

基于 Monte Carlo 的非测距传感器网络定位算法

李长庚, 李新兵

(中南大学物理科学与技术学院, 长沙 410083)

摘要: 针对无线传感器网络, 提出一种基于 Monte Carlo 方法的非测距无线传感器网络节点定位算法。该算法通过计算随机散布的粒子与锚节点之间的距离再与最大射频发送距离比较, 根据权值的改变进行滤波, 确定未知节点可能存在的位置。在不同粒子数和锚节点个数下, 对定位算法进行了仿真, 同时对锚节点比率分别为 0.1~0.5 的情况下, 比较了该算法和 DV-Hop 算法的定位性能, 结果表明该算法充分利用对传感器节点定位估计的有用信息, 计算复杂度小, 定位精度较高、健壮性好。

关键词: 无线传感器网络; 定位算法; Monte Carlo 方法; 锚节点; DV-Hop 算法

Range-free Localization Algorithm of Sensor Networks Based on Monte Carlo

LI Chang-geng, LI Xin-bing

(School of Physical Science and Technology, Central South University, Changsha 410083)

【Abstract】 A new range-free sensor node localization algorithm is proposed based on Monte Carlo method in wireless sensor networks. By computing the distance between random particles and anchor nodes, compared with the farthest RF sending distance and filtered according to power value, the algorithm ensures the unknown node's position. It simulates at different quantity particles and anchors. At the same time, it is compared with DV-Hop algorithm's localization performance in 0.1~0.5 ratio of anchor. Simulation result shows that the algorithm makes full use of node's localization information, and reduces the complexity of computing with high accuracy and well robustness.

【Key words】 wireless sensor networks; localization algorithm; Monte Carlo; anchor node; DV-Hop

1 概述

无线传感器网络是由多个节点组成的面向任务的无线网络, 它是传感器技术、嵌入式计算技术、现代网络及无线通信技术、分布式信息处理技术等多种技术的结合。在无线传感器网络的各种应用领域中, 大多数情况下需要确定事件发生的位置, 或者需要对目标进行跟踪, 它要求节点给探测到的数据加上位置标志。如果要确定整个网络的覆盖范围, 还需要知道节点的位置信息。此外, 许多无线传感器网络路由协议也是基于节点位置信息的。所以, 节点定位技术在无线传感器网络中占有重要地位, 目前已经成为一个非常重要且很活跃的研究领域^[1]。

目前的定位算法从定位手段上分为 2 大类: 基于测距算法(range-based)和非测距算法(range-free)。基于测距算法通过测量节点间的距离或角度信息, 使用三边测量、三角测量或最大似然估计定位法计算节点位置。常用的测距技术有RSSI, TOA, TDOA和AOA等;非测距定位算法则不需要距离和角度信息, 算法根据网络连通性等信息来实现节点定位, 如质心算法、DV-Hop、Amorphous、MDS-MAP和APIT算法等^[2-5]。

本文在基于Monte Carlo方法^[6-7]的基础上提出了适合无线传感器网络节点非测距定位的MCL(Monte Carlo Localization)算法。

2 Monte Carlo 算法原理

Monte Carlo 算法的核心思想是:先在状态空间中产生一组随机样本 x , 这些样本称为粒子, 通过对这些样本进行观测, 得到一系列观测值 z , 根据这些观测值计算样本的权值

w , 并利用这组带有权值的随机样本来近似估算状态的后验概率分布 $p(x|z)$, 得到状态估计值。

令 $\{x_n^i, i=0,1,\dots,M\}$ 是对应权值为 $\{w_n^i, i=0,1,\dots,M\}$ 的样本集。权值被归一化为 $\sum_{i=1}^M w_n^i = 1$, 因此, n 时刻目标状态的后验概率分布可离散加权为

$$p(x_n) \approx \sum_{i=1}^M w_n^i \delta(x_n - x_n^i) \quad (1)$$

其中, $\delta(\cdot)$ 为狄拉克函数; 权值 w_n^i 可通过重要采样法选择。样本 x_n^i 可由重要密度函数 $\pi(x_n^i)$ 得到, 粒子未归一化权值为

$$w_n^i = \frac{p(z_{0:n} | x_{0:n}^i) p(x_{0:n}^i)}{\pi(x_{0:n}^i | z_{0:n})} \quad (2)$$

