

多通信半径与角度修正的凸规划改进定位算法

叶 娟 陈元琰 王 明 尼迎波

(广西师范大学计算机科学与信息工程学院 广西 桂林 541004)

摘 要 凸规划定位算法是无线传感器网络中一种基于非测距的定位算法。针对传统凸规划定位算法中最后重叠区域较大和区域不规则所导致的定位精度不高的问题,提出了结合多通信半径与 RSSI 来缩小未知节点的所在区域和使用角度修正不规则区域的改进定位算法。改进算法首先在传统凸规划算法的基础上引入了多通信半径进行多次广播,缩小了未知节点的所在区域;然后利用 RSSI 细化区域;最后对获得的多边形区域进行角度修正处理,从而获得定位结果。实验结果表明,相比于原有算法,改进后的算法能有效地降低定位误差,提升定位精度。

关键词 无线传感器网络,凸规划,多通讯半径,RSSI,角度修正

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

Optimized Convex Localization Algorithm Using Multiple Communication Radius and Angle Correction

YE Juan CHEN Yuan-yan WANG Ming NI Ying-bo

(College of Computer Science and Information Engineering,Guangxi Normal University,Guilin,Guangxi 541004,China)

Abstract The convex localization algorithm is a range-free positioning algorithm in wireless sensor networks. In order to solve the problem of low positioning accuracy caused by the large overlap area and the irregularity of the region in the traditional convex localization algorithm,an improved localization algorithm was proposed,which uses the combination of multiple communication radius and RSSI to reduce the unknown node area and use the angle to correct the irregular area. The improved algorithm introduces multiple communication radius to broadcast multiple times to refine the area where the unknown node on the basis of the traditional convex algorithm,and then uses the RSSI to reduce the area,and finally obtains the polygon region using the angle correction as the positioning result. The simulation results show that the improved algorithm can effectively reduce the positioning error and improve the positioning accuracy compared with the original algorithm.

Keywords Wireless sensor network,Convex,Multiple communication radius,RSSI,Angle correction

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network,WSN)是近年来计算机网络领域研究的热点,它是一种综合信息采集、信息处理和信息传输功能于一体的通信网络信息系统。这种网络信息系统能够实时感知和采集各种环境数据和目标信息,实现人与物理世界之间的信息交互,在军事和民用领域有着十分广阔的应用前景。近年来,随着国内外无线技术的发展,在无线传感器网络众多的关键技术中,定位技术有着重要的意义。没有位置的信息,传感器节点所采集的数据几乎是没有什么应用价值的,当某个事务被感应器监测到时,第一时间就是需要了解其所发生的地点,定位技术的优劣直接影响着无线传感器网络的发展。

在无线传感器网络定位中,依据对未知节点位置的估测,一般将定位方法分为基于测距的(Range-Based)定位和无需测距(Range-Free)的定位^[1]。基于测距的定位,通过测量未知节点到已知节点的距离或者角度信息,使用三边测量法、三角测量法或最大似然估计法计算节点位置。常用的测距技术有到达时间(Time of Arrival,TOA)、到达角度(Angle of Ar-

rival,AOA)、到达时间差(Time Different Of Arrival,TDOA)、接收信号强度指示(Received Signal Strength Indicator,RSSI)等^[2]。而无需测距的定位则仅仅依靠网络连通性等信息进行定位,常见的基于非测距的定位算法主要有质心算法^[3]、APIT 算法^[4]、DV-Hop 算法^[5]、凸规划算法^[6]等。基于测距的定位算法与无需测距的定位算法相比,前者的定位成本较高、能耗较高、计算量和通信量较大,但定位精度都比较高;后者的算法不需要额外的硬件来获得距离信息,定位精确度相对较低,在成本和能耗上优于基于测距的算法。

