

基于锚圆交点加权质心的无线传感器网络定位算法

李娟¹, 王珂¹, 李莉¹, 卢长刚²

(1. 吉林大学通信工程学院, 长春 130022; 2. 吉林大学测试科学实验中心, 长春 130022)

摘要:针对无线传感器网络节点能量有限, 基于距离的定位算法有时并不适用的问题, 在研究了未知节点与其无线射程范围内的3个锚节点之间的通信约束和几何关系的基础上, 提出了一种基于锚圆交点加权质心的定位算法。该定位算法仅基于网络连通性而不需要测量距离, 算法计算量小, 节点通信开销小。仿真结果表明, 当在100 m×100 m的区域范围内随机部署100个传感器节点, 通信半径为30 m、锚节点密度为16%时, 相对定位误差为22.7%。

关键词:通信技术; 无线传感器网络; 节点定位; 质心算法; 加权; 锚圆交点

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5497(2009)06-1649-05

Weighted centroid localization algorithm based on intersection of anchor circle for wireless sensor network

LI Juan¹, WANG Ke¹, LI Li¹, LU Chang-gang²

(1. School of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Center of Test Science, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Range-based localization schemes are sometimes not feasible due to hardware cost and resource restriction of sensor nodes. The geometric relationships and communication constraints among unknown node and anchor nodes are studied. A weighted centroid localization algorithm based on intersection of anchor circle is proposed. If there are anchor nodes within the communication range of an unknown node, the unknown node must be inside the triangle constituted by the intersection of the anchor circles. It is assumed that the location estimation of the unknown node is the triangle centroid. To increase the positioning accuracy an improved scheme is proposed. It uses RSSI as weight function and takes the weighted centroid of the triangle as the location estimation of the unknown node. This range-free algorithm is based exclusively on connectivity of sensor networks. The communication and computational loads are small. Simulation results show that the relative localization error is 22.7% when 100 sensor nodes are randomly deployed in 100 m×100 m scenario with 30 m communication range, and the anchor density is 16%.

Key words: communication technology; wireless sensor networks; node location; centroid scheme; weighted; intersection of anchor circle

收稿日期: 2009-05-25.

基金项目: “863”国家高技术研究发展计划项目(2007AA12Z242).

作者简介: 李娟(1970-), 女, 副教授, 博士研究生. 研究方向: 无线传感器网络. E-mail: li.juan@163.com

由于传感器网络节点通常随机布放在环境中执行监测任务,以自组织的方式相互协调工作。随机布放的传感器节点无法事先知道自身位置,这一特点使得节点定位成为无线传感器网络的关键技术之一^[1]。

目前已经提出了很多种定位方法,根据定位时是否需要距离和角度的信息,现有的定位方法可以分为基于测距技术(range-based)和无需测距技术(range-free)两种^[2]。在许多情况下由于节点尺寸、消耗和能量的限制,基于测距的方法在大规模传感器网络中是不实用的,而且通常情况下当定位误差小于传感器节点无线通信半径的40%时,定位误差对路由性能和目标追踪精确度的影响不会很大,因此无需测距定位方案倍受关注^[3]。

本文研究了未知节点与其无线射程范围内的3个锚节点之间的通信约束和几何关系,得出了未知节点所在的三角区域,将三角形的质心作为未知节点的估计位置,在此基础上进一步讨论了加入RSSI(Received signal strength indicator)作为质心算法的权重来增加定位精度。

1 相关研究

目前,有很多种无需测距技术的定位算法,如质心定位算法^[4]是一种仅基于网络连通性、无需测距的分布式室外定位算法,因此比较简单,容易实现。但该算法仅能实现粗粒度定位,且需要较高的锚节点密度。

凸规划算法^[5]是将节点间的通信连接视为节点位置的几何约束,把整个网络模型化为一个凸集,从而将节点定位问题转化为凸约束优化问题,然后使用半定规划和线性规划方法得到一个全局优化的解决方案,确定节点位置。同时也给出了一种计算未知节点有可能存在的矩形区域的方法。凸规划算法要求锚节点必须部署在网络边缘,否则节点的位置估算会向网络中心偏移。

文献^[6]提出一种基于弧心的节点定位的算法,确定出包括未知节点的扇形区域,以该扇形区域的质心作为未知节点的估计位置。

文献^[7]通过对无线电传播路径损耗模型的分析,提出一种加权质心定位算法,提出信标节点影响力的概念,节点到信号源的距离越近,影响力越大。影响力越大的信标节点对节点位置有更大的决定权。并且采用优选信标节点的方式,根据

