

一种用于无线传感器网络三维定位的迭代估计方法

蒋 锐 吴 谦 徐友云

(南京邮电大学通信与网络国家工程研究中心 南京 210003)

(南京邮电大学宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室 南京 210003)

摘 要 现有无线传感器网络三维定位算法大部分借鉴并基于相对成熟并且算法性能较好的二维定位算法原理,将其扩展至三维空间以实现节点定位,相比二维定位算法具有更好的定位精度。基于质心迭代估计的无线传感器网络二维定位算法通过对连通锚节点所围成平面的质心进行迭代计算,缩小了未知节点所在二维平面的范围,提高了节点的定位精度。基于此二维定位方法的原理,提出了一种用于无线传感器网络三维定位的迭代估计方法。首先,该算法计算当前连通锚节点所张成三维空间的质心坐标及其与未知节点间的接收信号强度;其次,以该质心节点为虚拟锚节点替代距离未知节点最远的连通锚节点,为未知节点自身的定位提供帮助。由于节点定位精度随着未知节点所处三维空间范围的缩小而不断提高,因此通过多次迭代后可以获得理想的定位精度。在 3.50GHz 电脑平台上模拟实际无线传感器网络环境,利用交互式数据语言对所提算法进行仿真,以验证算法的性能。仿真结果表明,所提算法与基于质心迭代估计的无线传感器网络二维定位算法相比,其定位精度可提高 3%~6%;与三维质心定位算法相比,其定位精度可提高 5%~23%。同时,所提算法具有较好的抗 RSSI 测量误差的能力,并通过多次迭代定位使得节点定位覆盖率可以达到 99% 以上,是一种适用于无线传感器网络三维定位的有效方法。

关键词 无线传感器网络, 三维节点定位, 非测距, 质心定位

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/jsjx.181001855

3D Node Localization Algorithm Based on Iterative Computation for Wireless Sensor Network

JIANG Rui WU Qian XU You-yun

(Telecommunication and Networks National Engineering, Nanjing University of Posts and
Telecommunications, Nanjing 210003, China)

(Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology Key Lab of Ministry of Education,
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract The existing three-dimension localization algorithm for wireless sensor networks (WSN) is mostly based on the principle of two-dimension localization algorithm with mature and good performance. Compared with the two-dimensional localization algorithm, most of the three-dimension localization algorithms have better localization accuracy. Two-dimensional localization algorithm for wireless sensor networks based on centroid iteration estimation reduces the range of two-dimensional plane of unknown nodes and improves the positioning accuracy of nodes by iterating the centroid of the plane surrounded by connected anchor nodes. Based on the theory of the two-dimension centroid localization algorithm, this paper proposed a novel approach of three-dimensional node localization algorithm based on iterative computation. First, the centroid coordinates of the three-dimensional space enclosed by the current connected anchor nodes as well as the received signal strength (RSSI) between the unknown node and the centroid node are calculated. Then, the current connected anchor node with the weakest RSSI is replaced with the centroid node in order to reduce the three-dimensional space enclosed by the connected anchor nodes. The location accuracy can be improved through multi-iterations with an appropriate threshold. Simulation results are obtained with interactive data language (IDL) on a PC of 3.50 GHz. Judging from the simulation results, there is an improvement of 3% to 6% in location accuracy compared with the two-dimension localization algorithm, and an improvement of 5% to 23% in location accuracy compared with the 3D centroid localization algorithm. What's more, the proposed algorithm performs well for RSSI error disturbance and can reach more than 99% of localization coverage after multi-iterations.

Keywords Wireless sensor networks, 3D node self-localization, Range-free, Centroid localization

到稿日期: 2018-10-08 返修日期: 2019-03-06 本文受国家自然科学基金(61601243, 61701253), 国家重点研发计划(2016YFE0200200), 江苏省自然科学基金(BK20161518)资助。

蒋 锐 博士, 副教授, 主要研究方向为雷达信号处理和无线传感器网络; 吴 谦 硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络; 徐友云 博士, 教授, 主要研究方向为移动通信和物联网技术, E-mail: yyxu@njupt.edu.cn(通信作者)。

1 引言

无线传感器网络由大量具有感知、通信和信号处理能力的传感器节点所组成,是物联网的基本组成部分之一。对无线传感器网络的研究源于其在军事领域的应用,由于具有节点自定位、低成本、低功耗和多功能的特点,无线传感器网络适用于复杂多变的地理环境,甚至可以投放在恶劣的自然环境和人类难以企及的角落。如今,随着相关科学技术的发展,无线传感器网络技术的应用也在不断普及,涉及人们生活的方方面面,如环境监测、医疗护理、目标检测和跟踪等^[1-2]。无线传感器网络必须准确地知道传感器节点所在的位置信息,该节点所感知的信息才具有应用的价值。因此,传感器节点在网络中通过与相邻节点间的通信来对自身进行定位,是无线传感器网络得以实际应用的基础^[1]。

