

混沌三角形定位参考点选择算法

孙佩刚^{1,2} 赵海¹ 韩光洁¹ 张希元¹ 朱剑¹

¹(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110004)

²(沈阳炮兵学院基础部 沈阳 110162)

(sunpg@neuera.com)

Chaos Triangle Compliant Location Reference Node Selection Algorithm

Sun Peigang^{1,2}, Zhao Hai¹, Han Guangjie¹, Zhang Xiyuan¹, and Zhu Jian¹

¹(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004)

²(Department of Fundamental Courses, Shenyang Artillery Academy, Shenyang 110162)

Abstract Positioning service is one of the basic services required by practical application of ubiquitous computing and how to obtain location information of an unknown node precisely is a key problem of positioning service in ubiquitous computing. However, positioning error is inevitable due to various potential errors caused by imprecise measuring instruments, improper measuring methods, etc. Firstly, a new error convergence theorem is presented and proved about how to reduce positioning error rapidly. The theorem is composed of three sub-theorems which indicate respectively how to make the smallest initial positioning error, how to reduce the initial location error more quickly by topological replication of reference nodes, and how to converge the initial location error to obtain minimal location error. Secondly, with a view of the actual application in ubiquitous computing, the optimal computing unit of reference nodes selection is proposed and the location reference node selection algorithm is put forward using topological duplication according to chaos triangles based on the presented error convergence theorem. Performance analysis and simulation experiments indicate that the location reference node selection algorithm is more suitably applied in resource-constrained environment of ubiquitous computing with less system cost and faster positioning error convergence than the traditional polygonal positioning algorithm at the same location accuracy.

Key words ubiquitous computing; wireless sensor networks; chaos triangle; location error; location reference node selection algorithm

摘要 定位服务是普适计算所必须提供的基本服务之一。然而由于测量误差的存在,定位误差在所难免。首先围绕如何减小定位误差,提出并证明了误差收敛定理,揭示了不同位置的参考点对定位误差的贡献规律;其次针对普适计算的实际应用,提出了参考点选择的最佳计算单元和混沌三角形定位参考点选择算法。性能分析及仿真实验表明,所提出的定位参考点选择算法较传统的多边形定位算法在满足相同定位精度需求的情况下,所需的系统开销小、定位误差收敛速度快,更适合为资源受限环境下的普适计算定位服务所使用。

关键词 普适计算;无线传感器网络;混沌三角形;定位误差;定位参考点选择算法

中图法分类号 TP393.17

普适计算的上下文感知为用户提供其所在环境的上下文相关信息,其中约 80% 的信息和位置有关^[1-2]. 因此如何及时准确地获取移动用户的位置信息,以便主动向用户提供所需定位服务已成为当前普适计算必须解决的关键课题.

现有的绝大多数定位算法^[3-5]大都包含如下几个基本步骤:1)距离(或角度)测量;2)初始定位计算;3)选择更多的参考点进行迭代计算. 在距离测量时,测量误差在所难免,这必然导致了在初始定位计算后引入定位误差. 通过引入冗余的参考点进行迭代计算,可以逐渐减小定位误差,直至满足应用所需的定位精度要求. 一般地,节点间距离或角度的测量技术常用的有 RSSI, TOA, TDOA 和 AOA 等^[6-7]. 在获得节点间的距离(或角度)后,定位计算多采用三边定位法、三角定位法或极大似然估计法等来计算未知节点的位置^[8-9]. 三边定位法存在着较大的定位误差;三角定位法要求未知节点的天线或天线阵列能够精确探测出参考点发射电波的入射角,这对节点的硬件配置要求较高^[10];而最大似然估计法由于引入了较大的计算量而使得定位的实时性差^[11].

本文以无线传感器网络的定位跟踪作为普适计算定位服务的特定实现范例^[12],以 Crossbow 公司 MicaZ 无线传感器网络节点所提供的接收信号强度显示(receive signal strength indicator, RSSI)值进行节点间距离的测量与评估. RSSI 随着节点间距离增加、障碍物阻拦等的影响,距离测量误差较大,这直接导致初始定位误差变大. 通过分析不同位置的参考点对定位误差贡献的大小,提出并证明了定位误差收敛定理,在此基础上,针对普适计算的实际应用环境,提出了定位参考点的最佳计算单元及定位参考点选择算法,并对算法性能进行了分析与仿真测试.

