

一种基于分布式协作的 WSN 定位方法

丰宁宁,王成华

(南京航空航天大学 电子信息工程学院,江苏 南京 210016)

摘要:针对当前无线传感器网络定位算法的不足,在对几种传统定位方式进行局部改进的基础上,提出了一种基于分布式协作的节点定位方法。通过改进策略的独立计算与基于分布式协作的二次综合定位分析,能获得传感器节点的精确位置信息。而后采用基于信标节点角色变换的扩展定位方法,扩展了网络中可定位节点的范围,降低了网络中盲点存在的可能性,使全网节点都可方便进行定位,同时也降低了信标节点计算量。通过仿真实验,证明了该方法的正确性和有效性。

关键词:无线传感器网络;定位;协作定位;信标节点

中图分类号:TP393.02

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2012)05-0060-04

A Type of Localization Method Based on Distributed Collaboration for Wireless Sensor Networks

FENG Ning-ning, WANG Cheng-hua

(College of Electronic Info. Engi., Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aimed at some defects of current localization algorithms in wireless sensor networks, it makes partial improvement on some traditional localization models, and puts forward a type of localization method based on distributed collaboration. By independent calculation of improvement strategies and distributed collaborative based integrated localization analysis, accurate location information will be gained. This method also extends the domain of wireless sensor networks nodes which can be located easily, reduce the possibility of the existence of blind spots in the network and the amount of beacon nodes calculated. The results of simulation illustrate that this method is correct and effective.

Key words: wireless sensor networks; localization; cooperating localization; beaconing nodes

0 引言

无线传感网节点定位机制是指依靠有限的位置已知节点(称为信标节点),确定布设区中其他节点的位置,在传感节点间建立起空间关系的机制^[1]。然而现今的无线传感网普遍面临着能量有限、可靠性差、节点规模庞大且分布过于分散、易受外界环境干扰以及通信距离有限等诸多问题^[2],直接影响定位准确度和精确性。现有定位算法的各方面功能需求与性能指标如表1。

针对现有定位算法的部分缺陷,文中提出了一种基于多种改进计算的分布式定位方法。利用信标节点角色变换,实现定位区域扩展,同时,拥有较为合理的误差调整策略,以独立定位与综合定位相结合方式,完成最终位置的确定。方法无须任何额外硬件设备,只

在信标节点与待定位节点间实施单次通信,节约了网络带宽,降低能量消耗。

表1 几种主要定位算法的功能需求与性能指标

	TDOA	AOA	RSSI	质心法	DV-HOP	APIT
时间同步	要求严格	不需要	不需要	不需要	不需要	不需要
附加硬件	无	需要	无	无	无	无
硬件精度	要求高	一般	要求低	要求低	要求低	要求低
节点尺寸	较大	很大	较小	较小	较小	较小
抗干扰性	较弱	弱	弱	较强	较强	一般
功耗	较大	较大	较小	较小	较小	较小
定位误差	一般	较小	较大	较大	较大	一般
节点分布	无影响	有影响	无影响	有影响	有影响	有影响

1 方法描述

本方法以预先布置且位置已知的信标节点为前提,以待定位节点的定位请求为起始,经过信标节点应答,位置信息获取,独立定位计算,综合协作定位计算,最终获得目标节点位置信息,同时,利用信标节点角色变换,实现更大范围的定位。

收稿日期:2011-09-03;修回日期:2011-12-05

作者简介:丰宁宁(1987-),男,浙江金华人,硕士研究生,CCF会员,主要研究领域为无线传感器网络;王成华,博士,教授,主要研究领域为VLSI设计、验证与测试、电路理论与电子系统设计。

1.1 定位请求与信息获取阶段

本阶段,待定位节点首先以广播方式发送定位请求数据报,同时开启内部定时系统,并设定门限值 T_0 。

每个信标节点都将维系一张定位请求节点列表。当定位请求数据报到来时,处于休眠状态的信标节点将立即切换至监听状态,开始应答过程。若请求节点 ID 不在列表中,则将该 ID 及请求发出相对时间 T 加入列表,返回应答数据报;否则,计算列表中该项的相对时间 t 与当前数据报中的相对时间 T 的绝对差 $\Delta p = |t - T|$,当 Δp 小于固定值 C 时,则覆盖列表中原有表项,返回应答数据报,否则,维持原有表项不变,不作应答。固定值 C 与当前网络内节点分布密度 ρ 及可利用带宽 W 相关。一般认为 $C = \rho/W$ 。

