

# 基于局部保持典型相关分析的无线传感器网络三维定位算法

崔鸿飞 刘佳 顾晶晶 庄毅

(南京航空航天大学计算机科学与技术学院 南京 210016)

**摘要** 针对目前无线传感器网络三维空间定位算法精度不高、稳定性差等问题,在基于局部保持典型相关分析LPCCA模型的基础上构造三维定位算法3D-LE-LPCCA。首先,将LPCCA模型扩展到三维空间并建立信号空间和物理空间的映射模型,通过求解映射模型得到未知节点在物理空间上的临近节点集;其次,采用共面度阈值和体积比阈值的约束在临近节点集上计算出最佳定位单元;最后,采用最佳定位单元计算未知节点的坐标。仿真实验表明,该算法具有良好的定位效果,有效地提高了三维定位算法的精度和稳定性,降低了节点能耗。

**关键词** 无线传感器网络,局部保持典型相关分析,三维定位算法,共面度,体积比

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.09.021

## 3D Localization Estimation Algorithm Based on Locality Preserving Canonical Correlation Analysis in Wireless Sensor Networks

CUI Hong-fei LIU Jia GU Jing-jing ZHUANG Yi

(College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract** Since existing three dimensional localization algorithms have the drawbacks of low positioning accuracy and poor stability, 3D-LE-LPCCA algorithm was put forward. Firstly, locality preserving canonical correlation analysis is extended to three dimensional space and a mapping model between signal space and physical coordinate space is built. After solving the model, the adjacent node which is of unknown nodes in physical coordinate space is obtained. Secondly, our algorithm calculates the best positioning unit in the adjacent node set in constrains of degree of coplanar and volume ratio. Finally, the coordinate of the unknown node is calculated through the best positioning unit. The simulation results show that 3D-LE-LPCCA algorithm has a good localization effect and improves the accuracy and stability of the three-dimensional localization algorithm, and reduces the energy consumption of the node.

**Keywords** Wireless sensor networks, Locality preserving canonical correlation analysis, Three dimensional localization algorithms, Degree of coplanar, Volume ratio

## 1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)是继因特网之后对人类产生重要影响的一项IT技术。其中,节点定位技术是WSN的关键技术之一,目前已被广泛应用于军事、环境监测、目标跟踪、灾难救援、空间探测、智能交通控制等领域。对于一个大型的网络结构,传感器节点通常利用全球定位系统(Global Positioning System, GPS)来获取自身的位置。但是如果为每个传感器节点都配备一个GPS接收器,则会造成能量消耗过快、节点体积过大、运转成本过高等问题。近年来,很多WSN节点定位算法相继被提出,根据定位手段主要分为基于测距(Range-based)的算法和基于非测距(Range-free)的算法。基于测距的算法主要是通过对节点之

间的距离或者方位的测量进行定位,该类算法能耗和通信开销较大,但精度相对较高。基于非测距的算法主要是利用节点之间的估计距离进行定位,这类算法对硬件要求较高,在实际应用环境中,目标定位大都是基于三维空间的。然而,由于定位环境复杂多变,现有的定位算法往往存在定位精度不高、锚节点能耗过大等问题<sup>[1-2]</sup>,因此对三维空间节点定位算法的研究具有重要的意义。

本文针对目前WSN三维空间定位算法精度不高、能耗过大和稳定性差等问题,在基于局部保持典型相关分析(Locality Preserving Canonical Correlation Analysis, LPCCA)模型的基础上构造三维定位算法(3D Localization Estimation Algorithm Based on LPCCA, 3D-LE-LPCCA)。首先,将LPCCA模型扩展到三维空间建立信号空间和物理空间的映

到稿日期:2016-08-26 返修日期:2016-12-18 本文受国家自然科学基金面上项目(61572253),国家自然科学基金青年科学基金项目(61202351),国家博士后基金项目(2011M500124)资助。

崔鸿飞(1990—),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail: cuihongfei\_nuaa@163.com;刘佳(1980—),女,博士,讲师,主要研究方向为密码学与信息安全,E-mail: liujia@nuaa.edu.cn;顾晶晶(1983—),女,博士,副教授,主要研究方向为无线传感器网络定位、模式识别,E-mail: gujingjing@nuaa.edu.cn;庄毅(1956—),女,教授,主要研究方向为无线传感网络、网络安全与分布计算,E-mail: zy16@nuaa.edu.cn。

射模型,并通过求解映射模型得到未知节点在物理空间上的临近节点集;其次,采用共面度和体积比阈值的约束在临近节点集上计算出最佳定位单元;最后,采用最佳定位单元计算未知节点的坐标。该算法在三维定位中引入了LPCCA的思想,避免了大量的RSSI测距计算,能够完成WSN未知节点的快速定位,具有稳定性好、效益高的优点。

