

近邻表:RSSI辅助的一维无线传感网络相对定位*

朱小军^{1,2+}, 罗迪军^{1,2}, 陈贵海^{1,2}

¹(南京大学 计算机软件新技术国家重点实验室,江苏 南京 210093)

²(南京大学 计算机科学与技术系,江苏 南京 210093)

Proximity List: RSSI-Assisted Relative Localization in One Dimensional Wireless Sensor Networks

ZHU Xiao-Jun^{1,2+}, LUO Di-Jun^{1,2}, CHEN Gui-Hai^{1,2}

¹(State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

²(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

+ Corresponding author: gxjzhu@gmail.com

Zhu XJ, Luo DJ, Chen GH. Proximity list: RSSI-Assisted relative localization in one dimensional wireless sensor networks. Journal of Software, 2009,20(Suppl.):257-265. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/09030.htm>

Abstract: In wireless sensor networks, relative localization problem is to infer the relative locations instead of absolute locations. This paper considers one dimensional relative localization problem in wireless sensor network, and proposes PLO (Proximity List algorithm), which characterizes each node by its Proximity List, a list of all node IDs ordered by distances away. A trace-driven analysis verifies that the difference in distances can be mostly reflected by the difference in received RSSI (received signal strength indicator) values. Therefore, proximity lists can be obtained by comparing RSSI values. Finally, relative locations are obtained by locating end nodes in the line topology. This paper shows that this algorithm is feasible in practical situations.

Key words: proximity list; relative localization; wireless sensor network; one dimensional network

摘要: 在无线传感器网络中,相对定位是指寻找节点之间的相对位置而非绝对位置.考虑一维无线传感器网络的相对定位问题,提出了一种近邻表算法,该算法通过使用近邻表来刻画每个节点的位置,这个表中包含了所有节点,并以它们到指定节点的距离排序.实际网络中的数据分析验证了距离上的差别在大多数情况下可由接收到的RSSI值之间的差别来反映.因而,近邻表可以通过比较RSSI值来获得.最后,算法通过寻找一维拓扑中的端节点来得到所有节点的相对位置.验证了算法在实际环境中的可行性.

关键词: 近邻表;相对定位;无线传感器网络;一维网络

在传感器网络中,节点定位是一个重要的问题,因为大多数传感器应用都需要节点的位置信息^[1,2].例如,在事件监测应用中,我们需要知道事件发生的地点.一般来说,定位问题是一个在节点和物理位置之间进行映射匹配的问题,并且,在寻找节点精确位置的问题上已有很多工作^[3-7].在这些工作中,大多数都需要借助锚节点(anchor node)或特殊的硬件(如用来测距的硬件)来给未知节点定位.

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60573131, 60673154, 60721002, 60825205 (国家自然科学基金); the National Basic Research Program of China under Grant No.2006CB30303000 (国家重点基础研究发展计划(973)); the Jiangsu-High-Tech Research Project of China under Grant No.BG2007039 (江苏省高技术研究计划)

Received 2009-05-01; Accepted 2009-07-23

当我们没有足够多的锚节点或者特殊硬件时,我们无法获知未知节点的确切位置,但我们可以得到未知节点的相对位置.尽管相对位置可能是实际位置的一个任意的旋转、平移或两者的组合,实际中还是有一些场景不需要节点的绝对位置,而仅需要相对位置,例如,在一些地理位置信息路由中.目前在这方面的研究包括文献[8-11],然而,这些工作利用的信息局限于节点间的连通情况,当两个节点可以互相通信时,便认为它们处于一定的范围之内.在这些工作中,所有的互为一跳邻居的节点都被认为是单一点,因为利用这些信息无法将它们区分.