待定位节点在发出请求后 T_0 内,将陆续收到 $0 \sim N$ 个信标节点应答。本方法使用定长链表保存应答信息。

1.2 改进策略的独立定位计算阶段

本阶段将在获取位置信息的基础上,完成三类独立的改进定位计算,为之后的综合协作定位提供基础。

1.2.1 功率相关的 RSSI 定位计算

传统的 RSSI 算法受环境因素影响较大,本阶段,在传统 RSSI 只关心信号强度与距离单一线性关系的基础上,引入信标节点发射功率 P 。由 RSSI 距离关系公式 $P = -50.0 \times V_{\text{RSSI}} - 45.5^{[3]}$ 及自由空间损耗公式 $\frac{P_i}{P_r} = \frac{(4\pi d)^2}{\lambda^2}^{[4]}$,不同发射功率下的信号强度与距离,将呈现不同的曲线特征, P 的大小将与接收端 RSSI 强度的衰减速度呈反比。本阶段将首先建立 RSSI 值、发射功率 P 及距离参数 d 之间的经验模型,通过读取信标节点回送数据报中的功率字段,取得相应发射功率下的 RSSI 变化曲线,获得距离参数。

本方法将优先选取 RSSI 值大的信标节点,作为定位计算数据源,放弃强度较小的 RSSI 值,提高定位准确性。当可用信息较多时,使用极大似然估计法计算^[2],否则,使用三边测量法。

1.2.2 往返时延替代到达时间差的改进 TDOA 计算

基于到达时间差的 TDOA 算法要求精确的时间同步^[5],需要至少两个以上的无线传输模块,节点的能耗与硬件开销较大^[2]。本阶段采用基于往返时延的改进 TDOA 计算策略。

设全网节点采用统一通信频段,即拥有统一的信号传播速率 V ,则各信标节点与待定位节点的距离可以表示为 $S_1 = (t_1 - p_1) \times V/2, S_2 = (t_2 - p_2) \times V/2, \dots, S_n = (t_n - p_n) \times V/2$ 。其中, t_1, t_2, \dots, t_n 为应答信息链表中的时间字段, p_1, p_2, \dots, p_n 为各信标节点的信息处

理时延。

针对无线信号易于受外界条件干扰,从而影响时延准确性的缺陷,本阶段将过滤误差较大的往返时延数据。考虑到单跳内,应答信息最快的信标节点受干扰的概率较小^[2],选定第一个应答数据报到来时间 t_1 为参考时间,后续应答数据报需要首先与参考时间进行比对,在误差允许范围内才予以接收。具体接收条件为:

$$|(t_i - t_1) \times V/2 - \text{sqrt}[(X_i - X_1)^2 + (Y_i - Y_1)^2]| < \Delta S \quad (1)$$

其中, t_i 为第 i 个应答包到达的具体时间, X_i, Y_i 为第 i 个信标节点的位置, ΔS 为误差允许门限值,一般设置为网内平均单跳距离的 50%。只有经过误差过滤后的信标节点应答信息才可以参与运算。运算采用极大似然估计法。最终得出的改进 TDOA 定位策略下的节点坐标为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (2)$$

这里假设信标节点 2 没有通过误差过滤。

$$\text{其中, } A = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ 2(x_3 - x_n) & 2(y_3 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$b = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 + ((t_n - p_n) \times V/2)^2 - ((t_1 - p_1) \times V/2)^2 \\ x_3^2 - x_n^2 + y_3^2 - y_n^2 + ((t_n - p_n) \times V/2)^2 - ((t_3 - p_3) \times V/2)^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 + ((t_n - p_n) \times V/2)^2 - ((t_{n-1} - p_{n-1}) \times V/2)^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.2.3 能量选择质心计算