无线传感器网络节点的定位分为基于二维平面的节点定位和基于三维空间的节点定位。基于二维平面的节点定位由于减少了第三维信息的估计,相对简单。现有的基于二维平面的定位算法大致分为两类:基于测距的定位算法和基于非测距的定位算法。基于测距的定位算法需要对未知节点与连通锚节点之间的相关距离或者方位信息进行精确的计算,节点定位精度较高,但定位过程中节点的能量消耗往往较大,无法满足无线传感器网络对节点低功耗特点的要求,并且受距离或者方位计算误差的影响较大,抗距离测量误差能力较差。这类算法包括基于接收信号强度(Received Signal Strength Indication, RSSI)进行距离测量的节点定位算法^[3-6]、基于信号到达时间(Time of Arrival, TOA)进行距离测量的节点定位算法^[7-8]和基于信号到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)进行距离测量的节点定位算法^[9]等^[10-11]。基于非测距的定位算法不需要计算未知节点和连通锚节点之间的精确距离或者方位,仅利用节点的连通性等估计未知节点的位置,如质心定位算法^[12]、DV-Hop(Distance Vector-Hop)定位算法^[13-14]和近似三角形内点测试(Approximate Point-In-Triangulation test, APIT)定位算法^[15-16]等^[17-19],该类算法的定位精度较低。然而,由于其定位过程对节点能量的消耗较小,大大降低了无线传感器网络的整体定位计算量和通信开销,在实际生活中被应用得更广泛^[20-21]。

由于在实际应用中无线传感器网络节点一般不会分布于绝对的二维平面,因此研究无线传感器网络的三维定位算法更符合实际的定位需求,具有更好的应用前景^[1-2]。现有无线传感器网络三维定位算法大部分借鉴并基于相对成熟且算法性能较好的二维定位算法原理,将其扩展至三维空间以实现节点定位。因此,现有无线传感器网络三维定位算法大致也可分为两类:基于测距的定位算法和基于非测距的定位算法。其中,基于测距的定位算法,如 Constrained-3D 定位算法,通过 TOA 的方法计算所需要的具体距离信息,并基于三角测量原理实现节点的自定位。但是该算法假设所有初始锚节点分布在同一平面上,严重影响了该算法的实际应用^[22]。基于非测距的定位算法,如三维质心定位算法和三维 DV-Hop 定位算法,基于二维质心定位算法和 DV-Hop 定位算法原理,将二维平面坐标扩展至三维空间坐标,保留了原二维定位算

法无需测距、节点功耗较低的优点,成功实现了基于非测距的无线传感器节点的三维定位^[23]。APIS(Approximate Point-In-Sphere test)定位算法和 APIT-3D 定位算法基于二维 APIT 定位算法的原理实现无线传感器网络的节点三维定位。APIS 算法以网络中各锚节点为球心、通信距离为半径,将整个三维空间划分为多个球体空间,通过判断未知节点与各球体空间的位置关系来实现三维定位。该算法虽然无需测距,但是整体计算和通信开销较大,要求锚节点具有较高的能量储备和通信能力^[24]。在 APIT-3D 定位算法中,任意 4 个锚节点可以唯一确定一个四面体,将与未知节点连通的锚节点进行排列组合,可以确定多个不同的四面体,并通过判断未知节点与各四面体之间的位置关系来实现三维定位。该定位方法的计算量小,节点功耗低,但是容易对未知节点和四面体之间的位置关系进行误判,从而影响未知节点的定位精度^[25]。

综上所述,根据实际应用的需求,研究无线传感器网络三维定位方法以实现高精度并且低能耗的节点定位显得尤为重要。虽然并不是所有的无线传感器网络二维定位算法都可以扩展至三维空间进行应用,但借鉴并基于相对成熟且算法性能较好的二维定位算法原理,将其扩展至三维空间以实现节点定位,并保持原二维算法的优点,是研究并实现无线传感器网络三维定位的有效方法^[1-26]。基于质心迭代估计的无线传感器网络二维定位算法通过对锚节点所围成平面质心的迭代计算,不断缩小未知节点可能存在的二维平面范围,以此提高节点的定位精度。该算法不需要测量未知节点与连通锚节点之间的距离,具有较好的抗距离测量误差的性能,定位过程中节点的能量消耗较小,且通过多次迭代可以获得较好的定位精度^[27]。本文基于该算法的原理,提出了一种用于无线传感器网络三维定位的迭代估计方法。在二维定位算法中,未知节点可能存在的二维平面区域越小,其定位精度就越好。同理,在三维定位过程中,定位精度随着未知节点所处三维空间范围的不减小而不断提高。基于以上分析,本文首先计算当前连通锚节点所张成三维空间的质心坐标及其与未知节点间的 RSSI,然后用该质心替代距离未知节点最近的锚节点,从而生成新的三维空间。通过公式推导可以证明,新生成的三维空间范围一定小于原三维空间范围。因此,通过多次迭代可以有效提高算法的定位精度。仿真实验结果表明,相比二维定位方法,本文算法具有相当甚至更好的定位精度,且同样具有较好的抗 RSSI 测量误差的能力,并通过多次迭代定位可以获得较好的定位覆盖率,是一种适用于无线传感器网络三维定位的有效方法。

