

基于弹力的无线 Ad-Hoc 网络节点定位方法*

官鲁斌^{1,2+}, 吴小兵^{1,2}, 陈贵海^{1,2}

¹(南京大学 计算机科学与技术系, 江苏 南京 210093)

²(计算机软件新技术国家重点实验室(南京大学), 江苏 南京 210093)

Node Localization in Wireless Ad-Hoc Networks Using Elastic Force

GUAN Lu-Bin^{1,2+}, WU Xiao-Bing^{1,2}, CHEN Gui-Hai^{1,2}

¹(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

²(State Key Laboratory for Novel Software Technology (Nanjing University), Nanjing 210093, China)

+ Corresponding author: E-mail: gps.qipa@gmail.com

Guan LB, Wu XB, Chen GH. Node localization in wireless ad-hoc networks using elastic force. *Journal of Software*, 2011, 22(Suppl. (1)): 23-31. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/11003.htm>

Abstract: In wireless ad-hoc and sensor networks, localization is often viewed as one of the most significant problems. This study has designed a localization system that abstracts the distance of every neighbor nodes pair as the length of a spring between them and then attains the final position information through spring updating. Compared with other spring-based localization methods, this system converges faster because it uses a displacement vector that has proven to be more efficient in updating coordinates. The system performs better than range-free localization methods even under high ranging error.

Key words: ad-hoc; WSNs; elastic force

摘要: 在无线 Ad-hoc 网络和无线传感器网络中,定位是一个广受关注的重要问题.设计了一个系统,该系统将测量得到的距离信息抽象成为两节点间弹簧的长度,将节点坐标距离与测距距离差抽象成为节点间的力,通过受力分析产生位移向量多次更新节点坐标并最终得出节点的位置.系统使用简单的计算就能得到一个位移向量,然后使用该向量更新坐标.证明了该系统比其他基于力的思想的定位方法收敛更快.系统在测距精度不高的情况下也能得到比无需测距的方法更好的定位效果.

关键词: ad-hoc;无线传感器网络;弹力

节点的地理位置信息对无线 Ad-hoc 网络和无线传感器网络(WSN)具有重要意义.一些性能优异的地理路由方法^[1,2]需要节点的坐标信息来进行路由;传感器网络中节点感知到的信息只有与节点所在的位置信息结合使用,才能对感知数据进行分析并获知该地域的环境的变化和异常^[7-9].

本文为解决大规模节点网络自组织定位,克服已有系统高能耗高代价^[3]的问题设计了一个网络自我定位的系统,该系统中使用了不多的节点作为锚节点,将其位置作为初始信息,参考点对点跳数信息进行节点的初步定位;再将网络中邻居节点间测得的带误差的距离信息抽象成为两节点间弹簧初始长度,通过受力分析对节点位置进行更新,通过多次位置更新寻求整个网络中各个节点间受力平衡;作为一种启发式的算法,考虑到网络在

* 基金项目: 国家自然科学基金(60825205, 60903179, 61073152, 61021062)

收稿时间: 2011-05-02; 定稿时间: 2011-07-29

测距精确的情况下,真实位置坐标在进行本系统的抽象后是受力平衡的(即每个节点的所有邻居都给该节点施以 0 大小的力),所以在有误差的测距下,本文认为当网络中的每个节点都达到或接近力的平衡时,每个节点均位于真实位置附近,从而启发式地达到为节点定位的目标.

本文中假设测距数据是存在误差的.误差在测量中不可避免,而在无线网络的某些应用环境中可能存在有较大的误差.在已有的无线网络节点测距技术中,超声测距^[4,5]被认为是精度较高的一种方法,该方法能较准确的获得两节点间的直线距离.而在实际应用中,尤其是二维平面定位时,节点并非严格处于同一水平高度,如绿野千传(GreenOrbs)^[6]系统的节点就固定在树上,树高及地面海拔的不同导致测得的距离信息总是大于二维坐标距离.有的系统并不具备超声测距的条件,也无法得到较准确的测距信息,只能通过信号强度来进行估计,所以考虑测距的误差是必要的.实验结果表明,本系统能够在有测距误差的情况下进行定位并得到较准确的结果,即便测距误差达到 32%,利用本系统也能获得相对较满意的定位效果.