为克服传统质心算法的节点分布密度相关性^[6,7],本阶段采用能量选择策略。依能量大小,选取离待定位节点较近的若干信标节点参与计算,在待定位节点处于信标节点所构成的多边形外部的情况下,传统质心法往往会造成大的偏差,而基于能量选择的计算策略,尽可能避免了大误差的出现。

令网络中信标节点数为 n ,其中,节点 k 为能量最弱信标节点,令待定位节点的实际位置为 X_0, Y_0 。则由能量选择质心法求出的节点坐标(以 x 轴为例)与节点实际位置的差距 Δd_2 为:

$$\left| \frac{\sum_{i=1}^{k-1} X_i + \sum_{i=k+1}^n X_i}{n-1} - X_0 \right| =$$

$$\left| \frac{\sum_{i=1}^{k-1} X_i + \sum_{i=k+1}^n X_i}{n-1} + \frac{X_k}{n-1} - X_0 - \frac{X_k}{n-1} \right| = \left| \frac{n}{n-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} - X_0 \right) + \frac{X_0 - X_k}{n-1} \right| \quad (5)$$

而由传统质心法求出的节点坐标与节点实际位置的差距 Δd_1 为:

$$\left| \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} - X_0 \right| \quad (6)$$

经计算,

$$\Delta d_1 - \Delta d_2 = \frac{X_k - \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}}{n-1} > 0 \quad (7)$$

即能量选择质心法更接近节点实际位置。

1.3 基于协作的二次综合定位阶段

独立定位后,待定位节点获得了三组位置信息,即 $(X_{\text{rsi}}, Y_{\text{rsi}})$, $(X_{\text{TDOA}}, Y_{\text{TDOA}})$, $(X_{\text{质心}}, Y_{\text{质心}})$ 。为进一步消除误差,本阶段将进行协作下的二次定位,最终完成节点位置的确定。

考虑三组节点位置信息关系,这里设定 ΔL 为三组位置间相互偏差的最大值平方。

当公式(8)~(10)都成立时,表示独立定位阶段计算的相互差异不大。此时,三组独立定位信息均在可接收范围内。选取三组坐标决定的三角形(以下称为“协作三角形”)的外心坐标为最终节点坐标。如果条件不满足,则需要重新定位。

$$(X_{\text{rsi}} - X_{\text{TDOA}})^2 + (Y_{\text{rsi}} - Y_{\text{TDOA}})^2 < \Delta L \quad (8)$$

$$(X_{\text{TDOA}} - X_{\text{质心}})^2 + (Y_{\text{TDOA}} - Y_{\text{质心}})^2 < \Delta L \quad (9)$$

$$(X_{\text{质心}} - X_{\text{rsi}})^2 + (Y_{\text{质心}} - Y_{\text{rsi}})^2 < \Delta L \quad (10)$$

1.4 基于信标节点角色变换的扩展定位

本方法采用固定时隙信标节点角色变换策略,在物理位置固定的前提下,进行信标节点与已定位节点间的角色变换,为更多的待定位节点提供位置信息,实现多跳网络的扩展定位^[8,9]。

经历上述三个阶段,网络内所有与信标节点单跳范围内可达的待定位节点,大部分都已经获得了自身的位置信息^[10,11]。随着单跳内各个节点定位的逐渐完成,原有的信标节点相继进入休眠状态,将在极大程度上降低网络能耗,提高无线信道的带宽与利用率。

2 方法的优越性

①以多种改进的独立定位方式相结合为基础,进行二次协作定位,提高了节点定位精确度和准确性。在定位各阶段,采用一定误差调整策略(如改进 RSSI 计算中的强度优先选择策略、往返时延计算中的门限值过滤策略等),最大程度上保证了定位结果真实性。

