPARA-DO

节点的相对坐标建立目标函数. 由 IPARA-GO 算法和 IPARA-DO 算法的流程可以清楚地发现两者的不同: IPARA-GO 算法是针对网络全部节点进行

相对坐标估计优化的; 而 IPARA-DO 算法在任意时刻都只是针对部分网络节点进行相对坐标估计优化的. 但不论是 IPARA-GO 算法还是 IPARA-DO 算法, 都提高了无线传感器网络节点的定位精度.

3 仿真结果及讨论

为了检验本文提出的 IPARA、IPARA-GO 和 IPARA-DO 三种算法的有效性, 设定了 2D 环境下四种节点分布情况, 使用 Matlab 7.0 进行了算法仿真研究. 四种节点分布情况如图 4 所示: 1) 200 个节点随机分布在 $10r \times 10r$ 的方形区域 (图 4(a)); 2) 200 个节点随机分布在 C 形区域, 边界为 $10r \times 10r$, 空心部分为 $6r \times 6r$ (图 4(b)); 3) 100 个节点规则分布在 $10r \times 10r$ 的方形区域 (图 4(c)); 4) 76 个节点规则分布在 C 形区域, 边界为 $10r \times 10r$, 空心部分为 $6r \times 5r$ (图 4(d)). 其中 r 为区域标度, 在本文仿真中 $r = 10$. 节点的放置误差为 2%, 节点间的通讯距离为 $1.5r$, 节点间的距离测量误差为 8%. 在算法仿真中, 由节点间相对角度测量误差产生的影响被统一归入距离测量误差进行考虑.

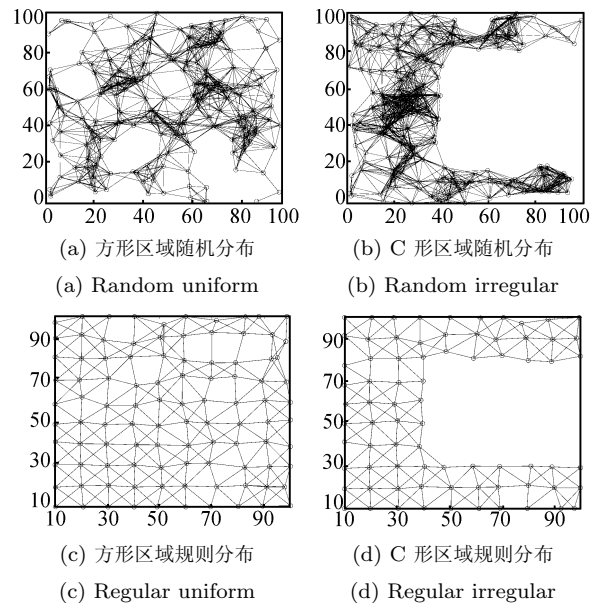


图 4 仿真中设定的四种节点分布情况

Fig.4 Four placements of nodes in simulations

3.1 IPARA 算法仿真及讨论

图 5 给出了 200 个随机分布在方形和 C 形区域的节点采用 IPARA 算法进行定位的仿真结果. 图 5(a) 和图 5(b) 分别表示计算获得的节点在方形区域 100×100 中的相对坐标和绝对坐标. 节点的连通度为 13.1, 图 5(b) 中的直线段表示估计坐标的误差, 直线段越长误差越大. 仿真结果显示 x 坐标平均偏离真实坐标 6.87, y 坐标平均偏离真实坐标 17.54,

