

传感器网络节点间距离估计方法^{*}

李凯⁺, 汪芸

(东南大学 计算机科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

Similarity Based Ranging Method in Wireless Sensor Networks

LI Kai⁺, WANG Yun

(School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

+ Corresponding author: E-mail: newlikai@seu.edu.cn

Li K, Wang Y. Similarity based ranging method in wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2009,20(Suppl.):95-103. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/09012.htm>

Abstract: Sensor localization is used by many position dependent applications in the wireless sensor network (WSN), where ranging from sensor nodes to beacon nodes plays a fundamental role. Most state-in-the-art ranging methods rely on many assumptions of deployment and measurement. However, these assumptions do not hold in practice. Therefore, the present methods introduce such great ranging errors that they are not feasible for real applications. In order to obtain more accurate distance estimation, this paper proposes a new metric, round-route node correlation, to describe the bending of paths in the WSN. Then it proposes a method to identify turning nodes along paths. By comparing the similarities between paths, further adjustment algorithms based on similarities are proposed. Simulation results show that the proposed method outperforms PDM and DV-distance especially when beacon nodes are not deployed uniformly.

Key words: wireless sensor network; distance estimation; turning node; anisotropic; path similarity

摘要: 传感器节点间距离的估计是传感器网络节点定位方法的基础。已有的各种定位以及距离估计方法对传感器网络的部署以及测量特性提出了各种苛刻的要求,而这些要求在实际的应用环境中无法得到满足,因此造成了已有方法难以实现和应用。提出了对传感器网络中节点间路径的弯曲程度进行描述的方法。利用该方法,可以获取对路径弯曲具有较大影响的节点,即拐点,根据这些节点完成对测量距离的修正。在此基础上,根据对不同路径弯曲程度相似性的比较,可以完成对传感器网络中各个节点到达信标节点测量距离的修正。仿真结果表明,特别是在节点分布不均匀的情况下,该方法优于 PDM 和 DV-Distance 方法。

关键词: 传感器网络;测距;拐点;各向异性;路径相似性

1 问题描述

传感器网络的许多应用对于传感器节点的位置信息具有较高的要求^[1]。目前传感器节点定位的主要思路是获取传感器节点到达若干具有地理位置信息的信标节点的距离进而使用三边定位^[2]或者MDS^[3,4]的方法计

* Supported by the National Basic Research Program of China under Grant No.2009CB320705 (国家重点基础研究发展规划(973)); the Disguised Researcher Program of Jiangsu Province of China (江苏省六大人才高峰计划)

Received 2008-09-20; Accepted 2009-04-09

算出各个节点的位置.在这个过程中,距离测定的准确性对于最终的定位结果无疑具有直接的影响.传感器网络部署环境的复杂性导致传感器节点间距离测定受到诸多不确定因素的影响^[5].首先,基于RSSI,TOA以及TDOA等机制的相邻节点间的距离测量在不同的部署环境中会产生难以预测的误差^[6,7];其次,节点间测量误差在测量路径上由于路径的弯曲导致难以预测的累积误差.目前已有的各种定位方法对于这一问题使用各种假设^[2-8]进行了回避,同时也造成了这些方法难以应用于实际的传感器网络环境.

网络中两个节点之间按欧几里得坐标计算得到的距离称为物理距离;通过沿节点间最短路径逐跳进行累积的方式得到的距离称为测量距离.本文提出了一种对节点间测量距离的修正方法.通过比较信标节点间路径上相距一定距离的节点对之间的关联程度可以发现对路径的曲折程度具有关键性影响的节点,称为拐点.利用拐点可以对该路径上的各个节点到达路径端点的测量距离进行分阶段的修正,使之接近于物理距离.为了衡量节点之间的关联程度,我们提出了一种新的对节点特征的描述手段——回路节点关联度,并以此对传感器网络中的任意两条路径的相似度进行描述.在此基础上,可以得到传感器网络中各个节点到达信标节点的路径与信标节点之间路径的相似度,根据该相似度以及信标节点间路径的修正得到各个节点到达信标节点的距离修正,从而得到与物理距离更加一致的估计距离,提高三边法等定位方法的精确度.