重要密度函数 $\pi(x_n^i)$ 的选取依赖于所研究的问题。一种简单的选取就是使 $\pi(\cdot) = p(x_n | z_{0:n-1})$ 。

在 Monte Carlo 算法中, 经过几个迭代周期后, 大多数的粒子权值会趋近于零, 即粒子衰减现象。由于粒子权值的协方差随着时间的增长而不断变大, 这种现象是无法避免的。为了减弱这种影响, 可以采用重采样措施。重采样的基本思想在于减少权值较小的粒子数目, 而把注意力集中在权值较大的粒子上。

Monte Carlo 算法描述如下:

基金项目: 湖南省科技计划基金资助项目(2007FJ3066)

作者简介: 李长庚(1970 -), 男, 副教授、博士, 主研方向: 无线传感器网络, 移动通信技术; 李新兵, 硕士研究生

收稿日期: 2008-05-20 **E-mail:** lcgen@mail.csu.edu.cn

初始化： $n=0$ ，从先验分布 $p(x_0)$ 采集粒子 x_0^i ， $i=1, 2, \dots, M$ 。

当 $n=1, 2, \dots$ 时：

(1)重要性采样。通过重要密度函数 $\pi(x_n^i)$ 得到归一化权重的粒子样本集 $\{x_n^i, w_n^i\}_{i=1}^M$ 。

(2)重采样。根据重要性权重从粒子样本集重新采样 M 个粒子。

(3)输出。算法的输出是经过重采样的带权重的粒子集，用它可以近似表示目标状态的后验概率，得到目标状态的估计值。

3 MCL 定位

3.1 定位原理

Monte Carlo 定位过程分为预测和滤波 2 个阶段。本文只研究处于静止状态下的节点，所以，在整个定位过程中只在未知节点接收到第 1 个锚节点信号或者进行重采样后，对自身位置进行预测。滤波主要是节点根据当前时刻接收到的新观测值，对节点的位置可能性做出判断，丢弃那些不可能存在的预测位置。接收到的观测值可以是与未知节点直接通信的锚节点(即 1 跳锚节点)或者间接经过一个节点后与未知节点通信的锚节点(即 2 跳锚节点)。本文只考虑观测值为 1 跳和 2 跳锚节点的情况。图 1 显示了分别在 2 种观测值下节点可能存在的位置分布图(图中阴影部分为未知节点可能存在的区域)。图 2 显示了当未知节点接收到 3 个 1 跳锚节点信息后可能存在的位置。在图 1、图 2 中，图中阴影部分为未知节点可能存在的位置区域，黑点表示锚节点。

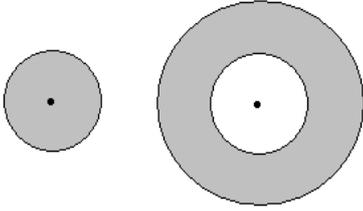


图 1 2 种观测值下未知节点可能存在的位置分布

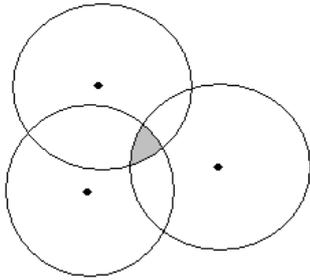


图 2 3 个锚节点下未知节点可能存在的位置分布

假设 S 为 1 跳锚节点的集合， T 为 2 跳锚节点的集合， s 为锚节点， r 为节点最大射频发送距离， $d(x, s)$ 为粒子与锚节点之间的距离，则滤波条件为

$$filter(x) = \forall s \in S, d(x, s) \leq r \cup \forall s \in T, r < d(x, s) \leq 2r \quad (3)$$

如果滤波条件满足，赋予粒子权值为 1，否则为 0。这样就丢弃了那些不可能存在的粒子。在滤波的过程中有可能碰到粒子样本数很少，通过这些粒子估计未知节点的位置误差则比较大(仿真证明当粒子数少于 50 时，则定位估计效果比较差)。这时可以通过重采样对粒子样本进行补充。重采样的

方法是根据当前时刻接收的锚节点信息，对未知节点的位置再次预测。

3.2 定位参数的获取

锚节点向整个网络广播自身位置信息的分组，其中，包括跳数字段，初始化为 0。接收节点记录具有到每个锚节点的最小跳数的分组，并且忽略来自同一个锚节点的较大跳数，然后将跳数值加 1，并转发给邻居节点。通过这个方法，网络中所有节点能够记录到每个锚节点的最小跳数，同时获得锚节点的位置信息。本文只考虑跳数值为 1, 2 的锚节点信息。