估计坐标与真实坐标间的平均距离偏差为 19.09, 其中有 145 个节点估计坐标的误差大于 r . 20 号节点只有一个 1-hop 邻居节点 (100 号节点) 和一个 2-hop 节点 (13 号节点), 不能根据极大似然法估计自身的坐标, 是一个不能定位的节点, 因此该节点的定位误差最大, 为 93.9. 图 5(c) 和图 5(d) 分别表示节点在 C 形区域中的相对坐标和绝对坐标. 节点的连通度为 17.6, 图 5(d) 中的直线段表示估计坐标的误差. 仿真结果显示 x 坐标平均偏离真实坐标 2.97, y 坐标平均偏离真实坐标 3.67, 估计坐标与真实坐标之间的平均距离偏差为 5.13, 其中有 18 个节点的距离偏差超过 r . 此外, 三个参考节点的选取对绝对坐标的影响较大, 当三个参考节点分别选在 C 形区域的三个边上时, 节点绝对坐标的偏差要低于随意选取的情况. 比较图 5(b) 和图 5(d) 可以发现, 方形区域的节点定位误差要大于 C 形区域, 这主要是由于在同样条件下, 前者的节点连通度 (13.1) 低于后者 (17.6), 两种区域下的定位误差分别为 $1.91r$ 和 $0.51r$.

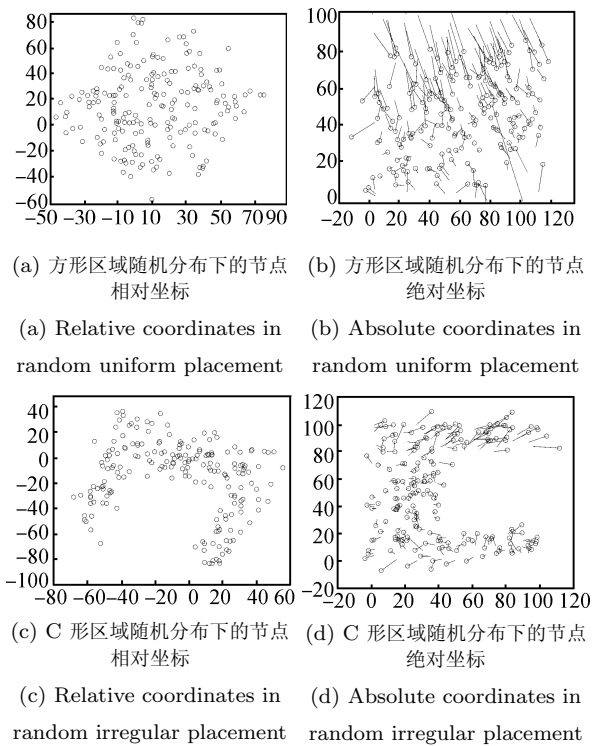


图 5 节点在随机分布情况下的 IPARA 算法仿真结果
Fig. 5 The simulation results of IPARA in
random placement

图 6 给出了 100 个规则分布在方形区域的节点和 76 个规则分布在 C 形区域的节点采用 IPARA 算法进行定位的仿真结果. 图 6(a) 和图 6(b) 分别表示规则分布在方形区域中的 100 个节点的相对坐标和绝对坐标, 节点的连通度为 5.7. 仿真结果显示

x 坐标平均偏离真实坐标 4.42, y 坐标平均偏离真实坐标 2.59, 估计坐标与真实坐标之间的平均距离偏差为 5.58, 其中有 13 个节点的距离偏差超过 r . 图 6(c) 和图 6(d) 分别表示规则分布在 C 形区域中的 76 个节点的相对坐标和绝对坐标, 节点的连通度为 5.23. x 坐标平均偏离真实坐标 2.64, y 坐标平均偏离真实坐标 4.14, 估计坐标与真实坐标之间的平均距离偏差为 5.45, 其中有 8 个节点的距离偏差超过 r . 两种区域下的定位误差分别为 $0.56r$ 和 $0.54r$.

