

RSSI 辅助的三维空间坐标四面体质心定位算法

葛 斌¹ 郑建宝¹ 韩江洪²

(安徽理工大学计算机科学与工程学院 淮南 232001)¹ (合肥工业大学计算机与信息学院 合肥 230009)²

摘 要 三维定位是无线传感器网络的重要技术之一。提出了一种 RSSI 辅助的三维空间坐标四面体质心定位算法。由于现实环境往往很复杂,存在锚节点组成的四面体不包含未知节点的情况,因此筛选优质的 RSSI 值,并将其转换为未知节点与锚节点的距离,进而计算和比较四面体体积来进行排除;对包含未知节点的四面体进行质心迭代求解,并且对不满足条件的情况运用 RSSI 均值加权质心定位算法。仿真结果表明,该算法的定位误差比坐标四面体质心算法的小,并且增加 RSSI 均值加权算法提高了定位覆盖率。

关键词 RSSI, 三维定位, 坐标四面体质心算法, 加权质心算法, WSN

中图法分类号 TP301.6 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.4.015

RSSI Assisted Coordinate-tetrahedron Centroid Localization Algorithm in Three-dimensional Space

GE Bin¹ ZHENG Jian-bao¹ HAN Jiang-hong²

(School of Computer Science and Engineering, Anhui University of Science & Technology,
Huainan 232001, China)¹

(School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)²

Abstract Three-dimensional localization is one of the important technologies of WSN. RSSI assisted coordinate-tetrahedron centroid localization algorithm in three-dimensional space was proposed. Due to the complexity of the reality environment, the cases that unknown node is not in the anchor node tetrahedron internal exist. Quality RSSI value will be screened and converted to the distance between the unknown nodes to an anchor node. Then the tetrahedron volume is calculated and compared to exclusion. The math of centroid iterative is used to solve tetrahedral which contains unknown node. In addition, a weighted centroid localization that algorithm based on RSSI average value is used to resolve the situation that does not meet the conditions. Simulation results show that this algorithm's positioning error is smaller than coordinate-tetrahedron centroid algorithm, and a weighted centroid localization algorithm based on RSSI average value is used to increase the node coverage rate.

Keywords RSSI, Three-dimensional localization, Coordinate-tetrahedron centroid algorithm, Weighted centroid algorithm, WSN

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是 21 世纪最具发展前景的技术之一^[1]。它是一种自组织网络,采用节点间协作方式感知、采集和处理被监测区域中对象的信息^[2]。在无线传感器网络中,位置信息对传感器网络的监测活动至关重要,知道节点的位置,侦测到的事件或采集的数据才有参考价值^[3]。

无线传感器网络的应用范围很广,随着该技术的不断成熟和进步,各行各业都涉及到无线传感器网络的应用^[4,5]。节点定位技术是无线传感器网络得以应用的重要支撑技术^[6]。目前,对无线传感器网络定位的研究,已经有许多的算法被提出来,但是大多是针对二维平面的定位,涉及三维定位

的比较少。而在现实环境应用中,如森林、海洋、矿山、大气中以及太空,传感器节点被随机地部署在这样的复杂三维空间内,很难预知所有节点的位置信息。因此对三维空间的传感器节点定位方法的研究具有非常重要的现实意义^[7]。

无线传感器网络定位算法可分为两大类:基于测距的定位和与距离无关的定位。RSSI^[8]是目前研究较多的测距定位方法,相比于与距离无关的定位方法, RSSI 增加了额外的有用的信息,且获取简单,能够提高定位的精度。现在许多与距离无关的定位算法都结合了 RSSI 技术。

与距离无关的定位算法有:文献[9]提出的坐标四面体质心定位算法,该算法比传统的质心算法定位误差要小,并且与传统质心算法有相似的特性,如不受跳数和跳距的影响等,但该算法仅仅考虑未知节点在所有四面体内,而在实际情况下