1 相关定义及引理

定义 1. 将需要定位的未知移动节点称为定位点,可能为携带普适终端(无线传感器节点)的用户,也可能为无线通信的终端设备;将参与定位的已知节点称为参考点,一般为已知自身位置的传感器节点或基站.

定义 2. 任意给定一个初始形状的三角形,在经过某种几何变换之后,可以得到具有某种特性的三角形序列,这些序列是收敛的;当无限次变换之后,

序列的极限就已经被确定了;而每个序列(或轨道)的性质都敏感地依赖于初始三角形形状的选取;把这一类的三角形序列称为混沌三角形序列).

引理 1. 对于任意给定的参数 α, β, γ , 当满足 $\alpha > 0$ 且 $\alpha \in \mathbb{R}, \beta > 0$ 且 $\beta \in \mathbb{R}, \gamma > 0$ 且 $\gamma \in \mathbb{R}$ 时,有以下不等式成立:

$$\alpha + \beta + \gamma \geq 3 \sqrt[3]{\alpha\beta\gamma}. \quad (1)$$

证明. 设 x, y, z 为大于 0 的实数, $\alpha = x^3, \beta = y^3, \gamma = z^3$, 则不等式(1)等价于如下不等式:

$$x^3 + y^3 + z^3 \geq 3xyz. \quad (2)$$

经过适当变换和因式分解,得到:

$$x^3 + y^3 + z^3 - 3xyz = (x + y + z) \cdot \frac{(x - y)^2 + (y - z)^2 + (z - x)^2}{2}. \quad (3)$$

因为 $x > 0, y > 0, z > 0$, 则式(3)恒大于等于 0. 当且仅当 $x = y = z$ 时,式(3)取 0 值,即 $x^3 + y^3 + z^3 - 3xyz \geq 0$ 成立. 将变量 x, y, z 替换为 α, β, γ , 于是不等式(1)成立. 通过证明过程可知,当且仅当 $\alpha = \beta = \gamma$ 时,不等式(1)中的等号成立. 证毕.

2 定位误差的收敛定理

2.1 初始定位误差

在三维空间中,知道了定位点到 4 个参考点的距离,就可以确定该点的坐标. 而在无线传感器网络中,坐标系大多采用二维空间,依靠 RSSI 进行测距,无需额外配置硬件及节点间时钟同步. 当假设不存在距离测量误差时,只要测出定位点到 3 个非共线的参考点间距离,通过三边测量法便可惟一确定定位点的位置^[13].

然而,限于节点通信芯片的能力,距离测量误差在所难免. 这里假定距离测量误差的范围在 $(0, \pm \epsilon)$ 之间, $\epsilon > 0$ 且为常数. 因此三圆不再交于一点,而是构成了一个小区域,记为 C_P . 设定位点 P 的坐标为 (x, y) , 可对该点进行定位,并能构成三角形的 3 个参考点 P_i 的坐标分别为 $(x_i, y_i), i = 1, 2, 3$, 到定位点的距离分别为 r_i, ϵ_i 为距离测量误差,令 C_{P_i} 代表第 i 个参考点的定位误差环, C_P 表示定位误差环的交集,也即初始定位误差区域, S_P 表示以定位点为圆心,以 ϵ 为半径的小圆. 利用集合表示,则有:

$$C_{P_i} = \{(x, y) | (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \leq (r_i + \epsilon_i)^2, (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \geq (r_i - \epsilon_i)^2\}. \quad (4)$$

$$C_P = \{ (x, y) \mid x \in \bigcap_{i=1}^3 C_{P_i}, y \in \bigcap_{i=1}^3 C_{P_i} \}. \quad (5)$$

为简化分析,假定距离测量误差大小相等,即 $\epsilon_i = \epsilon, i = 1, 2, 3$. 当 $\epsilon \equiv 0$ 时,式(5)中点集 C_P 将汇聚成为一点,而当 $\epsilon > 0$ 时, C_P 将是一个由几条弧线构成的不规则小区域,这个小区域的面积代表了定位误差的大小,如图1所示:

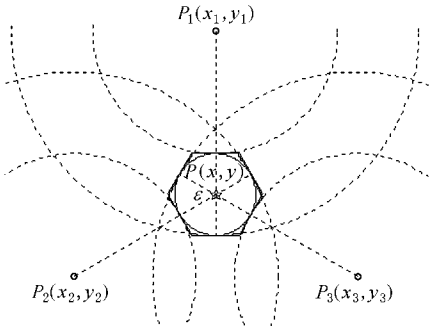


Fig. 1 The initial location error area.
图1 初始定位误差区域

当距离测量误差 ϵ 较小时, C_P 的边缘区域可以被线性化,并且被估计为 \tilde{C}_P ,如图2所示:

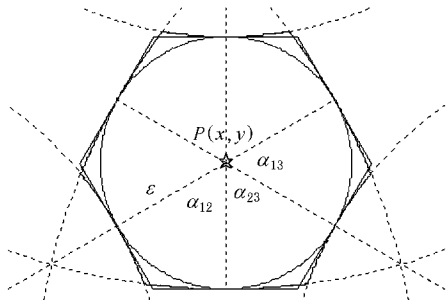


Fig. 2 The initial location error area after linearization.

为了便于显示,图2是对图1中间部分的局部放大.通过图2可知,原有的 C_P 为一个不规则的小区域,经过线性化后,恰恰成为了误差小圆 S_P 的外切六边形 \tilde{C}_P .这样,二维空间中节点的定位问题就转变为探讨如何选择合适的参考点,以使得 \tilde{C}_P 区域的面积 $S(\tilde{C}_P)$ 最小化.

2.2 定位误差收敛定理

定理1. 将定位点作为内点,选择不在同一直线上的3个参考点构成三边定位单元.当参考点形成等边三角形时,定位点的初始定位误差最小.

证明. 设 α_{12} 是向量 PP_1 与 P_2P 之间的夹角,设 α_{23} 是向量 P_2P 与 PP_3 之间的夹角,设 α_{13} 是向量

P_1P 与 PP_3 之间的夹角,则定理1可以等价证明:当 $\alpha_{12} = \alpha_{23} = \alpha_{13} = \pi/3$ 时, $S(\tilde{C}_P)$ 达到最小值.

因为 \tilde{C}_P 构成的区域为小圆 S_P 的外切六边形,所以有:

$$S(\tilde{C}_P) = 2\epsilon^2 \left(\tan \frac{\alpha_{12}}{2} + \tan \frac{\alpha_{23}}{2} + \tan \frac{\alpha_{13}}{2} \right).$$

而对于 $\alpha_{12}, \alpha_{23}, \alpha_{13}$ 来说,有如下关系式:

$$\alpha_{12} + \alpha_{23} + \alpha_{13} = \pi.$$

当 $x \in (0, \pi/2)$ 时,有 $\tan(x) > 0$,应用引理1可以导出如下表达式:

$$S(\tilde{C}_P) = 6\epsilon^2 \times \frac{1}{3} \left(\tan \frac{\alpha_{12}}{2} + \tan \frac{\alpha_{23}}{2} + \tan \frac{\alpha_{13}}{2} \right) \gg 6\epsilon^2 \times \sqrt[3]{\tan \frac{\alpha_{12}}{2} \times \tan \frac{\alpha_{23}}{2} \times \tan \frac{\alpha_{13}}{2}}.$$

当且仅当 $\alpha_{12} = \alpha_{23} = \alpha_{13}$ 时,上述不等式中等号成立,故有下式成立:

$$S(\tilde{C}_P) \geq 6\epsilon^2 \times \sqrt[3]{\tan \frac{\alpha_{12}}{2} \times \tan \frac{\alpha_{23}}{2} \times \tan \frac{\alpha_{13}}{2}} \geq 6\epsilon^2 \times \tan\left(\frac{\pi}{6}\right). \quad (6)$$

当3个参考点之间的位置关系成等边三角形时,可以使式(6)中的等号成立,同时定位点的初始定位误差达到最小. 证毕.

定理2. 当在选择新参考点时,根据初始等边三角形的参考点以混沌三角形序列的方式进行拓扑复制,所引入的新参考点是使定位误差减小的最佳参考点.

证明. 将所有的参考点按照初始等边三角形形状进行平铺布置,在未知定位点 $P(x, y)$ 的周围,会有多个参考点参与定位,如图3所示:

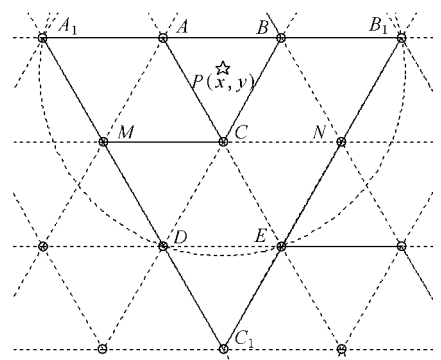


Fig. 3 Reference nodes selection by chaos triangles.
图3 基于混沌三角形的参考点选择

由于初始等边三角形 $\triangle ABC$ 具有三边对称性,

这里以 AB 边的拓扑复制为例,进行相关推导,其结论同样适用于 AC, BC 边的拓扑复制情况.