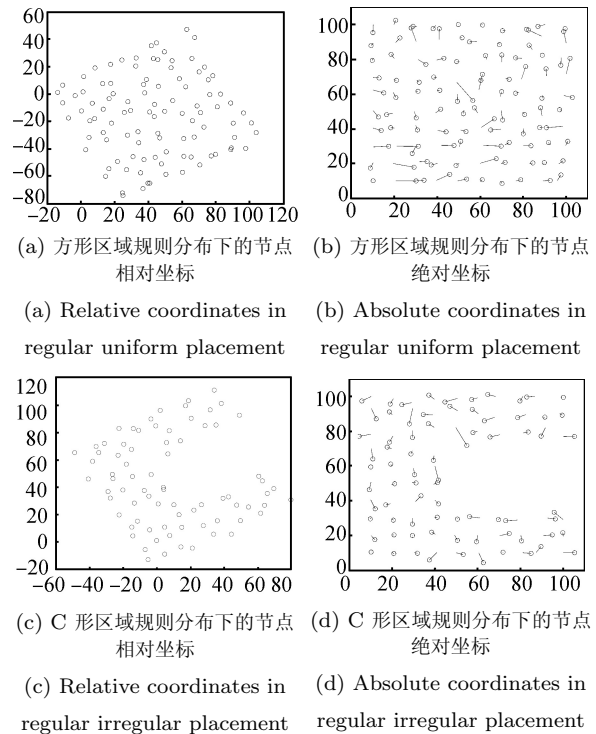


图 6 节点在规则分布情况下的 IPARA 算法仿真结果
Fig. 6 The simulation results of IPARA in
regular placement

3.2 IPARA-GO 与 IPARA-DO 算法仿真及讨论

在本节 IPARA-GO 算法和 IPARA-DO 算法仿真中, 引入的优化策略中的参数为: 式 (10) 中的 Δ 取值为 0.001, 式 (11) 中的 ε 取值为 0.001. 图 7 给出了 200 个随机分布在方形区域和 C 形区域的节点采用 IPARA-GO 算法和 IPARA-DO 算法进行定位的仿真结果. 图 7(a) 和图 7(b) 分别为采用 IPARA-GO 算法和 IPARA-DO 算法计算获得的方形区域内随机分布节点的绝对坐标; 图 7(c) 和图 7(d) 分别为采用 IPARA-GO 算法和 IPARA-DO 算法计算获得的 C 形区域内随机分布节点的绝对坐标. 在方形区域中, IPARA-GO 的优化次数为 405, IPARA-DO 平均优化次数为 244. 在定位过程中, 20 号节点的 1-hop 节点和 2-hop 节点只有两个点,

无法进行定位, 采用 IPARA-GO 和 IPARA-DO 算法的定位误差分别为 33.45 和 77.35, 即图 7 (a) 和图 7 (b) 中最长的两条直线段.

在 C 形区域中, IPARA-GO 的优化次数为 314, IPARA-DO 的平均优化次数为 251. 比较 IPARA、IPARA-GO 和 IPARA-DO 三种算法在方形区域节点随机分布情况下的定位结果可知, IPARA 算法的定位误差为 $1.91r$, 在进一步采用优化策略后, 误差分别降低为 $0.30r$ (IPARA-GO) 和 $0.42r$ (IPARA-DO). 同样比较在 C 形区域情况下, 定位误差由 $0.51r$ (IPARA) 降为 $0.15r$ (IPARA-GO) 和 $0.17r$ (IPARA-DO), 且所有节点的距离误差都小于 r . 由此可见, 引入优化策略后随机分布节点的定位精度得到较大的提高.