在本文中,我们考虑一维无线网络的相对定位问题.我们提出了一个近邻表算法(proximity list algorithm,简称PLO),主要思想是利用在大多数已有的传感器平台上均可获得的RSSI信息.RSSI一般被用来测量节点之间的距离^[4].然而,在实际中,由于RSSI受到很多因素的干扰^[12,13],测距的精确性受到挑战.另一方面,研究人员发现,RSSI值的高低能定性地反映出节点间距离的远近^[14,15],但是,这些工作依然关注于节点的确切定位.我们利用同样的RSSI特性来解决相对定位问题,在具体操作过程中,使用节点的邻居列表来刻画一个节点的空间位置,其中,邻居列表按照距离由近及远排序,这个序列则可以通过比较观测得到的RSSI来获得.将每个节点如此刻画之后,我们只需要找出处于端点位置的传感器节点,就可以将一维的传感器网络中其他节点的相对位置寻找出来.

我们的主要贡献如下:

- 验证了 RSSI 和距离之间的定性关系.通过数据驱动的分析方法(trace-driven analysis),我们验证了随着发送者和接收者之间距离的变大,接收到的 RSSI 值也单调地下降.数据是从布置在排球场上由 7 个 Iris 节点组成的网络中收集.

- 提出了使用近邻表来刻画一个节点的位置,这种方法利用了 RSSI 的特性.
- 提出了近邻表算法 PLO,并且演示了它在获取节点相对位置中的可行性.

本文第 1 节总结相关工作.第 2 节给出问题的定义.第 3 节提出我们的算法.第 4 节介绍实验部分.最后,第 5 节给出本文的总结以及将来的工作.

1 相关工作

在普适计算领域,定位是一个经典的问题(可参阅文献[1]).其解决方法可被分为两个大类:基于测距的(range-based)方法和基于非测距的(range-free)方法^[15].后一类方法与我们的方法相近,所以我们只讨论这类方法.为了叙述更清晰,我们将这种方法进一步分为 3 类,分类依据为相似的模块.因为分类界限不严格,故有的工作同时属于几类,为避免重复,我们只将每个工作介绍一遍.

1.1 基于锚节点的定位

锚节点,或种子节点(seed node),是那些已知位置的传感器节点.对于未知节点来说,若能够获得它到锚节点的信息,那么,它可以定位(或被定位)出一个粗粒度的位置(因为没有测距信息).在这个类别中的工作,主要区分在节点利用了哪种信息,以及如何利用这些信息.以下简述之.

未知节点在获得到锚节点连通信息后,便可将自身定位于以锚节点为圆心的单位圆的相交区域内^[5].这里,利用的信息局限于未知节点与锚节点间的连通信息,另外还有未知节点间的连通信息.为了同时利用这两部分信息,有学者使用一个基于凸优化的算法来进行定位^[6].更进一步地,这两个工作中利用的是“正信息(positive information)”:节点间可以通信则认为它们在一定范围之内;还有负面信息(negative information)没被利用:两个节点不能通信则表示它们之间的距离超出了一定范围.然而,这种信息若转化为限制条件,则凸优化的方法难以使用,因为这种限制条件不是凸性的.在文献[7]中,研究者提出了将带有非凸限制条件的优化问题弱化为一个半定规划问题(semidefinite programming),从而利用了所有信息.

近来在这个类别中有一个理论性质的工作^[8]揭示了相对定位的难度,作者证明了在二维网络中,基于非测距的方法进行定位的问题是APX-难的,这意味着甚至不存在一种有效的近似算法.

相对于我们的工作,此类别中的方法利用了粗粒度的连通性信息.这些方法都比较复杂,而且如果加入我们

提出的连通性条件(近邻表)的话,则它们的精度有望提高.

1.2 没有锚节点的定位

没有锚节点时,我们能够获得的只是一张包含相对位置的图,这可能是实际位置的一个任意的旋转,平移或二者的组合.在此类中的工作,主要不同点在于它们所使用的技术.

在文献[9]中,作者使用了一种在数学心理学(mathematical psychology)中使用的技术,名为多维尺度分析(multidimensional scaling).在文献[11]中,作者提出使用自组织映射(self-organizing maps)技术来定位,这种方法来源于神经网络.另外,在文献[10]中,作者提出使用虚坐标(virtual coordinates)来描述节点的相对位置.

相对于我们的工作,此类中的研究仍然只利用了粗粒度的连通性信息,并且很容易发现,它们的方法较为复杂.