2 用于无线传感器网络三维定位的迭代估计算法

2.1 算法描述

假设在三维空间中存在真实坐标为 (x, y, z) 的未知节点 O 。在三维空间中,存在 N 个锚节点 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_N$ 与未知节点 O 相连通,其中第 n 个锚节点 S_n 的坐标为 (x_n, y_n, z_n) ,则该锚节点 S_n 与未知节点 O 之间的距离为:

$$d_n = \sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 + (z_n - z)^2}, 1 \leq n \leq N \quad (1)$$

由这 N 个连通锚节点 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_N$ 张成的三维空间

中,空间质心 \hat{O}_1 的坐标为 $(x_{\hat{O}_1}, y_{\hat{O}_1}, z_{\hat{O}_1})$,其计算公式如下:

$$\begin{cases} x_{\hat{O}_1} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n \\ y_{\hat{O}_1} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_n \\ z_{\hat{O}_1} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N z_n \end{cases} \quad (2)$$

根据式(1)和式(2),可得空间质心 \hat{O}_1 与未知节点 O 之间的距离为:

$$\begin{aligned} d_{\hat{O}_1} &= \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n - x\right)^2 + \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_n - y\right)^2 + \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N z_n - z\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n - x\right)^2 + \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_n - y\right)^2 + \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N z_n - z\right)^2} \end{aligned} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n - x\right)^2 &= \frac{1}{N^2} \left(\sum_{n=1}^N x_n - Nx\right)^2 \\ &= \frac{1}{N^2} \left[\sum_{n=1}^N (x_n - x)\right]^2 \end{aligned}$$

$$d_{\hat{O}_1} = \frac{1}{N} \sqrt{N \sum_{n=1}^N (d_n)^2 - \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (x_i - x_j)^2 - \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (y_i - y_j)^2 - \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (z_i - z_j)^2} \quad (9)$$

由于连通锚节点坐标已知,因此根据式(2)和式(9)可以获得当前三维空间质心 \hat{O}_1 的坐标及其与未知节点 O 之间的距离。此时,可以将空间质心 \hat{O}_1 视为新的连通锚节点,用其替代距离未知节点 O 最远的某一连通锚节点,从而缩小连通锚节点所张成空间的范围,并通过多次迭代不断提高算法的定位精度。

但是,在无线传感器节点定位算法中计算锚节点与未知节点间的距离会急剧增加算法的复杂度、网络的通信开销和节点的能量损耗,因此考虑利用未知节点 O 与连通锚节点间的RSSI信息替代距离信息,进行空间质心 \hat{O}_1 的相关参数计算及定位算法的迭代,可以有效减少网络的通信开销,降低节点能量的损耗。

假设未知节点 O 与第 n 个连通锚节点 S_n 之间的距离为 d_n ,并且已知未知节点 O 与锚节点 S_n 之间的RSSI为 P_n ,则根据自由空间内的信号传播理论可得^[28]:

$$\frac{P_1}{P_n} = \left(\frac{d_n}{d_1}\right)^M \quad (10)$$

其中, M 为常数, P_1 为与未知节点 O 距离为 d_1 处的RSSI。令 $d_1=1$,则 P_1 表示与未知节点 O 距离1m处的RSSI,代入式(10)并做进一步简化可得:

$$10 \log_{10} P_n = -[A + 10M(\log_{10} d_n)] \quad (11)$$

其中:

$$A = -10 \log_{10} P_1 \quad (12)$$

根据实际环境,一般地, M 值的最佳设定范围为3.24~4.5, A 值的最佳设定范围为45~49。根据式(10)~式(12),化简可得:

$$d_n = \sqrt{10^{-\frac{A}{5M}} P_n^{-\frac{2}{M}}} \quad (13)$$

将其代入式(9),假设未知节点 O 与当前质心 \hat{O}_1 的RSSI

$$= \frac{1}{N^2} \left[\sum_{n=1}^N (x_n - x)^2 + 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (x_i - x)(x_j - x) \right] \quad (4)$$

当 $i \neq j$ 时,有:

$$\begin{aligned} 2(x_i - x)(x_j - x) &= 2x_i x_j - 2x_i x - 2x_j x + 2x^2 \\ &= (x_i - x)^2 + (x_j - x)^2 - (x_i - x_j)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4),可得:

$$\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n - x\right)^2 = \frac{1}{N^2} \left[N \sum_{n=1}^N (x_n - x)^2 + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (x_i - x_j)^2 \right] \quad (6)$$

同理可得:

$$\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_n - y\right)^2 = \frac{1}{N^2} \left[N \sum_{n=1}^N (y_n - y)^2 + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (y_i - y_j)^2 \right] \quad (7)$$

$$\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N z_n - z\right)^2 = \frac{1}{N^2} \left[N \sum_{n=1}^N (z_n - z)^2 + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (z_i - z_j)^2 \right] \quad (8)$$

将式(6)~式(8)代入式(3),有:

为 $P_{\hat{O}_1}$,则有:

$$P_{\hat{O}_1} = \frac{1}{\left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (P_n^{-\frac{2}{M}}) - \frac{10^{5M}}{N^2} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (d_{ij})^2 \right]^{\frac{M}{2}}} \quad (14)$$