2 相关工作

近年来出现了大量基于测距的传感器网络节点定位方法.针对这些方法,文献[10]进行了细致的实验工作,证明已有的定位方法在实际应用环境中的精确度均远低于仿真结果.在其后续分析工作中发现,造成这种精确度差异的主要原因在于实际应用环境无法满足已有定位方法中的各种理论假设,例如实际应用环境中节点间在不同的距离按照不同的概率建立连接,而且不同的环境中连接概率无法事先获取,而现有的各种定位方法则假定节点间在通信范围内必定建立连接或者按照确定的概率建立连接.此外,现实应用环境中无线电信号的衰减特征也不符合普遍使用的假设.在试验数据的基础上,作者对传感器网络节点定位方法的仿真系统进行了改进,但是并没有提出在适合于实际应用环境的节点定位方法.

针对传感器网络中存在的部署空洞对节点间距离测定产生的影响,文献[11]提出了解决方法.该方法假定部署空洞的所有边界节点已经被标识出来.传感器网络中节点间的路径被不同的空洞分为各个子段.该方法通过在各个子段的端点处生成单位圆来计算各个子段之间的夹角.进而使用余弦定理以及各个子段的测量长度确定节点之间的物理距离.与已有方法相比,该方法注意到了部署空洞对节点间距离的测量所产生的影响并试图加以解决.但是该方法中子段端点处单位圆的生成以及余弦定理的应用依赖于传感器节点较高的部署密度.此外,该方法所依赖的部署空洞边界的标识在实际的应用环境中也是很难做到的.

文献[12]提出了一种对节点间测量距离的修正方法.该方法将传感器网络中的信标节点间路径的物理距离和测量距离分别使用矩阵进行标示,进而通过最小二乘法得到两个矩阵对应的线性转换矩阵.通过该线性变换矩阵使得测量距离进行变换之后与物理距离接近.与已有的各种传感器网络节点定位方法相比,该方法对传感器节点的部署、连接以及信号衰减方式等没有任何假设,因此更加适合于实际应用环境.但是,该方法对于测量距离的修正效果依赖于信标节点在传感器网络中的均匀部署.当信标节点数量较少时,该方法仅能保证信标节点周围节点的测量精度.

3 节点间距离估计方法

本文提出了一种利用节点间关联关系判断路径中拐点的方法.与已有的传感器网络节点定位方法不同,本文方法的判断过程不依赖于对传感器网络全局信息的获取,也不依赖于较高的传感器节点部署密度,而是利用信标节点所提供的精确位置信息对节点间测量距离进行修正.最后,根据传感器网络中各个路径的相似度,利用已经完成修正的路径,例如信标节点之间的路径,对未知节点间的测量距离进行修正.相似度的判断同样不依赖于全局信息.

3.1 术 语

本文方法中所使用术语的定义如下:

信标节点:传感器网络中部署的具备自身位置信息的节点,未知信息可以通过 GPS 得到的绝对未知信息,也可以是人工设定的相对位置信息.

信标节点路径:传感器网络中所部署的信标节点之间通过多跳传递所得到的相互之间的最短路径,易知,该路径上任意节点到达端点的路径都是最短路径.

回路节点:传感器网络中节点通过有限步长的范洪方式向周围传递自身的信息.信息向外传递的过程中在若干节点形成回路,即该节点从多个独立的路径收到信息.所有处于回路上的节点称为范洪源节点的回路节点.

拐点:路径端点间的物理距离与测量距离之间存在误差,路径上对测量误差具有显著影响的节点称为该路径的拐点.即通过该节点之后,到达端点的测量距离误差显著增加.

3.2 拐点的判断

通过观察可以发现,传感器网络中节点之间的路径所存在的弯曲不均匀.往往存在若干个节点组成的区域,在本文中称为路径的错误敏感区域,对路径的弯曲产生显著的影响.如图 1(a)所示.

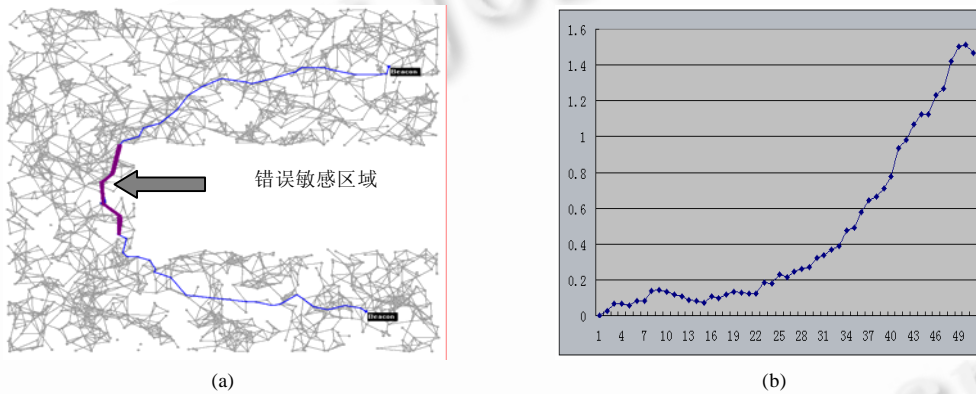


Fig.1 The inflection of the path and its impact on ranging errors, 1794 nodes, and average degree is 6.2