本文第 1 节介绍相关工作.第 2 节详细介绍本系统的计算过程.第 3 节给出实验结果.第 4 节得出结论.

1 相关工作

无线 Ad-hoc 以及 WSN 网络节点位置坐标信息的获取方法大致可分为两种:基于测距的(range-based)和无需测距的(range-free)定位方法.前者通常利用已知节点到未知节点的距离或角度信息来获取位置信息,AHLoS 系统^[4]就是一个 Ad-hoc 网络定位系统,它在假设测距数据较精确的前提下(如用超声测距),节点通过不断地对非锚节点进行定位,并在下一轮定位中将这已定位节点当作已知锚节点进行下一轮定位.这样做的缺点是误差会随跳数的增加而积累.文献[5]改进了这一做法,使用了卡尔曼滤波,而非简单将非锚节点当成锚节点.这一做法的好处是明显的,但该工作也是在测距较精确的前提下,一旦误差较大使整个网络在对应距离信息下可能有多种拓扑,或使网络的拓扑有较大改变,将导致定位结果出错.文献[10]对文献[4,5]所需要的唯一拓扑条件进行了进一步研究,得到了更加严密的理论结果从而给了文献[4,5]更多理论适用可能性.但以上这些工作都只在测距误差较小乃至精确的前提下才有好的性能.

无需测距的定位利用待定位节点到锚节点的跳数信息来定位未知节点.文献[3]简单地将节点的坐标定在所有可以连接到的锚节点的中心位置,这样的定位需要大量的锚节点才能做到较准确.文献[11]首先计算到锚节点的跳数,再通过锚节点间跳数来大致计算到某锚节点每跳的距离大小,最后通过三边关系定位出节点的位置,简单易行.

另外还有许多文献是从力的思想出发进行定位的工作,文献[12]使用弹力的思想来定位网络节点位置,该工作首先定位了几个初始节点,以这些节点为基准给整个网络一个很伸展的拓扑作为初定位以防止节点边叠放从而导致定位差错,再使用力的思想去更新位置信息.该工作使用了力的思想,但本文的研究和实验表明,文献[12]的系统收敛速度过慢.文献[13]将节点受力分解为多个组成部分计算合力,得出合力后进行多轮的更新坐标计算,但该文献给出的节点用来更新坐标的位移向量在连接度不同的情况下差异很大,更新过程中会导致节点震荡而并不能够稳定地向正确定位结果发展最终导致错误的定位.文献[14]在用不同于本文的方法计算得到节点间力后,将节点最合适的位置计算出来用于更新节点位置,但如第 2.4 节提到的,这样的计算比较复杂,大量节点每次都大量计算难以允许.本文给出的位移办法很大程度上改进了这些缺陷,并从理论上证明了本文给出的位移是在保证节点不发生局部震荡的前提下能达到的最大位移.

2 弹力定位算法

本文的弹力定位方法主要有以下几个步骤:首先根据待定位节点到各个锚节点的跳数以及平均的每跳步长来初步定位每个节点;再根据节点的拓扑情况将网络进行拉伸使得网络中节点基本达到均匀分布;最后通过抽象弹力进行多次定位以达到力的平衡,得出最终结果.

2.1 前提假设以及理论准备

假设给定节点分布区域的形状以及数个分布在该区域边缘的锚节点真实位置,在网络部署完成后,每个节点通过某种测距方法获得自己与相邻节点的距离信息并将这一信息汇聚于汇聚节点(sink).在做仿真实验时分布区域为边长 1000 的正方形,锚节点分布在正方形 4 个角处.

给出一个本文中用到的定义,管辖范围由待定位区域质心向各锚节点连线,相邻两锚节点以及质心组成的三角形区域为该两个相邻锚节点管辖范围,坐标位于该部分区域中的节点归这两个节点管辖.

