

普适计算中定位服务的参考点选择及误差分析

关沫^{1,2}, 赵海¹, 韩光洁¹, 张文波¹

(1. 东北大学信息科学与工程学院, 辽宁沈阳 110004; 2. 沈阳工业大学信息科学与工程学院, 辽宁沈阳 110023)

摘要: 通过分析多边定位法在未知节点的定位过程中产生的定位误差, 提出并证明了有关定位参考点布置的三个定理, 使在普适计算环境中可通过有针对性地布置参考点的位置来减小未知节点的定位误差. 在此基础上提出定位参考点选择算法, 该算法以参考点间的位置关系为基础, 通过选择合适的参考点对未知节点进行定位. 仿真实验结果表明所提出的定位参考点布置定理及选择算法能满足普适计算环境中移动对象实时定位的需求, 并具有较高的定位精度.

关键词: 普适计算; 定位服务; 参考点; 参考点选择算法; 定位误差

中图分类号: TP316 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2005)08-1425-07

Reference Point Selection of Locating Service and Error Analysis in Ubiquitous Computing

GUAN Mo^{1,2}, ZHAO Hai¹, HAN Guang-jie¹, ZHANG Wen-bo¹

(1. School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China;

2. School of Information Science & Engineering Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110023, China)

Abstract: The paper proposes and proves three theorems of location reference point placement based on the analysis of the location error produced when an unknown node is located using the multilateral localization method. Therefore the location error can be reduced through purposive placement of the reference points in the ubiquitous computing environment. The location reference point selection algorithm is proposed. This algorithm bases on the relative position of reference points and selects the optimum reference points to locate the unknown node. The simulation experiment results indicate that the location reference point placement theorems & selection algorithm can meet the requirement of mobile node's real time location in the ubiquitous computing environments and possesses the preferable location precision.

Key words: ubiquitous computing; locating service; reference point; reference point selection algorithm; location error

1 引言

普适计算是继主机计算、桌面计算之后, 出现的新一代计算模式. 普适计算的定义可总结为: 普适计算是信息空间与物理空间的融合, 在这个融合的空间中, 人们可以随时随地、透明地获得数字化的服务^[1,2]. 在普适计算时代, 具有计算和联网能力的设备将遍布世界的每一个角落. 就像现在的水、电、纸和笔一样随手可得, 从生活空间到工作空间, 具有计算能力的设备将无所不在, 人们无论走到哪里都能得到一定的计算能力. 同时, 计算机不再局限于桌面, 它将被嵌入到工作、生活空间中, 变为手持或可穿戴的设备, 甚至与日常生活中使用的各种器具融合在一起. 此时, 信息空间将与物理空间融合为一体, 这种融合体现在两方面: 首先, 物理空间中的物体将与信息空间中的对象互相关联, 例如, 一张挂在墙上的油画将同时带有一个 URL, 指向与这幅油画相关的 Web

站点; 其次, 用户在操作物理空间中的物体时, 可以同时透明地改变相关联的信息空间中对象的状态, 反之亦然.

普适计算中的上下文感知为用户提供其所在环境的上下文相关信息, 其中 80% 的信息和位置有关, 并且设备的许多行为都与其所在的位置相关联, 如实时跟踪用户所处的位置或将来电自动转接到离用户最近的电话等, 所有这些应用都需要判断目标对象在室内的位置, 以及与其它设备之间的相对位置关系. 因此, 定位服务是普适计算中的一个主要服务^[3-5]. 在由大量设备组成的普适计算环境中, 当移动对象要确定自己的位置时, 需要由相应的定位参考点为其提供定位服务. 当未知节点接收到多个参考点所提供的位置信息时, 为保证定位实时性的要求, 要从中选择出一些合适的参考点来估计其所在的位置信息. 如何选择合适的参考点使移动对象获取准确的定位信息, 并使其定位误差最小, 同时又能满足定位实时性的需求, 是本文所要研究的主要内容.

2 定位服务的参考点布置定理

2.1 二维空间中参考点的布置

二维空间中的节点定位问题可以通过节点之间的距离来计算。如果已知两个节点的坐标, 求解另外一个节点的坐标时, 可能产生定位值不确定的情况, 如图 1 所示。

由图 1 可知, 两个圆可能产生 p, p' 两个交点, 这样就不能唯一确定未知节点的位置。因此, 在二维空间中需要三个圆才能唯一确定未知节点的位置, 如图 2 所示。

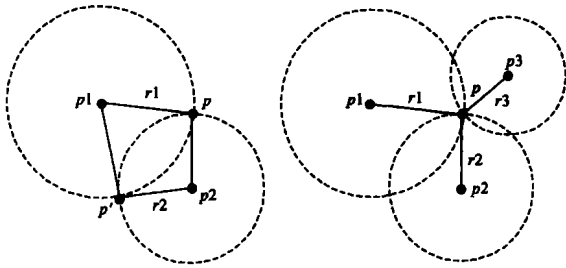


图 1 节点定位的不确定 图 2 二维空间中节点定位

假设已知有三个不同的参考点 $p_i = (x_i, y_i) (i = 1, 2, 3)$, 若要得到一个未知节点 p 的坐标 (x, y) , 需要计算 p_i 和 p 之间的距离 $r_i = d(p, p_i)$ 。以下将讨论这三个点如何布置, 才能使未知节点 p 的定位尽可能准确。