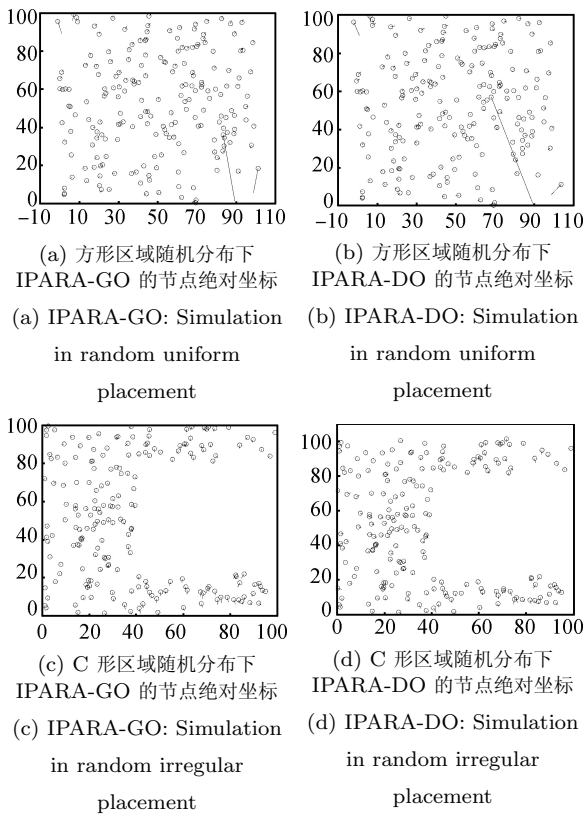


图 7 节点在随机分布情况下 IPARA-GO 算法和 IPARA-DO 算法的仿真结果

Fig. 7 The simulation results of IPARA-GO and IPARA-DO in random placement

图 8 给出了 100 个规则分布在方形区域的节点和 76 个规则分布在 C 形区域的节点采用 IPARA-GO 算法和 IPARA-DO 算法进行定位的仿真结果. 图 8 (a) 和图 8 (b) 分别为方形区域下采用 IPARA-GO 算法和 IPARA-DO 算法计算获得的节点绝对坐标; 图 8 (c) 和图 8 (d) 分别为 C 形区域下采用 IPARA-GO 算法和 IPARA-DO 算法计算获得的节

点绝对坐标. 在方形区域的仿真结果中, 节点的定位误差由 $0.56r$ (IPARA) 降低为 $0.24r$ (IPARA-GO) 和 $0.28r$ (IPARA-DO); 在 C 形区域的仿真结果中, 节点的定位误差由 $0.54r$ (IPARA) 降低为 $0.32r$ (IPARA-GO) 和 $0.29r$ (IPARA-DO).

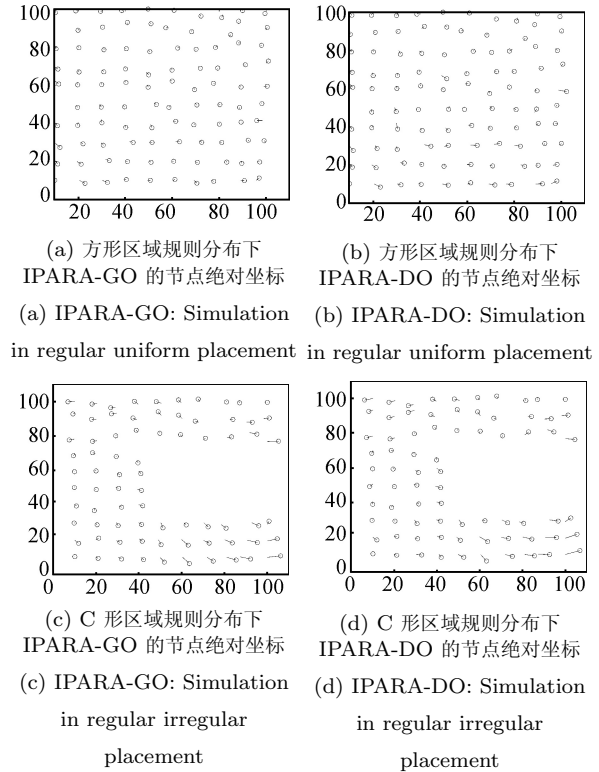


图 8 节点在规则分布情况下 IPARA-GO 算法和 IPARA-DO 算法的仿真结果

Fig. 8 The simulation results of IPARA-GO and IPARA-DO in regular placement

因此, 引入优化策略同样可以提高规则分布的节点的定位精度.