其中, d_{ij} 表示锚节点 S_i 与 S_j 之间的距离,即:

$$\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (d_{ij})^2 = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (x_i - x_j)^2 + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (y_i - y_j)^2 + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (z_i - z_j)^2 \quad (15)$$

因此,在已知锚节点间的距离和锚节点与未知节点间的RSSI时,利用式(14)可以直接计算未知节点与空间质心节点间的RSSI,避免了定位过程中RSSI和物理距离间的相互转换,大大降低了算法的运算量和节点的定位能耗。

2.2 算法收敛性

将式(15)代入式(9),可对空间质心 \hat{O}_1 与未知节点 O 之间的距离 $d_{\hat{O}_1}$ 的表达式做进一步简化,有:

$$d_{\hat{O}_1} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (d_n)^2 - \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (d_{ij})^2 \quad (16)$$

不失一般性,假设有:

$$0 < d_1 \leq d_2 \leq d_3 \leq \dots \leq d_{N-1} \leq d_N \quad (17)$$

因此,根据式(16)和式(17)可得:

$$\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (d_n)^2 \leq d_N \quad (18)$$

$$\frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (d_{ij})^2 > 0 \quad (19)$$

将其代入式(16),有:

$$d_{\hat{O}_1} < d_N \quad (20)$$

显然,利用当前三维空间质心 \hat{O}_1 替代锚节点 S_N 所张成的三维空间一定小于原锚节点所张成的三维空间,通过多次迭代不断缩小未知节点 O 所在的空间范围,提高节点定位精度,使算法收敛。

2.3 算法迭代的终止条件

本文算法收敛性的证明,说明本文算法的定位精度随着质心迭代次数的增加而不断提高。然而,随着锚节点所张成空间的不断缩小,算法迭代对未知节点定位精度的改善作用也变小。因此,设定合适的迭代终止条件可以在有效保证节点定位精度的情况下,节省网络的通信开销和节点的能量损耗。

未知节点 O 与连通锚节点所张成的三维空间之间存在两种位置关系:未知节点 O 位于连通锚节点所张成的空间的内部,未知节点 O 位于连通锚节点所张成的空间的外部。由于空间质心同样位于空间内部,因此当未知节点 O 位于连通锚节点所张成的空间的内部时,随着算法迭代次数的增加,锚节点所张成的空间的范围越来越小,其空间质心可以不断逼近并无限接近未知节点 O 。此时,考虑直接设定算法终止条件为未知节点 O 与所获得的空间质心之间的距离小于某一阈值。根据式(14),即设定当第 m 次迭代所获得的空间质心 \hat{O}_m 与未知节点 O 间的 RSSI 大于某一阈值:

$$P_{\hat{O}_m}^{\Delta} > \epsilon_1 \quad (21)$$

其中, ϵ_1 为设定的阈值。

当未知节点 O 位于连通锚节点所张成的空间的外部时,随着算法迭代次数的增加,其空间质心可以不断接近但不能无限接近于未知节点 O 。此时,若仍采用式(21)作为迭代终止条件,则算法会陷入死循环。根据式(18),考虑设定空间质心与未知节点 O 之间的 RSSI 变化率小于某一阈值:

$$\begin{cases} P_{\hat{O}_m}^{\Delta} > P_{\hat{O}_{m-1}}^{\Delta} \\ |P_{\hat{O}_m}^{\Delta} - P_{\hat{O}_{m-1}}^{\Delta}| < \epsilon_2 \end{cases} \quad (22)$$

其中, ϵ_2 为设定的阈值。

此时认为算法迭代对定位精度的改善作用较小,算法已经达到收敛。然而,在实际三维空间中,无法快速并且准确地判断未知节点 O 与连通锚节点所张成空间之间的位置关系。因此,为了保证对未知节点 O 定位的正确性,设定当计算所得空间质心 \hat{O}_m 满足式(21)和式(22)中的任意条件时,算法停止迭代。

3 仿真实验结果与分析

本文利用交互式数据语言(Interactive Data Language, IDL)在 3.50GHz 电脑平台上仿真模拟实际无线传感器网络环境,并改变影响未知节点定位精度的相关重要参数,如节点通信半径、锚节点分布密度和 RSSI 接收测量误差等,利用蒙特卡洛仿真方法验证本文定位算法的性能。

定义未知节点在三维空间中的真实位置与定位算法估计所得位置间的最短距离为算法的定位误差。假设三维定位算法估计未知节点的位置为 $\hat{O}(x_O^{\Delta}, y_O^{\Delta}, z_O^{\Delta})$,根据式(1),算法的定位误差为:

$$ERROR = \sqrt{(x_O^{\Delta} - x)^2 + (y_O^{\Delta} - y)^2 + (z_O^{\Delta} - z)^2} \quad (23)$$

为了更好地对比不同节点通信半径的无线传感器网络之间的定位精度,在式(23)的基础上定义相对定位误差为:

$$\frac{ERROR}{KR} = \frac{\sum_{i=1}^K ERROR_i}{KR} \quad (24)$$

其中, K 为无线传感器网络中未知节点的个数, R 为节点通信半径。

假设在 $100\text{ m} \times 100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的三维空间中随机分布 1000 个节点。根据式(21)和式(22),在蒙特卡洛仿真实验中设定算法的迭代终止条件为:

$$P_{\hat{O}_m}^{\Delta} > P_1 \text{ or } \begin{cases} P_{\hat{O}_m}^{\Delta} > P_{\hat{O}_{m-1}}^{\Delta} \\ |P_{\hat{O}_m}^{\Delta} - P_{\hat{O}_{m-1}}^{\Delta}| < 0.01P_1 \end{cases} \quad (25)$$