图 1 节点间路径的弯曲及测量距离误差的不均匀性,包含 1794 个节点,平均连接度 6.2

两个信标节点之间的最短路径在靠近路径中间的位置发生了明显的弯曲.图 1(b)显示了两个信标节点之间的测量距离和物理距离之间的误差.可以看出在经过错误敏感区域之前,路径上的节点到达信标节点的测量距离的误差保持在 20%以下;而在经过了错误敏感区域之后,测量误差则迅速上升到了 150%.路径的拐点存在于错误敏感区域中.为了得到拐点不同于路径上其它节点的特征,本文提出一种新的对传感器网络中节点特征进行描述的方法,其原理如图 2(a)所示.传感器网络中的任意节点都具有自身的控制范围,例如节点 O1 的控制范围和节点 O2 的控制范围分别使用网格和斜线表示.两个节点的控制范围会形成交集,而由于部署空洞的存在以及相应的路径的弯曲,必然导致弯曲点处节点对应的控制范围交集的缩小.如图 2(b)所示,点 O1 和 O2 的控制范围半径为 2r,则控制范围交集的计算如下所示:

$$\begin{aligned}
 L_{D,O2} &= r * \sin(\alpha / 2), \\
 L_{D,O3} &= r * \cos(\alpha / 2), \\
 L_{B,D} &= \sqrt{L_{O2,B}^2 - L_{O2,D}^2} = \sqrt{4 - \sin^2(\alpha / 2)} * r, \\
 L_{B,E} &= \sqrt{4 - \sin^2(\alpha / 2)} * r - 2 * r * \cos(\alpha / 2), \\
 S_{A,O3,O1} &= S_{C,O3,O2} = \frac{r^2 * (\pi - \alpha)}{2},
 \end{aligned}$$