根据多边形定位法, 有下列方程组:

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = r_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = r_3^2 \end{cases} \quad (1)$$

其中, 对于 p_i 和 p 之间的距离 $r_i = d(p, p_i)$ 是通过节点之间的信号传播时间差和信号传播速度的乘积得到的。假设参考点 $p_i (i = 1, 2, 3)$ 发送信号的时间为 $t_{si} (i = 1, 2, 3)$, 而未知节点 p 接收信号的时间是 $t_{ri} (i = 1, 2, 3)$, 信号传播的速度是 V_c , 则对于 r_i 和时间差 $t_{ri} - t_{si}$ 的关系如下:

$$r_i = (t_{ri} - t_{si}) V_c$$

将式(1)展开, 并整理后得到:

$$\begin{cases} 2(x_1 - x_2)x + 2(y_1 - y_2)y = T_1 \\ 2(x_1 - x_3)x + 2(y_1 - y_3)y = T_2 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $T_1 = r_2^2 - r_1^2 - x_2^2 + x_1^2 - y_2^2 + y_1^2$, $T_2 = r_3^2 - r_1^2 - x_3^2 + x_1^2 - y_3^2 + y_1^2$ 。

这样, 该问题就可以被转化为一个线性方程的解, 于是得到定位算子 Δ 的值。

$$\Delta^2 = 4((x_1 - x_2)(y_1 - y_3) - (x_1 - x_3)(y_1 - y_2))$$

如果定位算子 Δ^2 不等于 0, 则未知节点 p 的位置是:

$$\begin{cases} x = \frac{1}{\Delta^2}(2T_1(y_1 - y_3) - 2T_2(y_1 - y_2)) \\ y = \frac{1}{\Delta^2}(2T_2(x_1 - x_2) - 2T_1(x_1 - x_3)) \end{cases} \quad (3)$$

当定位算子 $\Delta^2 = 0$ 时, 线性方程的解无穷大, 即节点 p 不能通过三个参考点 $p_i (i = 1, 2, 3)$ 来定位。因此, 不能利用在同一条直线上的三个点来确定未知节点的位置, 如图 3 所

示。通过引理可以给出定位算子 $\Delta^2 = 0$ 的几何解释。

引理 二维空间中的三个节点 P_1, P_2, P_3 , 当且仅当 P_1, P_2, P_3 在同一条直线上时, 定位算子 $\Delta^2 = 0$, 否则定位算子 $\Delta^2 \neq 0$ 。

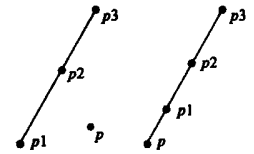


图 3 参考点共线

推论 通过不在同一条直线上的三个参考点可以计算未知节点的位置。若三个参考点位于一条直线上, 则未知节点的值将均趋近于无穷, 即当三个参考点在同一条直线上时, 无法对未知节点定位。

由上, 在实际定位过程中, 可通过计算定位算子 Δ^2 的值来排除不能定位的错误。同时, 在布置或选取参考点时, 应尽量避免任意三个参考点在同一条直线上的情况, 即使定位算子 $\Delta^2 \neq 0$ 。

2.2 定位参考点布置定理

上述对于节点之间距离的计算是假定这个距离是绝对准确的情况下进行的, 然而检测误差的发生是不可避免的。以下假定这个误差的范围是在 $(0, \epsilon)$ 之间, 即当两个节点之间的距离为 r 时, 那么定位距离的真实值就是在 $(r, r + \epsilon)$ 之间。

图 4 中每个节点所构成的圆, 如果没有误差, 三个圆相交就能唯一确定那个未知节点。而在存在误差的情况下, 则构成一个小区域, 如图 4 中三个圆相交围成的小区域, 记为 C_{p1} , 而该区域的面积则表示定位误差的大小。那么如何才能使该区域最小, 达到最小的定位误差, 是以下要讨论的内容。

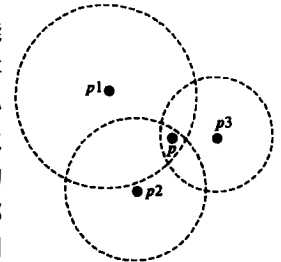


图 4 定位误差区域

定理 1 当 $\alpha_{1,2} = \alpha_{2,3} = \alpha_{3,1} = \frac{\pi}{3}$ 时, C_{p1} 的面积 $\text{area}(C_{p1})$ 达到最小值。即当三个参考点之间形成等边三角形时, 所计算的未知节点的定位误差最小。同时, 这三个参考点构成了室内环境中的最小定位单元。

证明: 通过推导, 可得到下面的公式:

$$\text{area}(C_{p1}) = 2\epsilon^2 \tan \frac{\alpha_{1,2}}{2} + \tan \frac{\alpha_{2,3}}{2} + \tan \frac{\alpha_{3,1}}{2} \quad (4)$$