2.2 初步定位

为辅助之后的定位,这一阶段很简单地初步地定位了整个网络中的节点.给定分布在边缘的锚节点后,利用跳数乘以平均每跳步长估算节点到各个锚节点的距离,再根据这些距离关系列出方程组如(1)所示,其中 B_{ix}, B_{iy} 为第 i 个锚节点的 x, y 轴坐标, r_i 为第 i 个锚节点到该节点的跳数估算距离, k 为锚节点的数量.解出该方程组的最小二乘解作为初步定位的节点坐标,定位后结果如图 1 所示.

$$(B_{ix} - x)^2 + (B_{iy} - y)^2 = r_i^2 (i = 1 \dots k) \quad (1)$$

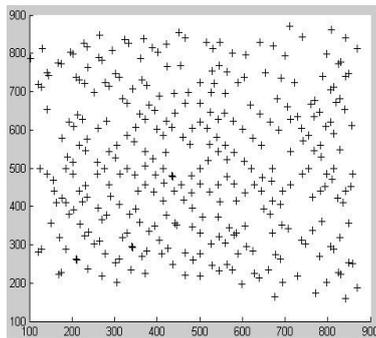


Fig.1 Localization result after first locating.
The nodes all located inside the area with x and y axis between 100 and 900 when they distributed randomly between 0 and 1000

图 1 经过初定位后的坐标,本该被定位在横竖坐标均在(0,1000)范围内的节点都被定位在了(100,900)范围内

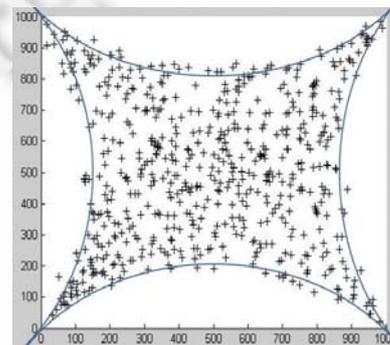


Fig.2 Localization result after stretch.
The boundary line we made which separate locating area based on nodes density looks like a part of circle

图 2 经过拉伸后的定位结果,图中辅助线为节点密度很不同的部分的分界线恰似圆弧

2.3 拓扑拉伸

上述初定位只是做到了相对位置的基本正确而并不准确,若定位的效果不能满足使整个网络的待定位区域节点均匀分布,还需要进行拓扑拉伸予以纠正,否则将很大程度上影响之后基于弹力定位算法的收敛速度.以之前的正方形区域为例,如图 1,在进行了初步定位之后,由于取平均步长作为多跳中每跳的距离长度,而当跳数大于 1 时,基于平均步长的累计长度必定大于真实距离,在这种情况下待定位节点均趋于集中在区域中央位置,边缘节点更是如此.因此我们需要对整个网络进行了再定位的拓扑拉伸,包括这样两个步骤,分别是基于锚节点的拉伸和基于节点分布均匀性的拉伸.下面详细介绍这两个拉伸步骤.

首先是基于锚节点的拉伸,鉴于锚节点的位置是准确的,我们从各个锚节点出发按到最近锚节点的跳数升序依次对每个节点进行位置更新,使节点被相对其最近锚节点的前跳节点拉向待定位区域外延而不再全都集中在中央.以正方形定位区域为例,如图 2,经过了这样的更新我们将该正方形区域内的节点拉伸成为更像 4 角星形的区域.

之后是基于分布均匀性的拉伸,为减少计算量本系统开发了一种不精确但简单朴素的拉伸算法以满足定位需求.仍以本系统的正方形区域为例,观察到图 2 中网络区域边界近似一段圆弧,为将 4 角星形分布区域拉伸为

