

无线传感器网络中的鲁棒区域定位算法

冯 缜 刘 威 徐侃如 程文青 杨宗凯
(华中科技大学湖北省智能互联网技术重点实验室 武汉 430074)

摘 要: 大多数传统的方法并不能处理一些影响定位算法性能的因素,如各向相异的投放环境,不精确的锚节点位置以及带误差的距离测量。该文提出一种鲁棒的区域定位算法,通过建立一个全局约束集来处理如上所述的影响因素。使用可行解区域投影方法计算每个节点的可行地理区域,将传感器节点的真实位置限定于该区域中,同时利用非凸约束计算其存在的内部空洞。此外为了提高该方法的实用性,提出了一种基于分簇的分布式迭代算法。仿真结果表明算法受地理环境,测量误差等因素的影响较小,能适用于传感器网络应用。

关键词: 无线传感器网络; 节点定位; 鲁棒区域定位

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)09-2263-04

Robust Region Localization for Wireless Sensor Networks

Feng Zhen Liu Wei Xu Kan-ru Cheng Wen-qing Yang Zong-kai
(Huazhong University of Science and Technology, Hubei Provincial Key Laboratory of Smart Internet Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Traditional localization methods usually can not handle sensor networks which are affected by several practical factors, such as anisotropic deployment terrain, imprecise anchor node position and noisy range measurements. In this paper, a robust region localization approach is proposed to naturally address these factors by constructing a global constraint set. A projection method is given to compute feasible geographic region, which can assuredly bound actual node position. The infeasible holes within the region are also computed using non-convex constraints. To enhance the practicability of this method, an iterative and distributed implementation based on clustering. Simulation results show that the algorithm is not affected by deployment terrain and measurement noise, thus it is applicable for sensor networks.

Key words: Wireless sensor network; Node localization; Robust region localization

1 引言

集成了传感功能与网络特性的无线传感器网络,提供了信息系统与物理世界之间的一道桥梁。在一些无线传感器网络的典型应用中,如环境监测^[1],计算目标事件发生的位置需要利用已知节点的位置信息。另外,节点的位置信息能用于路由^[2]。

使用邻居节点间距离信息的定位算法比基于测角的定位算法较为常见,主要的测距方式包括利用声音和无线电波信号传输时间差来测量节点间距离(TDoA)以及根据节点接受能量随着距离的衰减关系来测距(RSSI)^[3]。在网络的实际投放过程中,其投放环境并不是理想的规则区域,同时可能存在障碍物。如果投放区域的地形是各向相异(anisotropic)的,一些算法的性能会受到较大影响,如 APS^[4]和 MDS-MAP^[5]。为了解决这些问题,文献[6,7]针对传感器网络应用于非理想的投放环境,提出了一些新的定位方法。

另一方面,节点的两种测量误差, GPS 锚节点的位置测量误差以及邻居节点间的距离测量误差,是不能被简单忽略的。GPS 接收机通常不能工作于室内环境,锚节点的位置可能不够准确。此外由于成本的因素,节点上测距设备的精度较低,容易导致不准确的定位结果。

总的来说,大多数定位算法,仅给出了单一的节点位置估计值。当传感器网络受如下因素的影响的时候:各向相异(anisotropic)的投放环境,不精确的锚节点位置信息,以及有误差的测距信息,使用基于单一位置估计值的定位算法性能均会受到一定影响。一些节点的定位误差可能较大,而这种误差也无法被量化。本文提出了一种定位算法,能较好地处理上述传感器网络实用过程中的特殊情况,计算节点的所有可能位置范围,从而评估节点位置的不确定性。

2 限定传感器节点位置的约束集

为方便起见,把预先知道位置信息的传感器节点称为已知节点或者锚节点,其位置信息可以通过 GPS 接收机得到,把其他需要定位的节点称为未知节点。

假设 S_1, S_2, \dots, S_N 是投放到二维平面上的 N 个传感器节

2007-02-08 收到, 2007-08-06 改回

国家自然科学基金(60572049, 60602029)和湖北省重点实验室开放课题基金(HSIT-200605)资助课题

点。变量 (x_i, y_i) 为节点 S_i 的坐标, $(i = 1, 2, \dots, N)$ 。 G_1, G_2, \dots, G_M 是网络中的 M 个已知节点, 常量 $(x_q, y_q), (q = N + 1, N + 2, \dots, N + M)$, 是它们的坐标。本文提出的定位方法也能适用于没有已知节点的传感器网络: 可以任意选择一个节点作为已知节点, 其坐标为 $(0, 0)$, 计算其它节点相对于该节点的位置信息。最后, 假设所有传感器节点的最大通信距离均为 r 。下面引入一些约束用于限定传感器节点的位置变量。