到稿日期:2014-05-30 返修日期:2014-08-29 本文受国家自然科学基金:煤矿井下物联网感知层感知异构融合理论与技术基础研究(61170060),安徽省自然科学基金:矿山物联网自主组网模型与低耗自组方法研究(1408085ME110),安徽省高等学校省级自然科学研究重大项目基金:面向矿井电机车无人驾驶系统的机车精确定位技术的研究(KJ2013ZD09)资助。

葛 斌(1975—),男,博士生,副教授,主要研究方向为物联网技术、智能控制技术, E-mail: bge@aust.edu.cn; 郑建宝(1989—),男,硕士生,主要研究方向为物联网技术; 韩江洪(1954—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机控制技术、无线网络技术。

可能出现未知节点在某个四面体外;文献[10]为降低算法复杂度和减少通信开销,提出了利用四面体质心算法来替换三维 APIT 算法中的网格扫描法,但是该算法仍然存在不足,未考虑未知节点能接收到的所有锚节点中找不到满足条件的四面体或个数小于 4 个的情况;文献[11]为提高覆盖率提出了一种改进的三维 APIT 算法,将已定位的未知节点晋升为锚节点,同时对判断未知节点在四面体内外做了进一步改进;文献[12]结合 RSSI 技术提出了一种 Landscape-3D 的定位算法,该算法采用移动 LA(Location-assistant)设备按指定运行轨道移动,周期性地广播自身位置信息,并通过 RSSI 测量 LA 设备与节点之间的距离来确定节点位置,其缺陷是整个定位过程依赖于 LA 设备,且计算量大,对节点存储能力要求较高。

结合上述定位算法,本文先提出定位方法存在的问题,然后介绍了筛选较优 RSSI 值及通过 RSSI 值计算未知节点与锚节点的距离,重点阐述了坐标四面体质心迭代定位算法的实现。

2 算法描述

2.1 问题提出

在实际应用环境中,传感器节点是随机地部署在三维空间内的,未知节点的空间位置无法预知,文献[9]运用坐标四面体质心算法来估算未知节点的位置时,没有考虑未知节点在四面体外的情况,如图 1 所示。

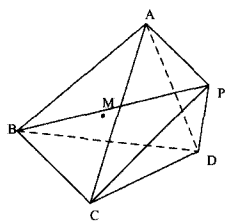


图 1 节点位置图

已知 A、B、C、D 是不在同一平面的 4 个锚节点,组成四面体 ABCD。未知节点 P 位于四面体 ABCD 外,点 M 是四面体的质心。从图中可以看出,用点 M 位置来估算未知节点 P 的位置显然会给定位造成很大的误差。因此,在运用质心算法估算未知节点时,应先判断点 P 是否在相应四面体内。

此外,对于文献[10],若未知节点接收到的所有锚节点存在四面体但不包含未知节点,或者锚节点数小于 4 个,则该算法对这种情况无效。且三维 APIT 算法在对未知节点在四面体内外进行判断存在误判,文献[11]采取对未知节点的所有邻居节点取平均值的方法,降低了误判的可能性^[11]。但是由于节点随机地部署在三维空间,取平均值后仍然存在一定误判,因此可能将在四面体内部的节点判为在外部,将在外部的判为在内部。

2.2 RSSI 距离计算

RSSI(Received Signal Strength Indicator)是一种接收信号强度指示测距的方法,该方法通过测量发送功率与接收功率,计算传播损耗,再利用信号衰减模型,将传播损耗转化为发送节点与接收节点的距离^[13]。这是一种低功率、廉价的测距技术,具有低成本、设备少、距离远、易获取的特点。

在实际应用环境中,由于无线信号受到各种障碍物的干扰、反射、多径传播、温度和传播模式的影响,电磁波传输损耗

符合对数正态阴影模型,可用修正的路径损耗模型^[14]描述:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n\lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (1)$$

其中, $PL(d)$ 为信号传播距离 d 后的损耗,单位为 dBm; $PL(d_0)$ 为信号传播距离 d_0 后的损耗,单位为 dBm; n 为传播因子(常取 2~5); X_σ 为遮蔽因子,是一个均值为 0、方差为 σ 的高斯随机噪声变量,单位为 dBm。