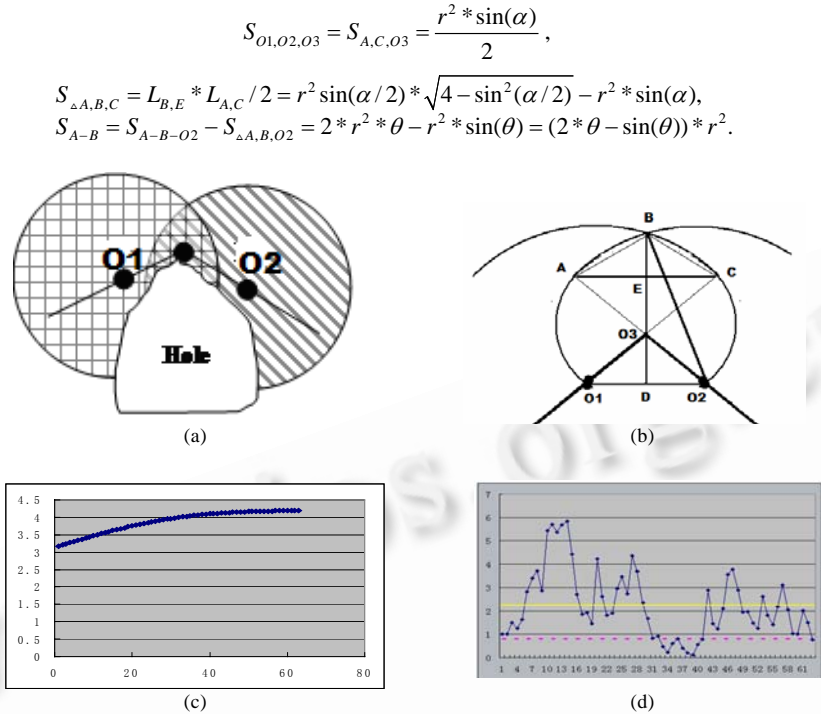


Fig.2 Identifying the turning nodes along the inflected path

图 2 节点间路径上拐点的判断

整个控制范围交集由 6 个部分组成,分别为两个三角形的面积 $S_{\triangle A,B,C}$ 、 $S_{\triangle A,O3,C}$ 、两个扇形 $S_{A,O3,O1}$ 、 $S_{C,O3,O2}$ 以及两个弧顶 S_{A-B} 、 S_{B-C} 。而最终的面积取决于角度 $\alpha = \angle(O1,O3,O2)$ 和 $\theta = \angle(O3,O2,B)$ 。显然,这两个角度是随着路径 $O1-O3-O2$ 弯曲程度的下降而提高。图 2(c)显示了控制范围交集的面积随着 θ 的增加而发生的变化。可见,当路径平坦时,控制范围交集的面积达到最大值。

为了对一个节点的控制范围进行定量描述,本文定义回路节点数 Rn ,即构成节点的控制范围的所有回路上节点的数量来表示节点的控制范围的大小。这里使用回路的方式排除了无法形成两点间路径的节点。在此基础上,定义回路节点关联度 RnC 来描述节点间控制范围交集,如下所示:

$$RnC_{i,i+step} = |Rn_{i,i+step} \cap Rn_i|,$$

其中 Rn_i 为第*i*个节点的控制范围内的回路节点数; $Rn_{i,i+step}$ 为第*i*个节点与相隔step个节点的路径上另一个节点之间的控制范围交集的回路节点数。其中,step的值可以根据网络的规模进行确定,在本文中將step设定为 5。图 2(d)显示了图 1(a)中的信标节点间路径上各个节点的回路节点关联度,可以发现错误敏感区域处的节点的关联度出现明显的下降,由此可以找到节点间路径上的拐点。

3.3 信标节点间测量距离的修正

在得到路径上的拐点之后,我们可以首先对两个信标节点间路径上的各个节点到达信标节点的测量距离进行修正。与文献[11]中进行的全局优化不同,本文提出的修正基于路径上的拐点分段进行。修正的过程如下所示:

(1) 通过DV-Distance或者DV-Hop采用逐跳累积的方式得到两个信标节点之间的测量距离 p_{ij} ,其中*i*和*j*分别为两端的信标节点的编号。同时,根据信标节点的位置信息可以计算出两个信标节点之间的物理距离 l_{ij} 。并由此计算出整个路径的测量距离误差 $PE_{ij}=(l_{ij}-p_{ij})/l_{ij}$ 。

(2) 如果整个路径的测量距离误差大于某一个预先设定的基础误差(BE),例如 5%,则使用上一节中的方法计算路径上每一个节点的 RnC ,据此得到该路径上的拐点。

(3) 整个路径的测量误差可以认为是基础误差与拐点引入的误差共同作用的结果.每经过一个拐点会使节点到达信标节点的距离测量误差增长速度加快.因此,对路径上的每一个拐点指定误差增长因子(TNC),并且通过 PE 计算得到该因子.计算过程如算法 1 所示.

(4) 利用拐点的 TNC 和路径的 BE,对信标节点路径上的节点进行测量距离修正.

算法 1. 得到路径上拐点的 TNC

输入:路径的基础误差和测量误差BE; PE_{ij}

输出: TNC

```

1. Starting_node=0; Valid_dist=0;
2. FOR(all nodes on a path)
3. { Est_dist = distance to the beacon node;
4. HopDist = Est_dist - Starting_node;
5. IF (this node is a Turing node)
6. { Valid_dist = Est_dist*2
7. Starting_node = Est_dist;
8. Mod_add_total+= Mod_add;
9. Mod_sub_total+= Mod_sub;
10. Mod_add = 0; Mod_sub = 0; }
11. IF(Valid_dist>0 & Est_dist< Valid_dist)
12. Mod_add =  $\frac{\text{square}(\text{HopDist})}{\text{Est\_dist}}$ 
13. ELSEIF(Valid_dist>0&Est_dist< Valid_dist*2)
14. Mod_sub =  $\frac{\text{square}(\text{HopDist})}{\text{Est\_dist}}$  }
15. TNC= $\frac{PE_{ij} - BE}{\text{Mod\_add\_total} - \text{Mod\_sub\_total}}$ 
16. return TNC;
```