2.1 带误差的距离测量

如果网络内邻居节点间距离测量存在误差, 为了保证节点定位的可靠性, 可以使用上限 u_{ij} , 下限 l_{ij} , 构成区间 $[l_{ij}, u_{ij}]$ 来限定邻居节点 S_i, S_j 之间的真实距离。通常情况下, 如果节点间距离测量较精确(使用 TDofA 测距), 该区间的长度可以设置为较小的值。反之, 如果节点间距离测量不够精确(使用信号能量 RSSI 测距), 可以将该区间设置得较大。可以使用下面的约束来限定所有邻居节点之间的真实距离:

$$\left. \begin{aligned} & \| (x_i, y_i) - (x_j, y_j) \| \leq u_{ij}, \text{ 邻居节点 } S_i, S_j \\ & \| (x_k, y_k) - (x_q, y_q) \| \leq u_{kq}, \text{ 邻居节点 } S_i, G_q \\ & \| (x_i, y_i) - (x_j, y_j) \| \geq l_{ij}, \text{ 邻居节点 } S_i, S_j \\ & \| (x_k, y_k) - (x_q, y_q) \| \geq l_{kq}, \text{ 邻居节点 } S_i, G_q \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)中前两个约束为凸约束, 其余为非凸约束。可以将两个凸约束写成如下的线性矩阵不等式(LMI), 其中 I_2 为 2 阶单位矩阵:

$$\left. \begin{aligned} & \begin{pmatrix} I_2 u_{ij} & [(x_i, y_i) - (x_j, y_j)]^T \\ [(x_i, y_i) - (x_j, y_j)] & u_{ij} \end{pmatrix} > 0 \\ & \begin{pmatrix} I_2 u_{kq} & [(x_k, y_k) - (x_q, y_q)]^T \\ [(x_k, y_k) - (x_q, y_q)] & u_{kq} \end{pmatrix} > 0 \end{aligned} \right\}$$

2.2 投放区域

假设投放区域的边界可以使用一个多边形表示, 因此, 所有未知传感器节点的位置可以由下面的线性约束限定, 也能写成线性矩阵不等式的形式:

$$\mathbf{A}\mathbf{X} \leq \mathbf{b} \Leftrightarrow \text{diag}(\mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{b}) < 0, \mathbf{X} = (x_1, y_1, \dots, x_N, y_N) \quad (2)$$

如果投放地理区域的地形较复杂, 可以通过预处理将其边界近似为多边形^[8]。本文考虑两种简单的投放地理区域, 各向相同(isotropic)的区域(图 1(a))和各向相异(anisotropic)的区域(图 1(b))。

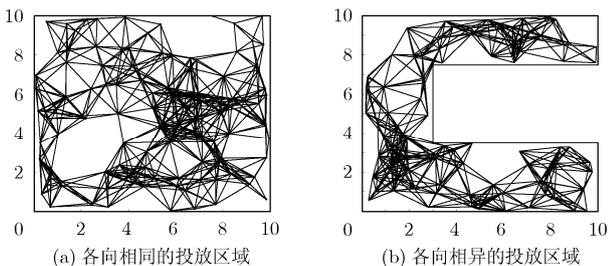


图 1 网络投放区域(100 个节点, 最大通信距离 $r=2$)

2.3 已知节点的位置误差

在传感器网络的实际运用中, 已知节点的位置可能存在误差。可以定义一个圆, 其圆心为带有误差的已知节点位置, 圆的半径 R_{err} 越大, 已知节点的位置测量误差越大。 $R_{\text{err}} = 0$ 表示已知节点的位置是完全准确的。用约束变量 (x_q^v, y_q^v) 代替存在误差的已知节点位置 (x_q, y_q) , 并使用下面的约束限定该变量:

$$\| (x_q^v, y_q^v) - (x_q, y_q) \| \leq R_{\text{err}}, \text{ 对所有存在位置误差的已知节点} \quad (3)$$