$PL(d_0)$ 可以通过室外无线电自由空间传播模型来计算。自由空间传播模型^[15]为:

$$PL(d_0) = 32.44 + 10n\lg(d) + 10n\lg(f_c) \quad (2)$$

其中, f_c 是传播信号的频率,单位为 MHz; d 为发送节点与接收节点的距离,单位为 km; 通常取 $d_0 = 1\text{m}$ 。

未知节点接收到锚节点的信号强度为:

$$RSSI = P_s + P_a - PL(d) \quad (3)$$

其中, P_s 为节点信号的发射功率; P_a 为天线增益; $PL(d)$ 为信号传播距离 d 后的损耗。根据式(1)~式(3)可以计算出距离。

2.3 筛选 RSSI 较优值

由于无线传感器网络所在矿山环境的复杂性,无线信号会受到各种因素的影响,因此不是在未知节点通信范围内接收到的所有锚节点都对定位有帮助,有时反而会增大定位误差。

未知节点到锚节点的距离越近, RSSI 的最大值和最小值相差越小,即距离与 RSSI 值的对应关系越好;当未知节点到锚节点的距离越远,测得的数据随机偏差也就越大,此时采集到的数据几乎不可用^[16]。由 RSSI 距离计算公式可知,距离锚节点越近, RSSI 值越大,因此要选择 RSSI 值较大的锚节点参与定位。

锚节点(Anchor Node)周期性地广播包含其自身位置信息和发射信号强度的无线信号,未知节点接收其通信范围内的信号,记录 RSSI 值,按从大到小的顺序建立 RSSI 值的集合:

$$RSSI_A = \{R_{A1}, R_{A2}, R_{A3}, \dots, R_{An}\} \quad (4)$$

综上所述,选择 RSSI 值较大的锚节点,被选中的锚节点再经过多次广播与未知节点进行通信,记录 RSSI 值,并舍弃波动明显的 RSSI 值。最后得到未知节点对于同一个锚节点收集的 N 个 RSSI 值,取其算术平均值作为对应该锚节点的最终 RSSI 值。

$$RSSI = \sum_{i=1}^N R_{An}(i) / N \quad (5)$$

2.4 坐标四面体质心迭代定位算法

本文针对文献[9,10]提出的运用坐标四面体质心定位的方法存在的问题和缺陷,并结合文献[12]利用 RSSI 的方法,对该算法进行如下优化和改进:

运用体积坐标系统中坐标四面体质心算法估算未知节点的位置之前,先对四面体进行选择,通过测量 RSSI 值计算距离,进而比较体积值的方法来进行判断,舍弃不包含未知节点的四面体;为提高定位的精确度和降低计算复杂度,采用坐标四面体质心迭代算法;对于在未知节点接收到的所有锚节点中找不到符合条件的四面体,或者锚节点数小于 4 个的情况,采用 RSSI 均值加权三维质心算法进行位置估计。

改进后的坐标四面体质心定位算法具体实施步骤如下:

步骤 1 筛选 RSSI 较优值的锚节点

未知节点接收其通信范围内所有锚节点的信号,分别记

录它们的 RSSI 值,按从大到小的顺序建立 RSSI 值的集合,取其中 RSSI 值较大的锚节点。

选定锚节点再经过多次广播与未知节点进行通信,记录 RSSI 值,其中舍弃波动明显的 RSSI 值。最后得到未知节点对于同一个锚节点收集的 N 个 RSSI 值,取其算术平均值 ($RSSI = \sum_{i=1}^N R_{Ai}(i)/N$) 作为对应锚节点的最终 RSSI 值。