而对于 $\alpha_{1,2}, \alpha_{2,3}, \alpha_{3,1}$ 来说, 有如下关系:

$$\alpha_{1,2} + \alpha_{2,3} + \alpha_{3,1} = \pi$$

当 $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$ 时, 可推导出:

$$\begin{aligned} \text{area}(C_{p1}) &= 6\epsilon^2 \frac{1}{3} (\tan \frac{\alpha_{1,2}}{2} + \tan \frac{\alpha_{2,3}}{2} + \tan \frac{\alpha_{3,1}}{2}) \\ &\geq 6\epsilon^2 \tan \frac{\alpha_{1,2} + \alpha_{2,3} + \alpha_{3,1}}{6} = 6\epsilon^2 \tan \frac{\pi}{6} \end{aligned}$$

当 $\alpha_{1,2} = \alpha_{2,3} = \alpha_{3,1} = \frac{\pi}{3}$ 时, 该方程的等式成立。即当三个参考点之间的位置关系是等边三角形时, 未知节点的定位误差最小。这样, 在室内定位环境中, 由这三个参考点形成了一个最小的定位单元。证毕。

定理 2 在室内环境中, 当参考点与未知节点之间的距

离超过了信号的传输范围时,就需要在原有参考点的周围增加参考点,以形成新的等边三角形,而新增加的参考点的坐标,可以通过原有的参考点计算出来.因此,所有的参考点都可以由初始参考点的位置计算得到,称之为参考点的坐标是拓扑可复制的.

证明:为了计算的简便,将参考点按图 5 所示的位置布置.假设已知等边三角形 $\triangle abo$ 的三个顶点的坐标,而 c, d 点的坐标是未知的.通过等边三角形的位置关系可以很容易地求得未知点 c, d 的坐标.这样,当在室内环境中布置定位参考点时,只要知道一个等边三角形的位置坐标,则其余所有点的坐标都可以通过坐标的拓扑复制而被确定,并且这些点的坐标也是唯一被确定的.理论上通过无限次的复制可以使所有的等边三角形都能得到自己的位置坐标,而实际上由于室内环境的范围有限,因而可以有针对性的布置参考点.证毕.

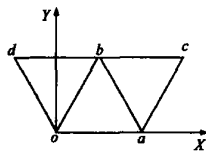


图 5 参考点的坐标拓扑可复制

定理 3 当有 $n(n \geq 1)$ 个等边三角形参与未知节点的定位计算时,随着等边三角形个数 n 的增多,未知节点的定位误差也随之减小,即定位误差是收敛的.

证明: (1) 当 $n = 1$ 时,由定理 1 可知,当三个定位参考点之间的位置关系是等边三角形时,所产生的定位误差比其它情况下产生的定位误差小,并可用 C_{p1} 表示未知节点的可能区域;

(2) 当 $n = 2$ 时,在未知节点定位的原有基础上增加了一个小区域,它代表着未知节点的可能区域,记为 C_{p2} .对于每一个参与定位的等边三角形的定位误差来讲,由于各等边三角形之间产生的定位误差是独立的.所以,当增加一个等边三角形时,未知节点的可能区域就是 $\bigcap_{i=1}^n C_{pi} = C_{p1} \cap C_{p2}$ (i 表示参与定位的等边三角形个数),即定位误差的可能区域是两个小区域的交集,这样就有 $\bigcap_{i=1}^n C_{pi} \subseteq C_{p1}$ 或 $\bigcap_{i=1}^n C_{pi} \subseteq C_{p2}$,即当有两个等边三角形参与未知节点的定位时,所得到的定位误差比一个等边三角形的定位误差小.

(3) 当 $n > 2$ 时,未知节点的定位误差就是这 n 个等边三角形所形成的 n 个小区域的交集,即 $\bigcap_{i=1}^n C_{pi} = C_{p1} \cap C_{p2} \cap \dots \cap C_{pn}$.这样未知节点的定位误差大小就是 $\bigcap_{i=1}^n C_{pi} \subseteq \min\{C_{p1}, C_{p2}, \dots, C_{pn}\}$.从中可得到,随着参与定位的等边三角形的增多,未知节点的定位误差将不断减小,从而达到更准确的定位.

所以,当有 $n(n \geq 1)$ 个等边三角形参与未知节点的定位时,随着等边三角形个数 n 的增多,未知节点的定位误差是逐渐减小的,即定位误差是周期收敛的.证毕.

在普适计算环境中,定位问题的初始条件是参考点的选择问题,定理 1 首先说明了等边三角形具有定位的“初始敏感性”;当定位对象在信号传输范围之外时,可利用定理 2 的“拓扑可复制性”来增加定位参考点,并形成新的等边三角形;当有多个等边三角形参与对未知节点的定位时,通过定

理 3 证明了未知节点的定位误差具有“周期收敛性”.这正符合混沌的三个主要特点,而这三个定理正是利用了混沌的初始敏感性好,并且可确定再生的特性实现对定位参考点的布置,并且能有效减小未知节点的定位误差.