其中, P_1 表示与未知节点 O 距离 1 m 处的 RSSI。

首先在图 1 中分别通过改变无线传感器网络中节点的通信半径和锚节点的比例,来说明网络中与未知节点连通的锚节点数对本文算法定位精度的影响。通过观察发现,在相同锚节点比例条件下,节点通信半径越大,与未知节点连通的锚节点的数量就越多,算法定位精度也随之不断提高。同理,当节点通信半径一定时,增加无线传感器网络中锚节点的比例同样可以增加与未知节点连通的锚节点数量,进而有效提高算法对未知节点位置的估计精度。综上所述,通过图 1 所示的蒙特卡洛仿真实验证明,增加与未知节点连通的锚节点数可以提高基于质心迭代估计的无线传感器网络三维定位算法的精度。

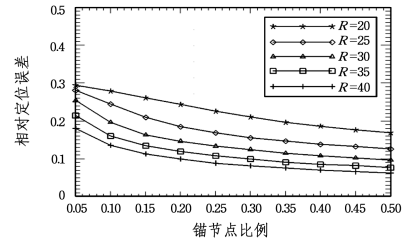


图 1 连通锚节点数对算法定位精度的影响

Fig.1 Effect of number of anchor nodes on location accuracy

由于本文算法是将二维定位算法扩展应用于三维空间,因此需要将二维定位算法和三维定位算法进行性能对比,并分析三维定位算法是否较好地保留了原二维定位算法的良好定位性能。然而,在二维平面和三维空间中节点所处的仿真环境不同,为了确保两种算法的定位精度之间具有可比性,要求节点在二维平面和三维空间中的分布情况在统计上保持一致。基于以上分析,仿真假设在 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的二维平面上随机分布 100 个节点,这样无论是在二维平面还是三维空间中,均满足任意一维方向上平均每间隔 10 m 存在一个节点。根据式(25),设定二维定位算法的迭代终止条件如下。

未知节点位于连通锚节点所围成平面的内部:

$$P_{\hat{O}_m}^{\Delta} > P_1 \quad (26)$$

未知节点位于连通锚节点所围成平面的外部:

$$\begin{cases} P_{\hat{O}_m}^{\Delta} > P_{\hat{O}_{m-1}}^{\Delta} \\ |P_{\hat{O}_m}^{\Delta} - P_{\hat{O}_{m-1}}^{\Delta}| < 0.01p_1 \end{cases} \quad (27)$$

此时,无论是无线传感器网络节点分布环境还是定位算法迭代终止条件,两种算法均具有较好的一致性。将二维节点定位看作是所有节点均分布在同一平面内的三维节点定

位,根据式(23)可得二维节点定位算法的误差为:

$$ERROR_{2D} = \sqrt{(x_{\Delta} - x)^2 + (y_{\Delta} - y)^2} \quad (28)$$

将式(28)代入式(24)即可得二维条件下算法的相对定位误差。为了充分对比二维定位算法和三维定位算法,分别选取节点通信半径较小的 $R=25$ 和节点通信半径较大的 $R=40$ 这两种情况来观察不同锚节点比例条件下两种算法的相对定位误差,如图 2 所示。

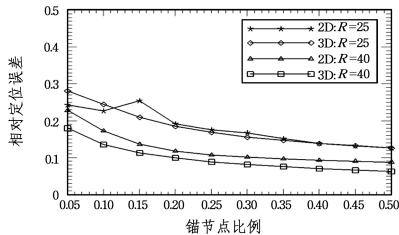


图 2 二维定位算法和三维定位算法相对定位误差的对比

Fig. 2 Performance comparison of 2D localization algorithm and 3D localization algorithm

通过观察发现,随着无线传感器网络中连通锚节点比例的增加,二维定位算法和三维定位算法的估计精度都有显著改善,该实验结果与图 1 所示的实验结果相吻合。当节点通信半径较小如 $R=25$ 时,以未知节点为球心的通信半径内的锚节点数量与以未知节点为圆心的相同通信半径内的锚节点数量相当,此时二维定位算法和三维定位算法具有几乎相同的节点相对定位误差;然而,当节点通信半径较大如 $R=40$ 时,以未知节点为球心的通信半径内的锚节点数明显多于以未知节点为圆心的相同通信半径内的锚节点数量,此时本文算法相较于二维定位算法呈现出了更小的节点相对定位误差。因此,本文所提三维定位算法不但保持了原二维节点定位算法的优点,而且在较大节点通信半径的情况下,具有比原二维定位算法更优的定位精度。