文献[6]提出了凸规划定位算法,该算法利用节点间的通信条件构造凸规划问题,但由于使用最后交集的外接矩形质心作为定位结果,一定程度上降低了定位精度,特别是当重叠区域较大时,定位误差较大。文献[7]通过引入锚节点构成的三角形进一步滤掉节点不可能存在的区域,缩小节点可能存在的范围,提高了定位精度,但增加了判断未知节点是否在锚节点组成的三角形内的计算量。文献[8]提出了 RSSI 与凸规划相结合的改进定位算法,利用 RSSI 值与距离的相对关系,将原有凸规划定位中未知节点的存在区域进一步缩小,提升定位精度。文献[9]提出了半定规划松弛方法转化问题为

叶 娟 女,硕士生,主要研究方向为计算机网络;陈元琰 男,教授,主要研究方向为计算机网络,E-mail:yychen@mailbox.gxnu.edu.cn(通信作者);王 明 男,硕士生,主要研究方向为计算机网络、人工智能。

凸规划问题,但定位过程需使用 RSS 测距模型。文献[10]提出了一种改进定位算法 Convex-CIS,以多边形的最大内接圆的圆心作为定位结果,减少影响定位精度的无效区域,进而降低未知节点的定位误差。

本文在传统凸规划定位的基础上,引入多通信细化未知节点所在区域,利用 RSSI 再次缩小区域,最后采用角度修正的坐标作为定位结果。

2 凸规划算法及误差分析

2.1 凸规划定位算法

凸规划定位算法是由加州大学的 Doherty 等人提出,该算法的基本思想是,将传感器节点随机覆盖性地分布在网络中,节点到节点间的通信模型转化为节点位置的一组几何约束,从而确定未知节点的有效范围,将问题转化为凸约束优化问题,这些约束转化为线性矩阵不等式,然后使用线性规划(LP)和半定规划(SDP),得到一个全局优化的解决方案,从而确定未知节点位置^[11]。具体为:未知节点通过网络的连通性找到周围的锚节点,利用未知节点周围的所有锚节点和通信半径,计算未知节点可能存在的区域,从而得到最小矩形区域,最后使用矩形的质心作为未知节点的定位结果。

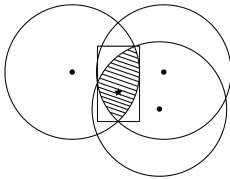


图 1 凸规划定位算法示意图

如图 1 所示,五角星代表未知节点的实际位置,实心圆点代表能够检测到该未知节点的锚节点,由于未知节点能够被这些锚节点共同感测到,根据锚节点与未知节点的通信半径关系,用 U_{node} 表示未知节点, A_{node} 表示锚节点, R 表示通信半径,则可以得到:

$$\|U_{\text{node}} - A_{\text{node}}\| \leq R \tag{1}$$

式(1)表示未知节点所在的位置,与感测到此未知节点的锚节点距离不大于通信半径,图 1 中的阴影部分即为未知节点可能存在的区域,也就是相应的矩形区域,然后以矩形的质心作为未知节点的定位结果。

2.2 凸规划定位算法的误差分析

2.2.1 重叠区域过大

凸规划对未知节点周围的锚节点分布的要求不高,在定位执行过程中,只需要划分多个子网,无需涉及整个网络的跳数情况。采用凸规划算法的定位精度取决于重叠区域的情况,如果重叠区域过大,会导致未知节点定位精度较低。如图 2 所示,重叠区域越大,未知节点的定位精度越小。因此,进一步缩小定位区域才能提升定位精度,使得凸规划在更多场合得到更加广泛的应用。