为了能更精确的得到未知节点的位置,定位参考点一般都摆放在固定的位置,以避免由于参考点的移动而导致误差的积累.当在室内环境中布置一个等边三角形后,利用定理 2 的参考点坐标的拓扑可复制性,就可以在这个三角形的基础上扩展其余的等边三角形,使所有定位参考点都能得到自己的准确坐标,如图 6 所示.

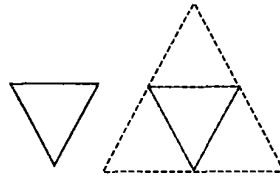


图 6 参考点的扩展

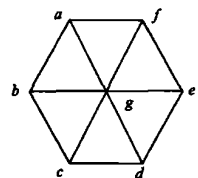


图 7 参考点的布置

为了最大限度的节省定位参考点的数量,可根据定理 2 按以下方式布置参考点,如图 7 所示,其中包括 6 个小的等边三角形 $abg, bcg, cdg, deg, feg, fag$,以及 2 个大等边三角形 ace 和 bfd .这样通过 7 个参考点就可以形成 8 个等边三角形,大大节省了参考点的数量和布置成本.在室内环境中,当参考点与未知节点之间的距离超过了信号的传输范围时,就需要在原有参考点的周围增加参考点来减少定位盲区.

3 定位参考点选择算法

3.1 二阶段定位算法

在普适计算环境下,定位算法的主要任务是如何利用一组已知位置的参考点,实现对移动对象的动态跟踪,并得到其运动轨迹^[6,7].由于普适计算设备在设计方面存在以下需求:功耗低,重量轻和物理尺寸比较小,因此同固定设备相比,其计算资源及存储资源都有限.而传统的定位算法,如二阶段定位算法在对未知节点的定位过程中,算法的时、空开销都比较大,因而很难在资源有限的普适计算设备上实现^[8-12].二阶段定位算法的定位过程简单描述如下:

(1) 每个已知位置的参考点发送广播包.广播包包含如下定位信息 $\{ID, T_{send}, (a, b)\}$.其中, ID 是参考点的标识; T_{send} 是发送消息的时间; (a, b) 是参考点坐标.

(2) 未知节点接收到多个广播包后,就可利用发送节点的发送时间 T_{send} 与接收节点的接收时间 T_{rece} 之间的时间差 T_{diff} 来计算节点之间的距离.这样,就可以利用最先收到的三个消息来初步计算未知节点的位置.

(3) 对于所有接收到的 N 个消息,按照 C_N^3 的组合,分别计算每个组合中的两点之间的距离,判断它们是否在一条直线上.

(4) 对每一组不在一条直线上的点,分别计算未知节点的位置 $\{L_1, L_2, \dots\}$.

(5) 最后,对集合中所有计算的位置取平均值 L_{avg} , L_{avg} 就是未知节点的位置估计.

可以看出,二阶段定位算法首先粗略计算未知节点的位

置,然后通过多个类似的过程来逐步提高未知节点的定位精度.当参考点数目很多的时候,能尽最大可能地减小定位误差.通常,在同样情况下这种算法的定位误差是最小的.但随着节点数量的增加,算法的计算量将以几何级数增长,无法满足定位实时性的要求.因此,该定位算法不适合在资源有限的普适设备中实现.

3.2 定位参考点选择算法

通过对二阶段定位算法的分析,结合上述的3个参考点布置定理,对传统的二阶段定位算法进行了改进,提出了适合在资源有限的普适设备中实现的定位参考点选择算法,其定位过程如下:

(1) 已知位置的参考点发送广播包,广播包包含如下定位信息 $\{ID, T_{\text{Send}}(a, b)\}$. 其中, ID 是参考点的标识; T_{Send} 是参考点信息发送时间; (a, b) 是参考点坐标.

(2) 未知节点接收到多个这样的定位消息.对于所有接收到的 N 个消息,按照 C_N^3 的组合,对每一个组合计算每两个点之间的距离,判断这三个参考点是否构成了等边三角形.

(3) 对于符合条件的等边三角形,利用发送时间 T_{Send} 与接收时间 T_{Rec} 之间的时间差 T_{diff} 计算节点间的距离,并利用最先得到的等边三角形计算未知节点的位置.

(4) 对每一组等边三角形,分别计算未知节点的位置 $\{L_1, L_2, \dots\}$.

(5) 最后,对集合中所有计算的位置取平均值 L_{avg} , L_{avg} 就是未知节点的位置估计.

定位参考点选择算法利用本文提出的3个参考点布置定理,有针对性的把三个参考点布置成等边三角形.这样,在定位计算的过程中,可以选择这组参考点来完成对未知节点的定位.该算法对二阶段定位算法做了适当改进,在定位误差较小的情况下,可以保证定位计算的实时性,能满足在资源有限的普适计算设备中实现定位的需求.

4 定位误差的分析

定位误差的大小与两个因素有关:一个是时间测量所引起的误差,它反映了时间测量值对定位精度的影响,包括时间测量误差以及节点的时钟精度引起的时钟不同步;另外一个参考点的位置所引起的定位误差,反映了参考点之间的相对几何位置关系对定位精度的影响.

本文主要对由参考点位置所引起的定位误差进行了定量分析,利用最优参考点得到的最小定位误差和其它随机分布参考点所形成的定位误差的对比结果,来验证本文所提出的参考点布置定理及选择算法.