正方形,这一步骤致力于找到 4 个位置大小合适的圆分别与该待定位区域相交,这 4 个圆满足如下 3 个条件:1)该圆与待定位区域的交面积尽量大;2) 相交部分的节点密度与正方形区域节点密度差别明显,本系统中设定密度是 10 倍的差别关系;3) 为了计算方便计算不妨假设对应的锚节点位于该圆上.找到了这样的几个圆后,对每个圆,从圆心部分给对应三角形区域一个引力,这个引力按距离远近比例将每个三角区域中的待定位节点吸引向新的位置,以达到所有的待定位区域都均匀分布的效果.如图 3 所示,从该圆的圆心向待定位节点 M 连线,交距离该节点 M 最近的两个锚节点管辖范围(即三角形区域)于两点 P, C ,交圆于 Q ,坐标更新使 M 更新到 M' ,其中 M' 在 PC 连线上且 $PM:MQ=PM':M'C$,在圆和正方形相交部分的节点 N 则被更新到圆心和 N 的连线与正方形区域的边界线的交点 N' .对于其他形状的待定位区域,只要通过跳数来计算得出锚节点的管辖范围,两个相邻的锚节点的管辖范围通常是三角形或接近三角形,再针对节点的分布情况寻求适合的圆并施以相应的力的作用也会得到节点均匀分布的效果.以上初步定位也并未准确地定位网络中的节点而是为之后的弹力定位做准备使其更快速收敛.

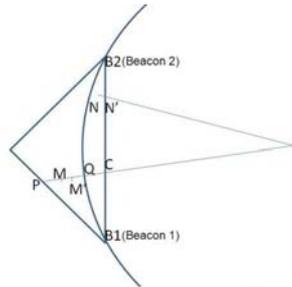


Fig.3 Example of stretch based on uniformity of distribution

图 3 基于分布均匀性的拉伸示例图

拉伸过程中使用到了点到点测距距离,所以节点坐标此时已经比较接近于真实位置为弹力作用的快速收缩做到了准备.

2.4 节点间弹力定位

此时假想每个节点与其邻居节点间连接着一个弹簧,弹簧原长是测距距离,将相邻节点间的坐标距离同测距距离相对比,长度差就是邻居给该节点施加的引力或推力.本过程致力于使每个节点都处于它与邻居节点间力平衡的状态,进而使整体的网络都处在力的平衡状态,以平衡状态下的坐标为最终定位的坐标结果.

由胡克定理,一个节点 i 的邻居节点 j 由弹簧力加给节点 i 的力为

$$\vec{F}_{ij} = k(R_{ij}' - R_{ij}) \times u(\vec{j} - \vec{i}) \quad (2)$$

其中, \vec{F}_{ij} 为 j 节点加给 i 节点的力, k 为弹性系数, R_{ij}' 为 i, j 间坐标距离, R_{ij} 为 i, j 间测距距离, $u(\vec{j} - \vec{i})$ 为 i, j 连线方向的单位向量.因 k 的选取对以下计算过程没有影响,同时为叙述方便,我们取 $k=1$.于是,所有 i 的邻居节点加给节点 i 的合力为

$$\vec{F}_i = \sum_{j=1}^n \vec{F}_{ij} \quad (3)$$

其中, n 为邻居节点个数,节点 i 通过邻居给的合力更新自己位置移动的大小和方向是难以确定的,因为合力会在位置位移的时候随着变动,而当邻居节点也变动后合力发生改变,又要再次进行重复的计算和位移.针对这一问题,每轮用来更新节点坐标的位移更新公式需要尽量满足以下几个条件:1) 位移幅度较大;2) 位移幅度不能过大产生震荡;3) 因为需要多轮定位每轮都遍历每个节点,该位移向量计算不能复杂.本文经过研究选取如下更新向量:

$$\text{Update} = \vec{F}_i / n \quad (4)$$

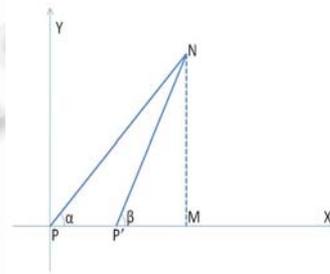


Fig.4 Example picture of proof 1

图 4 证明 1 的示例图

即合力方向上大小为合力大小除以邻居个数的位移向量,这一位移向量计算并不复杂,但最简洁地集合了邻居节点施加的力的信息,如本节末给出的证明 1,在这样的移动后,该方向上邻居对该节点的合力方向不变(或为 0),这样大小的位移并未改变位移方向上力的正负号,也就不会因位移幅度过大而产生震荡。