沿 AB 边向下,在 $P(x, y)$ 点周围,除了原参考点 A, B, C 之外,又新增了 $A_1, B_1, M, N, D, E, C_1$. 由于点 M, N, C_1 对于圆 S_P 的外切点分别与 B, A, C 的切点相重合,它们对于初始误差区域 \tilde{C}_P 没有贡献,因此不适于选作新的参考点. 而点 D, E 分别位于 $\triangle ABC$ 边 BC 及 AC 的延长线上,其对初始误差区域贡献的性能等同于点 A_1, B_1 . A_1 与 B_1 具有对称性,现以点 B_1 的引入为例,分析其对初始误差的贡献. 图 4 示意了由于点 B_1 的引入,误差区域的变化情况. 图 5 是对图 4 圆 S_P 外切部分的局部放大.

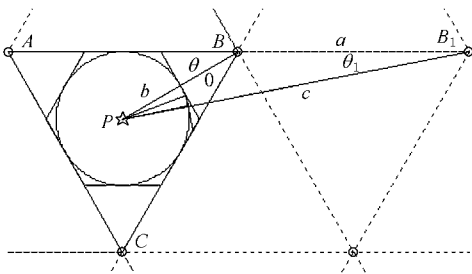


Fig. 4 The contribution of B_1 to initial error area.

图 4 新增点 B_1 对初始误差区域的贡献

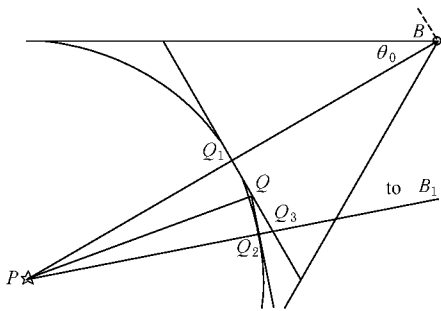


Fig. 5 The partial magnification of Fig. 4 at circumscribed part of S_P .

图 5 对图 4 中的圆 S_P 外切部分的局部放大

结合图 4 与图 5,由于点 B_1 的引入,使得初始误差区域 $\triangle PQ_1Q_3$ 面积缩小为四边形 PQ_1QQ_2 的面积. 根据图 4 的标注, PQ_1QQ_2 的面积可以计算为

$$S(PQ_1QQ_2) = \epsilon^2 \tan\left(\frac{\theta_0 - \theta_1}{2}\right).$$

沿 AB 边向右,采用与引入点 B_1 相似的方法,依次每隔 $|AB|$ 单位长度引入更多的点,直至趋向无穷多点,致使边 PB_1 与边 AB 趋于平行,则新增的

参考点使得误差区域变为

$$S(PQ_1QQ_2 \dots Q_n \dots) = \epsilon^2 \left[\tan\left(\frac{\theta_0 - \theta_1}{2}\right) + \tan\left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{2}\right) + \tan\left(\frac{\theta_2 - \theta_3}{2}\right) + \dots + \tan\left(\frac{\theta_{n-1} - \theta_n}{2}\right) + \dots \right].$$

由于点 A_1 的引入会产生具有与点 B_1 相同的效果,为此沿 BA 方向向左引入无穷多点. 同时,考虑沿初始等边 $\triangle ABC$ 的三边进行拓扑复制,当引入无穷多个参考点后,迭代计算后的误差区域记为 $S(\tilde{C}_P)$,其计算如下:

$$S(\tilde{C}_P) = 12\epsilon^2 \left[\tan\left(\frac{\theta_0 - \theta_1}{2}\right) + \tan\left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{2}\right) + \tan\left(\frac{\theta_2 - \theta_3}{2}\right) + \dots + \tan\left(\frac{\theta_{n-1} - \theta_n}{2}\right) + \dots \right]. \quad (7)$$