算法 2. 利用路径 TNC 修正路径上节点的测量距离

输入: 算法 1 得到的 TNC; 基础误差 BE

输出: 路径上每一个节点修正后的测量距离

```

1. Starting_node=0; Valid_dist=0;
2. FOR(all nodes on a path)
3. { Est_dist = distance to the beacon node;
4. HopDist = Est_dist - Starting_node;
5. IF (this node is a Turing node)
6. { Valid_dist = Est_dist*2
7. Starting_node = Est_dist;
8. Mod_add_total+= Mod_add;
9. Mod_sub_total+= Mod_sub;
10. Mod_add = 0; Mod_sub = 0; }
11. IF(Valid_dist>0 & Est_dist< Valid_dist)
12. Mod_add =  $\frac{\text{square}(\text{HopDist})}{\text{Est\_dist}}$ 
13. ELSEIF(Valid_dist>0&Est_dist< Valid_dist*2)
14. Mod_sub =  $\frac{\text{square}(\text{HopDist})}{\text{Est\_dist}}$ 
15. Set distance estimation of this node as

$$\frac{\text{Est\_distance}}{1 + BE + (\text{Mod\_add\_total} - \text{Mod\_sub\_total}) * \text{TNC}}$$

```

算法 1 由信标节点根据其所收集到的与其它信标节点的连接信息展开,从一个信标节点出发到对端的信标节点结束.对节点的测量距离修正的程度通过 Mod_add_total 和 Mod_sub_total 两个变量控制,前者表示对修正的增加量而后者表示对修正的减少量,两个参数初始情况下均为 0.在路径中每遇到一个拐点则需要设置新的修正范围(L6~L7),在该修正范围中修正的增量与到达拐点的距离平方成正比而与到达信标节点的距离成反比(L11~L12);超过该修正范围后对距离修正的小量与到达拐点的距离平方成正比而与到达信标节点的距离成反比(L13~L14).每遇到一个拐点之后需要累加对距离修正的增加量和减少量(L10~L12).最终在对端的信标节点计算该路径的 TNC(L15).

算法 2 则是算法 1 的逆过程.对每一个节点的测量距离的修正从一个信标节点出发.在遇到拐点之前修正增加量 Mod_add_total 和减少量 Mod_sub_total 均为 0,即对节点到达路径端点的信标节点的测量距离的修正仅仅通过预先设定的基础误差 BE 完成.每经过一个拐点则分别对 Mod_add_total 和 Mod_sub_total 进行调整(L6-L10),这使得对节点测量距离的修正程度在经历一个上升阶段($Valid_dist$ 所表示的距离)之后再进入一个下降阶段(L11-L14).这与图 1 中所显示的路径上节点测量距离误差的变化规律是对应的.最终使用算法 1 中 TNC 计算的逆运算以及逐个节点累计得到的 Mod_add_total 和 Mod_sub_total 可以完成对节点测量距离的修正(L15).

3.4 任意节点测量距离的修正

信标节点间连接上的节点可以通过算法 1 和算法 2 完成对到达两端信标节点的测量距离的修正.不处于信标节点连接上的节点无法直接进行测量距离的修正.通过观察可以发现以下的规律:(1) 部署环境相近的传感器网络中节点间路径的弯曲往往相似;(2) 相似的两条路径对于测量距离的修正方式也相近.需要指出的是,在实际部署环境中,传感器网络节点间的路径会因为不同形状的空洞影响而在局部形成不同的弯曲特征.然而局部的弯曲特征对整个路径的测量距离所产生的影响是较小的.相反,路径作为整体所体现出的特征则直接决定

了整个路径测量距离的误差.由此,我们可以将已经完成测量距离修正的信标节点间路径作为样本.对于其它路径,我们比较与样本路径的相似程度,进而完成对该路径的测量距离的修正.

本文提出了基于路径相似度的测量距离修正方法.对于路径上的每一个节点使用RnC作为节点的特征值,而整个路径则可以表示为一个特征值向量.为了简化计算,该方法在计算路径对应的特征值向量的过程中按照节点间距离对节点的RnC进行平均化,即一定步长内所有节点RnC的平均值作为该步长对应的特征值,由此可以得到新的特征向量PRnC.对于两个给定的路径特征向量PRnC_i和PRnC_j可以计算其差分向量Dp:Dp_k=PRnC_{ik}-PRnC_{jk}.差分向量中每一个位置的值是两个路径特征向量对应位置值的差.路径的弯曲表现在路径特征向量的异常变化,即路径中拐点的产生上,而两条路径的相似则体现在对应的路径特征向量各个位置特征值的变化规律的相似性上.而差分向量则体现出了两条路径在不同位置的变化方面的关系.进一步的,可以对差分向量进行如下的数值化:Diff_i=∑abs(Dp_i-Dp_{i-1})(i>=2)由此得到两个路径特征向量的区分度.该值越大说明两条路径的特征向量各个位置值的变化方式差异越大,即路径的弯曲方式差异越大.则两条路径在测量距离修正方式上相互的参考价值越低.