## 2 相关研究

在无线传感器网络中硬件及能量的限制下,RSSI方法虽然能够方便地进行节点定位,但由于信道的信号干扰和衰减等因素的影响,RSSI方法很难测得节点的真实坐标。为了解决现有的RSSI定位算法精度较低的问题,北京邮电大学的Zhao Fang等人提出了一种基于梯度的RSSI无线接入点定位算法<sup>[3]</sup>,在该算法中节点根据接收到的局部信号强度估算接入点的方向,用聚类方法筛选并过滤异常值,最后采用三角测量法计算无线接入点的坐标。为了进一步提高定位精度,加拿大蒙特利尔大学的Pratap Kumar Sahu等人提出了一种基于RSSI的定位算法<sup>[4]</sup>,该算法根据接收到的锚节点的信号强度值的变化趋势对节点的坐标进行估算。文献<sup>[5]</sup>提出了一种基于RSSI的概率分布网格定位算法,该算法将定位区域分割成网格,再通过对比方格中的RSSI概率似然函数值得到未知节点的坐标,降低了RSSI信号值的波动对节点定位精度的影响。为了克服RSSI测得信号值的不确定性,文献<sup>[6]</sup>提出了一种基于映射的RSSI定位方法,并用RSSI元组匹配算法决定定位结果,提高了定位的准确性。虽然上述基于RSSI的定位算法的定位精度较其他定位算法高,但是该类算法对硬件要求较高,能耗较大,且不容易部署。

在基于RSSI的定位技术中,传感器节点通过接收其他节点的信号强度来获取自身的位置信息。通常情况下,WSN中任意相邻的两个节点接收到同一个信标节点发射来的信号强度也是相似的,这种隐含的网络结构使信号空间和物理空间近似符合流形结构<sup>[7]</sup>。因此,可以建立一个信号空间到物理空间的非线性映射来刻画基于RSSI的定位问题,且建立该映射关系是定位算法的首要任务。LPCCA作为构造两个数据集之间映射的方法,将局部保持的思想引入典型相关分析(Canonical Correlation Analysis,CCA),以临近样本之间的相关性的最大化代替传统的CCA中成对样本之间的相关最大化,能够同时有效处理两组分别具有流形结构的数据。文献<sup>[8]</sup>借助LPCCA进行建模,建立了信号空间到现实物理空间的映射,提出了一种能够体现网络拓扑结构信息的WSN定位算法——LE-LPCCA,该算法仅针对二维空间。考虑到LPCCA可通过每个节点邻域内的典型相关关系将全局非线性问题转化为多个局部线性问题,可以显著提高节点定位的精度和稳定性,因此本文将LPCCA扩展到三维空间。另一方面,考虑到网络空间中未知节点周围可能出现信号强度与距离不相符的异常节点,在LPCCA模型构造中引入跳距矩阵,进一步融入网络的拓扑结构信息,提高了定位精度和稳定性。

## 3 3D-LE-LPCCA模型和算法

本文提出的3D-LE-LPCCA定位算法分为3个阶段:构

建映射模型、求解最佳定位单元和三维空间定位方法。该算法是在LPCCA模型的基础上提出的。阶段一,将LPCCA模型扩展到三维空间建立信号空间和物理空间的映射模型,通过对未知节点接收到的信号进行线性变换来找到未知节点在物理空间的临近节点集;阶段二,在临近节点集的基础上通过共面度和体积比两个阈值的约束计算出最佳定位单元;阶段三,利用最佳定位单元计算未知节点的坐标。3D-LE-LPCCA定位算法在求解最佳定位单元的过程中避免了大量的RSSI测距计算,减少了数据包的转发和接收,节约了网络节点的定位时间和能耗,并且保证了信标节点到每个待定位的未知节点的距离足够小,提高了定位精度。

### 3.1 映射模型

临近节点集是指在一定范围内与一个未知节点临近的信标节点的集合。在三维空间中,未知节点的位置是通过接收其临近的信标节点发射的信标信息计算得到的。通常未知节点在接收到周围信标节点发射的信息之后,通过RSSI测距法计算节点之间的距离或者通过DV算法计算跳距(Hop Distance),再根据计算得到的距离或者跳距寻找用于定位自身坐标的定位单元。在基于LPCCA的方法中,通过构建信号空间到物理空间的映射模型,只需根据未知节点接收到的信号强度即可找到物理空间中用于定位自身坐标的定位单元,可大幅度降低计算代价。