步骤 2 计算未知节点到锚节点的距离

由步骤 1 得到未知节点对应各锚节点的 RSSI 值,将该值代入式(1)~式(3)中,即可求得未知节点与各锚节点的距离。

步骤 3 判断未知节点是否在四面体内

若未知节点接收到的锚节点数 $N \leq 3$,则执行步骤 5。否则,随机选择一组锚节点组成一个四面体。如图 2 所示, A_1, A_2, A_3, A_4 为 4 个已知坐标锚节点,故容易计算出 $A_1A_2, A_1A_3, A_1A_4, A_2A_3, A_2A_4, A_3A_4$ 的距离。由步骤 2 得到 MA_1, MA_2, MA_3, MA_4 的距离。然后利用四面体体积计算公式(6)和(7)分别计算出四面体 $A_1A_2A_3A_4, MA_1A_2A_3, MA_1A_2A_4, MA_1A_3A_4, MA_2A_3A_4$ 的体积值 V, V_1, V_2, V_3, V_4 。如果 $(V_1 + V_2 + V_3 + V_4) > V$,则可以判断 M 在四面体 $A_1A_2A_3A_4$ 外面,舍弃该四面体。

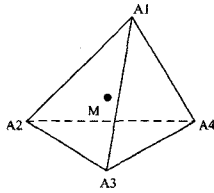


图 2 四面体 $A_1A_2A_3A_4$

四面体 4 个顶点的直角坐标为: $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3), (x_4, y_4, z_4)$, r_{ij} 是顶点 i 和 j 之间的距离。那么其体积值计算公式如下:

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \end{vmatrix} = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ x_4 - x_1 & y_4 - y_1 & z_4 - z_1 \end{vmatrix} \quad (6)$$

或者,

$$V^2 = \frac{1}{288} \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & r_{12}^2 & r_{13}^2 & r_{14}^2 \\ 1 & r_{12}^2 & 0 & r_{23}^2 & r_{24}^2 \\ 1 & r_{13}^2 & r_{23}^2 & 0 & r_{34}^2 \\ 1 & r_{14}^2 & r_{24}^2 & r_{34}^2 & 0 \end{vmatrix} \quad (7)$$

随机选择锚节点可能出现重复的情况,因此,在选择锚节点组的过程中,可以根据未知节点周围锚节点数,设置适当的选取次数。例如,当周围有 10 个锚节点时,取其中 4 个,则有 $C_{10}^4 = 210$ 种取法,当有更多的锚节点时,为降低算法时间代价,必须对选取次数设定一个阈值。

步骤 4 坐标四面体质心迭代求解

由步骤 3 得到一个符合条件的四面体的集合,若集合为空则执行步骤 5,否则执行下面步骤:

①对集合内的所有四面体运用坐标四面体质心算法来计算四面体的质心,得到一组质心坐标。

②对于上一步获得的一组质心坐标,每 4 个一组,组成新的四面体集合,若该组不能整除 4,剩下的质心坐标则进入下一轮坐标四面体质心迭代计算。

③重复①、②,直到得到的质心坐标个数小于 4,若最后获得 1 个坐标则该坐标为未知节点的坐标估计值;若最后获得 2 或 3 个质心坐标则取其平均坐标作为未知节点最终坐标估计值。

步骤 5 加权质心算法估计位置

若未知节点接收到的锚节点数 $N \leq 3$ 或者四面体集合为空,则对所有锚节点采用 RSSI 均值加权质心算法来进行未知节点位置估计。

设未知节点接收到的锚节点信号个数为 K ,相对应的 RSSI 值为 $R_1, R_2, \dots, R_k$,第 i 个锚节点的加权因子为 $Q_i = \frac{K \times R_i}{\sum_{i=1}^k R_i}$,那么 RSSI 均值加权质心算法估计坐标为:

$$(x, y, z) = \left(\frac{\sum_{i=1}^k Q_i x_i}{\sum_{i=1}^k Q_i}, \frac{\sum_{i=1}^k Q_i y_i}{\sum_{i=1}^k Q_i}, \frac{\sum_{i=1}^k Q_i z_i}{\sum_{i=1}^k Q_i} \right) \quad (8)$$