设传感器网络中部署的信标节点数为m,则到达任意一个信标节点存在m-1个信标节点路径,且可以根据算法1和算法2确定这些路径上任意节点到达该信标节点的测量距离修正系数Mod_i(i=1,2,...,m-1).同时可以得到与这些信标节点间路径对应的特征向量PRnC_i(i=1,2,...,m-1).对于网络中不在信标节点间路径上的未知节点,到达相同信标节点的路径对应的特征向量为PRnC',则可以得到该特征向量与信标节点间路径特征向量之间的区分度Diff_i(i=1,2,...,m-1).由于区分度与路径弯曲的相似性成反比,由此可以采用加权平均的方式得到未知节点所对应的测量距离修正系数:

$$Mod' = \sum_{i=1}^{m-1} \frac{\overline{Diff}}{Diff_i} Mod_i .$$

其中 \overline{Diff} 为所有路径区分度Diff的平均值.

在计算的过程中会存在路径长度不匹配的情况.当信标节点路径的长度大于未知节点到达信标节点的长度时,可以对信标节点路径进行截断.截断位置对应的节点到达目的信标节点的路径长度与未知节点到达目的信标节点的长度相等.使用截断点位置的节点修正系数以及截断后剩余路径的特征向量完成计算.当信标节点路径的长度小于未知节点到达信标节点的长度时,本方法对信标节点路径进行虚拟延长,并假定延长的部分不再发生任何弯曲,因此延长部分对应的特征向量值使用原有特征向量的最后一个节点的特征值.由此可以完成相应路径特征值的计算.

4 仿真与分析

为了验证本文所提出算法的有效性,我们对不同的使用环境,包括节点密度以及信标节点部署方式下各个节点间距离测定方法进行了仿真.并且对DV-Distance,PDM^[11]以及本文提出的方法所产生的测距结果进行了对比.仿真程序在Windows平台下使用C++完成.所仿真的传感器网络中各个节点的连接按照文献[10]中所指出的根据节点间距离的概率方式完成,从而保证仿真系统与实际应用环境相近.节点间距离占最大通信半径的比例与连接概率的关系见表1.仿真得到的传感器网络如图3所示,图3(a)包含1687个节点,平均节点密度较为均匀,平均连接度为6.25;图3(b)包含2272个节点,平均连接度为6.64,上半部的平均节点密度是下半部的2倍.在两个网络中各有3个信标节点部署在右侧区域.

Table 1 Connection probabilities at different distances**表 1** 节点间距离与连接概率对应关系

节点间距离	10%	20%	30%	40%	50%
连接概率	0.9	0.9	0.8	0.6	0.4
节点间距离	60%	70%	80%	90%	100%
连接概率	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1

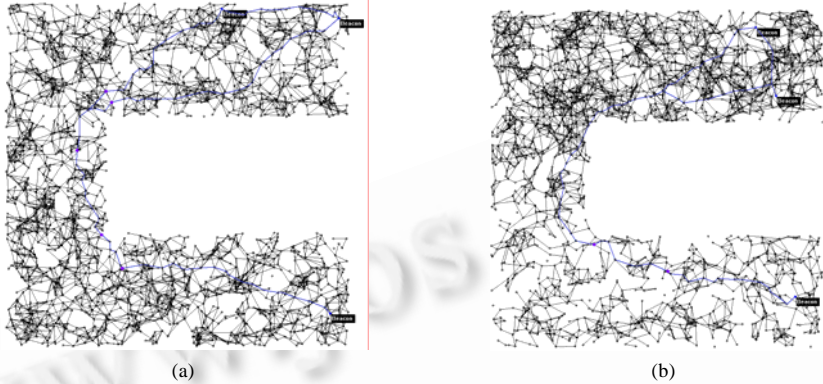
**Fig.3** The deployment setup of the simulation