1.3 基于RSSI的定位

此类中,最接近我们方法的工作有两项^[4,15].在文献[14]中,研究者提出通过对比RSSI来估计来自不同的锚节点的圆的重叠区域,借此估计出未知节点位置.他们利用的RSSI来源于锚节点与未知节点的交互信息,而在我们的工作中,我们假定没有锚节点,我们利用的是所有未知节点间信息交互时测得的RSSI.在文献[15]中,锚节点按预定轨迹移动,并不停广播自己的位置.未知节点记录下RSSI最强时锚节点的位置.由于RSSI最强时二者距离最近,借此可得到未知节点的位置与锚节点移动轨迹之间的几何关系,从而定位.

本文中,我们使用了和以上两项工作相同的RSSI的特性来刻画一个节点的空间位置.我们搭建了一个实际的网络用来验证这种特性,并且验证我们提出的方法.

2 问题建模

在此部分,我们首先介绍一个例子来说明我们想解决的问题,然后给出基本的思路,接着给出问题的形式化模型.

2.1 问题实例

假定有3个传感器节点位于一条直线上,并且互相间均可通信.它们的节点编号为0,1,2,但是我们不知道编号与实际位置间的对应关系.这种情况下,它们之间的相对位置关系有3种可能,而我们的目标是找出与真实情况相符的那一种,这就是我们想解决的问题的一个简单实例.

一般来说,在一个由 n 个节点组成的一维传感器网络中,节点间的相对位置有 $n!/2$ 种可能的情况.因而高效地寻找出实际的相对位置是有意义的.此外,因为节点间互为一跳邻居,故已有的工作,如文献[9-11]不能够解决这种问题,因为它们将互相为一跳邻居的点看作单一节点来处理.

在下面,我们通过观测到的RSSI的性质来刻画一个节点的位置.首先,我们介绍RSSI的观测结果.

2.2 RSSI观测

本节我们报告RSSI的观测结果.我们将7个Iris节点排在一条线上,具体如图1(a)所示.我们选择节点0广播数据包,此时,其他节点记录下收到数据包时测量到得RSSI的值.这些观测值随着时间的变化被描述到图1(b)中.在第4节将介绍更多的实验配置.

在图1(b)中,我们可以看到RSSI并不是固定不变的,但是,在大多数情况下,RSSI间的差距可反映出节点在空间上的差距.据此,我们认为,在某一个方向上,节点离发送者越近,它所接收到的RSSI就越强.

2.3 基本思想

基本想法为,充分利用RSSI和空间距离之间的关系.在下面,我们依然举例说明此想法.

选择一个节点,比如节点0,广播消息,此时,让其余节点记录下收到消息时的RSSI值.由于RSSI值越大,可推测距离越近,因而,我们可以通过比较它们接收到的RSSI值的大小来推出它们与信号发送者的距离远近程度.以列表的形式来记录这种远近程度,各节点以距离由近到远排序.这个表我们称之为近邻表,被用来刻画发

送者的空间位置.所有的节点轮流广播消息,因而每个节点都拥有一个近邻表.考虑第 2.1 节的情况,若各节点的近邻表情况如下:节点 0 为 0-1-2;节点 1,1-0-2;节点 2,2-1-0.据此,我们可以将实际的相对位置恢复出来.

使用穷尽搜索的办法,我们可以得出结论,实际的相对位置布局为 0-1-2 或者 2-1-0.其他情况均不可能.例如 0-2-1 不可能是实际的布局,因为若是这样,则节点 0 的近邻表应为 0-2-1 而不是 0-1-2.使用穷尽搜索的办法不实际,一种更有效的办法是首先寻找位于端点的节点,然后报告它的近邻表.这是我们的基本思路,将在第 3 节加以介绍.