同时,当 i 节点只有一个邻居 j 时,证明 1 中的不等式(10)将达到临界变成等式,说明该位移幅度已经达到最大幅度.综上,本位移在提出的 3 个条件上均有优势,利用这样简单的位移计算公式,本系统在每轮计算中依次更新节点位置,定位在进行完一定轮数的更新后便认为已基本达到力平衡,从而得到节点位置坐标。

以下是证明 1 的证明过程和算法的具体描述。

证明 1:如图 4 所示,假定 P 是待定位节点 i 当前的位置, P' 为经过位移后节点的位置,故 $\overline{Update} = \overline{PP'}$,不失一般性,我们以 P 为原点, $\overline{PP'}$ 为 x 轴建立坐标系如图所示,此时 $\overline{F_i} = \overline{F_{ix}} = n \times \overline{PP'}$,对该节点的邻居 N ,做 $NM \perp X$ 轴交 X 轴于 M ,假定 N 到 i 测距距离为 r , i 节点位于 P 处时 N 给 i 的力根据等式(2):

$$\overline{F_{iN}} = (|NP| - r) \times u(\overline{PN}) \quad (5)$$

在 x 轴方向(即 update 的方向)的力为

$$\overline{F_{iNx}} = (|NP| - r) \times (|PM| / |PN|) \times u(\overline{PP'}) \quad (6)$$

在更新位置后:

$$\overline{F'_{iNx}} = (|NP'| - r) \times (|P'M| / |P'N|) \times u(\overline{PP'}) \quad (7)$$

而

$$\overline{F'_{iNx}} - \overline{F_{iNx}} = -|PP'| - r \times (\cos \beta - \cos \alpha) \quad (8)$$

这里,因 $\cos \alpha - \cos \beta > 0$,所以在 X 轴正方向有

$$\overline{F'_{iNx}} \geq \overline{F_{iNx}} - |PP'| \quad (9)$$

若 N 在其他象限,可以推得同样结果,这里不再赘述.由于每个 N 都满足这一条件,故在 X 轴正方向的力为

$$\overline{F'_{iX}} = \sum_{j=1}^n \overline{F'_{ijX}} \geq \sum_{j=1}^n (\overline{F_{ijX}} - |PP'|) = \overline{F_{iX}} - n \times |PP'| = 0 \quad (10)$$

□

算法 1.

输入:每个锚节点坐标 $B_i(x_i, y_i)$,各节点与邻居节点测距信息 d_{ij} (i, j 为相邻节点, d_{ij} 为测距距离),并由此矩阵得到各节点到各锚节点的跳数 $\text{HopTo}B_{i1}$ 以及所有测距距离的平均值 d 作为邻居节点平均步长.(i, j 为待测节点 id , n 为待测节点规模).

输出:每个节点坐标 $\text{Position}(j)$,用 $x+iy$ 表示(i 为虚数单位).

For $i=1:n$

列方程组 $(x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2 = (\text{HopTo}B_{i1} \times d)^2$

解得该超定方程组的最小二乘解 (x_i, y_i) 作为 i 节点的初始坐标 $\text{Position}(i)$;

End(初步定位结束)

以到最近的锚节点的跳数 $\text{HopToNearest}B(i)$ 为序排列所有待定位节点 id 记录于数组 $\text{array}()$,则 $\text{array}(j)$ 为排列在该序列中的第 j 个节点的 id .再记录前跳节点 $b(\text{array}(j))$ 满足:

$b(\text{array}(j))$ 与 $\text{array}(j)$ 相邻且 $\text{HopToNearest}B(b(\text{array}(j))) = \text{HopToNearest}B(\text{array}(j)) - 1$,若多个节点均满足则取两个间测距距离最小者为 $b(\text{array}(j))$.

For $j=1:n$

在 $\text{array}(j)$ 与 $b(\text{array}(j))$ 当前位置的连线上更新 $\text{array}(j)$ 节点的位置使两者坐标距离为 $d(\text{array}(j), b(\text{array}(j)))$.