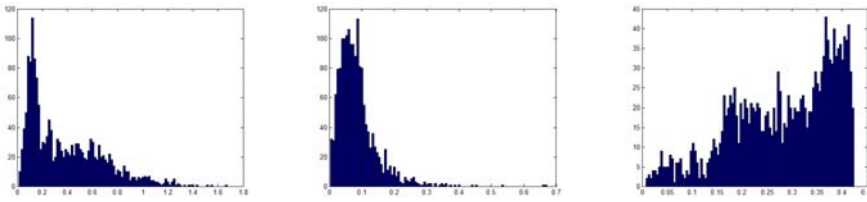
图 3 进行仿真的传感器网络

4.1 信标节点非均匀部署情况下测距结果

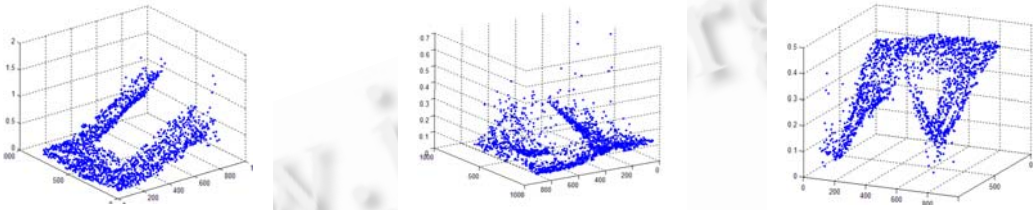
对于图 3(a)中的传感器网络 3 种方法得到到达信标节点距离误差如图 4(a)~图 4(c)所示.其中横坐标为误差而纵坐标为节点所占百分比.使用本论文提出的方法得到的误差大部分为 10% 以下,而 PDM 在这种信标节点不均匀部署的情况下出现了较大的误差.为了使误差产生的原因进一步明确,图 4(d)~图 4(f)给出了误差在位置上的分布.DV-Distance 所产生的误差在靠近信标节点的位置明显增大.这是因为 DV-Distance 采用节点间跳数与平均节点间距的方式产生测量距离,这种方式下与信标节点距离越远则测量距离越接近于实际距离.PDM 与 DV-Distance 显示出完全相反的误差分布.这是因为 PDM 根据信标节点完成全局优化,因此靠近信标节点位置的节点优化效果较为明显,而不存在信标节点的区域则失去了优化的依据,因此误差较大.本文提出的方法是用基于节点间连接的局部优化,因此在远离信标节点的区域保持了较低的误差.

4.2 节点密度非均匀情况下的测距结果

图 5 显示了在节点密度非均匀情况下各种方法得到的误差的分布情况的对比.图 5(a)、图 5(b)为到达右上角节点密度较高区域中信标节点的距离误差,图 5(c)、图 5(d)为到达右下角节点密度较低区域中信标节点的距离误差.与上一个仿真结果相比,由于节点密度的非均匀分布造成了单跳距离的非均匀分布,DV-Distance 的误差即使在远离信标节点的区域也明显较大.图 5(a)和图 5(c)相比,节点稀疏区域中较大的节点间距离造成到达右上角信标节点的距离误差更大.与 DV-Distance 相比,PDM 由于进行全局优化可以更好地适应节点密度的不均匀分布,在图 5(b)和图 5(d)中误差基本相当.但是在远离信标节点的区域,仍然存在较大的误差.与以上两种方法相比,本文提出的方法到达两个区域的信标节点的距离误差均较低.



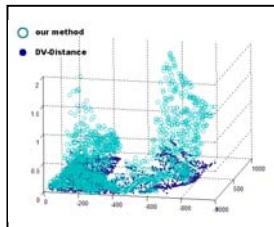
(a) Error distribution of DV-Distance (b) Error distribution of our method (c) Error distribution of PDM
 (a) DV-Distance 方法的误差分布 (b) 本文方法的误差分布 (c) PDM 方法的误差分布



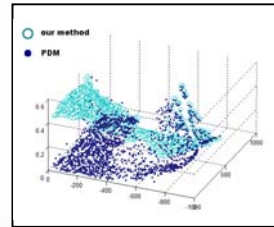
(d) Error-Position distribution of DV-Distance (e) Error-Position distribution of our method (f) Error-Position distribution of PDM
 (d) DV-Distance 方法的误差-地理位置分布 (e) 本文方法的误差-地理位置分布 (f) PDM 方法的误差-地理位置分布