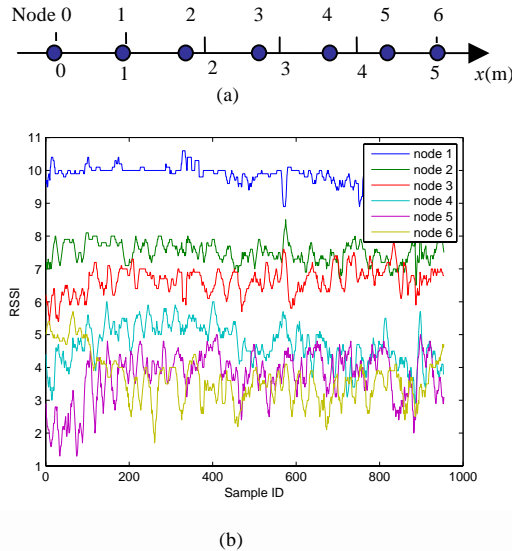


Fig.1 RSSI measurements of signals sent from node 0: (a) Nodes placement (b) RSSI observed by other nodes.

Note the plot in (b) is smoothed from the original plot by a window size of ten

图 1 节点 0 发出信号的 RSSI 观测值:(a) 节点位置;(b) 其他节点观测到的 RSSI.

注意图(b)中的曲线对原始数据进行了平滑,滑动窗口为 10 个样本

2.4 问题形式化

我们定义一些将要使用到的符号如下:

- N , 传感器节点的总数.
- π , 所有节点编号的一个排列.
- π_i^* , 节点 i 的近邻表.是所有节点编号的一个排列,按它们离节点 i 由近及远的顺序排序,此序列第 1 个编号为 i .
- C , 所有近邻表的集合,即, $C = \{\pi_i^* | 0 \leq i \leq N-1\}$.
- $\pi(k)$, 排列 π 中的第 k 个元素,其中 k 的范围是 0 到 $N-1$.
- $\langle i, j \rangle \in \pi$, 在 π 中, 节点 i 位于节点 j 之前.例如, $\langle 2, 3 \rangle \in 2-1-3-0, \langle 1, 2 \rangle \notin 2-1-3-0$.

我们称一个排列 π 兼容近邻表 π_i^* : 如果 π_i^* 可能由 π 产生.更具体地说,需要满足以下两个限制条件:(1) 在 π 中出现在节点 i 前的任意两个节点,在 π_i^* 中均以 π 中相反的顺序出现;(2) 在 π 中出现在节点 i 后的任意两个节点,在 π_i^* 中均以 π 中相同的顺序出现.例如,在一个有 3 个节点的网络中,节点以 0,1,2 编号.有一排列 π 为 0-2-1,若 π_1^* 为 1-2-0,则它与 π_1^* 兼容,而若 π_1^* 为 1-0-2,则不兼容.因为 0-2 在 π 中位于节点 1 之前,它在 π_1^* 中应按 2-0 的顺序出现.

若一个排列可兼容所有的近邻表,那么我们称它可以满足 C .使用这些定义,我们可以将问题定义如下:

问题 1. 给定近邻表集合 C , 找出一个可以满足它的排列.

3 PLO 设计

设计的基本思想为,通过特殊点来定位.在一维情况下,特殊点为线段的端点.我们将处在线段两端的两个节点命名为端节点,于是有以下的结论:

定理 1. 在一维网络中,距离任何节点最远的节点是一个端节点.

证明:我们用 $x(i)$ 来表示节点 i 的在线段上的位置.那么节点 i 和节点 j 之间的距离可以计算如下:

$$d(i,j)=|x(i)-x(j)|.$$

不妨用 a,b 表示两个端节点,并且令 $x(a)<x(b)$,那么我们有下面的等式:

$$x(a)=\min\{x(i)|0\leq i\leq N-1\},x(b)=\max\{x(i)|0\leq i\leq N-1\}.$$

将 3 个等式组合在一起,我们得到如下结果:

$$d(i,j)=|x(i)-x(j)|=\max\{x(i)-x(j),x(j)-x(i)\}\leq\max\{x(i)-x(a),x(b)-x(i)\}=\max\{d(i,a),d(i,b)\}.$$

命题得证. □

近邻表集合 C 是从一维网络中得到的,因而每一个近邻表 π_i^* ($0\leq i\leq N-1$) 的最后一个元素,即距离节点 i 最远的节点,是一个端节点.