最优参考点形成的定位误差大小可通过2.2小节中式

(4) 计算得到.当 $\alpha_{1,2} = \alpha_{2,3} = \alpha_{3,1} = \frac{\pi}{3}$ 时,将其带入到式(4)中,则式(4)的最小的值是:

$$\text{area}(C_{p1}) = 2\sqrt{3}\varepsilon^2$$

因此,当定位参考点之间的形状是等边三角形时,三个定位参考点所形成的 $\text{area}(C_{p1})$ 的平均误差区域的大小可以确定下来.

而通过随机的选择参考点形成的三角形参与未知节点的定位时,产生的定位误差大小可按以下方式确定.

由于在 $\alpha_{1,2} + \alpha_{2,3} + \alpha_{3,1} = \pi$ 的条件下, $\text{area}(C_{p1})$ 平均的误差区域和 $E(\text{area}(C_{p1}))$ 的期望相等.因此,以下的关系成立:

$$E(\text{area}(C_{p1})) = 2\varepsilon^2 E\left(\tan \frac{x}{2} + \tan \frac{y}{2} + \cot\left(\frac{x}{2} + \frac{y}{2}\right)\right)$$

其中, (x, y) 是和区域 D 具有同一分布的随机向量.

$$D = \{(x, y) | x \geq 0, y \geq 0, x + y \leq \pi\}$$

因此,向量 (x, y) 的概率分布是: $p(x, y) = \frac{2}{\pi^2}$, 则

$$\begin{aligned} E(\text{area}(C_{p1})) &= \frac{4\varepsilon^2}{\pi^2} \iint_D \left(\tan \frac{x}{2} + \tan \frac{y}{2} + \cot\left(\frac{x}{2} + \frac{y}{2}\right)\right) dx dy \\ &= \frac{4\varepsilon^2}{\pi^2} \left(\int_0^\pi \int_0^{\pi-x} \left(\tan \frac{x}{2} + \tan \frac{y}{2} + \cot\left(\frac{x}{2} + \frac{y}{2}\right)\right) dx dy \right) \\ &= \frac{4\varepsilon^2}{\pi^2} \left(\int_0^\pi (\pi-x) \tan \frac{x}{2} dx - 4 \int_0^\pi \ln \sin \frac{x}{2} dx \right) \end{aligned} \quad (5)$$

对式(5)的第一部分推导,得到以下关系:

$$\begin{aligned} \int_0^\pi (\pi-x) \tan \frac{x}{2} dx &= -2 \left((\pi-x) \ln \cos \frac{x}{2} \Big|_0^\pi + \int_0^\pi \ln \cos \frac{x}{2} dx \right) \\ &= -2 \int_0^\pi \ln \cos \frac{x}{2} dx \end{aligned} \quad (6)$$

将式(6)的结果代入式(5)中,可得到:

$$E(\text{area}(C_{p1})) = \frac{4\varepsilon^2}{\pi^2} \left(-2 \int_0^\pi \ln \cos \frac{x}{2} dx - 4 \int_0^\pi \ln \sin \frac{x}{2} dx \right)$$

通过变量变换,计算出随机选取参考点的平均误差区域大小是: $E(\text{area}(C_{p1})) = \left(\frac{24}{\pi} \ln 2 \right) \varepsilon^2$

所以,当有针对性的布置参考点时,可以提高定位精度:

$$\beta = \frac{\left(\frac{24}{\pi} \ln 2 \right) \varepsilon^2 - 2\sqrt{3}\varepsilon^2}{\left(\frac{24}{\pi} \ln 2 \right) \varepsilon^2} = 34.9\%$$

通过对随机摆放定位参考点的平均误差区域大小和最优参考点的误差区域大小的对比,可知当有针对性的布置定位参考点时,可使最优参考点的定位精度比随机摆放参考点的定位精度提高34.9%.

本节通过对定位误差的定量分析,验证了所提出的参考点布置定理及选择算法的正确性及有效性.最优参考点所能提高的定位精度是在理想条件下得到的,可由于各种不确定因素的存在,实际得到的定位精度很难达到理想值.但通过有针对性的布置参考点,能较大幅度地提高未知节点的定位精度.

5 仿真实验及算法评价

5.1 仿真环境及测试方法

对于本文所提出的定位参考点选择算法的验证,分为两个部分:(1) 针对普适计算环境下未知节点定位实时性的需要,本文以 Webit 2.0 为实验平台对该算法的实时性进行了测试. Webit 2.0 是一个基于8位微控制器的嵌入式计算应用平台,在该平台上进行测试的目的是说明该算法能够在资源有

限的设备中实现,并且可以用来验证该算法是否能够在室内环境下满足移动用户实际行走的需要;(2)利用网络仿真软件 OPNET 对多边定位法的无线环境进行模拟,通过加入一些噪声或者干扰等影响因素验证本文所提的参考点选择算法的有效性。