该约束与式(1)中的凸约束类似, 同样能写成线性矩阵不等式的形式。

2.4 传感器节点的可行地理区域

首先将式(1)中的凸约束, 与式(2), 式(3)相结合, 可以得到一个全局的凸约束集:

$$\left. \begin{aligned} & \| (x_i, y_i) - (x_j, y_j) \| \leq u_{ij}, \text{ 邻居节点 } S_i, S_j \\ & \| (x_k, y_k) - (x_q, y_q) \| \leq u_{kq}, \text{ 邻居节点 } S_i, G_q \\ & \mathbf{A}\mathbf{X} \leq \mathbf{b}, \mathbf{X} = (x_1, y_1, \dots, x_N, y_N) \\ & \| (x_q^v, y_q^v) - (x_q, y_q) \| \leq R_{\text{err}}, \text{ 对所有存在位置误差的已知节点} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(4)的可行解区域在几何上是 $2N$ 维(或 $2(N+M)$ 维, 如果所有已知节点位置均不精确)空间中一个有限大小的物体 F 。对于每个未知节点 $S_i, (i = 1, 2, \dots, N)$, 将 F 从高维空间投影到二维平面 $x_i - y_i$, 其投影结果即为传感器网络节点 S_i 的可行地理区域, 用 F_i 表示。每个传感器节点的真实位置一定由其可行地理区域所限定。

3 计算传感器节点的可行地理区域

3.1 由凸约束集限定的可行地理区域

对于由约束集式(4)的可行解区域投影得到的不规则可行地理区域, 将其近似为简单, 且更容易表示的多边形, 其顶点个数 m 可以由用户指定, 对应于不同的精度级别及计算开销。下面提出的投影与近似算法可以应用于可行解区域有限, 以传感器节点位置为变量的凸约束集。

在 $2N$ 维空间中, 选择 m 个不同的向量 $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \dots, \mathbf{d}_m$, $(m \geq 4)$, 这些向量中除了第 $2i-1$ 和第 $2i$ 个分量以外, 其余分量均为 0。这 m 个向量用作搜索方向来确定 m 个处于该方向上, 位于 F 最大边界上的点。这 m 个点在 F 投影到平面 $x_i - y_i$ 之后, 仍然位于可行地理区域的边界上。可以建立如下的优化问题求解如上所述的 m 个边界点:

$$\begin{aligned} & \max \mathbf{d}_p^T \mathbf{X} \quad p = 1, 2, \dots, m \quad \mathbf{X} = (x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_N, y_N), \\ & \text{s.t. 约束集式(4)} \end{aligned} \quad (5)$$

由于该约束集可以用线性矩阵不等式表示, 因此得到 m 个半正定规划(SDP)问题, 其解为 $2N$ 维空间中的 m 个边界点 B_1, B_2, \dots, B_m 。丢弃 B_1, B_2, \dots, B_m 中所有除第 $2i-1$ 个和第 $2i$ 个以外的分量, 即可以将这些点投影到 $x_i - y_i$ 平面。投影

所得到的像 V_1, V_2, \dots, V_m 为可行地理区域 F_i 边界上的点, 其凸壳可以构成 F_i 的一个内接多边形。

将在边界点 B_1, B_2, \dots, B_m 处与搜索方向正交的切平面投影到 $x_i - y_i$ 平面, 形成了 m 条直线, 其交点为另外 m 个点 VP_1, VP_2, \dots, VP_m , 这些点的凸壳可以构成 F_i 的一个外接多边形。

对于搜索方向的选择, 可以任意选择其非零分量, 只需满足最终得到的外接多边形是有界的, 而使用更多的搜索方向可以得到更精确的近似结果。

3.2 非凸约束的处理

到目前为止, 本文仅讨论了凸约束, 而式(1)中的非凸约束会使可行地理区域内部存在空洞(或者称为不可行区域)。式(1)中的非凸约束可以写成如下的形式, 其中 d 为常量。

$$\|(x_i, y_i) - (x_j, y_j)\| \geq d, \quad \text{非邻居节点 } S_i, S_j \quad (6)$$

由式(6)可以看出, 如果能找到一个地理区域, 其内部所有点到节点 S_i 的距离一定小于 d , 则该区域可以从另一节点 S_j 的可行地理区域中去除。

注意到节点 S_i 的所有可能位置由其外接多边形表示, 可以利用一个简单几何原理: 如果平面上的点 P 到 S_i 外接多边形所有顶点之间的距离都小于 d , 由于该多边形的凸性, 点 P 到这个多边形内部所有点的距离一定都小于 d 。由于 S_i 的外接多边形一定包含了 S_i 的真实位置, 点 P 到节点 S_i 真实位置的距离一定小于 d 。下面计算所有满足该条件的点 P 。

引入一个二维变量来表示点 P 的位置, 并建立一个约束集, 使 P 到 S_i 外接多边形每个顶点的距离都小于 d 。由于该约束集只有 2 个约束变量, 且约束数量较少(等于 S_i 外接多边形的顶点数), 因此很容易计算出点 P 的可行地理区域。点 P 的可行地理区域内所有的点到传感器节点 S_i 真实位置的距离一定小于 d , 可以将该区域从 S_j 的可行地理区域中去除, 为其内部的不可行区域(空洞)。