定理 1 是我们算法的基础,我们可以得到下面的推论:

推论 2. 在近邻表集合 C 中,只存在一组相互报告对方最远的节点对,它们是端节点.

证明:首先,至少存在一对相互距离最远的节点对,因为两个端节点会互相报告对方是最远点.其次,假设在 C 中存在两对相互距离最远点,那么根据定理 1,它们应该都是端节点,而一条线段不可能有 4 个端点,矛盾. □

若我们认为一个排列的逆排列和它自身等价,则有如下定理:

定理 3. 取 C 中相互最远的节点对,记其中任一节点为 e ,则近邻表 π_e^* 是问题 1 的唯一解.

证明:从推论 2 可得知,我们能够确定出两个端节点,此时,很容易验证以下事实:任何不同于 π_e^* 的排列均和 π_e^* 不兼容. □

我们的算法可从定理 3 中直接得到,如图 2 所示.在算法中,我们先确定一个端节点,然后将它的近邻表输出,作为全网的相对位置图.

Algorithm 1: Proximity List algOrithm	
Input: Constraint $C = \{\pi_i^* 0 \leq i \leq N - 1\}$	
Output: π which satisfies C	
1 begin	
2 $i \leftarrow 0$;	
3 $i \leftarrow \pi_i^*(N - 1)$;	
4 $\pi \leftarrow \pi_i^*$;	
5 end	

Fig.2 Proximity list algorithm

图 2 近邻表算法

4 实验

为了验证算法在实际中的性能,我们在户外环境下进行了实验.主要方法是收集真实环境下的数据然后进行离线分析.

4.1 数据收集

实验在一个空旷的排球场上进行.7 个 Iris 节点被摆放在一条线上(如图 1(a)所示),数据收集工作从晚上 19:20 开始,至 22:00 结束.球场周围有很多树木,实验期间有围观的学生.总之,这是一个相对复杂的实验环境.节点的数据收集流程如下:

- 1) 第 1 个节点确定当前这一轮的数据样品编号(sample ID).
- 2) 所有节点相继地广播一个包含自身编号和样品编号的消息.

- 3) 任意节点在收到消息时,将该消息的 RSSI 值存放在缓存中,以消息发送者的编号作为索引.
- 4) 每一轮广播结束时,每个节点将存放在缓存中的数据发送至基站,后者将数据转发至计算机.
- 5) 计算机记录一个数据样品.

我们采集了 960 个数据样品,每个数据样品被表示为一个 7×7 的矩阵.

4.2 性能指标

为了评价算法的性能,我们需要设计新的指标.因为传统的用来评价定位误差的指标,如平均定位误差,在这个问题上是不适合的,无法评价节点间的相对位置关系.因此,为了描述输出排列和真实的排列之间的接近程度,我们定义了乱序度如下:

$$d(\pi_1, \pi_2) = \min\{|A|, |B|\},$$

其中,

$$A = \{(i, j) | (i, j) \in \pi_1, \text{and}, (i, j) \notin \pi_2\},$$

$$B = \{(i, j) | (i, j) \notin \pi_1, \text{and}, (i, j) \in \pi_2\}.$$

基本思想为,每两个乱序的节点被记录为一个乱序度,如

$$d(0-1-2-3, 2-1-0-3) = 3.$$

4.3 RSSI和距离

我们按照第 2.3 节的方法来验证 RSSI 和距离间的关系.选择一个节点作为发送者,绘出其他节点观测到的 RSSI 值.当发送节点并非端节点时,信号的传播有两个方向,我们需要检测在各个方向上 RSSI 与距离的关系.因此假如在发送节点的两个方向上都至少有 2 个节点时,我们将为此节点作两张图,分别绘制两个方向上 RSSI 的观测状况.我们已经在图 1 中描绘了节点 0 的情况,在图 3 中,我们将描绘其他 6 个节点的情况.