现在来考察一下引入新参考点的拓扑复制规律. 对照图 3,为了定位点 $P(x, y)$,根据定理 1,首先选择了能构成等边三角形的 A, B, C 作为参考点;其次,为了寻找对定位误差贡献较大的参考点,沿边 AB 作新的等边 $\triangle A_1B_1C_1$,引入了 3 个新增点,但由于点 C_1 对初始定位误差区域没有贡献,其真正有贡献的点为 A_1, B_1 . 以此类推,分别沿初始等边 $\triangle ABC$ 的三边,不断按边长整数倍的新等边三角形拓扑复制,从而引入了更多的参考点. 由于每次复制均为等边三角形拓扑复制,其基本形状及 3 个内角的映射关系均未发生任何变化. 因此,可将此拓扑复制方法视为周期为 1 的混沌三角形拓扑复制法^[14].

定理 3. 设距离测量误差为 ϵ ,采用混沌三角形拓扑复制法引入新的参考点,会使定位误差逐渐减小,当引入无穷多个参考点时,其定位误差收敛.

证明. 由图 5 可知,按照混沌三角形拓扑复制法,每次新引入的参考点都会对定位误差有新的贡献,新的误差区域将是对原误差区域取交集的结果. 为此,新增参考点必使得定位误差不断减小.

根据式(7),当引入无穷多个参考点后,其定位误差写成通项取极限形式为

$$S(\tilde{C}_P) = 12\epsilon^2 \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \tan\left(\frac{\theta_{i-1} - \theta_i}{2}\right). \quad (8)$$

式(8)中的通项先对半角取正切,后求和再取极限,复杂且不易求解. 为此,将其进行转换,由角度关系换算为边的关系. 为了便于推导,请参见图 4 中 $\triangle PBB_1$ 边的标注,设 $\triangle ABC$ 的边长为单位长度.

令 $\alpha_i = \theta_i - \theta_{i+1}$,下标 i 从 1 开始,于是迭代过

程中的三角形三边长可以表示为

$$\begin{aligned} a_i^2 &= 1; b_i^2 = \left(\frac{1}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} + i\right)^2; \\ c_i^2 &= \left(\frac{1}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left[\frac{1}{2} + (i+1)\right]^2. \end{aligned} \quad (9)$$

根据余弦定理可得 $\cos(\alpha_i) = \frac{b_i^2 + c_i^2 - a_i^2}{2b_i c_i}$, 因为

α_i 为锐角, 且 $\alpha_i \in \left(0, \frac{\pi}{6}\right)$. 因此, $\sin(\alpha_i) =$

$\sqrt{1 - \cos^2(\alpha_i)}$. 结合半角定理可得 $\tan\left(\frac{\alpha_i}{2}\right) =$

$\frac{\sin(\alpha_i)}{1 + \cos(\alpha_i)}$. 故式(8)可以表示为

$$\begin{aligned} S(\widetilde{C}_p) &= 12\epsilon^2 \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \tan\left(\frac{\alpha_i}{2}\right) = \\ &= 12\epsilon^2 \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \frac{\sin(\alpha_i)}{1 + \cos(\alpha_i)}. \end{aligned} \quad (10)$$

将式(9)代入式(10)中, 于是得到了关于 $S(\widetilde{C}_p)$ 的通项. 由于通项太长, 设 $\cos(\alpha_i) = f(i)$, 则其通项可以简记为

$$S(\widetilde{C}_p) = 12\epsilon^2 \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{1 - f(i)}{1 + f(i)}}. \quad (11)$$

由于每次引入新的参考点, 所形成的误差是取与上一次迭代误差的交集. 根据极限存在准则, 式(11)的极限一定存在, 且小于初始误差区域. 笔者试图通过解析方法, 求解式(11)中的极限值, 几次没能成功; 转而求其数值解, 取得了成功, 其值的前10位如下:

$$S(\widetilde{C}_p) = 3.160577192\epsilon^2. \quad (12)$$

为了便于比较, 取式(6)的数值解, 列其前10位如下:

$$S(\widetilde{C}_p) = 6\epsilon^2 \times \tan\left(\frac{\pi}{6}\right) = 3.464101616\epsilon^2. \quad (13)$$

根据参考文献[15], 当初始三角形为随机引入的参考点时, 初始定位误差为

$$E[S(\widetilde{C}_p)] = \left(\frac{24}{\pi} \ln 2\right)\epsilon^2 = 5.295254404\epsilon^2. \quad (14)$$

而误差小圆 S_p 的面积为

$$S(S_p) = \pi\epsilon^2 = 3.141592654\epsilon^2. \quad (15)$$

式(15)的物理意义是由于距离测量误差的存在, 误差小圆 S_p 的面积始终存在, 它是定位误差所趋向的理想下界. 式(14)的物理意义是随机选择不共线的3个参考点, 构成任意形状的三角形, 其所引

入的平均定位误差. 式(13)的物理意义是选择构成等边三角形的3个参考点, 所引入的初始定位误差. 而式(12)的物理意义是按照所提出的混沌三角形拓扑复制法, 引入无穷多个参考点, 迭代计算后所形成的误差.