4 基于分簇网络的传感器节点可行地理区域定位方法

使用全局约束集式(1)计算节点的可行地理区域是一种集中式方法, 并不适用于传感器网络。本节中将给出一种基于分簇的分布式迭代计算方法, 可以分为如下 3 个阶段: 初始化, 簇内计算和簇间更新。

(1)在初始化阶段, 对传感器网络进行分簇, 网络节点被划分为两种类型: 簇头节点与普通节点。把既有邻居节点在相同簇内, 也有邻居节点在其他簇中的节点称为边缘节点, 限定相同簇内两个相连节点的距离约束称为簇内约束, 限定不同簇中的两个相连边缘节点的距离约束称为簇间约束。所有未知节点的可行地理区域被初始化为整个投放区域。

(2)在簇内计算阶段, 如果一个簇中存在已知节点, 则该簇内未知节点的可行地理区域可以被更新。簇头节点收集该簇内的所有簇内约束, 构造一个局部约束集, 然后使用最大

边界搜索方法计算出该簇内所有未知节点的可行地理区域。反之, 如果簇内不存在已知节点, 簇内未知节点的可行地理区域此时不能被更新。

(3)将更新过的边缘节点可行地理区域传输到所有邻居簇内的簇头节点。在网络中的簇头节点接收到了来自其他簇内边缘节点的可行地理区域更新报文后, 构建一个包含如下 3 部分的约束集: (a)簇内约束; (b)限定发送报文的边缘节点到与其相连的本簇内边缘节点之间距离的簇间约束; (c)将簇内的未知节点, 以及发送报文的边缘节点限定于外接多边形内的线性约束。在此之后, 使用最大边界搜索算法重新计算簇内未知节点的可行地理区域。计算完毕后, 如果簇内边缘节点的可行地理区域更新了, 则会继续发起簇间更新。如上所述的过程会一直进行下去, 直到网络中不会产生簇间的可行地理区域更新, 即定位过程收敛完毕为止。

5 仿真评估

使用 MATLAB 仿真本文提出的分布式节点定位算法, 使用带有 6 个顶点的外接多边形近似节点的可行地理区域, 并使用其面积来评估节点的定位精度。可行地理区域面积越小, 则其位置不确定性越小, 估计精度越高。

首先评估在不同地理环境下(图 1(a)和图 1(b)), 定位算法的性能。已知节点的百分比为 10%, 假设其位置信息是准确的。设定邻居节点间的距离限定区间为 $[d_{ij} - d_{err}, d_{ij} + d_{err}]$, 其中 d_{ij} 为节点 S_i, S_j 之间的真实距离, d_{err} 反映了距离测量误差, 被分别设置为 $5\%r, 10\%r, 20\%r, r=2$ 为传感器节点间的最大通信距离。图 2(a)给出了不同网络大小下, 网络中未知节点可行地理区域面积的平均值。在两种地理环境下, 增加节点的数量都可以得到更好的定位结果。这是因为提高节点密度增加了更多的距离约束, 能将节点限定于更小的可行地理区域中。另一方面, 较大的距离测量误差会得到较大的可行地理区域, 节点定位误差较大。

从图 2(a)中可以看出, 各向相异(anisotropic)的投放环境与各向相同(isotropic)的环境下对定位结果的影响不大。节点数目相对较小的时候, 各向相同环境中的定位结果略好于各向相异环境的定位结果。而在传感器节点个数相对较多的时候, 如 120 个节点和 150 个节点, 各向相异(anisotropic)的投放环境比各向相同(isotropic)的投放环境得到的定位结果稍好。这是因为各向相异的投放区域(图 1(b))要小于各向相同的投放环境(图 1(a)), 投放同样数量的节点时, 可以得到更大的节点密度, 因此提高了节点的定位精度。然而, 当网络中的节点数量较少时, 并没有足够多的节点覆盖到整个区域上, 节点密度对定位结果的影响较小。

图 2(b)给出了不同网络大小下, 已知节点位置信息存在误差情况下的定位结果。对于所有测试网络, 已知节点的百分比为 10%, 其误差半径被分别设置为 0, 0.2r, 0.5r, 0.8r, r 和 1.5r。从图中可以看出平均可行地理区域面积随着已知节

点误差半径的增加以较低的幅度线性增大。综合图 2(a)与图 2(b)的仿真结果,可以看出本文提出的定位方法有较强的鲁棒性,并能在各种网络大小的情况下容忍网络中的距离测量误差和已知节点位置误差。此外,即使在误差较大的情况,每个节点的可行地理区域也能限定其真实位置。