在实际无线传感器网络中,各种噪声的干扰会导致网络对 RSSI 的测量存在误差。节点间信号的信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 越低,则网络对未知节点与连通锚节点间的 RSSI 测量的误差越大。基于质心迭代估计的无线传感器网络三维定位算法需要利用未知节点和锚节点间的 RSSI 估计当前三维空间质心与未知节点间的 RSSI 值,因此通过仿真实验分析 RSSI 测量误差对算法的影响尤为重要。为了更加全面地分析距离测量误差对基于质心迭代估计的无线传感器网络三维定位算法性能的影响,选取节点通信半径较小的 $R=25$ 和节点通信半径较大的 $R=35$ 两种情况,并分别在网络锚节点比例较低的 5% 和网络锚节点比例较高的 45% 两种条件下,观察 RSSI 测量误差对算法性能的影响,如图 3 所示。

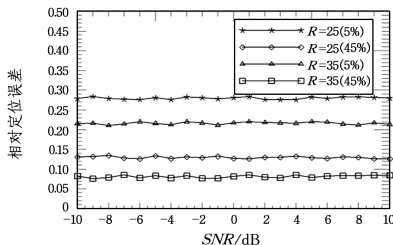


图 3 RSSI 测量误差对算法定位精度的影响

Fig. 3 Effect of RSSI measuring error on location accuracy

观察图 3 发现,当通信半径较小且网络锚节点比例较低时,由于与未知节点连通的锚节点数量较少,此时算法的定位相对误差始终处于较高水平。随着节点通信半径的增加和网络锚节点比例的提高,与未知节点连通的锚节点数量增加,算法的定位精度显著提高。该实验结果与图 1 所示的实验结果相吻合。本文算法虽然需要利用未知节点和锚节点间的 RSSI 测量值估计当前三维空间质心与未知节点间的 RSSI 值,但是无论是实际测量 RSSI 值还是计算所得 RSSI 值,在定位算法过程中对算法性能的影响主要体现在两个方面。1) 算法需要通过 RSSI 值间的大小关系将连通锚节点按与未知节点间的距离进行排序,从而决定迭代处理过程中被当前三维空间质心所替代的节点。RSSI 值的不准确测量会导致锚节点排序出错,当且仅当最小 RSSI 值对应锚节点排序出错时,才会对算法的迭代过程产生影响,而且仅仅影响算法的收敛速度,对算法定位精度的影响较小。2) 算法通过计算当前三维空间质心与未知节点间的 RSSI 值,并将其与算法所设定的迭代终止阈值进行比较,最终确定算法何时迭代终止。因此,不准确的 RSSI 测量会影响算法的迭代次数,较多的迭代次数不会影响算法的定位精度,但是会增加额外的算法复杂度;而较少的迭代次数会对算法的定位精度产生较小的影响。因此,在图 3 中,无论在较少连通锚节点数条件下还是在较多连通锚节点条件下,算法定位精度在不同 SNR 条件下变化较小,证明 RSSI 测量误差对算法定位精度的影响均较小,本文算法具有较好的抗 RSSI 测量误差的能力。

除了较高的节点定位精度和较好的抗 RSSI 测量误差能力,同时要求无线传感器网络节点定位算法具有较好的定位覆盖率。假设在无线传感器网络中未知节点的总数为 K_{all} ,利用节点定位算法可以对其中 K_{known} 个节点进行有效的定位处理,则算法的定位覆盖率为:

$$\text{定位覆盖率} = \frac{K_{known}}{K_{all}} \quad (29)$$

图 4 所示为不同连通锚节点分布条件下本文算法的定位覆盖率。从中可以看出,在较大的节点通信半径或者较大的锚节点比例条件下,由于锚节点在三维空间中的分布较为密集,因此算法的定位覆盖率较好;然而,当节点通信半径较小且锚节点比例较小时,算法的定位覆盖率较差。

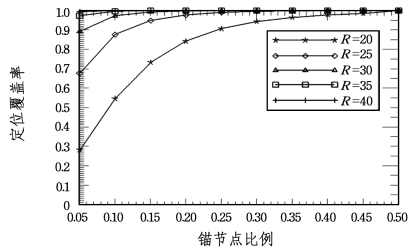


图 4 连通锚节点数对算法定位覆盖率的影响

Fig. 4 Effect of number of anchor nodes on cover rate of localizable nodes

然而,因为本文定位算法具有较好的抗 RSSI 测量误差能力,所以可以将新定位的未知节点等价于具有一定 RSSI 测量误差的新锚节点,从而提高无线传感器网络系统中的锚节点比例,通过多次迭代定位来提高算法的定位覆盖率。根据图 4,算法仅在节点通信半径较小且锚节点比例较小时的

定位覆盖率较差。因此,我们在图5中仅考虑通过多次迭代来提高节点通信半径较小(节点通信半径 $R=20$ 和 $R=25$)且锚节点比例较小(锚节点比例为5%和10%)时算法的定位覆盖率。通过观察发现,大部分情况下,只需要两次迭代定位就可以获得比较理想的算法定位覆盖率,即使在节点通信半径 $R=20$ 且锚节点比例为5%的较差锚节点分布条件下,通过3次迭代定位也可以将算法定位覆盖率提高到90%以上;并且在不同节点通信半径和锚节点分布条件下,本文算法通过4~5次迭代定位后,定位覆盖率均可以达到99%以上,具有极好的实用性。