**定义1** 三维空间中两个节点之间的跳距是指从一个节点到另一个节点的跳数。

本文将LPCCA算法扩展到三维空间,首先计算网络空间的跳距矩阵 $T$ 、信号空间的相似度矩阵 $L_S$ 和物理空间的相似度矩阵 $L_C$ ,其矩阵元素的计算表达式如式(1)~式(3)所示:

$$T_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{t_{ij}}, & \text{若 } i, j \text{ 节点之间连通} \\ 0, & \text{若 } i, j \text{ 节点之间不连通} \end{cases} \quad (1)$$

$$L_{S(ij)} = \begin{cases} \exp(-\|s_i - s_j\| \cdot t_{ij}/r_s), & i, j \text{ 节点之间连通} \\ 0, & i, j \text{ 节点之间不连通} \end{cases} \quad (2)$$

$$L_{C(ij)} = \begin{cases} \exp(-\|c_i - c_j\| \cdot t_{ij}/r_c), & i, j \text{ 节点之间连通} \\ 0, & i, j \text{ 节点之间不连通} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $s_i$ 和 $c_i$ 分别表示节点 $i$ 的信号强度和物理坐标, $S$ 和 $C$ 分别是信号强度矩阵和物理坐标矩阵, $t_{ij}$ 为 $i$ 和 $j$ 之间的跳距, $r_s$ 和 $r_c$ 一般为均方距离 $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \|s_i - s_j\| / n(n-1)$ 和 $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \|c_i - c_j\| / n(n-1)$ 。

在上述基础上构造信号空间到物理空间的映射关系,将网络中的跳距矩阵 $T$ 引入LPCCA模型中,可描述为式(4)所示的优化问题:

$$\begin{aligned} & \max_{w, u} w^T S T L_{SC} C^T u \\ & \text{s. t. } w^T S L_{SS} S^T w = 1 \\ & \quad u^T C L_{CC} C^T u = 1 \\ & \quad T \neq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $L_{SC}$ 是信号空间到物理坐标空间的相似度矩阵, $L_{SS}$ 是信号空间的相似度矩阵, $L_{CC}$ 是物理坐标空间的相似度矩阵,

$w$  和  $u$  分别是信号空间和物理空间的映射矩阵。通过求解式(4)所示的优化问题可以得到  $w$  和  $u$ 。对于任一未知节点  $k$ , 其接收到的信号向量为  $g$ , 利用  $w$  对  $g$  作线性变换得到变换后的线性空间  $P_g = wg$ 。在  $P_g$  中找到  $k$  的临近节点集, 即未知节点  $k$  接收到信号强度最强的  $m$  个信号组成的集合, 其对应的物理坐标即为物理空间中  $k$  的临近节点集  $ne(k)$ 。

### 3.2 最佳定位单元

**定义 2** 共面度是三维空间中 4 个点的共面程度, 可由式(5)<sup>[9]</sup> 计算得到。

$$DCP = \frac{216v^2}{\sum_{i=0}^3 s_i \sqrt{(a+b+c)(a+b-c)(a+c-b)(b+c-a)}} \quad (5)$$

其中,  $v$  为四面体的体积,  $s_i$  为四面体 4 个面的面积,  $a, b, c$  分别为四面体 3 组对棱长度的乘积。当  $DCP$  值为 0 时, 四面体的 4 个顶点共面; 当值为 1 时, 四面体为正四面体。

**定义 3** 最佳定位单元是空间中能够定位一个未知节点的 4 个信标节点的最佳组合, 满足  $DCP \neq 0$  且  $VRT = 1$ 。即, 4 个信标节点组成的四面体的共面度不为 0 且体积比为 1。

定义 3 中  $VRT$  为四面体的体积比, 其计算公式如式(6)<sup>[10]</sup> 所示。

$$VRT = \frac{V_{kABC} + V_{kACD} + V_{kABD} + V_{kBCD}}{V_{ABCD}} \quad (6)$$

其中,  $A, B, C, D$  为信标节点;  $k$  为未知节点;  $V_{ABCD}, V_{kABC}, V_{kACD}, V_{kABD}, V_{kBCD}$  分别为四面体  $ABCD, kABC, kACD, kBCD$  的体积。可以看出, 当  $VRT$  的值为 1 时, 未知节点  $k$  位于四面体  $ABCD$  内部。

本文基于未知节点的临近节点集对最佳定位单元进行求解, 如图 1 所示的临近节点求解中,  $A, B, C$  是 3 个信标节点,  $k$  和  $k_1$  是任意两个未知节点。设  $\epsilon_1$  为设定的一个较小的共面度阈值, 则  $\|DCP_{ABCk} - DCP_{ABCk_1}\| \leq \epsilon_1$  表示在三维空间中四面体  $ABCk$  和四面体  $ABCk_1$  的形状足够接近。设  $\epsilon_2$  为设定的一个较小的跳距阈值, 则  $t_{kk_1} \leq \epsilon_2$  表示节点  $k$  和  $k_1$  在三维空间中距离相近。若未知节点  $k$  和  $k_1$  同时满足  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$  两个阈值约束, 则称  $k_2$  是  $k$  的临近节点, 即  $k_1 \in ne(k)$ 。  $k$  的所有临近节点组成其临近节点集  $ne(k)$ 。