Webit.2.0 中的硬件平台是在 8 位微控制器和以太网接口控制器基础上设计而成,通过 UART 口或 I/O 口经过电平转换或功率驱动后与设备的控制线相连,实现对设备的管理与控制,并被嵌入到设备中成为设备不可分割的一部分。Webit.2.0 采用具有网络管理功能的 SNMP 协议,将设备引入网络化的管理范畴,其软件体系结构主要分为三层:嵌入式实时多任务操作系统层、thin TCP/IP 协议栈核心层和嵌入式 Web server 应用层。

为了比较本文提出的定位参考点选择算法和二阶段定位算法的定位实时性和定位误差,在仿真实验中使用超声波定位技术,并采用统一的仿真环境,即选取了一个 21m × 15m 的室内仿真环境,并有针对性地对参考点进行了布置,如图 8 所示。在图 8 中摆放了 21 个参考点和 1 个未知节点,每三个定位参考点为一组进行摆放,其位置关系是等边三角形,每组参考点间的距离是 4.6 米,并且每组节点间的位置都是拓扑可复制的。

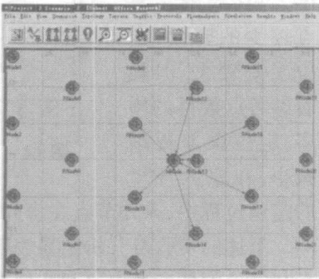


图 8 室内仿真环境中参考点的布置

由于参考点与移动节点之间的信号传播是有一定范围的,所以从图 8 中可以看出,移动节点只能与其周围的几个节点互相通信,要利用这几个节点来实现未知节点的定位。随着节点的不断移动,其周围所能通信的参考点的数目是不断变化的,参与定位的参考点数目也是不同的。因此,可以通过不断地调整参与定位的参考点数目和移动节点所处的位置进行相应的分析和比较。

5.2 定位误差的比较

本文提出的定位参考点选择算法是对二阶段定位算法的改进,在参考点数目 N 不同的情况下,对两种算法的定位误差进行了测试与比较,结果如图 9 所示。

由图 9 可以看出,随着定位参考点数目的增多,未知节点的定位误差逐渐减小,但开始时定位误差下降的速度较快,后来该值下降的速度趋缓。当参考点数目为 7 时,二阶段定位算法的定位误差为 8.2cm,定位参考点选择算法的定位误差为 7.1cm,与二阶段定位算法相比定位误差减小了 13.4%,降幅达到最大。而当参考点数目为 10 的时候,二阶段定位算法的定位误差要比参考点选择算法小,其原因是由于随着参考点数目的增多,等边三角形的数目增长速度相对于非等边三角形慢,使得其能够影响定位误差的因素减小。这样,在一定条件下二阶段定位算法的定位误差较小,但该算

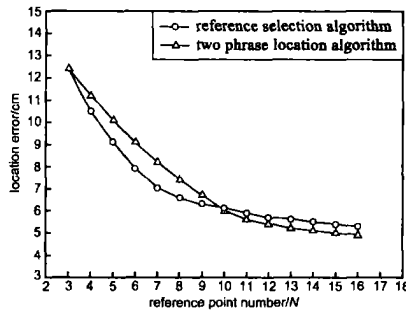


图 9 定位误差的比较

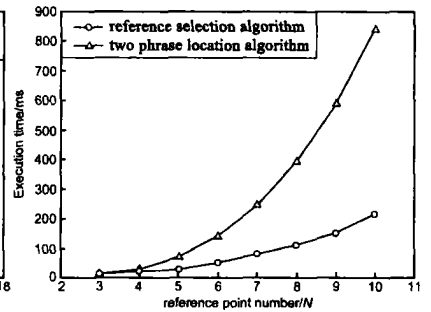


图 10 未知节点的定位时间

法的计算量将呈指数倍增加,它是通过增大计算量换取较高的定位精度。因此,在实际的室内定位计算中,可以通过使用定位参考点选择算法来减小未知节点在定位过程中的定位误差。

5.3 实时性测试

本文在 Webit.2.0 试验平台上对所提出的参考点选择算法和二阶段定位算法在参考点数目 N 不同的情况下,对两种算法的定位实时性进行了测试与比较,结果如图 10 所示。

从图 10 中可以看出,当定位参考点的数目为 7 时,参考点选择算法的时间开销是 75ms,而二阶段定位算法的时间开销是 245ms。随着参考点数目的增加,二阶段定位算法的时间开销呈指数性增长,而参考点选择算法的时间开销曲线的上升趋势比较缓慢。

上述对定位参考点选择算法的定位误差和定位实时性的分析结果表明,在室内环境中若在保证未知节点在定位过程中的实时性和较小的定位误差,其前提是不能有太多的参考点参与定位计算中来。因而,就需要考虑信号的传输范围,利用传输范围来控制参与定位的参考点数目。根据对现有数据的分析,当参考点数目为 7 时所得到的数据是最合适的,即如图 11 所示的参考点摆放方式(其中每个小的等边三角形的边长为 l)。

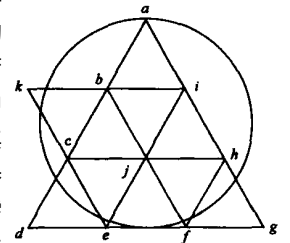


图 11 参考点信号的传输范围

由图 11 可以得到,当定位参考点的传输范围 $rf_{scope} \in [\frac{2\sqrt{3}}{3}l, \frac{3\sqrt{3}}{4}l]$ 时,能保证参与未知节点定位的参考点数目不多于 7 个,从而可保证较小的定位误差和较高的定位实时性。