3.3 MCL 定位算法

MCL 定位算法步骤如下：

步骤 1 锚节点向整个网络广播自己的位置信息 (x^i, y^i) ， $i=1, 2, \dots, n$ 。

步骤 2 当未知节点 (x, y) 收集到第 1 个可与其通信的锚节点的信息后，判断是 1 跳还是 2 跳锚节点。当为 1 跳锚节点时，根据其位置和最大射频发送距离确定未知节点可能存在的范围为 $\sqrt{(x-x^i)^2+(y-y^i)^2} \leq r$ ；当为 2 跳锚节点时，同理可以确定未知节点可能存在的范围为 $r < \sqrt{(x-x^i)^2+(y-y^i)^2} \leq 2r$ ；如果锚节点在边界位置，则上述范围缩小到不超过边界。在此范围内撒播随机的样本(成为粒子) N 个，各个粒子的位置坐标通过随机撒播函数获得。每一个粒子代表传感器节点在某个位置的可能性(概率)。 N 的值根据上述范围的大小来确定，理论上是越大越好，但是考虑到 N 越大，算法的计算量也越大，所以，在选取 N 的时候必须选择合适的值。

步骤 3 当接收到第 2 个锚节点的信息后，则计算每个粒子与这个锚节点之间的距离 r_i ， $i=1, 2, \dots, n$ 。根据滤波条件，给粒子赋予权值，同时丢弃那些不可能存在的粒子。

步骤 4 重复步骤 3，直到最后一个锚节点。

步骤 5 在进行步骤 4 的时候，如果粒子数少于 50，则通过重采样方法补充粒子数目。

步骤 6 估计未知节点的位置坐标， $(\hat{x}, \hat{y}) = ((\sum_{i=1}^M x_n^i) / M,$

$(\sum_{i=1}^M y_n^i) / M)$ ， M 为粒子数。

4 仿真与分析

为了验证算法的有效性，本文对算法进行了仿真。分别在不同粒子数和锚节点数下，对算法自身定位性能进行了仿真分析。同时还和 DV-Hop 算法进行了定位结果比较。

(1)改变随机撒播粒子数 N ，对未知节点定位过程仿真，得到性能曲线如图 3 所示。当粒子数为 100 时，定位误差为 $0.34r$ ，随着粒子数增加，定位误差逐渐减小，当粒子数为 700 时，减小到只有 $0.13r$ 。当粒子数大于 700 时，误差减小幅度基本上趋于平缓。

(2)改变锚节点个数，对未知节点定位过程仿真，得到性能曲线如图 4 所示。当锚节点数为 3 时，定位误差为 $0.18r$ ，随着锚节点数增加，定位误差急剧减小，当锚节点数为 7 时，误差仅为 $0.085r$ 。这主要是因为随着锚节点个数的增加，未知节点的可能性范围越小。当锚节点数大于 7 时，误差减小的幅度逐渐变小并趋于平缓。

(3)在 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 的仿真区域，随机撒布 100 个传感器节点，各节点通信距离为 10 m，当锚节点比率分别为 0.1~0.5 时与 DV-Hop 算法进行定位比较，其中，MCL 定位算法分