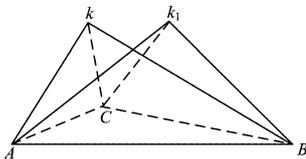


图 1 求解临近节点

得到  $ne(k)$  之后, 采用逐层加深的深度优先算法求解最佳定位单元, 其流程如算法 1 所示。

#### 算法 1 最佳定位单元算法

1. DFS( $ne(k)$ )

2.  $P = \emptyset$ ; // 用于定位的节点集合

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2(x_1 - x_4) & 2(y_1 - y_4) & 2(z_1 - z_4) \\ 2(x_2 - x_4) & 2(y_2 - y_4) & 2(z_2 - z_4) \\ 2(x_3 - x_4) & 2(y_3 - y_4) & 2(z_3 - z_4) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x_1^2 - x_4^2 + y_1^2 - y_4^2 + z_1^2 - z_4^2 + d_1^2 - d_4^2 \\ x_2^2 - x_4^2 + y_2^2 - y_4^2 + z_2^2 - z_4^2 + d_2^2 - d_4^2 \\ x_3^2 - x_4^2 + y_3^2 - y_4^2 + z_3^2 - z_4^2 + d_3^2 - d_4^2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

3. for each  $i \in ne(k)$

4. status[ $i$ ] = white; // 每个信标节点初始化为白色标记

5. depth = 0;

6. max = sum(E)/2; // 初始化搜索深度

7. DFS-Visit( $i, depth, max$ )

8. break;

9. for each  $j \in ne(i)$

10. if (status[ $j$ ] = white &&  $t_{ij} = 1$ )

11.  $P = P \cup j$

12. count++; // P 中节点数增加 1

13.  $j, prev = i$ ;

14. DFS-Visit( $j, depth+1, max$ )

15. status[ $i$ ] = black

16. if count(P) = 4 // P 中不少于 4 个节点

17. judge ( $DCP \neq 0 \& \& VRT = 1$ )

18. return P

19. 若 1 跳内没有找到最佳定位单元, 则跳距加 1 并继续搜索, 直到返回最佳定位单元

首先以节点  $k$  为起点, 深度搜索  $ne(k)$  中距离节点  $k$  跳距为 1 的节点, 若在这些节点中能够找到 4 个信标节点构成共面度不为零且体积比为 1 的节点组合, 则该组合即为最佳定位单元; 若没有满足条件的信标节点组合, 则以两跳为搜索半径继续遍历, 直到找出最佳定位单元。为了防止深度优先遍历的单条路径过长而陷入性能瓶颈, 限制了每次搜索的路径长度, 若在一定长度内不能找到满足条件的节点, 则增加限定的搜索路径长度以进一步深度优先搜索。

算法 1 中,  $E$  表示  $ne(k)$  构成的图的节点数; white 表示未被访问过的节点; black 表示该节点的所有邻接点都被访问过, 即回溯完毕的第二次访问。步骤 7 和步骤 8 表示在限定的深度  $max$  之内仍然没有回溯时, 搜索失败, 重新选择起点开始搜索; 步骤 9—步骤 13 表示对于  $i$  的每个邻接点  $j$ , 如果没有被访问过, 则循环调用搜索函数从  $j$  开始搜索, 并通过  $prev$  属性记录  $j$  的前继节点, 最终通过前继节点构建定位单元; 步骤 15 表示当  $i$  的所有后继节点被访问完成之后,  $i$  被标记为 black; 步骤 16—步骤 18 表示 1 跳以内搜索完毕, 若找到最佳定位单元则返回  $P$ 。

### 3.3 三维定位方法

通过映射模型得到最佳定位单元之后, 即可根据多边测量法估算未知节点的坐标。

如图 2 所示: 通过映射模型可得到 4 个信标节点  $A, B, C, D$  组成的最佳定位单元, 其坐标分别为  $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3), (x_4, y_4, z_4)$ , 未知节点  $k$  的坐标为  $(x, y, z)$ 。通过 RSSI 测距算法得到 4 个信标节点与未知节点  $k$  的距离分别为  $d_1, d_2, d_3$  和  $d_4$ , 由此可得式(7)所示的方程组:

$$d_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (7)$$

求解方程组(7)可得未知节点  $k$  的坐标为:

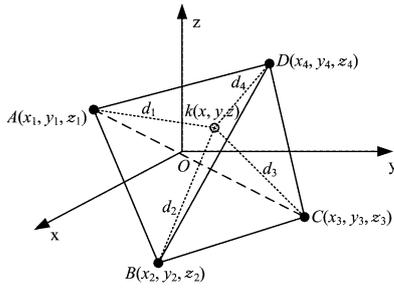


图2 三维定位示意图

### 3.4 3D-LE-LPCCA 算法的设计

3D-LE-LPCCA 算法分为 3 个阶段,具体流程包括以下 6 个步骤。

第一阶段:

Step1 所有信标节点广播自身的位置信息,每个未知节点在其通信半径范围内接收信标节点的广播信息,得到信标节点的物理坐标矩阵  $C=[c_1, c_2, \dots, c_N] \in R^{n \times N}$  以及信号向量  $s_g=(s_{1g}, s_{2g}, \dots, s_{mg})^T$ ;

Step2 根据网络结构,构建信号空间和物理空间的相似度矩阵  $L_S$  和  $L_C$ ;

Step3 在相似度矩阵的基础上构建映射模型,求解优化问题(4);

Step4 用  $w^T$  对未知节点  $k$  所接收到的信号向量  $s_g=(s_{1g}, s_{2g}, \dots, s_{mg})^T$  作线性变换,得到  $P_g^S=w^T s_g$ ,在  $P_g$  中找到  $k$  的临近节点集以及对应的物理空间中的节点集  $ne(k)$ 。

第二阶段:

Step5 在临近节点集  $ne(k)$  中根据算法 1 计算最佳定位单元。

第三阶段:

Step6 在最佳定位单元中通过三维定位算法计算未知节点的坐标,直到所有未知节点完成定位。

算法 2 给出了 3D-LE-LPCCA 算法的伪代码。

**算法 2** 3D-LE-LPCCA 算法

Input:  $C, g, s_g$

Output:  $k(x, y, z)$

1.  $C \leftarrow \emptyset, s_g \leftarrow \emptyset$ ;
2. each beacon node broadcast its beacon information; // 锚节点广播信息
3. for each unknown node  $k$  with signal vector  $g$   
 $C \leftarrow [c_1, c_2, \dots, c_N], s_g \leftarrow (s_{1g}, s_{2g}, \dots, s_{mg})^T$ ; // 坐标矩阵和信号向量
4. calculate  $T, L_S$  and  $L_C$ ; // 计算相似度矩阵
5. linear transform  $P_g^S = w^T s_g$ ; // 对信号向量进行线性空间变换
6.  $ne(k) \leftarrow \{P_g^S = w^T s_g\}$ ; // 从变换后的线性空间中得到对应物理空间中的临近节点集
7. count++; // 临近节点集中节点数加 1
8. if count  $\geq m$
9. Algorithm1( $ne(k)$ ) // 算法 1 计算最佳定位单元
10. return  $P$  // 在指定跳距内能计算出最佳定位单元
11. else t++; // 跳距加 1, 继续搜索节点
12.  $k(x, y, z) \leftarrow P$  // 执行三维定位算法来计算未知节点坐标
13. return  $k(x, y, z)$  // 返回未知节点坐标
14. until all unknown nodes are positioned

### 3.5 3D-LE-LPCCA 算法的复杂性分析

在基于 RSSI 无线传感器网络的定位算法中,运算代价主要在于 RSSI 距离的计算。RSSI 测距算法是通过信号转换模型将节点之间的信号距离转换成实际距离,过多的 RSSI 计算不仅能耗大,定位精度也无法保障。

设信标节点数目为  $N$ ,未知节点数目为  $n$ , $m$  是选取的信号个数即临近节点集中信标节点的个数。RSSI 距离计算的复杂度记为  $O_{RSSI}$ ,三边测量法的计算坐标复杂度为  $O_{TRI}$ ,共面度的计算复杂度为  $O_{DCP}$ ,体积比的计算复杂度为  $O_{VRT}$ ,则一般的基于 RSSI 测距的多边测量法的复杂度为:

$$O(RSSI) = n(N \cdot O_{RSSI} + O_{TRI}) \quad (9)$$

3D-LE-LPCCA 的算法复杂度为:

$$O(3D-LE-LPCCA) = n(m \cdot O_{RSSI} + O_{DCP} + O_{VRT} + O_{TRI}) \quad (10)$$

其中,  $O_{DCP}$  和  $O_{VRT}$  最终也归结为四面体各节点之间 RSSI 距离的计算。由式(5)和式(6)可以估算出  $O_{DCP} \approx 6O_{RSSI}$ ,  $O_{VRT} \approx 10O_{RSSI}$ ,因此式(10)又可表示为:

$$O(3D-LE-LPCCA) = n((m+16) \cdot O_{RSSI} + O_{TRI}) \quad (11)$$

在一般网络中, $m$  的取值直接影响算法的精度和复杂性。本文在仿真实验中对  $m$  的值进行了测试,当  $m$  取值越大时,临近节点越多,定位越准确;当  $m$  取到 8 以上时,平均误差变化相当小,趋于稳定。因此,在一般规模的网络中,式(11)的复杂性与式(9)的复杂度相当;而在节点较多的大型网络中, $m \ll N$ ,式(11)的复杂度小于式(9)的复杂度。因此,相比于一般的基于 RSSI 测距的多边测量法,3D-LE-LPCCA 算法虽然增加了计算量,但该算法的复杂度并未增加。