以随机选择的3个参考点所引入的初始定位误差作为比较的对象. 当选择等边三角形时, 其定位误差提高了34.58%; 当按照混沌三角形引入无穷多个参考点后, 其定位误差提高了40.31%; 最极端情况下即定位误差区域达到小圆 S_p 面积时, 其定位误差提高40.67%. 这表明当选用等边三角形进行定位时, 初始定位误差有了很大程度的缩小, 而用混沌三角形进行拓扑复制引入参考点, 使得定位误差进一步缩小, 但受所引入点的个数、方向性等限制, 其定位误差将会逼近但永远不可能达到其最理想的误差下界. 但无论如何, 当进行无限次拓扑复制后, 其误差将趋向于某一恒定值, 即定位误差收敛.

3 定位参考点选择算法

3.1 定位的最佳计算单元

依据定位误差的收敛定理, 以混沌三角形的拓扑复制方法引入新的参考点可以快速有效地减少定位误差, 引入的参考点数越多, 定位误差将变得越小. 然而, 在实际系统的定位应用中, 受各种因素的制约, 不可能无限次地进行混沌三角形的拓扑复制, 其迭代次数与以下因素有关:

1) 定位精度. 迭代次数越多, 定位误差减小得越慢.

2) 实时性. 当参与定位的参考点越多, 相应的定位开销越大, 定位实时性能必然降低.

3) 系统资源. 迭代次数越多, 完成定位的计算量、节点间的通信开销也越大.

无线传感器节点的资源极其有限, 在满足应用所设定的定位精度、实时性需求下, 应尽可能节省系统资源. 一般地, 可以考虑在定位点的周围选择如图6所示的参考点参与定位计算, 即对初始等边三角形分别沿三边作一次混沌三角形拓扑复制, 共引入6个新增参考点, 构成了参考点选择的最佳计算单元.

在图6中, 取小圆上的 A, B, C 三点表示构成初始等边三角形的3个参考点; 在沿 $\triangle ABC$ 的一边作一次混沌三角形的拓扑复制时, 引入了3个新节点, 由于其中一个节点对误差没有贡献, 因此只有两

个节点被选作新参考点. 因此, 沿 $\triangle ABC$ 三边分别作拓扑复制, 共选择了 6 个参考点, 且位于以定位点 P 为圆心的圆上, 构成了参考点选择的最佳计算单元. 图 6 中新选择参考点标识的下标, 揭示了沿初始等边三角形哪条边的复制情况.

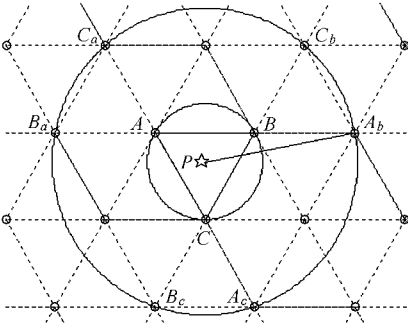


Fig. 6 The optimal computing unit of reference nodes' selection.

图 6 参考点选择的最佳计算单元

3.2 定位参考点选择算法

作为普适计算定位服务的可实现形式, 无线传感器网络的定位可以分为两类: 一类是节点自身定位, 一类是对监测对象定位. 本文研究的是后一类问题, 即如何布置及选择已知位置的参考点, 实现对移动对象的定位和跟踪. 在满足定位精度要求的前提下, 使得定位开销尽可能小.

由于传感器节点大都工作在资源受限环境下, 有着极其有限的计算、存储及通信能力, 能量资源极度受限. 传统的多边形定位算法采用的是随机布置和选择参考点, 在定位过程中, 系统开销大, 误差收敛速度慢, 因而很难在资源受限的传感器节点上实现.