在图 3(a)中,节点 2,3,4,5 的 RSSI 曲线整体呈现出由上到下的顺序,与我们的假设吻合.其中节点 6 的曲线出现了异常情况(或者说我们可以说节点 5 的曲线出现了异常情况).在图 3(b)中,节点 5 和节点 6 的曲线也出现了异常情况.在图 3(c)中,曲线的排列情况与我们的假设完全吻合.在图 3(d)中也出现了异常的曲线,节点 1 和节点 2 的曲线相对位置和预期相反.在图 3(e)和图 3(f)中,都有 3 条不能相互区分的曲线纠缠重叠在一起.然而,我们发现这些不能相互区分的曲线的 RSSI 都低于值 5.换句话说,假如我们只相信 RSSI 值大于 5 的曲线,那么除了图 3(d),所有异常的曲线都不存在了,而在图 3(d)中我们可以将阈值由 5 提升到 6.出现这种异常现象是因为 RSSI 值并非随着距离的增加而线性下降.

总结得到,我们将大于某个阈值的 RSSI 值设置为可信的.也就是说,我们的假设在节点相距比较近的情况下吻合情况较好.

4.4 PLO的可行性

PLO 的性能受 RSSI 的影响较大,主要受影响于观测规律的普遍性.如上所述,有一些 RSSI 曲线出现了乱序的情况,此时对应的近邻表出现了乱序.在未来的工作中我们将会着力解决这个问题.我们用第 4.2 节中提到的性能指标来评估当前的方法.为了得到更直观的理解,我们将算法与随机猜测方法进行了简单的对比,结果如图 4(b)所示.

在图 4(a)中,横坐标为样本编号,纵坐标为算法的性能.同样的数据在图 4(b)的盒图(box-plot)中我们可以获得一个更精确的视图,观测到超过 50% 的输出值的性能指标在 3 以下,即,若实际的序列为 0-1-2-3-4-5-6,那么算法输出可能为 0-1-2-4-5-6-3.注意在此图中,输入的数据没有进行平滑,这是为了得到更实际的性能情况.