## 4 实验和分析

### 4.1 参数选取

本文用 Matlab2013a 软件进行仿真实验,网络区域设置在  $100m \times 100m \times 100m$  的三维空间中,未知节点数目为 150,节点通信半径为  $30 \sim 50m$ ,节点跳距为  $1 \sim 6$ 。为了减小实验误差,所有实验均重复 50 次,结果取平均值。

本算法的定位效果通过以下两个定位指标反映:定位误差率(Localization Error Ratio, LER)和定位覆盖率(Localization Coverage Ratio, LCR)。其中,LER 为未知节点定位误差的平均值与通信半径的比值,反映定位的精度;LCR 为定位结束后能够成功定位的未知节点数占所有未知节点总数的比例,反映定位的稳定性。以上两个指标分别由式(12)<sup>[11]</sup>和式(13)<sup>[11]</sup>计算得到:

$$LER = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - x_i')^2 + (y_i - y_i')^2}}{n \times R} \quad (12)$$

$$LCR = \frac{n_{localized}}{n} \quad (13)$$

其中,  $(x_i, y_i)$  是未知节点的实际位置,  $(x_i', y_i')$  是未知节点的估算位置,  $n$  为未知节点的总数,  $n_{localized}$  为成功定位的未知节点数。

在最佳定位单元的求解中,用到了共面度和跳距两个阈值进行约束求解,在此分别测试了这两个参数对定位误差率的影响。

图 3(a)是 DCP 对定位误差率的影响。当 DCP 的值越接近于 1 时,定位单元的形状越趋近于正四面体,求解未知节点的坐标越精确,因此定位误差率越小。当 DCP 的值大于 0.8 时,定位误差率低于 15%,达到了较好的定位效果,因此本文在最佳定位单元的求解中,共面度的约束阈值取 0.8。

图 3(b)是跳距对定位误差的影响。当跳距增大时,网络节点之间的连通度随之增大,未知节点的临近节点集中信标节点数量增多,未知节点接收到的用于定位的信标信息增多,因此定位误差率减小。当跳距大于或等于 4 时,定位误差率都不超过 15%,达到了较好的定位效果,因此在最佳定位单元的求解中,采用 4 作为跳距的约束阈值。

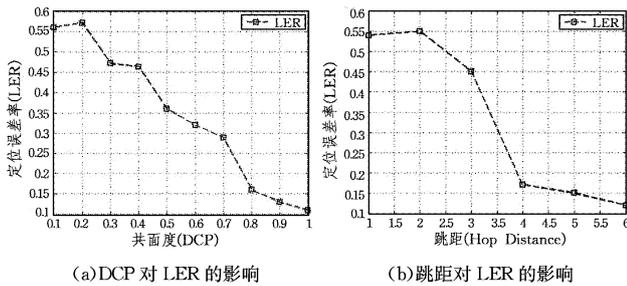


图 3

在 3D-LE-LPCCA 算法中,计算  $ne(k)$  时若  $m$  取值过大则会导致能耗增加,若  $m$  取值过小则不能保证定位的精度。为此,本文对  $m$  的取值进行了测试,图 4 示出了当  $m$  取不同的值时定位误差率的变化,当  $m$  取到 8 以上时,平均误差率的变化趋于稳定,因此 3D-LE-LPCCA 算法中  $m$  的取值为 8。

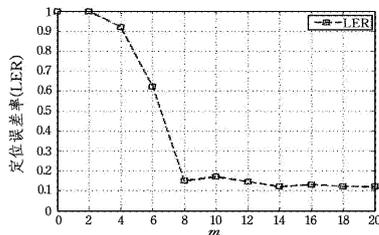


图 4 m 的取值对 LER 的影响

### 4.2 仿真实验与结果分析

为了检验 3D-LE-LPCCA 算法的整体性能,对该算法进行了仿真实验,并将其与现有的基于测距算法中的 3D-IDCP (An Improved 3D Localization Algorithm based on Degree of Coplanarity)<sup>[11]</sup>算法、基于迭代的无线传感器网络三维定位算法 (Iterative-Based Localization Algorithm for Wireless Sensor Network in Three-Dimensional Space)<sup>[12]</sup>算法和三维空间定位中最小二乘估计 (3D Least Square) 算法进行对比。3D-IDCP 算法是通过引入共面度的思想来消除定位单元的定位误差,ILAH-3D 算法采用加权最小二乘以及约束协作算法以提高定位精度,最小二乘估计是在三边测量法的基础上进行数据处理而得到的。