一般来讲,人在室内环境中行走的平均速度是 0.7 米/秒。而一个未知节点在室内环境中的定位时间是:

$$Time_{all} = Time_{execution} + Time_{delay} + Time_{propagation}$$

其中, $Time_{execution}$ 是定位算法的执行时间; $Time_{delay}$ 是信号延迟时间; $Time_{propagation}$ 是定位信号在参考点与移动节点之间的传播时间差。

根据仿真环境中的等边三角形边长为 4.6m,并且通过最佳的参考点传输范围 $\frac{2\sqrt{3}}{3}l \leq rf_{scope} \leq \frac{3\sqrt{3}}{4}l$ 可以计算超声波在

传输半径内的信号传输时间范围是 $11.9\text{ms} \leq \text{Time}_{\text{propagation}} \leq 17.1\text{ms}$ 。当定位参考点数目为 7 时,参考点选择算法的执行时间为 $\text{Time}_{\text{execution}} = 75\text{ms}$,而传统的二阶段定位算法的执行时间为 245ms ,远远大于定位误差所允许的时间范围,不能够保证定位实时性。因此,若使本文的参考点选择算法能在有效的时间内满足定位实时性的要求,未知节点的定位时间的值应是 $\text{Time}_{\text{all}} \leq 100\text{ms}$ 。所以,信号延迟时间的允许范围是 $7.9\text{ms} \leq \text{Time}_{\text{delay}} \leq 13.1\text{ms}$ 。

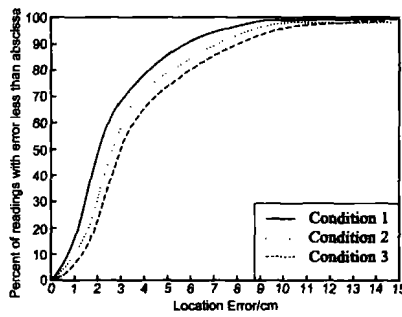


图 12 移动节点位置估计的准确率

这里测试的是算法的执行开销,如果考虑信号的传播时间差以及一些延迟时间等影响因素,当参与定位的参考点数目是 7 的时候,定位更新的速率可以达到 9~10 次/秒。因此,本文提出的参考点选择算法的实时性能够满足室内环境中的定位要求,并且优于二阶段定位算法。

5.4 算法的评价

当定位参考点按照图 8 所示进行摆放时,7 个参考点发射定位信息,在以下三个不同条件下随机选取 200 个未知节点作为测试点进行定位,每个测试点取样 500 次。

- (1) 参考点同时发射定位信号;
- (2) 参考点同时发射定位信号的同时,还加入一些噪音来模拟现实中的无线节点之间的通信情况;
- (3) 参考点同时发送定位信号的同时,还加入一些噪音和干扰信号来模拟现实中的无线节点之间的通信情况。

为了衡量定位系统的性能,通过将仿真实验得到的位置估计值和真实的检测值相对比,三种测试条件下的已经返回的定位误差的分布情况如图 12 所示,其中 X 轴表示定位误差, Y 轴表示读取返回定位信息的成功率。

从图 12 中可以看出,测量结果具有很好的重复性,读取返回定位信息在 95% 的成功率下,测量误差均小于 7.1 cm,具有很高的测量精度。并且该算法读取的返回定位估计的成功率,在没有干扰的情况下返回的信息较多,成功率较高;而在增加干扰的情况下,返回的信息较少,成功率较低,说明该算法较好的反应了室内定位的实际情况。

为了模拟移动节点在运动过程中的行走路径,分别对两种定位算法进行测试,移动节点的实际行走路径在这两个测试中相同,测试结果的比较如图 13 所示。

由图 13 可知,在将参考点按照图 8 所示进行布置的情况下,将实际计算出的移动节点的估计位置和实际位置相比,本文提出的定位参考点选择算法比传统的二阶段定位算法更接近于移动节点的实际行走轨迹。

两种定位算法对移动节点位置估计的均方根误差 RMSE,如图 14 所示。定位估计中计算 RMSE 的方法为:

$$RMSE = \sqrt{(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2}$$

其中, (x, y) 为移动节点的实际位置, (\bar{x}, \bar{y}) 为其估计位置。

当节点在移动过程中每个测试点对其位置进行估计时,图 14 中两种定位算法 RMSE 的比较结果表明,采用本文的参考点选择算法比二阶段定位算法所得到的未知节点的定位

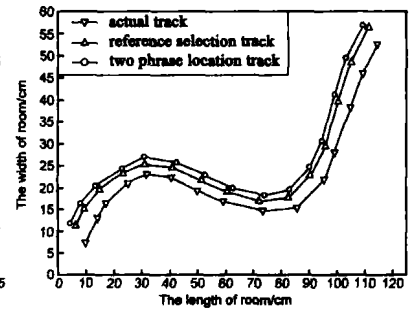


图 13 估计移动节点轨迹的比较

精度高。从 RMSE 的变化趋势可以看出,当其周围参考点较少的时候,定位误差较大,但随着参考点数目的增多,定位误差逐渐减小,在室内环境的定位过程中,未知节点在房间的边缘时会出现这样的情况。