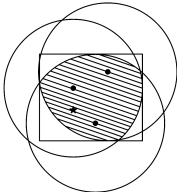


图 2 凸规划重叠区域较大的情况

2.2.2 计算方法的误差

在确定未知节点所在的空间位置后,凸规划直接使用区域的矩形质心作为定位结果,误差累积会对最终定位造成较大干扰。

3 优化的凸规划算法

3.1 多通信半径细化区域

文献[13]提出锚节点使用双通信半径的方法,改变了以往使用单通信的方式,在距离矢量路由的定位方式中能较大地提高定位精度。本文在借鉴此研究结果的基础上,进一步细化了锚节点的通信半径,应用于凸规划定位算法中。设锚节点的通信最大半径为 R ,则将锚节点分为多个通信半径 $R/n, R/(n-1), \dots, R$ 。锚节点首先以 R/n 向网络泛洪广播数据,记录感测到的未知节点信息,一定时间后,锚节点再以 $R/(n-1)$ 向网络泛洪广播数据,记录感测到的新的未知节点信息,不更新上一次感测到的节点信息,直至最后以半径 R 广播完成。则通过不同半径进行细化后锚节点感知锚节点的通信范围为:

$$\begin{cases} 0 < d_i \leq \frac{R}{n} \\ 0 < d_i \leq \frac{R}{n-1} \\ \vdots \\ 0 < d_i \leq R \end{cases} \tag{2}$$

其中, d_i 代表未知节点 i 到锚节点的距离范围。通常情况下,通信半径越多,泛洪次数越多,节点的能耗就越大,而传感器节点的能耗是有限的,为了能够使节点寿命更长,本文将通信半径细化为 4 个:

$$\begin{cases} 0 < d \leq \frac{R}{4} \\ 0 < d \leq \frac{R}{2} \\ 0 < d \leq \frac{3R}{4} \\ 0 < d \leq R \end{cases} \tag{3}$$

如图 3 所示,经过多通信半径细化后,每个锚节点可以更加精确地检测未知节点。如图 4 所示,锚节点 A_1, A_2, A_3 检测到未知节点的通信半径范围分别为 $\frac{3R}{4}, \frac{3R}{4}, R$, 则未知节点所在区域为实心线交集区域。

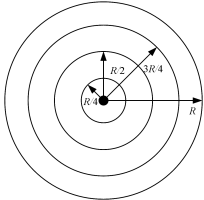


图 3 4 个通信半径

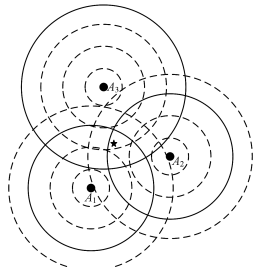


图 4 多通信半径的凸规划应用

3.2 RSSI 缩小区域

传感器节点可以通过接收信号强度指示(Received Signal Strength Indication,RSSI)判定节点间的距离,文献[8]利用 RSSI 值与距离的相对关系,将原有凸规划定位中未知节点的存在区域进一步缩小。改进算法通过多通讯半径获得的区域,采用 RSSI 判定,进一步缩小未知节点所在区域,如图 5 所示。

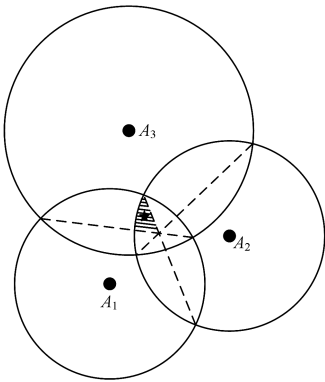


图 5 多通信半径+RSSI

假设锚节点 $A_i(x_i, y_i)$ 与锚节点 $A_j(x_j, y_j)$ 的交点为 $B_k(x_k, y_k)$,则通过下式求得 $B_k(x_k, y_k)$ 的坐标。

$$\begin{cases} (x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2 = R^2 \\ (x_k - x_j)^2 + (y_k - y_j)^2 = R^2 \end{cases} \tag{4}$$