2 种情况仿真：锚节点均匀分布和锚节点随机分布。3 种算法定位误差和定位覆盖率曲线比较如图 5、图 6 所示。

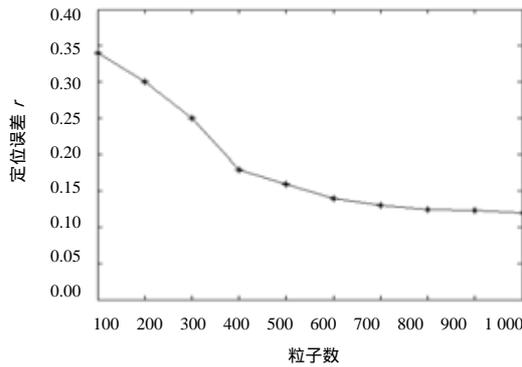


图 3 粒子数变化时定位误差曲线

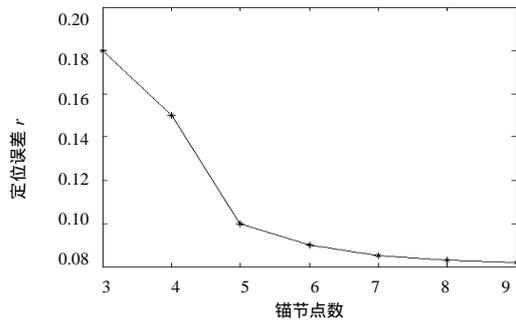


图 4 锚节点变化时定位误差曲线

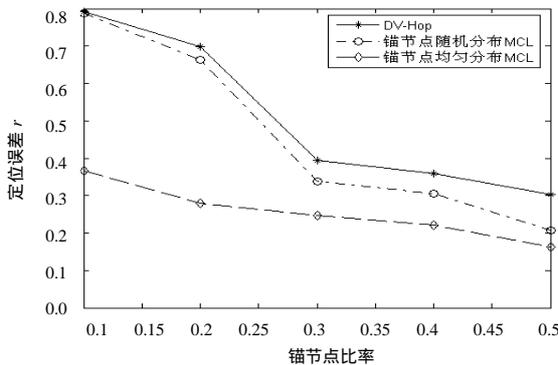


图 5 不同定位算法定位误差比较

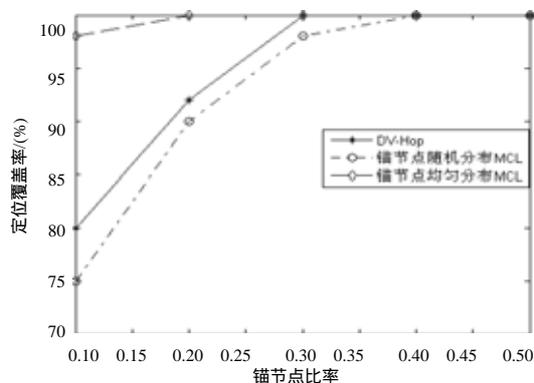


图 6 不同定位算法定位覆盖率比较

由图 5 可知，无论 MCL 定位算法在哪种情况下，定位精度都比 DV-Hop 要高。同时锚节点均匀分布 MCL 算法比锚节点随机分布 MCL 算法定位精度高，但是随着锚节点个数的增加，这种影响效果会逐渐减小。在定位覆盖率方面随着锚节点数增加，3 种算法定位覆盖率均增加。其中，锚节点均匀分布 MCL 算法定位覆盖率最大，当锚节点比率为 0.1 时，达到了 98%，当锚节点比率增加到 0.2 时，定位覆盖率就达到 100%。锚节点随机分布 MCL 算法定位覆盖率比 DV-Hop 算法差，主要原因是本文只考虑了 1 跳和 2 跳锚节点，而 DV-Hop 算法则考虑全部可以接收到的锚节点。

通过仿真，表明 MCL 算法定位精度比较高，同等情况下与 DV-Hop 算法进行仿真比较，定位效果明显好于 DV-Hop 算法。MCL 算法误差来源主要与随机撒播粒子数和锚节点个数有关。当粒子数与锚节点个数越多，定位精度将越高，但是粒子数越多，算法复杂度与定位消耗时间也会随着增加，锚节点数越多，则定位成本会越高，所以，在实际应用中应该根据定位精度折中考虑锚节点个数和粒子数。

5 结束语

本文在研究 Monte Carlo 算法的基础上提出并设计了基于 Monte Carlo 方法的非测距传感器节点定位算法。算法通过计算随机散布的粒子与锚节点之间的距离，再与最大射频传送距离比较，根据权值的改变进行滤波，确定未知节点可能存在的位置。仿真得到算法能够充分利用对传感器节点定位估计的有用信息，计算复杂度小，定位精度较高、健壮性好，对无线传感器网络具有较高的应用价值。

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Su W. Wireless Sensor Network: A Survey[J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.
- [2] 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(5): 1148-1157.
- [3] Niculescu D, Nath B. Ad Hoc Positioning Systems(APS)[C]//Proc. of the 2001 IEEE Global Telecommunications Conf.. [S. 1.]: IEEE Communications Society, 2001: 2926-2931.
- [4] Niculescu D, Nath B. DV Based Positioning in Ad Hoc Networks[J]. Journal of Telecommunication Systems, 2003, 22(1-4): 267-280.
- [5] Bahl P, Padmanabhan V N. RADAR: An In-building RF-based User Location and Tracking System[C]//Proceedings of the 19th Annual Joint Conference on IEEE Computer and Communications Societies. Aviv, Israel: IEEE Press, 2000: 775-784.
- [6] Hu U, Evans D. Localization for Mobile Sensor Networks[C]// Proceedings of the 10th International Conference on Mobile Computing and Networking. Philadelphia, USA: [s. n.], 2004: 45-57.
- [7] Doucet A, Godsill S, Andrieu C. On Sequential Monte Carlo Sampling Methods for Bayesian Filtering[J]. Statistics and Computing, 2000, 10(3): 197-208.