End(基于锚节点的拉伸结束)

观察图形并做适当形变以完成初定位(分布均匀的拉伸结束).

For $k=1:\text{total}$ (total 为定位的轮数)

```

For  $j=1:n$ 
  计算本文中用来更新的位移向量 update;
  Position( $j$ )=Position( $j$ )+update;
End
End(完)

```

3 仿真结果

本系统为验证定位效果,建立了模拟实验场地,该场地形状为正方形,设 4 个锚节点分别在正方形四角坐标为 $B_1(1000,1000), B_2(0,1000), B_3(1000,0), B_4(0,0)$. 每次实验在该场地范围内随机生成 600 个节点位置,根据设定不同的测距范围来改变节点密度,这里规定距离小于等于测距范围上限的节点才是该节点的邻居节点并能被该节点感知到.当测距范围确定后,所有在此范围内的邻居节点都能被测距,这一距离数值由我们真实距离乘上一个设定误差范围内的随机噪声.

本文方法主要与无需测距的 DV-hop^[11]和基于测距的 AHLoS^[4]以及基于力的节点定位相对收敛快而稳定的 mass-spring^[12]进行比较.这里的 AHLoS 的锚节点设在待定位区域的中心,为使 AHLoS 算法取得好的定位效果,我们设定更多的锚节点,共 10 个距离 B_1, B_2, B_3, B_4 跳数最多的节点为锚节点.

3.1 节点密度与定位精度

针对不同的节点密度,我们生成 10 组不同的节点,每组用本系统和 DV-hop 做 5 次定位实验,令测距范围上限分别为 80,90,100,110,120.使用本系统时每次定位的轮数为 100 次,测距误差不超过为真实距离的 10%,实验结果如图 5 所示,这里不使用更低连接度是因为实验表明更低的连接度随机产生节点很难使整个网络连通.

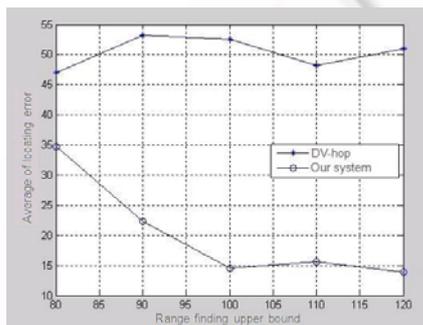


Fig.5 Locating error vs. node density

图 5 不同连接度对测距精度影响

可以看出,在测距 10% 的误差内,本系统随着节点密度的增加及连接度的上升,定位误差会显著下降并趋于稳定,连接度低的网络环境定位效果并不太好,而 DV-hop 则保持基本不变.

3.2 收敛速度

针对定位轮数,我们同样生成 10 组节点,每组用本系统做数次定位实验,公平起见我们在本系统中采用与文献[12]相同的初定位方法.令节点间力定位轮数分别为 2,10,50,200,800,3200 次.每次定位的测距范围上限设为 100,测距误差不超过真实距离的 10%,虽然^[12]是无需锚节点的,为了验证定位精度我们还是对两个方法都选取了 3 个处于中心区域的锚节点.实验对比结果如图 6 所示.

可以看出,定位轮数的增加可以提高定位的精度,而我们给出每次移动的幅度是文献[12]给出的移动幅度的 2 倍,所以在收敛速度上的提升很显著.这里因为锚节点位于中心区域,整个网络难免出现偏转角度带来的整体误差,所以定位误差会比本系统其他定位结果要大一些.

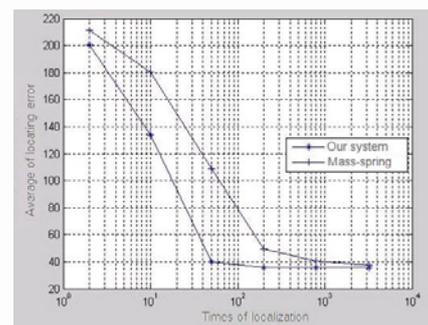


Fig.6 Locating result compare with mass-spring^[12]