信标节点对未知节点的不同影响力确定加权因子,以此来提高定位精度。

文献^[8]和^[9]都是在文献^[7]的基础上做出了一定的改进。

2 锚圆交汇三角形加权质心算法

2.1 锚圆交叠三角形质心算法

本文中的锚圆是指假设节点拥有理想的球形无线信号传播模型的情况下,对于二维平面,锚节点的无线射程为以锚节点为圆心、以通信半径为半径的一个圆形,我们称之为锚圆。

网络中节点的位置通常可由其无线射程范围内的锚节点来确定。当未知节点的无线射程范围内有一个锚节点时,那么未知节点一定在这个锚节点的锚圆范围内,如图1(a)所示;当未知节点的无线射程范围内有二个锚节点时,那么未知节点一定在这两个锚节点的锚圆交叠范围内,如图1(b)所示;当未知节点的无线射程范围内有三个锚节点时,那么未知节点一定在这三个锚节点的锚圆共同交叠范围内,如图1(c)所示。显然,随着可通信的锚节点数目的增加未知节点可能存在的区域逐渐减小。锚圆交叠区域的质心,可以作为未知节点 n 的估计位置。

由图1(c)看出3个锚圆的交叠区域不规则,所以可以通过计算3个锚圆的3个交汇点构成的三角形的质心作为未知节点的估计位置,如图1(d)所示。

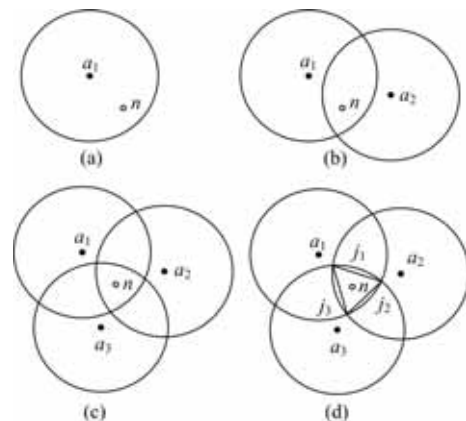


图 1 无线通信范围的交叠区域

Fig. 1 Combination of radial constraints

假设已知3个锚节点的位置坐标分别为 (x_{a_1}, y_{a_1}) 、 (x_{a_2}, y_{a_2}) 、 (x_{a_3}, y_{a_3}) ,节点的无线射程为 r ,则其中2个锚圆的交汇点 j_1 可以通过下面的公式求出:

$$\begin{cases} (x_{j_1} - x_{a_2})^2 + (y_{j_1} - y_{a_2})^2 = r^2 \\ (x_{j_1} - x_{a_3})^2 + (y_{j_1} - y_{a_3})^2 = r^2 \\ (x_{j_1} - x_{a_1})^2 + (y_{j_1} - y_{a_1})^2 \leq r^2 \end{cases} \quad (1)$$

同理,可以求出交汇点 j_2 和 j_3 。假设未知节点 n 的坐标为 (x_n, y_n) ,利用质心算法得到未知节点 n 的估计位置坐标为

$$\begin{cases} x_n = \frac{x_{j_1} + x_{j_2} + x_{j_3}}{3} \\ y_n = \frac{y_{j_1} + y_{j_2} + y_{j_3}}{3} \end{cases} \quad (2)$$

2.2 无线电传播模型

本文采用具有综合性而且被广泛应用的无线电传播模型即阴影(Shadowing)模型。阴影模型是通过分析和经验相结合的方法得到的,该模型由两部分组成,第一部分是路径损耗模型,它能够预测出当距离为 d 时接收到的平均能量 $P_r(d)$ 。它使用了一个接近发送者的距离 d_0 作为参考, d_0 处的平均能量表示为 $P_r(d_0)$,则 $P_r(d)$ 相对于 $P_r(d_0)$ 的关系为