多边形的顶点个数与算法开销是一个折衷关系,使用较多的多边形顶点虽然需要更大的计算开销,但能得到更好的定位结果。图 2(c)给出了使用不同个数顶点的情况下,网络中未知节点可行地理区域面积的平均值。已知节点的位置信息准确,其百分比为 10%。对于 60 个节点的网络,将多边形的顶点数从 4 增加到 6 使平均可行地理区域面积减少了约 60%。注意到持续增加多边形的顶点个数得到的性能改进会逐步减少,这是因为此时外接多边形已经非常接近于真实可行地理区域了。

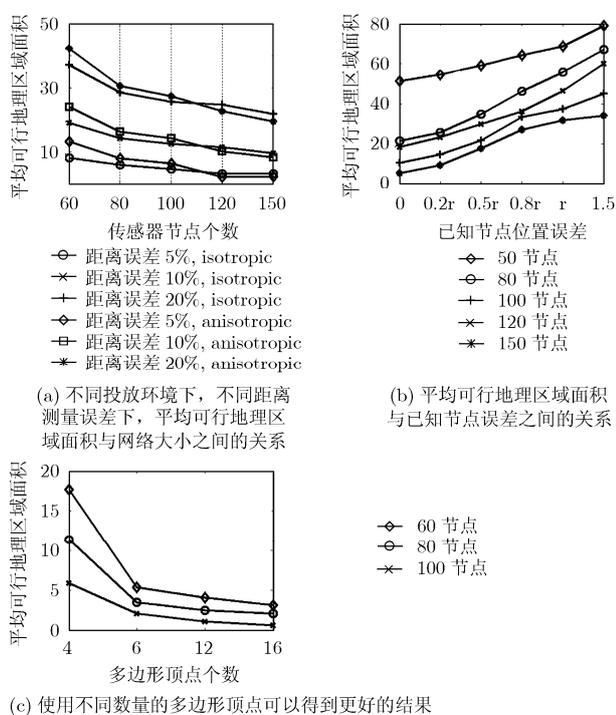


图 2

6 结束语

本文提出了一种鲁棒的传感器节点定位方法,计算节点的可行地理区域。在传感器网络受到一些外界因素,如各向相异的投放环境,不精确的邻居节点距离测量以及不精确的已知节点位置信息的影响下,可行地理区域仍然能将传感器节点的真实位置限定于其中,同时使用包含空洞的多边形近似不规则的真实可行地理区域,使其更容易存储表示。之后,

本文结合分簇传感器网络提出了一种分布式迭代算法,进一步提高了该定位方法的实用性。

参考文献

- [1] Steere D C, McNamee A B, Pu C, and Walpole J. Research challenges in environmental observation and forecasting systems. proceedings of MobiCom '00, New York, NY, USA, 2000: 292-299.
- [2] Karp B and Kung H T. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. Proceedings of ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. Boston, Mass, USA, 2000: 243-254.
- [3] Savvides A, Han C C, and Srivastava M. Dynamic fine-grained localization in Ad hoc networks of sensors. Proceedings of ACM/IEEE Int'l Conf. Mobile Computing and Networking. Rome, Italy, 2001: 166-179.
- [4] Niculescu D and Nath B. Ad hoc positioning system (APS) using AoA. Proceedings of INFOCOM'03. San Francisco, USA, 2003: 2926-2931.
- [5] Shang Y, Rumi W, and Zhang Y. Localization from mere connectivity. Proceedings of MobiHoc'03. Annapolis, Maryland, USA, 2003: 201-212.
- [6] Lim H and Hou J C. Localization for anisotropic sensor networks. Proceedings of IEEE INFOCOM'05. Miami, Florida, USA, 2005: 138-149.
- [7] Wang C, Xiao L, and Jin R. Sensor localization in an obstructed environment. Proceedings of International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems(DCOSS'05). Marina del Rey, California, USA, 2005: 49-62.
- [8] Hosur P I and Ma K K. A novel scheme for progressive polygon approximation of shape contours. Proceedings of IEEE 3rd Workshop on Multimedia Signal Processing. Copenhagen, Denmark, 1999: 309-314.

冯 缜: 男, 1983 年生, 博士生, 研究领域为无线传感器网络、优化理论。

刘 威: 男, 1977 年生, 博士, 副教授, 研究领域为无线自组织网络。

徐佩如: 男, 1980 年生, 博士生, 研究领域为无线 MIMO 通信系统、无线传感器网络。

程文青: 女, 1964 年生, 教授, 主要研究领域为传感器网络。

杨宗凯: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为通信与信息系统。