本文针对传统多边形定位算法应用于传感器网络定位中存在的不足, 基于混沌三角形拓扑复制的误差收敛定理, 提出了定位参考点选择 (location reference nodes selection, LRNS) 算法, 算法主要过程如下:

1) 在监测区域内按照等边三角形平铺的方式, 布置已知自身位置的传感器节点, 等边三角形的边长设置为节点传输距离的 $\frac{1}{3}$ 左右, 初始化位置等相关信息.

2) 已知位置的参考点发送 $TTL=1$ 的探测包, 探测包包含如下定位信息 $\{ID(a, b)\}$. 其中 ID 是参考点的标识, (a, b) 是参考点的绝对位置坐标.

3) 未知节点接收到多个这样的定位信息. 对于所有接收到的 n 个探测包, 按照 C_n^3 组合, 分别以包

到达时的 RSSI 值计算节点间的距离, 判断每 3 个参考点是否构成了等边三角形.

4) 利用最先得到的等边三角形粗略计算未知节点的初始位置.

5) 按照混沌三角形拓扑复制方法引入新的参考点, 对每一组拓扑复制的等边三角形, 分别计算未知节点的位置评估集 $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots\}$.

6) 最后, 对集合中所有估计出的未知节点位置取均值 (\bar{x}, \bar{y}) , 最终的 (\bar{x}, \bar{y}) 就是未知节点的位置估计.

上述算法中, 定位点通过读取接收包的 RSSI 值, 结合 RSSI 对传输距离的衰减关系来获得距离测量值; 混沌三角形拓扑复制的迭代计算次数要根据应用所提出的定位精度设定.

4 性能分析与仿真测试

对于所提出的参考点布置及混沌三角形定位参考点选择算法的分析与测试, 采用了以下 3 种方法:

1) 通过计算不同参考点数目时的定位误差, 考察当参考点数目增多时, 定位误差的变化趋势; 2) 通过计算不同迭代次数时所引入的参考点数目, 考察随着迭代次数的增加, 系统开销的变化关系; 3) 利用 ns-2 模拟无线定位环境, 在引入相同参考点数目的情况下, 测试传统多边形定位法与混沌三角形定位参考点选择算法对定位点运动轨迹的跟踪性能.

4.1 定位误差分析

定位误差的收敛速度与通过混沌三角形拓扑复制所引入的参考点数目关系见图 7. 取距离测量误差 ϵ 为单位长度, 其纵坐标的单位为 ϵ^2 运算后所得的单位.

由图 7 可以看出, 随着所选择的参考点数目的增多, 未知节点的定位误差在逐渐减小, 但开始时定位误差下降的速度较快, 后来下降的速度趋缓, 渐近于式 (12) 中的 $3.160577192\epsilon^2$. 当 $n=3$ 时, 定位误差最大, 为初始定位误差. 按照混沌三角形拓扑复制所引入的参考点, 前 6 个点对初始误差区域的贡献最大, 由图 7 中可以明显地看出, 当参考点总数多于 9 个之后, 误差区域面积的减小趋于平缓, 这表明此时新引入的参考点对误差的贡献越来越小.

在对误差贡献最大的 9 个参考点中, 除了初始 3 个参考点外, 又引入了 6 个新参考点. 它们是分别沿初始三角形三边进行一次混沌三角形拓扑复制所

引入的参考点,恰恰构成了上文所提出的混沌三角形的最佳定位计算单元.因此,使用最佳定位计算单元,引入的参考点数目较少(9个),计算量低,且定位精度相当高,其所消去的误差区域占可消去总误差区域的95.48%以上.

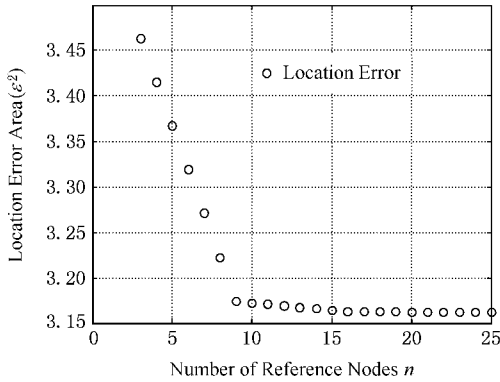


Fig. 7 Error converge rate vs. reference nodes number.