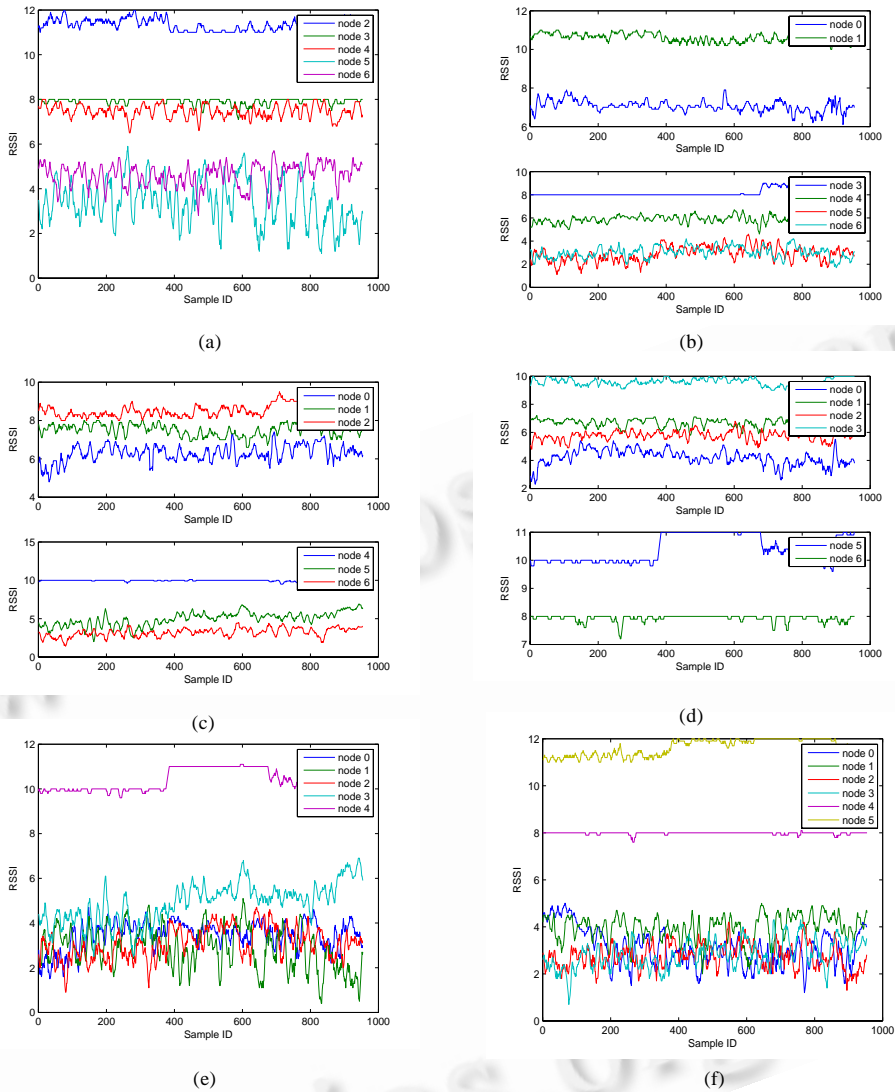


Fig.3. RSSI measurements of signals sent from: (a~e) node 1~6. Nodes are placed according to Fig.1(a).

All figures are smoothed from the original plots by a window size of ten to produce a more clear view.

Note that most of indistinguishable curves have RSSI value less than 5

图3 节点 1~6(a~e)发送消息的 RSSI 观测值.节点按照图 1(a)放置,所有曲线均进行了平滑,窗口大小为 10 个样本.注意大多数相互交叉的曲线的 RSSI 不超过 5

5 总结

在本文中,我们提出了近邻表算法(proximity list algorithm,简称 PLO).使用近邻表来刻画一个节点的位置,从而得到节点在一维场景中的相对位置.节点的近邻表是将其他节点由近及远进行排序,此序列通过比较 RSSI 的相对强弱而得到.通过对真实实验数据的分析,我们验证了相关假设的正确性,并验证提出算法的可行性.

在以后的工作中,我们将从理论和实际两方面考虑 RSSI 曲线的乱序问题,并且将把此方法推广到 2 维场景下考虑.

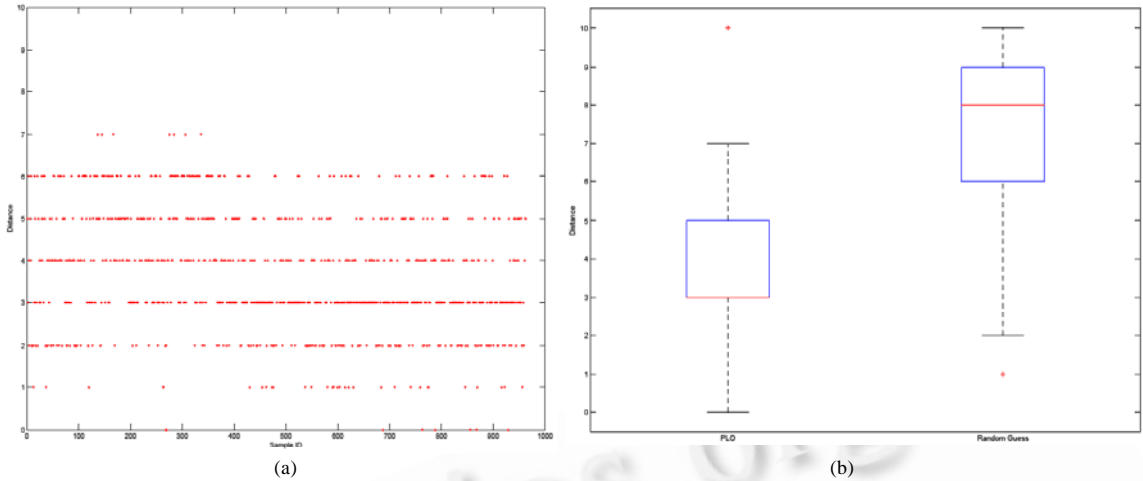


Fig.4 Feasibility of PLO:(a) error (in relative disorder) versus sample ID.