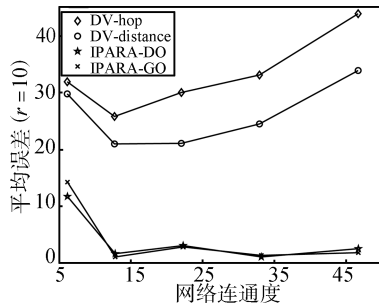
与文献 [13] 中提出的算法相比, 本文的方法给出了较好的节点初始坐标选取方法与估算策略, 使优化目标函数能够较快地收敛; 在节点相对坐标计算上, 采取了基于 1-hop 和 2-hop 节点坐标及节点间距离的极大似然法进行估计的策略, 与文献 [4] 中提出的算法比较计算量要小.

3.3 不同算法的定位结果比较

图 9 给出了节点随机分布在方形区域和 C 形区域的 IPARA-GO、IPARA-DO、DV-hop 和 DV-distance^[1] 算法定位比较结果. 参考节点数为 3, 测距误差为 5%.

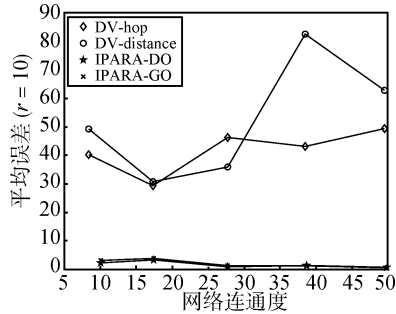
图 9 (a) 是在方形区域中的定位结果. 由图可知, 当参考节点的数目较少时, DV-hop 和 DV-distance 算法的定位误差较大, 当连通度为 13 时, 定位误差

最小,分别为 25.83 和 20.99,随着连通度的增加,这两种方法不能有效地降低误差.而 IPARA-GO 和 IPARA-DO 算法在参考节点数目较少时,定位误差相对较小,当网络连通度为 6 时,定位误差分别为 14.25 和 11.72,随着连通度的增加,定位误差可以有效地降低,当连通度达到 13 时,定位误差降为 1.03 和 1.06.当连通度大于 15 时,随着连通度的增加,定位误差降低很少,而计算量会增加,此时要权衡系统的定位精度要求和计算能力.



(a) 节点随机分布在方形区域下的比较结果

(a) Comparison in random uniform placement



(b) 节点随机分布在 C 形区域下的比较结果

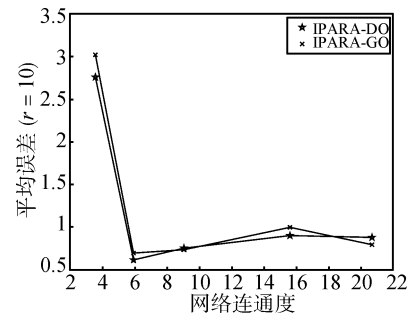
(b) Comparison in random irregular placement

图 9 节点随机分布情况下的算法比较结果
Fig.9 Comparison of simulation results in random placement

图 9(b) 是在 C 形区域中的定位结果.在 C 形区域中节点的密度较大,网络连通度较高,IPARA-GO 和 IPARA-DO 的定位误差相对较小;而 DV-hop 和 DV-distance 算法易受节点分布不均匀的影响,因此定位误差相对较高.

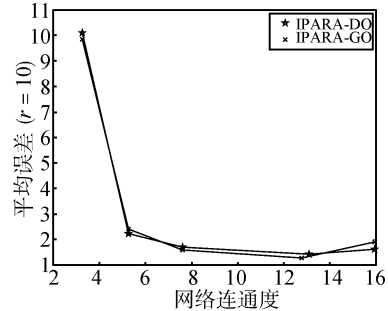
节点在规则分布的情况下, DV-hop 和 DV-distance 算法不能给出较好的定位结果,定位误差很大.当节点的通讯距离为 $1.5r$ 时,网络连通度为 6,在 10 个参考节点的情况下,两种方法的定位误差分别为 494.5 和 682.9.这是由于在规则分布的情况下,网络中 1-hop 平均距离的估计误差较大,由此计算出的未知节点到参考节点的距离误差很大,从而节点计算的自身坐标误差很大.因此,图 10 只给出 IPARA-GO 和 IPARA-DO 算法在不同网络连通度下的定位结果.