Fig.4 Simulation results in uniform deployment

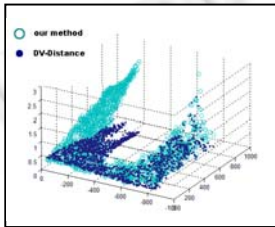
图 4 均匀部署密度下节点测距误差



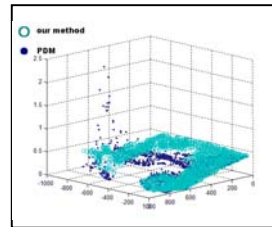
(a) Error-Position distribution of our method vs. DV-Distance (to the right-upper beacon)
 (a) 到达右上角信标节点的误差-地理位置分布, 本文方法对比 DV-Distance



(b) Error-Position distribution of our method vs. PDM (to the right-upper beacon)
 (b) 到达右上角信标节点的误差-地理位置分布, 本文方法对比 PDM



(c) Error-Position distribution of our method vs. DV-Distance (to the right-bottom beacon)
 (c) 到达右下角信标节点的误差-地理位置分布, 本文方法对比 DV-Distance



(d) Error-Position distribution of our method vs. PDM (to the right-bottom beacon)
 (d) 到达右下角信标节点的误差-地理位置分布, 本文方法对比 PDM

Fig.5 Simulation results in non-uniform deployment

图 5 节点密度非均匀情况下到达不同信标节点的误差分布

5 结 论

本文提出了一种实用的传感器网络节点间距离估计方法.与已有的工作不同,该方法对于传感器网络的各种部署和测量特性没有提出苛刻的要求,因此在实际的使用环境中具有更好的可实现性.我们提出了回路节点关联度 RnC 来衡量节点间路径弯曲程度.在此基础上,本文提出了一个新的方法来发现节点间路径上对路径弯曲起关键作用的节点,即拐点.利用拐点以及基于 RnC 的路径间相似度的比较,我们可以对路径上节点的测量距离进行分段地局部优化,因此本方法不依赖于信标节点的均匀部署.仿真的结果和分析表明,本文提出的方法在信标节点非均匀部署以及节点间连接不确定等实际应用环境中可以获得比已有方法更好的结果.

References:

- [1] Chintalapudi K, Fu T, Paek J, Kothari N, Rangwala S, Caffrey J, Govindan R, Johnson E, Masn S. Monitoring civil structures with a wireless sensor network, *Internet Computing*, IEEE, 2006,2(10):26–34.
- [2] Niculescu D, Nath B. Ad hoc positioning system (APS). In: *Proc. of the IEEE GLOBECOM*, 2001, 2926–2931.
- [3] Ji X, Zha H. Sensor Positioning in Wireless Ad-hoc Sensor Networks with Multidimensional Scaling. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM*, 2004. 2652–2661.
- [4] Ahmed A, Shang Y, Shi H, Hua B. MDS-Based methods for ad hoc network localization. *Int'l Journal of Interconnection Networks*, 2006,7(1):5–19.
- [5] Savvides A, Garber W. On the error characteristics of multihop node localization in ad-hoc sensor networks. In: *Proc. of the 2nd Int'l Workshop on Information Processing in Sensor Networks*, 2003. 317–332.
- [6] Niculescu D, Nath B. Error characteristics of ad hoc positioning systems (APS). In: *Proc. of the ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. 2004. 20–30.
- [7] Savarese C, Rabaey J M, Langendoen K. Robust positioning algorithms for distributed ad-hoc wireless sensor networks. In: *Proc. of the USENIX Annual Technical Conf.* 2002. 317–327.
- [8] Whitehouse K, Karlof C, Culler D. A practical evaluation of radio signal strength for ranging-based localization. *ACM Mobile Computing and Communications Review*, Special Issue on Localization Technologies and Algorithms, 2007,1(11):41–52.
- [9] Langendoen K, Reijers N. Distributed localization in wireless sensor networks: A quantitative comparison. In: *Proc. of the Int'l Journal of Computer and Telecommunications Networking*. 2003. 499–518.
- [10] Whitehouse K, Jiang F, Woo A, Karlof C, Culler D. Sensor field localization: A deployment and empirical analysis. *Technical Report, UCB/CSD-04-1349*, Berkeley: Univ. of California, 2004.
- [11] Li M, Liu Y. Rendered path: Range-free localization in anisotropic sensor networks with holes. In: *Proc. of the ACM MOBICOM*. 2007. 51–62.
- [12] Lim H, J.C Hou. Localization for anisotropic sensor networks. In: *Proc. of the 24th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies*. 2005. 138–149.



李凯(1979—),男,山东威海人,博士生,主要研究领域为分布计算,传感器网络.



汪芸(1967—),女,教授,博士生导师,主要研究领域为分布计算,容错理论,传感器网络.