将得到的交点进行通信范围排除,即:

$$\sqrt{(x_k - x_i')^2 + (y_k - y_i')^2} \leq R \tag{5}$$

其中, (x_i', y_i') 表示其他锚节点坐标,这样可以确定符合条件的顶点,之后再利用直线与圆的方程式联立、直线与直线的方程式联立求解得到各个顶点的坐标。

3.3 利用多边形的各个角度改善无效区域

通过前两步的计算,可以获得未知节点所在的多边形区域,然而由于多边形的不规则问题会受无效区域的影响,从而导致定位结果偏向无效区域。文献[18]以多边形的最大内接圆圆心作为定位结果,能一定程度上减小误差,但由于初始圆心随机,遇到两边垂直时也不能避免一定的误差。因此,本文提出利用多边形的各个角度改善无效区域的算法, $P_i(x_i, y_i)$ 为多边形的顶点, $P_i(x_i, y_i)$ 对应的多边形内角为 θ_i , 初始定位节点 $O(x_0, y_0)$ 为多边形的质心, O 到各个顶点的距离为 d_i 。根据 θ_i 角度的大小,从大到小重新排序为 $S\theta_{ij} \{ \theta_{i1}, \theta_{i2}, \theta_{i3}, \dots, \theta_{ik}, \dots, \theta_{im} \}$; 根据 d_i 的大小,从小到大重新排序为 $Sd_{ij} \{ d_{i1}, d_{i2}, d_{i3}, \dots, d_{ik}, \dots, d_{im} \}$ 。根据 $S\theta_{ij}$ 顺序,最大值 θ_{i1} 的顶点为 $P_i(x_i, y_i)$,判断 d_i 是否是最小的 d_{i1} ,若不是,则 O 点往 $P_i(x_i, y_i)$ 移动 ϵ (将其设置为通信半径的 1/100),反之,则判断下一个 θ_{i2} 。以此类推,直到移动到使 Sd_{ij} 的 $P_i(x_i, y_i)$ 排序与 $S\theta_{ij}$ 的排序一致,或者达到一个移动阈值次数时停止,就是尽量使得距离的长短比重与角度成对应的反比例。

如图 6 所示,初始条件为 $O(x_0, y_0)$, $\theta_1 > \theta_2 > \theta_4 > \theta_3$, $d_2 < d_1 < d_3 < d_4$ 。 θ_1 为最大,判定到 P_1 的距离 d_1 是否是最小的,由于 $d_2 < d_1$,因此 O 点向 P_1 移动 $R/100$,得到 $O'(x_0', y_0')$:

$$x_0' = x_0 + R/100 \times \cos \alpha, y_0' = y_0 + R/100 \times \sin \alpha$$

其中, α 表示 OP_1 与 X 正半轴(以 O 点为原点)的逆时针夹角。计算 O' 到各个节点的距离,排序得到 $d_1 < d_2 < d_4 < d_3$,此时判断 $\theta_1 > \theta_2 > \theta_4 > \theta_3$ 角度的顶点坐标顺序与距离坐标顺

序一致,则停止移动,取 $O'(x_0', y_0')$ 为最终结果,反之则 $O(x_0, y_0) = O(x_0', y_0')$,继续比较,直到符合条件或达到阈值界限为止。

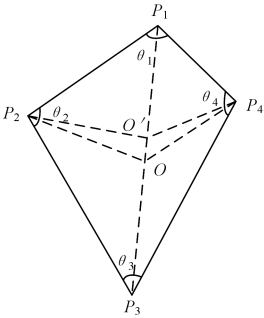


图 6 角度修正图

3.4 算法流程

- 步骤 1 初始化网络,锚节点使用多通讯半径,进行 4 次泛洪,记录信息。
- 步骤 2 未知节点收集 RSSI 信息,取 RSSI 值最大的 3 个信标节点,执行 Convex-RSSI,获得顶点坐标。
- 步骤 3 计算初始节点坐标 $O(x_0, y_0)$,计算多边形内角角度,计算 O 点到所有顶点的距离。
- 步骤 4 角度占比计算,距离占比计算,内角排序,距离排序。
- 步骤 5 根据角度排序,对比距离排序,计算 O 点移动后的 $O'(x_0', y_0')$ 。
- 步骤 6 $O(x_0, y_0) = O'(x_0', y_0')$,判断是否符合排序条件或阈值条件,若符合,则执行步骤 7,否则执行步骤 3。
- 步骤 7 以当前节点 O 作为定位结果。