图 6 与 mass-spring[12]定位结果的对比

3.3 测距精度与定位精度

AHLoS 在精确的测距环境中表现出很好的定位能力,而在测距精度较低时,如在 100 个节点,节点测距上限是 300,测距精度存在 3% 误差的情况下,AHLoS 的定位效果已经表现不佳,图 7 为我们做得的几组这样的网络环境下节点的定位结果(其中黑×代表真实位置,连线代表偏离真实位置的向量,连线末端为定位到的位置(后同)),远离锚节点的区域,误差在急剧扩大,而网络规模的扩大和误差的增大均会使定位结果愈加偏离真实位置,导致本系统未能够与之比较 600 节点情况下不同误差的定位效果;而我们的系统在误差较大时仍能较好的定位效果.图 8 为测距上限为 100,节点数为 600,测距误差分别为 4%,8%,16%,32%时,我们的系统定位 100 轮后测距误差与平均定位精度关系以及实例图.随测距精度的下降,定位精度也在降低,但即使很低精度的测距,本系统定位效果也比 DV-hop 效果好.文献[12]给出的定位方法,其最终用作定位的想法与本系统接近,虽然收敛过慢,但在多倍于本系统定位轮数的情况下所得到的结果与本系统大致相同(如图 6 所示),故不对文献[12]进行定位精度的比较.

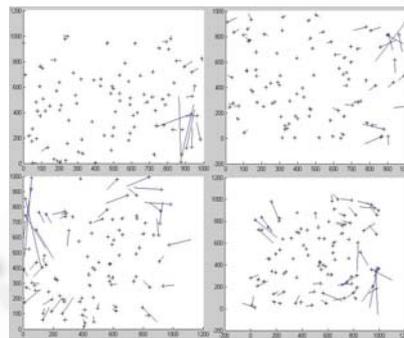
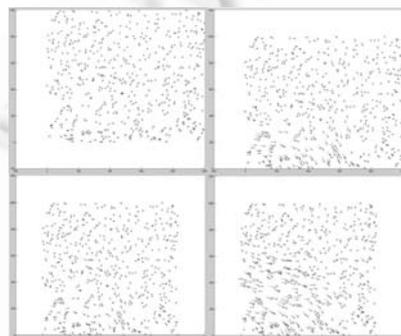


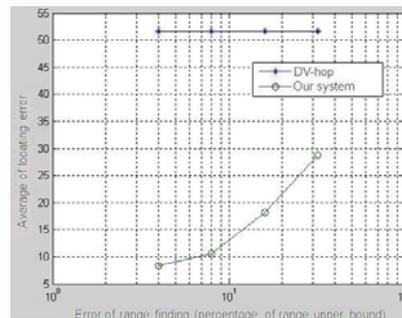
Fig.7 Results of localization by AHLoS

图 7 AHLoS 的定位效果实例



(a) An example result of locating by this system in our system. DV-hop is a range-free method so its results make no difference

(a) 本系统定位结果实例的统计,附 Dv-hop 同等情况下的结果,因为无需测距所以不变



(b) Influence of different ranging errors

(b)本系统定位实验结果针对不同测距误差

Fig.8

图 8

3.4 网络规模的变大

本系统针对网络规模做了如下实验,实验生成 10 组节点,仍令每次定位的测距范围上限为 100,测距误差不超过真实距离的 10%,我们生成 2 400 个节点,锚节点的坐标也改为边长为 2 000 的正方形的 4 个顶点,坐标分别

为 $B_1(2000,2000), B_2(0,2000), B_3(2000,0), B_4(0,0)$. 分别取 X,Y 坐标轴范围为(0,2000),(0,1000),(0,500),(0,200)共 4 组正方形区域以及对于每次测试添加对应的正方形顶点处的锚节点,对这 4 组正方形进行定位,其中在网络规模为 2000×2000 时,我们让定位轮数增加 1 倍以提高大规模定位的精度,其余设为 100 轮,结果统计如图 9 所示.