图 5 示出了在通信半径为 30m 时随机布置 150 个未知节点和 10 个信标节点情况下 3D-LE-LPCCA 的定位效果图,其中三角形表示信标节点,圆形表示未知节点,星形表示成功定位的节点,圆形中带有星形表示该未知节点被成功定位。此时有 143 个节点能够被成功定位,定位覆盖率达 95.3%。此外,有个别节点计算出的位置与实际位置存在一定的偏差,这

是由于节点随机分布于网络区域中,节点的拓扑结构对算法的精度存在一定的影响。

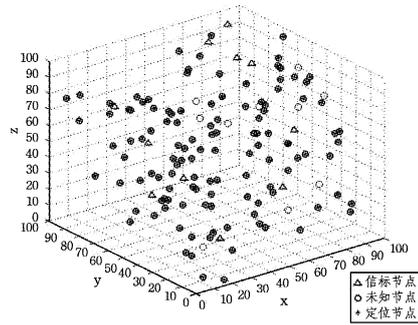


图 5 3D-LE-LPCCA 算法定位效果图

图 6 示出了当通信半径为 30m 时,信标节点的数目对 3D-LE-LPCCA, 3D-IDCP, ILAH-3D 和最小二乘法的定位误差率的影响。由于未知节点定位过程中需要邻居节点提供信标信息,因此信标节点数目越多,算法的精度越高。可以看出,当信标节点的个数相同时,4 种算法的优劣性基本保持一致,这说明信标节点数目对定位精度都有提高的作用,而本文提出的 3D-LE-LPCCA 算法的定位精度明显优于其他 3 种算法,相比于其他 3 种算法,其平均定位误差率分别提高了 14.7%, 31.1% 和 40.1%。

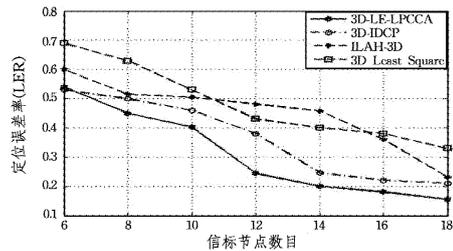


图 6 定位误差率随信标节点个数的变化情况

图 7 示出了 3D-LE-LPCCA, 3D-IDCP, ILAH-3D 和最小二乘法的定位覆盖率的对比情况。可以看出,随着信标节点个数的增加,4 种算法的定位覆盖率都逐渐增加,3D-LE-LPCCA 算法的定位结果显示出较大优势。当信标节点个数大于 12 时,3D-LE-LPCCA 算法的定位覆盖率达到 98% 以上,并且随着信标节点数目的增多,定位结果更加稳定。

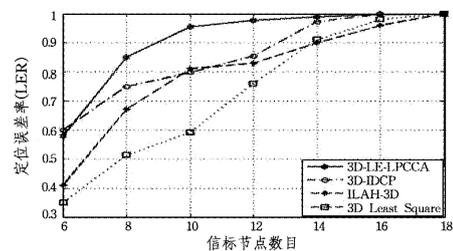


图 7 定位覆盖率随信标节点个数的变化情况

网络中的传感器节点主要有发送数据包、接收数据包、空闲和睡眠 4 种状态,而发送和接收数据包是节点能量消耗的主要状态。数据包的平均能耗是指传感器节点转发每个数据包所消耗的总的网络消耗,是传感器网络生存周期的一个重要评价指标。由于现有的传感器网络节点能量测量方法难以满足长时间、细粒度以及高精度的测量需求,本文通过 NS-2

(12):1855-1859. (in Chinese)

马占飞,杨树英,郭广丰.一种快速的基于BM模式匹配的改进算法[J].控制与决策,2013,28(12):1855-1859.

[14] CHO S, NA J C, PARK K, et al. A fast algorithm for order-preserving pattern matching[J]. Information Processing Letters, 2015, 115(2):397-402.

[15] NSIRA N B, LECROQ T, ELLOUMI M. A fast Boyer-Moore type pattern matching algorithm for highly similar sequences [J]. International Journal of Data Mining and Bioinformatics, 2015, 13(3):266-288.

[16] ZHANG H L, XU D L, LIANG M, et al. Massive string efficient matching method research[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(6):1220-1224. (in Chinese)

张宏莉,徐东亮,梁敏,等.海量模式高效匹配方法研究[J].电子学报,2014,42(6):1220-1224.

[17] BOYER R S, MOORE J S. A fast string searching algorithm [J]. Communications of the ACM, 1977, 20(10):762-772.

[18] LI X B, LIU B X, XU R S. Research of string matching techniques[J]. Computer Engineering, 2004, 30(22):24-26. (in Chinese)

李雪宝,刘宝旭,许榕生.字符串匹配技术研究[J].计算机工程,2004,30(22):24-26.