2.5 定位误差

定位误差公式为:

$$error_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \quad (9)$$

其中, (x_i, y_i, z_i) 为未知节点的估算坐标, (x_0, y_0, z_0) 为未知节点的实际坐标。

n 个未知节点平均定位误差为:

$$error = \frac{\sum_{i=1}^n error_i}{n} \quad (10)$$

3 仿真分析

用 Matlab 对所述定位算法进行验证,仿真环境为模拟矿山附近电厂上空长 100 米、宽 100 米、高 100 米的大气污染源排放监测区域,未知传感器节点被随机部署以监测大气污染源排放情况,仿真结果是在相同条件下进行 50 次实验的平均值,如图 3~图 6 所示。

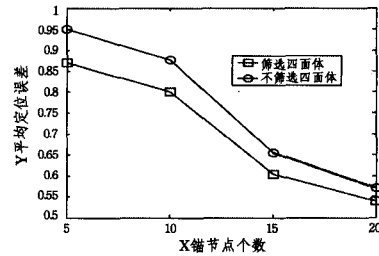


图 3 不同数量锚节点对应的定位误差

首先,我们取未知节点数量为 100 个,通信距离 40m,研究了根据随机选择的 4 个锚节点组成的四面体是否包含未知节点进行筛选对定位造成的误差。从图 3 可看到,在随机选取的 4 个锚节点所组成的四面体中,进行了筛选的定位误差要比没有进行筛选的更小,可见随机选取确实存在不包含未知节点的情况,给定位带来很大的误差,因此,对四面体进行筛选是很有必要的。同时,由图 3 可知,在未知节点的数目固定不变的情况下,定位误差随着锚节点数量的增加而减小。

图 4 显示了两种方案在节点通信距离从 30m 到 70m 的定位误差。实验固定锚节点和未知节点分别为 20 和 100。图 4 所示结果进一步证明了进行筛选比没有进行筛选的定位误差要小。同时还可以看出,定位误差随着节点通信距离的增加而减小。这是因为增加节点通信距离,会使距离估计更加接近节点间的欧氏距离。

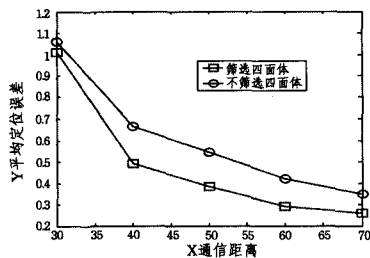


图4 20个锚节点对应的定位误差

图5所示为取未知节点数量为160个、通信距离为40m的情况下各算法的定位误差比较。由图5可以看出本文提出的算法的定位误差比文献[9,10]运用四面体质心算法的要小。虽然这两种算法都是对四面体包含未知节点的情况进行求质心,估算未知节点位置坐标,但是本文和文献[11]的算法运用了四面体质心迭代求解法求解质心的位置,比取所有质心坐标平均值的方法进一步降低了定位误差。并且文献[10]由于在判断未知节点是否在四面体内时,存在出现误判情况,导致定位误差较大。文献[11]虽然对误判做了进一步改进,但是仍然存在一定的误判。

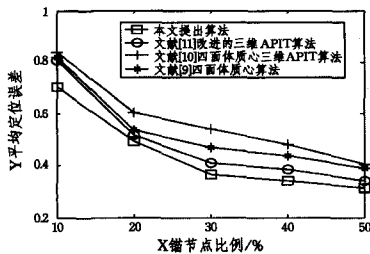


图5 改进后算法定位误差比较

图6所示为在选择160个节点的情况下,让锚节点比例分别从10%增加到50%时各种算法对定位覆盖率的影响。从图6不难看出,本文提出的算法覆盖率较好,这是由于本文算法针对文献[9,10]的不足,对接收锚节点数少于4和存在锚节点四面体但未知节点不在其内的情况,采用了RSSI均值加权质心定位方法。由图6还可看出,本文算法在锚节点比例较小时,采用RSSI均值加权质心定位方法大大增加了定位的覆盖率。而文献[11]在锚节点比例较小时,能定位的未知节点少,则晋升的锚节点也少,所以定位覆盖率低。从整体看,采用RSSI均值加权质心定位方法的覆盖率很高。同时,在节点数目固定不变,只改变锚节点比例时,覆盖率随锚节点比例增加而增加。