②实现了信标节点变换,扩展了可定位节点的范围,降低了网络中盲点存在的可能性^[12]。同时,角色转换分散了全网能耗,降低了信标节点失效概率,延长了网络运行时间。

③采用分布式计算策略,定位计算由待定位节点完成,无需信标节点参与,降低了信标节点计算量。便于进行失效替换与角色变换,保证网络不会因为部分信标节点失效而陷入瘫痪。

3 定位仿真结果

基于上述各阶段分析,利用 OMNeT++,对本方法执行情况进行了仿真验证。在观测区域内,随机布置了有限数量的信标节点及大量待定位节点。

3.1 定位结果分析

待定位节点的最终位置信息以节点间距来衡量。仿真后的间距与实际间距的对比如图 1 所示。从中可见,除个别节点(经分析,这里主要是网络边缘节点)定位结果与实际位置偏差稍大外,绝大部分节点的定位都与实际位置基本吻合,即使是离初始信标节点较远以及可达信标节点数较少的节点,最终也都能通过信标变换,获得较为准确的位置信息。

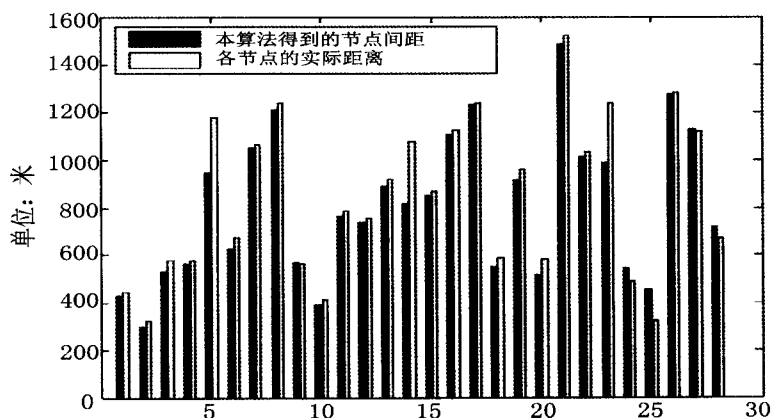


图 1 仿真后的间距与实际间距的对比

3.2 网络流量分析

为验证定位过程中的数据报流量,体现分布式及角色变换定位策略带来的网络能耗变化,对全网在整个定位完成过程中的包传输进行了分析。这里设定每轮的定位时长(即 1.1 中的 T_0)为 5s,以网络当前正在传递的数据报个数为标准,如图 2 所示。

从中可见,随着每一轮定位任务的开始,网络中将

同时存在待定位节点请求包及信标节点应答包,全网的包传输将出现明显增长趋势。定位过程中,网络内传输的包个数基本保持在 60 以下,最多不会超过 70,并且能耗峰值的持续时间都不长,有效节约了全网能量。

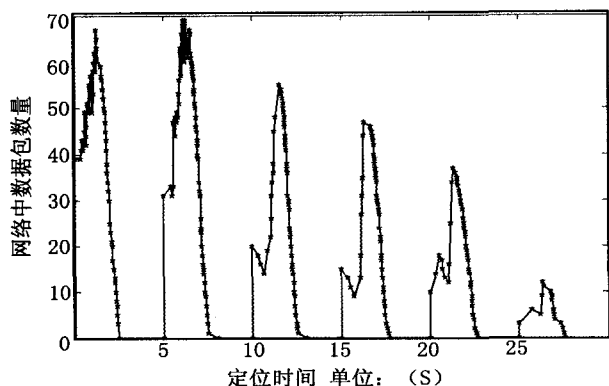


图2 各轮定位过程中的网络流量情况

4 结束语

文中以信标节点的角色变换策略为基础,提出了一种采用多种改进计算的综合协作定位方法。进行了较为完善的误差调整,拥有一定可信度。扩大了定位范围,实现了定位计算分布化,降低了网络能耗,节约了网络带宽。

本方法的定位改进策略前提是良好的网络通信环境。然而,由于无线信道传输不确定性,当网络拥塞时,将出现频繁的误差过滤,影响计算的正常进行。同时,当网内节点分布密度较大、单跳长度较短时,节点处理定位请求的时间就不应被忽略,此时易造成定位失真。这些都将成为今后研究与改进的方向。

参考文献:

- [1] Chong C Y, Kumar S. Sensor networks: evolution, opportunities and challenges[J]. *Proceedings of IEEE*, 2003, 91(8): 247-1256.
- [2] Mao G, Fidan B, Anderson B D O. Wireless Sensor Network Localization Techniques[J]. *Elsevier/ACM Computer Networks*, 2007, 51(10): 2529-2553.
- [3] 张佳,吴延海,石峰,等. 基于 DV-HOP 的无线传感器网络定位算法[J]. *计算机应用*, 2010, 30(2): 323-326.
- [4] Tian S, Zhang X M, Liu P X, et al. A RSSI-based DV-hop algorithm for wireless sensor networks[C]//*Proc. of IEEE WICOM2007*. [s. l.]: [s. n.], 2007.
- [5] Sayed A H, Tarighat A, Khajehnouri N. Network-based wireless location: challenges faced in developing techniques for accurate wireless location information[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2005, 22(4): 24-40.
- [6] 郝晓弘,李慧,粘坤. 功率控制在无线传感器网络定位中的应用[J]. *自动化仪表*, 2009, 30(8): 30-32.
- [7] Hofmann-Wellenho B, Lichtenegger H, Collins J. *GPS Theory and Practice*[M]. New York: Springer Wien, 1997.
- [8] 王福豹,史龙,任丰原. 无线传感器网络中的自身定位系统和算法[J]. *软件学报*, 2005(16): 857-868.
- [9] Bulusu B, Heidemann J, Estrin D. Density adaptive algorithms for beacon placement in wireless sensor networks[C]//*IEEE ICDCS01*. Phoenix, AZ: [s. n.], 2001.
- [10] 蒋峥峥,王汝传,孙力娟. 基于移动 Agent 无线传感器网络节点自定位算法[J]. *计算机技术与发展*, 2007, 17(6): 1-4.
- [11] 王书聪. 无线传感器网络分布式节点定位算法研究[J]. *计算机技术与发展*, 2008, 18(11): 62-65.
- [12] 杨永雷,朱军. 无线传感器网络中异步成簇算法的研究[J]. *计算机技术与发展*, 2010, 20(2): 145-151.
- [13] 调方法及其在 Robot Soccer 中的应用[J]. *机器人*, 2005, 27(1): 46-51.
- [14] 李晓萌,杨煜普,许晓鸣. 基于 Markov 对策和强化学习的多智能体协作研究[J]. *上海交通大学学报*, 2001, 35(2): 288-292.
- [15] 李晓萌,杨煜普,许晓鸣. 基于多级决策的多智能体自动导航车调度系统[J]. *上海交通大学学报*, 2002, 36(8): 1146-1149.
- [16] 高阳,周志华,何佳洲,等. 基于 Markov 对策的多 Agent 强化学习模型及算法研究[J]. *计算机研究与发展*, 2000, 37(3): 257-263.
- [17] Kaelbling L, Littman M, Cassandra A. Planning and acting in partially observable stochastic domains[J]. *Artificial Intelligence*, 1998, 101: 99-134.
- [18] 洪晔,王宏健,边信黔. 基于分层马尔可夫决策过程的 AUV 全局路径规划研究[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(9): 2361-2363.
- [19] Sharma R, Gopal M. Hybrid Markov Game Controller Design Algorithms for Nonlinear Systems[J]. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2005(12): 328-332.
- [20] Sharma R, Gopal M. Markov Game Controller Design Algorithms[J]. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2007(34): 585-593.
- [21] 胡佳,汪峰. 工业机器人路径规划的双目标优化策略[J]. *计算机技术与发展*, 2009, 19(5): 16-18.
- [22] Morisset B, Ghallab M. Learning how to combine sensory-motor functions into a robust behavior[J]. *Artificial Intelligence*, 2008, 172(4-5): 392-412.
- [23] Kaelbling L P. Hierarchical Task and Motion Planning in the Now[C]//*IEEE International Conference on Robotics and Automation*. [s. l.]: [s. n.], 2011.
- [24] 吕凌,曾碧. 基于评估和分工合作并行蚁群机器人路径规划[J]. *计算机技术与发展*, 2011, 21(9): 10-13.

(上接第 59 页)