4 仿真实验与分析

本节介绍仿真的场景,同时针对不同的条件做出定位方案设计,为了检验和对比各定位算法的性能,本文在 R2016a 平台上对本文改进的算法与原凸规划算法和文献[10](Convex-CIS)两种算法进行仿真和对比分析。

4.1 仿真场景

使用随机函数模拟 n 个节点坐标,其中含 m_1 个锚节点和 m_2 个未知节点,将改进算法与另外两种算法在同一环境下进行对比实验,检验改进算法的定位精度。在仿真过程中,根据锚节点计算未知节点的位置,然后算出未知节点定位位置和真实位置的距离差,最后求出平均误差(平均定位误差和通信半径之比)。同时,我们设定:1)没有收到任何锚节点信息的未知点,我们将场景的中心点设为定位点;2)只收到一个锚节点信息的未知节点,我们将该锚节点的坐标作为定位点。本文分别设置了 4 个场景进行仿真,具体设计如表 1 所列。

表 1 不同节点场景设计

序号	仿真区域/m ²	节点总数/个	信标节点最大数/个	通信半径/m
1	50×50	50	20	20
2	100×100	100	40	20
3	300×300	300	120	20
4	500×500	500	200	20

结合实际情况,设定信标节点的数目不超过总结节点数目的 40%。

4.2 结果分析

根据 4 种不同的场景得到的实验仿真结果如图 7—图 10 所示,横坐标表示锚节点的比率,纵坐标表示平均误差,为了保证实验更加科学有效,同时对每种仿真方法计算 50 次,取 50 次结果的平均值作为实验的最后结果。

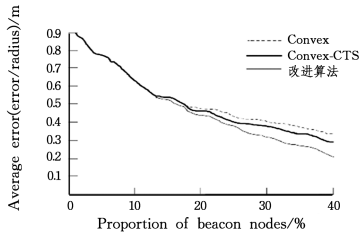


图 7 节点总数为 50 个的定位误差

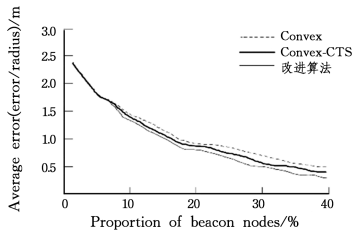


图 8 节点总数为 100 个的定位误差

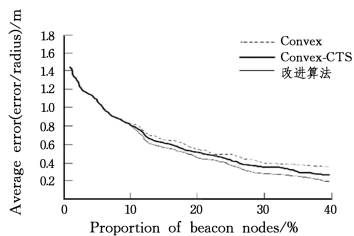


图 9 节点总数为 300 个的定位误差

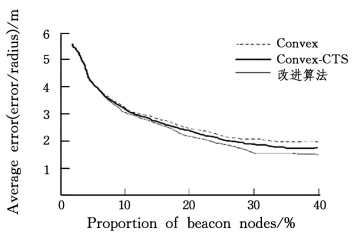


图 10 节点总数为 500 个的定位误差

比较以上 4 种改进算法与 Convex 算法、Convex-CIS 算法的定位误差图,可以明显看出,相比 Convex 算法,改进算法和 Convex-CIS 算法的定位结果有更好的精度,具体如下。

1) 当未知节点周围的锚节点数目较少时,由于很多未知节点未被检测到,如图 7—图 10 的横坐标初期,当锚节点比率较低时,3 种定位算法的误差均比较高,且误差相差不大。