[19] LIU G S, WANG Y C, XU H Q. A single pattern matching algorithm based on character frequency[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(12A):2079-2082. (in Chinese)

刘功申,王永成,许欢庆.基于字频的单模式匹配算法[J].电子学报,2002,30(12A):2079-2082.

[20] AHMED M, MAHMOOD A N, HU J K. A survey of network anomaly detection techniques[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2016, 60:19-31.

(上接第109页)

平台对3D-LE-LPCCA算法的节点能耗进行了仿真实验,并与基于RSSI测距的多边测量法进行了对比。

在相同的网络参数下,节点数目为20~240的不同网络规模中,上述两种算法的数据包平均能耗如图8所示。可以看出,3D-LE-LPCCA算法的数据包平均能耗明显低于一般的基于RSSI测距的多边测量算法的能耗。这是由于3D-LE-LPCCA算法在临近节点集的求解中采用跳距约束,若一个数据包经过4次转发仍未到达未知节点,则该消息不再转发,即信标节点只转发跳距约束以内的数据包。因此,网络中转发和接收的数据包减少,节点平均能耗也相应降低。

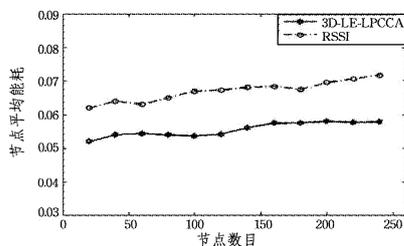


图8 不同节点数目下两种定位算法的平均能耗数据对比

综上所述,本文提出的3D-LE-LPCCA定位算法在定位误差率、定位覆盖率上均优于3D-IDCP、ILAH-3D和最小二乘定位法。相比于一般的基于RSSI测距的定位算法,3D-LE-LPCCA算法的平均节点能耗较小。实验结果表明,3D-LE-LPCCA定位算法能提高三维空间定位算法的定位精度和稳定性,降低节点能耗。

**结束语** 本文在LPCCA模型的基础上构造三维定位算法3D-LE-LPCCA,该算法具有定位精度高、稳定性好以及能耗小的优点。由于现实定位环境错综复杂,难免有障碍物对节点定位产生影响,因此对复杂环境下的三维定位算法的研究将是下一步研究的重点。

## 参考文献

[1] HAN G, XU H, DUONG T, et al. Localization Algorithms of Wireless Sensor Networks; a survey [J]. Telecommunication Systems, 2013, 52(4):2419-2436.

[2] KHELIFI M, MOUSSAOUI S, SILMI S, et al. Localisation Algorithms for wireless sensor networks; a review [J]. International

Journal of Sensor Networks, 2015, 19(2):114-129.

[3] ZHAO F, LUO H, GENG H, et al. An RSSI Gradient-based AP Localization Algorithm [J]. China Communications, 2014, 11(2):100-108.

[4] 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.

[5] WANG S, LI Y. Node Localization Algorithm Based on RSSI in Wireless Sensor Network [C] // 2012 6th International Conference on Proceedings of the Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS). IEEE, 2012.

[6] LUO Q, PENG Y, LI J, et al. RSSI-Based Localization Through Uncertain Data Mapping for Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(9):3155-3162.

[7] BISHOP E. Differentiable Manifolds in Complex Euclidean space [M] // Selected Papers of Errett Bishop, 1986:363-383.

[8] GU J J, CHEN S C, ZHUANG Y. Localization in Wireless Sensor Network Using Locality Preserving Canonical Correlation Analysis [J]. Journal of Software, 2010, 21(11):2883-2891. (in Chinese)

顾晶晶,陈松灿,庄毅.用局部保持典型相关分析定位无线传感器网络节点[J].软件学报,2010,21(11):2883-2891.

[9] MAO K J, ZHAO X M, SHAO B, et al. Three Dimensional Localization Algorithm Based on Degree of Coplanarity for Wireless Sensor Networks [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(10):1484-1488. (in Chinese)

毛科技,赵小敏,邵奔,等.无线传感器网络中基于共面度的三维定位算法研究与设计[J].传感技术学报,2011,24(10):1484-1488.

[10] SONG G, TAM D, LIAO D, et al. 3D Localization Algorithm for Wireless Sensor Networks Based on DCP and VRT [M] // Embedded System Technology. Springer:58-67.

[11] XU Y, ZHUANG Y, GU J. An improved 3d localization algorithm for the wireless sensor network [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2015, 2015(98).

[12] QI R B, LI S J, MA T Y, et al. Iteration-Based Localization Algorithm for Wireless Sensor Network in Three-Dimensional Space [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(5):644-650. (in Chinese)

祁荣宾,李思瑾,马天义,等.基于迭代的无线传感器网络三维定位算法[J].传感技术学报,2012,25(5):644-650.