$$\frac{P_r(d_0)}{P_r(d)} = \left(\frac{d}{d_0}\right)^\alpha \quad (3)$$

式中: α 称为路径损耗指数,它通常是由场地测量得来的经验值。

阴影模型的第二部分反映了在一定距离内接收到的能量的变化。为了简化,在推导锚圆交点三角形加权质心算法时,阴影模型的第二部分被忽略。

2.3 锚圆交点三角形加权质心算法

如果单纯地按照锚圆交点三角形质心来估计未知节点的位置,就无法考虑未知节点与 3 个锚节点距离远近的因素。通过对无线电传播路径损耗模型的分析,可以发现 RSSI 值反映了两者距离的远近,而且由于 RSSI 技术主要是用 RF 信号,不需要加入附加的设备,故其是一种低功耗、廉价的测距技术。下面提出一种采用 RSSI 作为权值加权质心算法。它的基本思想是:在锚圆交点三角形质心算法中,通过加权因子来体现信标节点与未知节点距离对锚圆三个交点坐标决定权的大小,反映它们之间的内在关系。通过下式中的加权因子来体现这种约束力:

$$\begin{cases} \hat{x} = \frac{\omega_1 x_{j_1} + \omega_2 x_{j_2} + \omega_3 x_{j_3}}{\omega_1 + \omega_2 + \omega_3} \\ \hat{y} = \frac{\omega_1 y_{j_1} + \omega_2 y_{j_2} + \omega_3 y_{j_3}}{\omega_1 + \omega_2 + \omega_3} \end{cases} \quad (4)$$

以 j_1 为例,如图 1(d) 所示。由于 j_1 分别是 a_2 和 a_3 为圆心、以通信半径为半径的两个锚圆的交点,所以当未知节点距离锚节点 a_2 和 a_3 较远时, j_1 的权值较大。同理,当未知节点距离锚节点 a_1 和 a_3 较远时, j_2 的权值较大;当未知节点距离锚节点 a_1 和 a_2 较远时, j_3 的权值较大。因此每个交点的权值和两个距离有关,本文采用的权值方案为

$$\omega_1 = d_2 + d_3; \omega_2 = d_1 + d_3; \omega_3 = d_1 + d_2 \quad (5)$$

根据式(3),可以得到

$$\frac{P_r(d_0)}{P_r(d_1)} = \left(\frac{d_1}{d_0}\right)^\alpha, \frac{P_r(d_0)}{P_r(d_2)} = \left(\frac{d_2}{d_0}\right)^\alpha \quad (6)$$

显然有

$$\frac{\sqrt[\alpha]{P_r(d_2)}}{\sqrt[\alpha]{P_r(d_1)}} = \frac{d_1}{d_2} \quad (7)$$

由上式可知,距离的比值与收到能量开 α 次方的比值成反比。所以上面权值方案按照 RSSI 也就是收到能量可以表示为

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{1}{\sqrt[\alpha]{P_r(d_2)}} + \frac{1}{\sqrt[\alpha]{P_r(d_3)}} \\ \omega_2 = \frac{1}{\sqrt[\alpha]{P_r(d_1)}} + \frac{1}{\sqrt[\alpha]{P_r(d_3)}} \\ \omega_3 = \frac{1}{\sqrt[\alpha]{P_r(d_1)}} + \frac{1}{\sqrt[\alpha]{P_r(d_2)}} \end{cases} \quad (8)$$

3 算法过程

(1) 每个锚节点 a_i 都以一定的信号强度广播自身的 ID 号及位置信息 (x_{a_i}, y_{a_i}) ($i=1, \dots, N$)。

(2) 每个未知节点 n_k 接收到邻居锚节点的信息,并且为每个能够接收到信息的锚节点计算连通度,连通度的定义如下^[10]:

$$CM_{k, a_i} = \frac{n_{\text{recv}}(a_i, t)}{n_{\text{send}}(a_i, t)} \times 100\% \quad (9)$$

式中: $n_{\text{recv}}(a_i, t)$ 和 $n_{\text{send}}(a_i, t)$ 分别为在时间 t 时节点 n_k 收到的由锚节点 a_i 发出信号的数量和由锚节点 a_i 发出信号的数量。

(3) 当某个锚节点 a_i 的连通度高于一个阈值时,比如 $CM_{k, a_i} > 90\%$,未知节点 n_k 把 a_i 当作邻居节点。当未知节点有 3 个邻居锚节点时,利用公式(1)计算由 3 个锚节点形成锚圆的交点。

(4) 同样,每个接收者也是在一段时间内收集从相应锚节点来的信号强度 RSSI,然后通过下式计算平均信号强度 P_i

$$P_i = 10 \left(\frac{\sum_{j=1}^{n_{\text{recv}}(a_i, t)} \text{RSSI}_j}{n_{\text{recv}}(a_i, t) \times 10} \right) \quad (10)$$

