

无线传感器网络中序列定位新算法的研究

刘志华,陈嘉兴,陈霄凯

(河北师范大学信息技术学院,河北石家庄 050016)

摘 要: 在无线传感器网络中传统的序列定位算法将空间划分为点、边和面等不同的区域,但以面重心为未知点定位时误差较大.针对此节点自定位算法的误差问题,提出了一种序列定位与三点垂心法相结合的节点定位改进算法,给出了该算法的基本原理与实现方法.通过进一步判断排列顺序相关系数的三个最大值,求出离未知节点“最近”的三个区域的重心构成的三角形的垂心,进一步滤掉节点不可能存在的区域,减少定位误差.该算法增加了计算未知节点精确位置的计算量,但不需要增加节点的硬件条件和计算复杂度.仿真结果表明,与传统序列定位算法和三点垂心法相比,新算法可以明显的提高定位精度,随着锚节点数的增多,定位误差呈大幅度的减少.

关键词: 无线传感器网络; 锚节点; 定位序列; 三点垂心法

中图分类号: TN915 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 07-1552-05

A New Algorithm Research of Sequence-Based Localization Technology in Wireless Sensor Networks

LIU Zhi-hua, CHEN Jia-xing, CHEN Xiao-kai

(Department of Information Technology, Hebei Normal University, Shijiazhuang, Hebei 050016, China)

Abstract: In wireless sensor networks, the localization space can be divided into distinct regions such as vertices, edges and faces in traditional sequence-based algorithm. But the average location error for locations in a face region is quite in evidence. For the problem of localization error, a new algorithm which is based on the sequence-based algorithm and the three orthocentres method is proposed here. Its principle and realization method have also been studied. The new algorithm uses the three maximal values of Rank Order Correlation Coefficient to judge the three nearest centroids and computes its orthocentre to exclude areas in which nodes do not exist. The new algorithm will bring some computing increases. However, it does not need additional improvement in hardware or complexity of nodes. Simulation experiments prove that the new algorithm can obviously improve the localization accuracy compared to the traditional sequence-based algorithm and the three orthocentres method. If the proportion of anchors increases, the localization error will decrease markedly.

Key words: wireless sensor networks (WSN); anchor; localization sequences; three orthocentres method

1 引言

无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)是一组传感器节点以自组网形式构建的无线网络,其目的是协同感知、采集和处理网络覆盖地理区域中感知对象的信息,并传送给观察者.在传感器网络中,位置信息对传感网络的监测活动至关重要.事件发生的位置是传感器节点监测消息中所包含的重要信息,没有位置信息的监测消息往往毫无意义.无线传感器网络中节点位置信息也是基于位置信息的路由算法的前提.因此,确定事件发生的位置是传感器网络最基本的功能之一,对传感器网络的有效性起着关键作用.对于无线传感器网络节点

自定位的研究,国内外学者获得了丰富的研究成果,提出了许多定位解决方案和算法.根据定位过程中是否实际测量节点间的距离或方位,定位机制可分为:与距离无关的定位机制和与距离相关的定位机制.与距离无关的定位无需知道节点间的绝对距离或方位,如质心算法、APIT算法等等^[1~3].这类算法虽然能够降低能量消耗和硬件配置的要求,但定位精度低;基于距离的定位技术对硬件的要求有所提高,能耗有所增大,但能够实现较精确的定位.根据测量节点间距离或方位时所采用的方法,距离定位分为基于到达时间(TOA)、基于到达时间差(TDOA)、基于到达角度(AOA)、基于接收信号强度指示(RSSI)等方法.基于距离的定位目前代表性的算

法主要有:Euclidean 算法、Generic Localized Algorithm 算法、N-HOP multilateration primitive 算法、Cooperative ranging 算法和 Two-phase positioning 算法等^[4~6]。我们重点研究基于距离定位的 RSSI 定位机制的节点自定位算法,无线电收发器是无线传感器节点已有的资源,不需要添加额外的硬件,在理想条件下,使用 RSSI 随距离衰减模型可推断节点间距离^[7],但在实际应用中由于多路径和阴影效果产生的随机误差使得误差较大,而文献[7]提出的序列定位算法对此具有很好的鲁棒性。

本文对文献[7]的序列定位算法进行了分析,提出了优化算法,对未知点的定位更加准确。新算法在定位精度和复杂测距技术之间实现了较好的折衷,既能获得较高的定位精度,又无需复杂的测距技术。通过仿真分析,新算法定位误差远远低于文献[7]提出的序列定位算法。