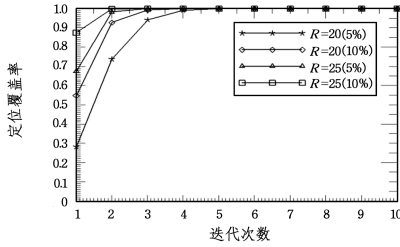
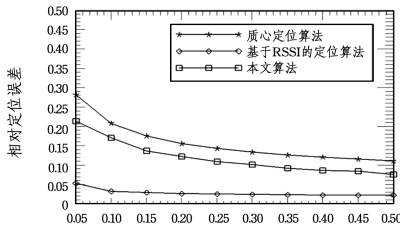


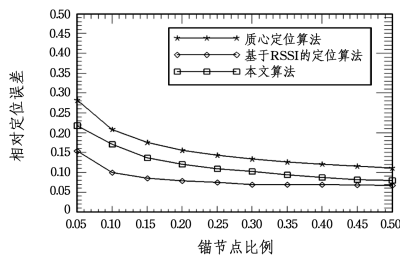
图5 迭代定位次数对算法定位覆盖率的影响

Fig. 5 Effect of iteration number on localization coverage

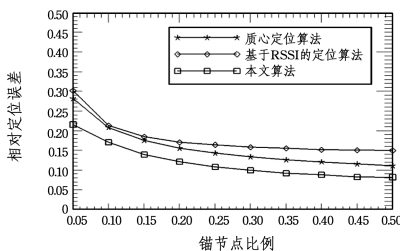
最后,考虑本文算法中需要计算空间质心与未知节点 O 之间的RSSI,并且将空间质心作为新的锚节点参与迭代计算,因此选取基于RSSI的定位算法与质心定位算法来更直观地比较本文算法的定位性能。设定节点通信半径 $R=35$,观察不同SNR条件下3种算法的定位精度变化,如图6所示。



(a) SNR=10 dB



(b) SNR=0 dB



(c) SNR=-10 dB

图6 本文算法与经典算法性能的对比

Fig. 6 Performance of proposed algorithm and its competitors

通过观察图6发现,质心定位算法作为基于非测距的定位算法,其定位性能主要受连通锚节点数量的影响,SNR的变化对于其定位性能完全没有影响。而基于RSSI的定位算法作为基于测距的定位算法,可以在高SNR条件下获得极好的定位精度。但是,随着SNR的下降,其算法性能也急剧恶化。当 $SNR=-10$ dB时,基于RSSI的定位算法的性能甚至不如质心定位算法。本文算法不需要测量连通锚节点与未知节点间的具体距离信息或者角度信息,属于基于非测距的定位算法。因此,本文算法的性能受SNR变化的影响较小,图6所示的仿真结果再一次证明了本文算法具有较好的抗RSSI误差能力。图6(a)中,虽然在 $SNR=10$ dB时的高信噪比条件下,本文算法的性能不如基于RSSI的定位算法,但是随着SNR的下降,当 $SNR=-10$ dB时,本文算法的性能明显优于基于RSSI的定位算法。值得一提的是,由于本文算法采用质心迭代计算的方法估计未知节点的位置信息,而多次的迭代计算可以提高未知节点的定位精度,因此无论在何种SNR条件下,本文算法始终可以表现出优于质心定位算法的性能。

结束语 本文针对基于三维空间的无线传感器网络节点定位问题,借鉴基于质心迭代估计的无线传感器网络二维定位算法的原理,提出了一种通过质心迭代计算的未知节点定位方法。该方法采用迭代计算质心坐标的方式进一步提高了节点的定位精度;通过直接计算未知节点与空间质心节点间的RSSI,避免了定位过程中RSSI和物理距离间的相互转换,大大降低了算法的运算量和节点的定位能耗。蒙特卡洛仿真实验结果表明,本文算法具有较好的定位精度和定位覆盖性,且抗RSSI误差能力强,是一种可实现相对高精度并且低能耗的无线传感器网络三维定位算法。

参考文献

- [1] 刘伟荣,何云. 物联网与无线传感器网络 [M]. 北京:电子工业出版社,2013:140.
- [2] 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络 [M]. 北京:清华大学出版社,2005:135.
- [3] YAGHOUBI F, ABBASFAR A A, MAHAM B. Energy-efficient RSSI-based localization for wireless sensor networks [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(6): 973-976.
- [4] SAHOTA H, KUMAR R. Maximum-likelihood sensor node localization using received signal strength in multimedia with multipath characteristics [J]. IEEE Systems Journal, 2018, 12(1): 506-515.
- [5] ZHANG Y Y, XING S, ZHU Y P, et al. RSS-based localization in WSNs using gaussian mixture model via semidefinite relaxation [J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(6): 1329-1332.
- [6] SAHU P K, WU E H K, SAHOO J. DuRT: Dual RSSI trend based localization for wireless sensor networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(8): 3115-3123.
- [7] YU K, GUO Y J, HEDLEY M. TOA-based distributed localisation with unknown internal delays and clock frequency offsets in wireless sensor networks [J]. IET Signal Processing, 2009, 3(2): 106-118.
- [8] XU E, DING Z, DASGUPTA S. Source localization in wireless