这里的 $RSSI_j$ 是锚节点 a_i 发送的第 j 个信息包, 其单位为 $-dBm$, 而 P_i 的单位为 mW 。

(5) 利用锚圆交点三角形加权质心算法, 即式 (4) 估计未知节点的坐标, 其中权重函数见式 (8)。

4 仿真实验与性能评估

该定位算法无需测距, 只需求出锚圆交点三角形, 并利用收到信号强度作为三角形 3 个交点的权值计算三角形质心, 计算简单, 通信量小, 具有耗能小的特点。除了耗能以外定位算法的性能评价主要还有定位比例、定位误差, 本文将对这两个性能指标进行评估。

(1) 定位误差与相对定位误差

定位误差由下面式子给出

$$err_n = \sqrt{(\hat{x}_n - x_n)^2 + (\hat{y}_n - y_n)^2} \quad (11)$$

式中: (x_n, y_n) 是节点 n 的实际坐标; 而 (\hat{x}_n, \hat{y}_n) 是用算法估计出的未知节点坐标。

网络中 N 个未知节点的平均定位误差与通信半径 r 的比值记为相对定位误差

$$\Delta \overline{err} = \frac{\sum_{i=1}^N err_i}{Nr} \quad (12)$$

(2) 定位比例

网络中能够定位的节点个数与总的未知节点的比值称为定位比例, 表示为

$$cov = \frac{n_{known}}{n_{all}} \quad (13)$$

式中: n_{known} 为通过定位算法能够得到定位的未知节点的数量; n_{all} 为所有未知节点的数量。

本文进行仿真分析的网络模型的主要参数如下: 网络由 100 个节点随机分布在 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的区域内。在节点中选取锚节点, 使其均匀地分布在网络区域。锚节点的数量分别为: 4、6、9、12、16、20、25、30。考察不同的锚节点数目对定位算法性能的影响。另外网络连通度 (Connectivity) 是指网络中每个节点的平均邻节点数目。网络连通度与网络规模、布撒区域大小、节点的通信半径有关。在网络规模、布撒区域大小一定的情况下, 可以通过改变通信半径来改变网络连通度。下面通过改变锚节点密度和网络连通度两个参数, 对相对定位误差和定位比例两个性能指标作出评价。

4.1 定位比例

对于给定的网络, 在不同的通信半径下, 通过

改变锚节点密度来观察定位比例的变化。图 2 给出了锚节点密度从 4% 增加到 30% 的定位比例变化曲线。

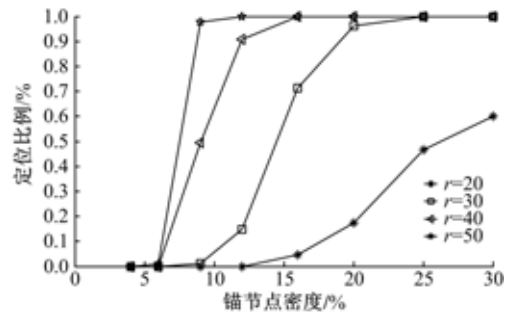


图 2 定位比例与锚节点密度

Fig. 2 Coverage and anchor node density

从图 2 可以看出, 定位比例随着锚节点密度的增加迅速增加。除了通信半径为 20 m 的情况外, 最终定位比例在锚节点密度大于 25% 时都可以达到 100%。说明本文的算法当锚节点密度及网络连通度达到一定程度时定位比例较高。

4.2 相对定位误差

同样对于该网络, 选取通信半径分别为 30、35、40、50 m, 并通过改变锚节点密度观测相对定位误差的变化。由图 3 可以看出, 当网络规模一定, 在不同的通信半径下, 相对定位误差的最小值在不同的锚节点密度处取得, 且数值变化不大, 大多数集中在 $0.1r$ 与 $0.25r$ 之间, 这说明本算法的定位精度对锚节点密度不敏感。