图 10(a) 是节点规则分布在方形区域下的定位结果.由于 IPARA-GO 和 IPARA-DO 是递推算法,定位过程从由初始点及其 1-hop 节点组成的核心逐步向外扩展,在低连通度下,定位所有节点需要的次数更多,误差累积效应更大,因此节点的坐标误差较大.随着连通度的增加,节点在计算自身坐标时有更多的参照点且定位次数减少,使定位精度提高,但同时也引入了更多的测距误差,使坐标精度降低,这两个因素导致了该算法的定位误差曲线随着连通度的增加不是单调递减,而是可能出现了如图 10(a) 所示的误差反弹.由图 10(a) 可知,当网络连通度为 6 时,节点的定位误差分别为 $0.70r$ 和 $0.62r$.



(a) 节点规则分布在方形区域下的比较结果

(a) Comparison in regular uniform placement



(b) 节点规则分布在 C 形区域下的比较结果

(b) Comparison in regular irregular placement

图 10 节点规则分布情况下的算法比较结果
Fig.10 Comparison of simulation results in regular placement

图 10(b) 是节点规则分布在 C 形区域下的定位结果.由图 10 可知,IPARA-GO 和 IPARA-DO 能够很好地解决在规则分布情况下的节点定位问题.

与 MDS^[4] 算法的比较利用了文献 [4] 中的四种定位方法的仿真结果.在 200 个节点随机分布在 100×100 的方形区域的情况下,由文献 [4] 中的 MDS 算法的仿真结果与 IPARA-GO、IPARA-DO 算法的定位结果相比较可知,在连通度较低的情况下(连通度 < 10),本文提出的算法的定位精度要高于文献 [4] 中的四种方法: MDS-MAP(C)、MDS-MAP(C,R)、MDS-MAP(P) 和 MDS-MAP(P,R).

但随着连通度的增加, 本文的算法与文献 [4] 中的 MDS-MAP(C, R) 和 MDS-MAP(P, R) 的定位误差相差不大. 对比其他三种节点分布情况, 可以得到一致的结论. 此外, 在文献 [4] 中每个节点的坐标都要通过 MDS 方法来计算, 而本文提出的算法只有初始点及其 1-hop 节点的坐标需要通过 MDS 方法计算, 其余节点的坐标都通过极大似然法计算, 从而有效降低了算法的复杂性.

4 结论

本文提出了一种利用 1-hop 节点之间的距离和相对角度信息进行无线传感器网络定位的递推算法 (IPARA). 通过测量或估算获得 1-hop 和 2-hop 节点间的距离, 而后利用 MDS 算法和极大似然估计算法估算各个节点的相对坐标, 最后利用参考节点的绝对坐标信息将各个节点的相对坐标转换为绝对坐标. 与已提出的定位算法不同, 本文给出的算法中用到的距离是通过测量 (1-hop 距离) 或利用距离和相对角度测量值估算 (2-hop 距离) 得到的, 从而提高了用于节点定位的节点间距离信息的精度. 由于 IPARA 算法是一种递推算法, 在定位过程中存在误差累积问题, 为了解决这一问题, 引入了优化策略对 IPARA 算法进行改进, 提出了基于集中式优化策略的 IPARA 算法 (IPARA-GO) 和基于分布式优化策略的 IPARA 算法 (IPARA-DO). 仿真结果表明, IPARA、IPARA-GO 和 IPARA-DO 算法都是有效的, IPARA-GO 和 IPARA-DO 算法同 IPARA 算法相比, 可以有效地提高无线传感器网络节点的定位精度.