2 序列定位算法

序列定位算法的核心是将一个二维平面用已排号的锚节点(锚节点是指专门配置的一些特殊节点,它们通过 GPS 或者其它方法在定位前就已经知道自己的位置)彼此间的垂直平分线分为三个类型:点、边、面的许多区域。对每一类型的定位区域,分别带入式(1)~(4),算出其重心,点重心坐标即点本身坐标。然后基于锚节点的距离次序来确定它们的次序序列即“定位序列”,如图 1 所示。其中 A, B, C, D 表示锚节点, U 表示未知节点。接下来使用 RSSI 测量方式来确定未知节点到各个锚节点的距离,进而确定它的定位序列。再将定位序列以表的形式列出来得到“定位序列表”。根据参数式(5)算一下未知节点的定位序列和“定位序列表”中其它序列之间的 ρ_w , 求出所有 ρ_w 值的最大值,最后将此最大值相关的定位序列对应的区域的重心坐标(离未

知节点最近)作为未知点位置的估计^[7]。

下面对序列定位算法中的几个相关概念再做进一步说明:

(1)接收信号强度指示(received signal strength indicator, RSSI):节点接收到无线信号的强度大小,称为接收信号的强度指示。已知发射功率,并在接收节点测量接收功率,以此来计算传播损耗,使用理论或经验的信号传播模型可将传播损耗转化为距离,该技术主要使用无线电信号。因传感器节点本身具有无线通信能力,故其是一种低功率、廉价的测距技术,不需要额外增加太多的硬件。它的主要误差来源是环境影响所造成的信号传播模型的建模复杂性:反射、多径传播、非视线、天线增益等问题都会对相同距离产生显著不同的传播损耗。但由于其拥有简单的优点,所以是无线传感器网络节点自定位技术中常用的测距方式。文献[7]通过对 RSSI 的误差影响因素的仿真试验,证明序列定位算法对 RSSI 的误差具有很好的鲁棒性。

(2)求边的重心:设 (C_x, C_y) 为所求边 C 的重心坐标,因为边的重心即边的中点,则

$$(C_x, C_y) = \left(\frac{O_x + D_x}{2}, \frac{O_y + D_y}{2} \right) \quad (1)$$

其中 $(O_x, O_y), (D_x, D_y)$ 为边 C 的两个端点。

(3)求面的重心:设 (P_x, P_y) 为所求面 P 的重心坐标, $\{(x_i, y_i) | 0 \leq i \leq p-1\}$ 为面的边界上的点, p 为点数,则:

$$P_x = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{p-1} (x_i + x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (2)$$

$$P_y = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{p-1} (y_i + y_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (3)$$

其中

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{p-1} (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (4)$$

(4)给定两个定位序列 $u = \{u_i\}$ 和 $v = \{v_i\}, 1 \leq i \leq n$, 其中 n 为锚节点的个数, u_i 和 v_i 为锚节点的顺序序列。Spearman 的排列顺序相关系数 ρ_w , 也称为排列顺序间的线性相关系数^[7]

$$\rho_w = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (u_i - v_i)^2}{n(n^2 - 1)} \quad (5)$$

当两个定位序列 $u = \{u_i\}$ 和 $v = \{v_i\}$ 表征的点离得最近即坐标相同时,由式(5)可见 $\rho_w = 1$ 。两个定位序列 u 和 v 离得越近, ρ_w 值越大。本文后面提出的序列三点垂心法也应用参数 ρ_w 来评判序列间的相近程度。

(5)求三角形的垂心:设 (Q_x, Q_y) 为所求三角形的垂心坐标, $(x_a, y_a), (x_b, y_b), (x_c, y_c)$ 为此三角形的三个顶点坐标,则:

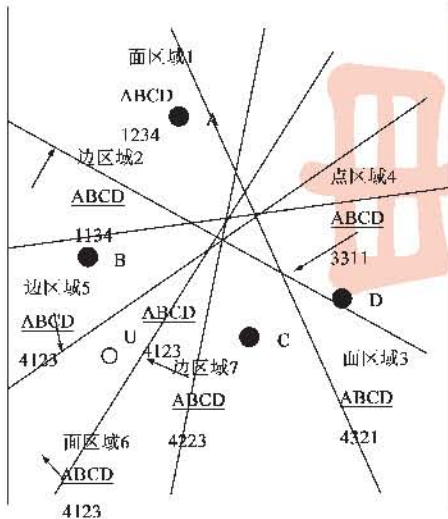


图1 序列定位算法示意图

$$\rho_x = \frac{(y_b - y_a)(x_c - x_a)(x_c - x_b) + (y_c - y_a)(x_c - x_b)x_b - (x_c - x_a)(y_c - y_b)x_a}{(y_c - y_a)(x_c - x_b) - (y_c - y_b)(x_c - x_a)} \quad (6)$$

$$\rho_y = \frac{(x_a - x_b)(y_c - y_a)(y_c - y_b) + (x_c - x_a)(y_c - y_b)y_b - (y_c - y_a)(x_c - x_b)y_a}{(y_c - y_a)(x_c - x_b) - (y_c - y_b)(x_c - x_a)} \quad (7)$$

(6)三点垂心法:利用未知节点距锚节点的 RSSI 测量值,求出最近的三个锚节点,再利用式(6)和式(7),求出此三个锚节点的垂心,将此垂心坐标认为是未知节点的位置坐标。

序列定位算法的主要优势在于对硬件要求非常低,只需要收集定位列表中的信息,进行集中计算。但序列定位算法的缺点是未知点处于面和边区域时定位误差比较高,由图1可见,不同的未知节点若处于同一面区域重心附近,则将都以此面区域重心作为位置估计,这种情况误差显然比较大。而且有可能出现多个相同的 ρ_{w_i} 的最大值,图1中,边区域5与面区域6和未知节点 U 之间的 ρ_{w_i} 值相同,且都为最大值,这样存在多个区域重心都符合未知节点定位的情况,使得未知节点定位不准确。

3 改进的新算法:序列三点垂心算法

通过上文可以得知减小未知节点可能存在的区域是提高序列定位算法精度的有效途径,由此我们提出了一种以序列定位算法为基础的新算法:序列三点垂心算法。该算法针对序列定位算法引入锚节点的垂直平分线构成的点、边和面三类区域,缩小未知节点可能存在的范围,在所在范围内再次应用三点垂心法减少定位误差。同时该算法不需要增加硬件设施来实现特殊的功能,保证了定位机制的低成本优势。

序列三点垂心算法的基本思想:首先和序列定位算法一样,将一个二维平面分为点、边、面等许多区域,求出每一类型的定位区域的重心,依照重心距锚节点

的距离(锚节点位置坐标已知,带入两点间距离公式即可算出)进而确定各定位区域的定位序列,得到定位列表。然后使用 RSSI 测量方式来确定未知节点到各个锚节点的距离,从而确定未知节点的定位序列,在定位列表表中求出最大三个 ρ_{w_i} 值,以便搜寻最近的三个“定位序列”,以这三个定位序列对应的重心来按照三点垂心法确定未知节点的定位坐标。

如图2所示,设按照序列定位算法得出的未知节点可能存在的区域为边区域5或面区域6(对应的 ρ_{w_i} 值相同且均为最大值1),按照新算法即序列三点垂心定位算法,依照三个最大的 ρ_{w_i} 值:1,1,0.9,分别对应离未知节点最近的三个区域:边区域5,面区域6和边区域7,设三个区域的重心分别为 E, F, G ,进一步求三角形 EFG 的垂心,得出较精确的未知节点定位坐标。将已求出位置坐标的未知节点看为锚节点,对下一个未知节点继续定位。具体算法过程如下:

步骤1 对锚节点进行排号 A, B, C, \dots , 根据锚节点的分布确定彼此间的垂直平分线,从而得到点、边和面的若干区域。

步骤2 计算三种类型区域的重心:点重心、边重心、面重心。

步骤3 根据三种类型区域重心距已排号的锚节点距离得出各自的定位序列。

步骤4 以定位列表的形式列出步骤3得出的定位序列。

步骤5 使用 RSSI 测量方式来确定未知节点到各个锚节点的距离,从而确定它的定位序列。

步骤6 根据参数式(5)算一下未知节点定位序列和定位列表表中定位序列之间的 Spearman 排列顺序相关系数 ρ_{w_i} , 求出最大的三个 ρ_{w_i} 。

步骤7 以此搜寻出离未知节点最近的三个定位序列,设它们所对应的区域的重心分别为 $(x_a, y_a), (x_b, y_b), (x_c, y_c)$, 带入式(6)和式(7),通过求三角形垂心来确定未知节点的定位坐标。