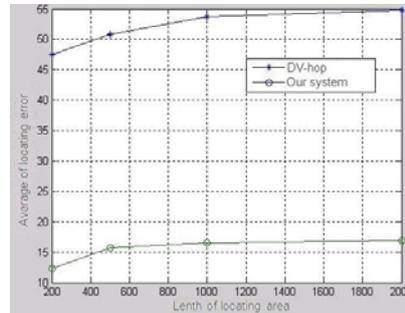


Fig.9 Relation between network size and locating error

图 9 网络规模的扩大与定位误差的增长关系

结果表明,本系统对网络规模的扩大有较强的适应性,随着网络规模的扩大虽然需要增加定位次数才能获得相对精确的定位结果,但其增加的幅度仍远低于规模扩大的幅度.

4 小结及未来工作

本文基于力的平衡的思想提出了一种进行 Ad-hoc 以及 sensor 网络进行定位的方法,过程中以弹力作为更新节点坐标的依据,对节点进行多轮定位,定位系统适用于节点测距精度不高的大规模网络,在许多网络环境中能够取得优于其他方法的定位效果,本文提出的定位方法与同类的基于力的思想的定位方法相比,具有更显著的收敛速度和更好的定位效果.

致谢 我们向对本文的工作给予支持和建议的同行表示感谢.

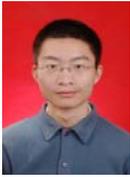
References:

- [1] Stojmenovic I. Position based routing in ad hoc networks. IEEE Communications Magazine, 2002,40(7):128-134.
- [2] Bose P, Morin P, Stojmenovic I, Urrutia J. Routing with guaranteed delivery in ad hoc wireless networks. Wireless Networks, 2001,7(6):609-616.
- [3] 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.
- [4] Savvides A, Han C, Strivastava MB. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors. In: Proc. of the ACM MobiCom. 2001. 166-179.
- [5] Savvides A, Park H, Strivastava M. The bits and flops of the n -hop multilateration primitive for node localization problems. In: Proc. of the WSNA. 2002. 112-121.
- [6] Liu YH, Zhou GM, *et al.* Long-Term large-scale sensing in the forest: Recent advances and future directions of GreenOrbs. Frontiers of Computer Science in China, 2010,4(3):334-338.
- [7] Tolle G, Polastre J, Szewczyk R, Culler D, Turner N, Tu K, Burgess S, Dawson T, Buonadonna P, Gay D, Hong W. A Macroscope in the Redwoods. In: Proc. of the ACM SenSys. 2005. 51-63.
- [8] Werner-Allen G, Lorincz K, Johnson J, Lees J, Welsh M. Fidelity and yield in a volcano monitoring sensor network. In: Proc. of the OSDI. 2006. 27.

- [9] Li M, Liu Y. Underground coal mine monitoring with wireless sensor networks. TOSN, 2009,5(2):1-29.
- [10] Yang Z, Liu Y, Li XY. Understanding node localizability of wireless ad-hoc networks. In: Proc. of the IEEE Infocom. 2009. 1-9.
- [11] Niculescu D, Nath B. Ad hoc positioning system. In: Proc. of the GlobeCom. 2001. 2926-2931.
- [12] Nissanka B, Hari B, Erik D, Seth J. Anchor-Free distributed localization in sensor networks. In: Proc. of the SenSys. 2003. 340-341.
- [13] Yuan ZW, Liang JJ. Multi-Hops localization algorithm based on virtual force for wireless sensor networks. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2010,22(1):122-126 (in Chinese with English abstract).
- [14] Zou Y, Krishnendu C. Sensor deployment and target localization based on virtual forces. In: Proc. of the IEEE Infocom. 2003. 1293-1303.

附中文参考文献:

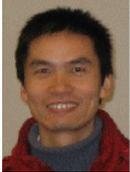
- [13] 袁正午,梁均军.基于虚拟力的无线传感器网络多跳定位算法.重庆邮电大学学报,2010,22(1):122-126.



官鲁斌(1987-),男,山东平度人,硕士生,
主要研究领域为无线传感器网络.



陈贵海(1963-),男,博士,教授,博士生导师,
主要研究领域为并行与分布式计算.



吴小兵(1979-),男,博士,讲师,主要研究
领域为无线传感器网络.