References

- 1 Niculescu D, Nash B. Ad Hoc positioning system (APS). In: Proceedings of Global Telecommunications Conference. San Antonio, USA: IEEE, 2001. 2926–2931
- 2 Bulusu N, Heidemann J, Estrin D. GPS-Less Low-Cost Outdoor Localization for Very Small Devices, Technical Report 00-729, Computer Science Department, University of Southern California, USA, 2000
- 3 He T, Huang C, Blum B M, Stankovic J A, Abdelzaher T. Range-free localization schemes for large scale sensor networks. In: Proceedings of the International Conference on Mobile Computing and Networking. San Diego, USA: ACM, 2003. 81–95
- 4 Shang Y, Ruml W, Zhang Y, Fromherz M. Localization from connectivity in sensor networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2004, **15**(11): 961–974
- 5 Shang Y, Ruml W. Improved MDS-based localization. In: Proceedings of the 23rd IEEE Communications Society. Washington D. C., USA: IEEE, 2004. 2640–2051
- 6 de Abreu G T F, Destino G. Super MDS: source location from distance and angle information. In: Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Washington D. C., USA: IEEE, 2007. 4433–4437

- 7 Feng Li, Yao Yuan-Cheng, Hu Rong-Chun. Reearch on wireless sensor localization based on hierarchical localization. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications*, 2008, **20**(4): 427–430
(冯立, 姚远程, 胡荣春. 基于分层定位的无线传感器网络定位研究. 重庆邮电大学学报, 2008, **20**(4): 427–430)
- 8 Ma Zhen, Liu Yun, Shen Bo. Distributed locating algorithm for wireless sensor networks — MDS-MAP(D). *Journal on Communications*, 2008, **29**(6): 57–62
(马震, 刘云, 沈波. 分布式无线传感器网络定位算法 MDS-MAP(D). 通信学报, 2008, **29**(6): 57–62)
- 9 Yu Ning, Wan Jiang-Wen, Ma Wan-Xing. Sampling based three-dimensional localization algorithm for wireless sensor networks. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2008, **31**(3): 13–18
(于宁, 万江文, 马万兴. 无线传感器网络三维抽样定位. 北京邮电大学学报, 2008, **31**(3): 13–18)
- 10 Luo Hai-Yong, Li Jin-Tao, Zhao Fang, Lin Quan, Zhu Zhen-Min, Yuan Wu. Robust node localization based on distributed weighted-multidimensional scaling in wireless sensor networks. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(3): 288–297
(罗海勇, 李锦涛, 赵方, 林权, 朱珍民, 袁武. 一种基于加权多尺度分析技术的鲁棒节点定位算法. 自动化学报, 2008, **34**(3): 288–297)
- 11 Liu Ke-Zhong, Wang Shu, Hu Fu-Ping, Xu Chang-Chun. An improved DV-hop localization algorithm for wireless sensor networks. *Information and Control*, 2006, **35**(6): 787–792
(刘克中, 王殊, 胡富平, 许昌春. 无线传感器网络中一种改进 DV-Hop 节点定位方法. 信息与控制, 2006, **35**(6): 787–792)
- 12 Sun Li-Min, Li Jian-Zhong, Chen Yu, Zhu Hong-Song. *Wireless Sensor Networks*. Beijing: Tsinghua University Press, 2005
(孙利民, 李建中, 陈渝, 朱红松. 无线传感器网络. 北京: 清华大学出版社, 2005)
- 13 Ji X, Zha H. Sensor positioning in wireless Ad-Hoc sensor networks using multidimensional scaling. In: Proceedings of the 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Washington D. C., USA: IEEE, 2004. 2652–2661



郝志凯 中国科学院自动化研究所博士研究生. 主要研究方向为无线传感器网络. 本文通信作者.

E-mail: hpzilong@yahoo.com.cn

(HAO Zhi-Kai Ph.D. candidate. His main research interest is wireless sensor network. Corresponding author of this paper.)



王硕 中国科学院自动化研究所副研究员. 主要研究方向为仿生机器人, 多机器人系统.

E-mail: shuo.wang@ia.ac.cn

(WANG Shuo Associate professor. His research interest covers biomimetic robot and multi-robot system.)



谭民 中国科学院自动化研究所研究员. 主要研究方向为多机器人系统, 先进机器人, 仿生机器人.

E-mail: min.tan@ia.ac.cn

(TAN Min Professor. His research interest covers multi-robot system, advanced robot, and biomimetic robot.)