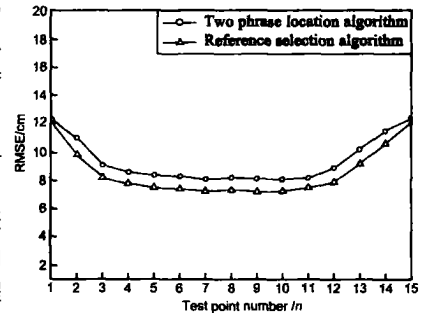


图 14 两种定位算法的 RMSE 比较

上述的实验及分析结果表明,在未知节点的定位过程中,参与定位的各参考点之间几何布局的差异会影响定位算法的性能和未知节点的定位精度。而本文提出的定位参考点选择算法与传统的二阶段定位算法相比,更适于在室内环境中对未知节点的定位需求,该算法具有较强的定位实时性,能在一定范围内减小定位误差,具有较高的定位精度。

6 结论

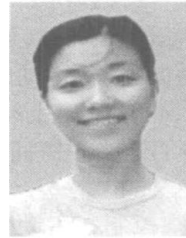
准确地获得未知节点的定位信息是普适计算环境中定位服务的一个关键问题。而在定位过程中不可避免的存在误差,本文对产生定位误差的原因进行分析后,提出当三个参考点之间的位置关系是等边三角形时,未知节点的定位误差最小。在此基础上提出并证明了关于参考点布置的三个定理,为在二维空间中的定位参考点布置问题提供了理论依据,使在室内环境的定位过程中,可通过有针对性地布置参考点的位置来减小未知节点的定位误差。结合定位参考点布置定理,对传统的二阶段定位算法进行了改进,提出了对未知节点定位的参考点选择算法,该算法以参考点之间的位置关系为基础,在多个可供选择的定位参考点中,选择出较优的参考点参与未知节点的定位计算。最后,通过仿真实验对本文提出的参考点布置定理及定位参考点选择算法的正确性及有效性进行了分析与验证。

参考文献:

- [1] 徐光佑,史元春,谢伟凯. 普适计算[J]. 计算机学报, 2003, 26(9): 1042-1052.
- [2] Weiser M. The computer of the 21st century [J]. Scientific American, 1991, 265(3): 66-75.

- [3] Rappaport T S, Reed J H, Woerner B D. Position location using wireless communications on highways of the future[J]. IEEE Communication Magazine, 1996, 34(10): 33- 41.
- [4] Chan Y T. A simple and efficient estimate for hyperbolic location[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1994, 42(8): 1095- 1115.
- [5] Savvides A, Han C, Srivastava M. Dynamic fine grained localization in ad hoc networks of sensors[A]. Proceedings of 7th ACM Int Conf on Mobile Computing and Networking (Mobicom) [C]. Rome, Italy: ACM press, 2001. 166- 179.
- [6] Dearle A. Toward ubiquitous environments for mobile users[J]. IEEE Internet Computing, 1998, 2(1): 22- 32.
- [7] Doherty L. Algorithms for position and data recovery in wireless sensor networks[D]. Master' s thesis, UC Berkeley, 2000.
- [8] Doherty L, Pister K S J, Ghaoui L El. Convex position estimation in wireless sensor networks[A]. Proceedings of IEEE INFOCOM 2001 [C]. Anchorage, Alaska: IEEE press, 2001. 1655- 1663.
- [9] Girod L, Estrin D. Robust range estimation using acoustic and multi modal sensing[DB/ OL]. <http://lecs.cs.ucla.edu/~girod/papers/IROS2001.pdf>, 2001.
- [10] Savarese C, Rabaey J, Beutel J. Localization in distributed ad hoc wireless sensor networks[A]. Proceedings of IEEE Intel Conf on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP) [C]. Salt Lake City: IEEE press, 2001. 2037- 2040.
- [11] Savarese C, Rabaey J, Langendoen K. Robust positioning algorithm for distributed ad hoc wireless sensor networks[A]. USENIX Technical Annual Conference 2002[C] Berkeley: USENIX Association, 2002. 317 - 327.
- [12] Priyantha N B, Chakraborty A, Balakrishnan H. The cricket location support system[A]. Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking[C]. New York: ACM press, 2000. 32- 43.

作者简介:



关沫女, 1976年生于辽宁沈阳, 东北大学博士研究生, 沈阳工业大学讲师, 主要研究方向为普适计算和嵌入式 Internet 技术. E-mail: Guanmosy@163.com.



赵海男, 1959年生于辽宁沈阳, 东北大学教授、博士生导师, 主要研究方向为普适计算与嵌入式系统、信息融合.

韩光洁男, 1972年生于黑龙江伊春, 东北大学博士研究生, 主要研究方向为普适计算.

张文波男, 1973年生于黑龙江伊春, 东北大学博士研究生, 主要研究方向为普适计算、嵌入式系统.