- sensor networks from signal time-of-arrival measurements [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(6): 2887-2897.
- [9] BANDIERA F, COLICIA A, RICCI G, et al. TDOA localization in asynchronous WSNs [C]//12th IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC). Milan:IEEE Computer Society, 2014:193-196.
- [10] SUN D Y, QIAN Z H, HAN M F, et al. Improving multilateration algorithm by cluster analysis in WSN [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(8):1601-1607. (in Chinese)
孙大洋, 钱志鸿, 韩梦飞, 等. 无线传感器网络中多边定位的聚类分析改进算法 [J]. *电子学报*, 2014, 42(8):1601-1607.
- [11] SLAVISA T, MARKO B, RUI D, et al. RSS-Based Localization in Wireless Sensor Networks Using Convex Relaxation: Noncooperative and Cooperative Schemes [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(5):2037-2050.
- [12] NINIPAMA B, JOHN H, DEBORAH F. GPS-less low cost outdoor localization for very small devices [J]. *IEEE Personal Communications*, 2000, 7(5):28-34.
- [13] HADIR A, ZINE D K, BAKHOUYA M, et al. An optimized DV-hop localization algorithm using average hop weighted mean in WSNs [C]//5th Workshop on Codes, Cryptography and Communication Systems (WCCCS). El Jadida: Chouaib Doukkali University, 2014:25-29.
- [14] XIANG J, TAN W W. An improved DV-hop algorithm based on iterative computation for wireless sensor network localization [C]//2013 IEEE International Workshop on Electromagnetics (iWEM). Hongkong: IEEE Press, 2013:171-174.
- [15] ZHOU Y, AO X, XIA S X. An improved APIT node self-localization algorithm in WSN [C]//7th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). Changsha: IEEE Control System Society, 2018:193-196.
- [16] WANG J Z, JIN H X. Improvement on APIT localization algorithms for wireless sensor networks [C]//International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing (NSWCTC). Wuhan: IEEE Computer Society, 2009:719-723.
- [17] DOHERTY L, PISTER K S J, GHAOUI L E. Convex position estimation in wireless sensor networks [C]//Proc of Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Anchorage: IEEE Press, 2001:1655-1663.
- [18] GUADANE M, BCHIMI W, SAMET A, et al. Enhanced range-free localization in wireless sensor networks using a new weighted hop-size estimation technique [C]//IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). Montreal: IEEE Press, 2017:1-5.
- [19] MENG Y H, WEN Y Y, CHEN J, et al. Range-free localization algorithm based on proximity for wireless sensor networks [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(9):1712-1717. (in Chinese)
孟颖辉, 闻英友, 陈剑, 等. 无线传感器网络中基于接近度的无需测距定位算法 [J]. *电子学报*, 2014, 42(9):1712-1717.
- [20] DWIVEDI A, VAMSI P R. Performance analysis of range free localization methods for wireless sensor networks [C]//4th International Conference on Signal Processing, Computing and Control (ISPCC). Heraklion: IEEE Press, 2017:521-526.
- [21] ANTHRAYOSE S, PAYAL A. Comparative analysis of approximate point in triangulation (APIT) and DV-hop algorithms for solving localization problem in wireless sensor networks [C]//IEEE 7th International Advance Computing Conference (IACC). Marina: IEEE Computer Society, 2017:372-378.
- [22] LIANG J L, SHAO J, XU Y, et al. Sensor network localization in constrained 3-D spaces [C]//Proceeding of the IEEE International Conference on Mechatronics and Antomation. Harbin: IEEE Press, 2006:49-54.
- [23] FANG W S, LUO Y Z, HUANG Y. Three-Dimensional DV-Hop location technology for coal mine based on WSNs [C]//IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and Embedded and Ubiquitous Computing (EUC). Guangzhou: IEEE Press, 2017:22-25.
- [24] WANG D. Node self-localization algorithm for 3D wireless sensor networks [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
王丹. 三维无线传感器网络节点自定位算法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [25] LIU Y H, PU J H, HE Y, et al. Three-dimensional self-localization scheme for wireless sensor networks [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2008, 34(6):647-651. (in Chinese)
刘玉恒, 蒲菊华, 赫阳, 等. 无线传感器网络三维自身定位方法 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2008, 34(6):647-651.
- [26] TANG L R, GONG Y, LUO Y T, et al. A 3D position algorithm based on euclidean for wireless sensor networks [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(4):821-825. (in Chinese)
唐良瑞, 宫月, 罗艺婷, 等. 一种基于 Euclidean 的无线传感器网络三维定位算法 [J]. *电子学报*, 2012, 40(4):821-825.
- [27] JIANG R, YANG Z. An improved centroid localization algorithm based on iterative computation for wireless sensor network [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(3):030101. 1-030101. 9. (in Chinese)
蒋锐, 杨震. 基于质心迭代估计的无线传感器网络节点定位算法 [J]. *物理学报*, 2016, 65(3):030101. 1-030101. 9.
- [28] MADDUMABANDARA A, LEUNG H, LIU M. Experimental evaluation of indoor localization using wireless sensor networks [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(9):5228-5237.