2) 仿真区域不变,随着锚节点数量的增加,3 种算法的定位误差均在减小,但是改进算法和 Convex-CIS 算法相对 Convex 算法有更好的定位精度。

3) 当通信半径固定时,随着仿真区域的增大,从图 7—图 10 的变化可以看出,3 种算法的定位误差都在不断加大。这是因为当锚节点密度较高时,重叠区域较大,反而不能实现精度定位,这也符合实际生活的应用,因为锚节点成本较高,需要尽量减少锚节点的数量从而达到利益最大化。

4) 当锚节点数量达到一定数目后,3 种算法的定位误差

会趋于一个较为稳定的值。

结束语 Convex 算法本身就是一种定位估计算法,其定位结果是一个近似值,改进的定位改进算法是在 Convex 算法的基础上,通过使用多通信半径进行多次泛洪广播未知节点所在的区域,减小未知节点可能存在的区域范围,通过 RSSI 值判定再次减小区域范围,最后使用角度修正获得定位结果。根据仿真实验结果可知,改进算法相对于其他算法,能够有效地降低定位节点的误差,提升定位精度。同时,由于凸规划本身是锚节点信号范围内的定位,即需要部署相对密集的锚节点,达到算法的基本要求,较为局限于紧耦合部署的场景使用。同时,在信标节点较少的情况下,定位误差较大,未来的研究不仅要实现提升紧耦合部署场景的定位精度,还需要提升松散型部署场景的定位精度。

参 考 文 献

- [1] CHENG XIUZHEN, SHU HAINING, LIANG QILIAN, et al. Silent positioning in underwater acoustic sensor networks[C]// IEEE Transactions on Vehicular Technology. IEEE, 2008; 1756-1766.
- [2] 黄中林, 邓平, 梁甲金, 等. 无线传感器网络定位技术研究进展[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(11): 4-7.
- [3] BULUSU N, HEIDEMANN J, ESTRIN D. GPS-less Low Cost Outdoor Localization for Very Small Devices[J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers Personal Communications Magazine, 2000(5): 28-34.
- [4] WANG Z J, JIN H. Improvement on APIT Localization Algorithms for Wireless Sensor Networks; Networks Security, Wireless Communications And Trusted Computing[C]// International Conference on IEEE NSWCTC'09. 2009; 719-723.
- [5] NICULESCU D, NATH B. Ad-Hoc Positioning System (APS) [C]// IEEE Global Telecommunication Conference. 2001; 2926-2931.
- [6] DOHERTY L, EL GHAOU L. Convex Position Estimation in Wireless Sensor Networks[C]// Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Infocom 2001. IEEE, 2001; 1655-1663.
- [7] 张翰, 刘锋. 无线传感器网络基于凸规划的改进定位算法: Convex-PIT[J]. 传感技术学报, 2007(5): 1129-1133.
- [8] 马骏, 王敬东, 温家旺, 等. RSSI 与凸规划相结合的无线传感器网络定位算法[J]. 指挥控制与仿真, 2013, 35(4): 56-61.
- [9] VAGHEFI R M, GHOLAMI M R, BUEHRER R M, et al. Cooperative Received Signal Strength-Based Sensor Localization with Unknown Transmit Powers[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(6): 1389-1403.
- [10] 向满天, 罗嗣力, 戴美思. 无线传感器网络中一种改进的凸规划定位算法[J]. 传感技术学报, 2014, 27(8): 1138-1142.
- [11] GHOLAMI, MOHAMMAD R, RYDSTROOM M, et al. Positioning of Node Using Plane Projection onto Convex Sets[C]// Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2010.
- [12] LI T Y, CHANG J H C, HUNG S P, et al. Provably All-Convex Optimal Minimum-Error Convex Fitting Algorithm Using Linear Programming[C]// 2010 International Symposium on. IEEE, 2010; 283-286.
- [13] 李娟, 刘禹, 钱志鸿, 等. 基于双通信半径的传感器网络 DV-Hop 定位算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(2): 502-507.