步骤8 将已定位的未知节点看作锚节点,对下一个未知节点进行步骤1开始定位。

序列三点垂心定位算法的时间损耗主要浪费在构建定位列表与在定位列表表中搜寻最近的三个定位序列上,因此可以把构建定位列表的时间和搜寻时间估计为序列三点垂心定位算法的时间复杂度。由于大量的空间被用来存储定位列表,故可以用构建定位列表的空间估计作为序列三点垂心定位算法的空

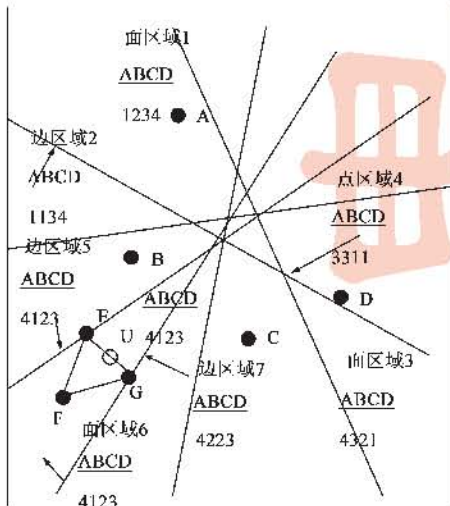


图2 序列三点垂心算法示意图

间复杂度.

构建定位序列表与搜寻算法最坏情况下时间复杂度为 $o(n^6)$, 最坏空间复杂度为 $o(n^5)$.

具体分析如下:步骤 1 确定锚节点间的垂直平分线用 $o(n^2)$ 时间和空间. 得到点、边和面的若干区域用 $o(n^4)$ 时间与 $o(n^4)$ 空间. 步骤 2 计算三类区域的重心花费 $o(n)$ 时间和空间. 步骤 3 得到序列包括根据三种类型区域重心距已排号的锚节点的距离得出各自的定位序列, 与步骤 5 未知节点确定它的定位序列共需要 $o(n \log(n))$ 次操作. 步骤 4 以定位序列表的形式列出步骤 3 得出的定位序列, 这需要时间复杂度和空间复杂度分别为 $o(n^5 \log(n))$ 和为 $o(n^5)$. 步骤 6 根据参数式(5) 求出最大的三个 ρ_{ω} 需要 $o(n^6)$ 时间和 $o(n^5)$ 空间. 步骤 7 用三点垂心测量法再进一步确定未知节点坐标花费 $o(n^2)$ 时间和 $o(n)$ 空间. 因此, 序列三点垂心定位算法最坏时间复杂度和最坏空间复杂度为分别为 $o(n^6)$ 和 $o(n^5)$.

由上可知本文提出的序列三点垂心定位算法的时间复杂度为 $o(n^6)$, 空间复杂度为 $o(n^5)$. 和文献[7]中的序列定位算法时间复杂度与空间复杂度一样. 这种算法适合于计算精度要求较高而计算复杂度作为次要考虑因素的场合. 对于计算复杂度作为主要因素考虑的场合, 可以使用三点垂心测量法, 其算法时间复杂度为 $o(n^2)$, 空间复杂度为 $o(n)$.

4 序列三点垂心算法的性能评估

4.1 衡量标准

利用 MATLAB 对序列三点垂心定位算法在二维传感器网络节点定位应用中进行仿真. 根据无线传感器网络的特点, 我们用定位误差的相对值来表示系统定位的准确性, 即以定位误差的绝对值与节点无线射程的比例表示, 称为定位误差 Pe 如下:

$$Pe = \frac{|\text{计算位置} - \text{实际位置}|}{\text{无线通信半径}} \times 100\% \quad (8)$$

例如, $Pe = 30\%$ 表示某节点的计算位置与实际位置之间的差值达到节点无线通信半径的 30%.

由于一个无线传感器网络中成百上千个节点的定位误差并不相同, 为了简单并且相对公平的评价节点自定位算法的定位性能, 我们常把所有节点的定位误差求平均值作为该算法的平均定位误差. 为简单起见, 我们也直接简称其为该算法的定位误差. 显然, 定位误差越小, 说明该算法的定位精度越高, 该算法就越好.