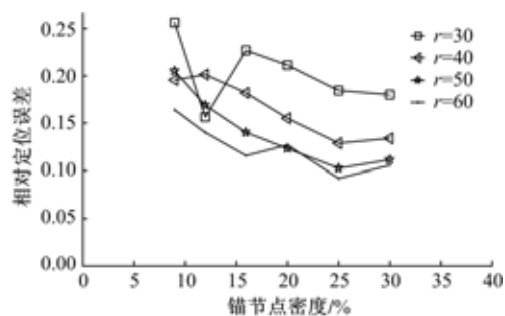


图 3 相对定位误差与锚节点密度

Fig. 3 Relative localization error and anchor node density

4.3 与现有算法的对比

对于同样的网络模型, 通信半径 r 取 25 m 的情况下, 将文献 [7] 提出的加权质心算法、基本的质心算法与本文提出的锚圆交点三角形质心算法和锚圆交点三角形加权质心算法做出了对比。

从图 4 可以看出, 本文提出的锚圆交点三角形质心算法优势不大, 但是锚圆交点三角形加权

质心算法与其他三种算法比较,相对定位误差较小,尤其是在锚节点密度较低的情况下。

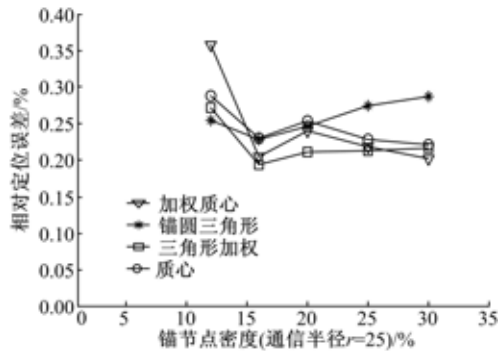


图 4 不同定位算法相对定位误差与锚节点密度关系

Fig. 4 Relative localization error and anchor node density for deferent algorithms

5 结束语

采用无需测距的定位思想,在未知节点无线通信范围内 3 个锚节点组成的锚圆交点构成三角形,并以三角形质心作为未知节点的定位,在此基础上,提出利用 RSSI 值给 3 个交点加权的质心算法。算法计算简单,耗能小,同时定位精度得到了提高。

参考文献:

[1] 孙利民,李建中. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社,2005.

[2] Savvides A, Han C C, Srivastava M B. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors [C]//In: Proceedings of MOBICOM '01, 2001.

[3] 王福豹,史龙,任丰原. 无线传感器网络的自身定位和算法[J]. 软件学报,2005,16(5):857-868.

Wang Fu-bao, Shi Long, Ren Feng-yuan. Self-localization systems and algorithms for wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2005, 16(5): 857-868.

[4] Bulusu N, Heidemann J, Estrin D. GPS-less low cost outdoor localization for very small devices[J]. IEEE Personal Communications Magazine, 2000, 7: 28-34.

[5] Doherty L, Pister K S J, Ghaoui L E. Convex position estimation in wireless sensor networks[C]//In: Proc of the IEEE INFOCOM 2001. Anchorage: IEEE Computer and Communications Societies, 2001, 3: 1655-1663.

[6] 曾桂秀,赖旭芝,吴敏. 一种分布式无线传感器网络节点定位新算法[J]. 计算技术与自动化, 2006, 25(4): 28-30.

Zeng Gui-xiu, Lai Xu-zhi, Wu Min. A new distributed positioning algorithm for wireless sensor network[J]. Computing Technology and Automation, 2006, 25(4): 28-30.

[7] 陈维克,李文锋,首珩,等. 基于 RSSI 的无线传感器网络加权质心定位算法[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 30(12): 265-268.

Chen Wei-ke, Li Wen-feng, Shou Heng, et al. Weighted centroid localization algorithm based on RSSI for wireless sensor networks[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 30(12): 265-268.

[8] 余义斌,曹长修,李昌兵. 基于权重重心法的传感器网络节点定位[J]. 计算机仿真, 2007, 24(6): 296-300.

Yu Yi-bin, Cao Chang-xiu, Li Chang-bing. Localization for sensor networks based on weighted centroid [J]. Computer Simulation, 2007, 24(6): 296-300.

[9] 张蝉爱,马艳艳,白凤娥,等. 基于 RSSI 的加权质心定位算法的实现[J]. 太原理工大学学报, 2009, 40(2): 146-147.

Zhang Chan-ai, Ma Yan-yan, Bai Feng-e, et al. Implement of weighted centroid localization algorithm based on RSSI[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2009, 40(2): 146-147.

[10] Shen Xing-fa, Zhi Wang, Peng Jiang. Connectivity and RSSI based localization schema for wireless sensor networks[C]//ICIC, 2005.