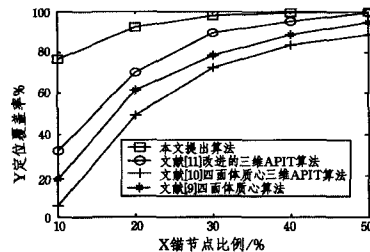


图6 锚节点比例对覆盖率的影响

结束语 本文对文献[9,10]运用求四面体质心的定位方法进行了优化和改进,结合文献[12]中使用RSSI测距的方法提出一种RSSI辅助三维空间坐标四面体质心定位算法。该算法结合了RSSI测距对随机选取四面体进行筛选,排除

了现实环境中四面体不包含未知的节点情况,对满足条件的四面体质心进一步运用四面体迭代求解法求解质心坐标,而对不满足条件的情况采用RSSI均值加权质心定位方法定位。仿真结果表明,该算法既降低了定位误差又增加了定位覆盖率。与文献[9,10]运用四面体质心定位算法相比,其更适用于复杂的现实环境中。

参考文献

- [1] Rabacy J J, Ammer M J, Patel D, et al. Picoradio supports ad hoc ultra-low power wireless networking [J]. Computer, 2000, 33 (7): 42-48
- [2] 王长征, 汤文亮, 徐燕. 无线传感器网络中四面体三维质心定位算法[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(8): 141-143
- [3] Liu Yun-hao, Yang Zheng, Wang Xiao-ping. Location, Localization, and Localizability [J]. Journal of Computer Science and Technology, 2010, 25(2): 274-297
- [4] Alemdar H, Ersoy C. Wireless sensor networks for healthcare: A survey[J]. Computer Networks, 2010, 54: 2688-2700
- [5] Othmana M F, Shazali K. Wireless sensor network applications: A study in environment monitoring system[J]. Procedia Engineering, 2012, 41: 1204-1210
- [6] 李建中, 高宏. 无线传感器网络的研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(1): 1-15
- [7] Wang Jing, Ghosh R K, Das S K. A Survey on Sensor Localization[J]. Journal of Control Theory and Applications, 2010, 27 (4): 1345-1352
- [8] Zhang Zhi-bin, Xu Xiao-ling, Yan Lian-long. Underground localization algorithm of wireless sensor network based on Zigbee[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1): 125-128
- [9] Chen Hong-yang, Huang Pei, Martins M. Novel Centroid Localization Algorithm for Three Dimensional Wireless Sensor Networks [C]//WiCOM'08 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008: 1-4
- [10] Liu Zhuang, Fang Zhi-yi, Ren Nai-ji. A New Range-Free Localization Algorithm Based on Annulus Intersection and Grid Scan in Wireless Sensor Networks [J]. Journal of Information and Computational Science, 2012, 9(4): 831-841
- [11] 胡伟, 朱西平, 文红, 等. 基于四面体质心迭代的三维APIT定位算法研究[J]. 传感技术学报, 2013, 26(10): 1432-1436
- [12] Zhang Li-qiang, Zhou Xiao-bo, Cheng Qiang. Landscape 3D: A Robust Localization Scheme for Sensor Networks over Complex 3D Terrains [C]//Proceedings of the 31st IEEE Conference on Local Computer Networks, 2006: 239-246
- [13] Zhang Jie, Wu Ling-xi, Tang Zhi-jun. Ranging Method and Accuracy Analysis Based on RSSI of Wireless Sensor Network [J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(4): 83-87
- [14] Dieng N A, Chaudet C, Charbit M, et al. Experiments on the RSSI as a Range Estimator for Indoor Localization [C]//2012 5th International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS), 2012: 558-565
- [15] Rappaport T. Wireless Communications: Principles and Practice [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 2002
- [16] 王珊珊, 殷建平, 张国敏, 等. 求解无线传感器网络定位问题的线性规划算法[J]. 计算机研究与发展, 2009(5): 705-712