(b) boxplot of error of PLO (left) and error of random guess (right).

Smoothing is not applied here. Note in over 50% samples, PLO has less than 3 relative disorders

图4 PLO的可行性:(a) 差错(用乱序度衡量)与样本编号图.

(b) 差错的盒图,PLO(左)与随机猜测(右).此处的数据未进行平滑.

注意:在超过 50%的样本中,PLO 的乱序度不超过 3

致谢 感谢沈世卿在实验数据收集工作方面给予的帮助,同时感谢谢军峰在问题分析方面提供的指导.

References:

- [1] Hightower J, Boriello G. Location systems for ubiquitous computing. *IEEE Trans. on Computers*, 2001,34(8):57-66.
- [2] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8):102-114.
- [3] Wang FB, Shi L, Ren FY. Self-Localization systems for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2005,16(5):857-868 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/857.htm>
- [4] Sichertu M L, Ramadurai V. Localization of wireless sensor networks with a mobile beacon. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems*. IEEE Computer Society, 2004. 174-183.
- [5] Bulusu N, Heidemann J, Estrin D. Gps-Less low cost outdoor localization for very small devices. *IEEE Personal Communications Magazine*, 2000,7(5):28-34.
- [6] Doherty L, Pister K, Ghaoui L. Convex position estimation in wireless sensor networks. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM 2001, Vol.3*. Anchorage: IEEE Computer and Communications Societies, 2001. 1655-1663.
- [7] Biswas P, Ye Y. Semidefinite programming for ad hoc wireless sensor network localization. In: *Proc. of the 3rd Int'l Symp. on Information Processing in Sensor Networks*. Berkeley: ACM Press, 2004. 46-54.
- [8] Lotker Z, Albeniz M, Perennes. Range-Free ranking in sensors networks and its applications to localization. In: *Proc. of the 3rd Int'l Conf. on Ad-Hoc, Mobile, and Wireless Networks*. Vancouver: Springer-Verlag, 2004. 158-171.
- [9] Shang Y, Runml W, Zhang Y, Fromherz M. Localization from mere connectivity. In: *Proc. of the 4th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking & Computing*. Annapolis: ACM Press, 2003. 201-212.
- [10] Moscibroda T, O'Dell R, Wattenhofer M, Wattenhofer R. Virtual coordinates for ad hoc and sensor networks. In: *Proc. of the 2004 Joint Workshop on Foundations Of Mobile Computing*. Philadelphia: ACM Press, 2004. 8-16.

- [11] Giorgetti G, Gupta S, Manes G. Wireless localization using self-organizing maps. In: Proc. of the 3rd Int'l Symp. on Information Processing in Sensor Networks. Cambridge: ACM Press, 2007. 293–302.
- [12] Hightower J, Want R, Borriello G. Spoton: An indoor 3D location sensing technology based on RF signal strength. Technical Report, UW CSE 2000-02-02, Seattle: Department of Computer Science and Engineering, University of Washington, 2000.
- [13] Bahl P, Padmanabhan V. Radar: An in-building RF-based user location and tracking system. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2000, Vol.2. Tel Aviv: IEEE Computer and Communications Societies, 2000. 775–784.
- [14] Liu C, Wu K, He T. Sensor localization with ring overlapping based on comparison of received signal strength indicator. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems. IEEE Computer Society, 2004. 516–518.
- [15] Guo Z, Guo Y, Hong F, Yang X, He Y, Feng Y, Liu Y. Perpendicular intersection: Locating wireless sensors with mobile beacon. In: Proc. of the 29th IEEE Real-Time Systems Symp. Barcelona: IEEE Computer Society, 2008. 93–102.

附中文参考文献:

- [3] 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.软件学报,2005,16(5):857–868. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/857.htm>



朱小军(1986—),男,山西霍州人,硕士生,主要研究领域为无线传感网络技术.



陈贵海(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为无线传感器网络,并行计算技术,网络计算技术.



罗迪军(1984—),男,硕士生,主要研究领域为无线网络,无线传感器网络.