4.2 仿真实验

假设节点总数为 160, $n(n = 8, 16, 24, 32)$ 个锚节点均匀分布在一块边长为 $10 \times 10 \text{m}^2$ 的正方形平面区域 T

中, 锚节点比例为 5% ~ 20%, 且锚节点都位于未知节点的无线范围内, 节点通信半径为 8m. 设定锚节点坐标和定位区域边界线方程, 求出锚节点两两之间的垂直平分线方程, 从而确定各个定位区域, 再采用新算法步骤对各未知节点进行迭代定位.

表 1 给出了当锚节点数分别为 8, 16, 24, 32 时, 三种算法确定未知节点定位时误差的比较. 由表 1 可见, 序列三点垂心算法能很精确地恢复出未知节点的绝对坐标, 定位误差在三种算法中最低, 且锚节点数越多定位越准确.

表 1 序列三点垂心法、序列定位法和三点垂心法定位平均误差(m)

锚节点数	序列三点垂心法	序列定位法	三点垂心法
8	1.46	1.57	2.81
16	0.72	0.89	1.58
24	0.49	0.56	0.98
32	0.31	0.39	0.71

表 2 序列三点垂心法、序列定位法和三点垂心法定位计算耗时比较(s)

锚节点数	序列三点垂心法	序列定位法	三点垂心法
8	0.49	0.47	0.18
16	1.24	1.0	0.26
24	2.31	2.26	0.35
32	3.62	3.19	0.48

由表 2 可见, 三种算法的计算耗时与本文前面对时间复杂度分析是一致的, 综合起来可以看出新算法与序列定位算法相比在同等条件下耗时基本上是一致的, 但是前者所达到的精度是远远优于后者的, 而三点垂心测量法虽然在耗时上是比较低的, 但是精度却远远的小于前两种算法.

5 结论

本文提出了一种应用于无线传感器网络中的序列三点垂心定位算法, 该算法定位更加准确. 新算法旨在降低原有序列定位算法的定位误差, 并提高算法精度. 对二维正方形区域均匀分布的锚节点集的分析 and 仿真结果表明, 此改进算法相对于传统的序列定位算法既能获得较高的定位精度, 又无需复杂的测距技术, 定位较准确, 表现出很好的性能, 可以将之应用到计算精度要求较高而计算复杂度作为次要考虑因素的无线传感器网络中.

参考文献:

- [1] Bulusu N, Heidemann J, Estrin D. GPS-less low cost outdoor localization for very small device[J]. IEEE Personal Communications, 2000, 7(5): 28 - 34.
- [2] Jianliang Xu, Xueyan Tang, Wang Chien Lee. A new storage scheme for approximate location queries in object-tracking sen-

- sor networks[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2008, 19(2): 262 - 275.
- [3] Kevin Yuen, Ben Liang, Baochun Li. A distributed framework for correlated data gathering in sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(1): 578 - 593.
- [4] 戴桂兰, 赵冲冲, 邱岩. 一种基于球面坐标的无线传感器网络三维定位机制[J]. *电子学报*, 2008, 36(7): 1297 - 1303.
DAI Gui-lan, ZHAO Chong-chong, QIU Yan. A localization scheme based on sphere for wireless sensor network in 3D[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(7): 1297 - 1303. (in Chinese)
- [5] Awides A, Park H, Srivastava M B. The bits and flops of the N-hop multilateration primitive for node localization problems [A]. *Proc. of the 1st ACM Int'l Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*[C]. Atlanta, 2002. 112 - 121.
- [6] 王睿, 梁彦, 潘泉. 无线传感器网络的蚁群自组织算法[J]. *电子学报*, 2007, 35(9): 1691 - 1695.
WANG Rui, LIANG Yan, PAN Quan. Ant colony for wireless sensor networks self-organization[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(9): 1691 - 1695. (in Chinese)

- [7] K Yedavalli, B Krishnamachari. Sequence-based localization in wireless sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, 17(1): 81 - 94.

作者简介:



刘志华 女, 1977 年 4 月生于河北省沧州市, 讲师, 研究方向: 无线传感器网络算法设计.
E-mail: hebtdluzhihua@163.com



陈嘉兴(通信作者) 男, 1977 年 1 月生于安徽省阜阳市, 博士, 中国电子学会高级会员, 副教授, 研究方向: 扩频通信、无线传感器网络.
E-mail: xinghuo2815@163.com

陈霄凯 女, 1978 年 10 月生于河北省定州市, 讲师, 研究方向包括计算机通信网、无线传感器网络等. E-mail: bdcchenxiao@yeah.net