图7 定位误差的收敛速率与参考点数目之间关系

4.2 系统开销分析

为便于分析,本文将引入一个参考点所花费的系统整体开销,包括处理、通信及能量消耗等,计为一个定位开销单元(cost unit, CU).为了分析混沌三角形定位参考点选择算法对系统资源的需求性能,对比了多边形定位算法与定位参考点选择算法在每次迭代计算时所引入的系统开销情况.由于多边形定位算法采用随机布置参考点,系统所引入的参考点数目没有规律.为了便于比较,将两种算法的参考点布置均按照等边三角形进行平铺,当每次迭代计算时,对比统计以定位点为圆心相同半径内两种算法所引入的参考点数目,结果如图8所示:

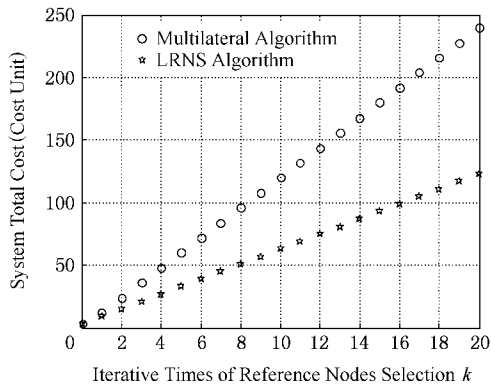


Fig. 8 System cost contrast between the two location algorithms.

图8 两种算法的系统开销对比

图8的横坐标不是引入的参考点数目,而是迭代计算的次数.如当迭代次数 k 为0时,表示初始

定位,当迭代次数 k 为1时,定位参考点选择算法引入了6个新增的参考点,而多边形定位算法引入了9个新增参考点,依此类推.随着迭代次数的增加,定位参考点选择算法的系统开销呈线性增加,而多边形定位算法的系统开销呈2倍斜率增加.可见在普适计算中,若保证以较小的系统开销获得较高的定位精度,其前提是不能进行太多次的迭代计算.当参考点构成定位的最佳计算单元时,定位开销仅需9CU,一般的传感器节点完全可以承受.

4.3 轨迹跟踪比较

为了比较所提出的定位参考点选择算法和多边形定位算法的性能,利用ns-2建立了统一的仿真环境,构造了一个 $80m \times 80m$ 的定位监测区域,分别以参考点均匀平铺和随机方式布置了400个节点,节点的工作参数按照典型传感器节点MicaZ的参数性能进行配置^[16].设置了一个移动的定位点,移动速度约为 $0.7m/s$.随着节点的不断移动,其周围所参与定位的参考点也在发生变化,定位点可以利用各参考点的位置信息进行实时定位.因此,可以对两种算法的跟踪轨迹与实际移动轨迹进行比较.由于RSSI距离测量误差较大,设置最大的 $\epsilon = 1m$,每次参与计算的参考点数目上限为9个,仿真结果如图9所示:

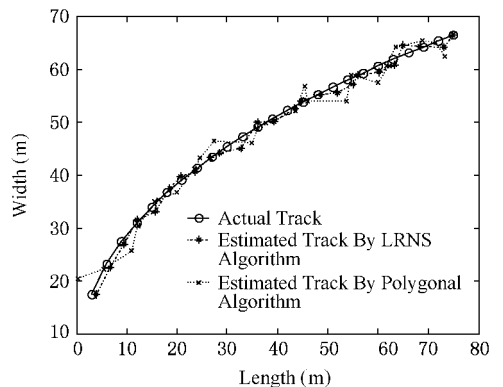


Fig. 9 Comparison between location tracks of two algorithms and real track.

图9 两种算法定位跟踪轨迹与实际移动轨迹比较

通过图9可以看出,在相同数目的参考点参与定位的情况下,定位参考点选择算法比多边形定位算法更准确,更加接近于移动节点的实际行走轨迹.

5 结束语

本文提出并证明了二维空间定位的误差收敛定理,并在此基础上,针对普适计算的实际应用,提出

了参考点选择的最佳计算单元以及混沌三角形定位参考点选择算法。

通过对算法的性能分析以及与传统多边形定位算法的仿真比较可知,在达到相同的定位精度时,定位参考点选择算法所需的系统开销小,定位误差收敛速率快,特别适用于普适计算下资源受限的定位应用。

致谢 感谢对本文工作给予支持和建议的同行,尤其向供职于沈阳工业大学的关沫副教授、沈阳理工大学的张文波副教授以及东北大学的宋纯贺硕士表示感谢!

参 考 文 献

- [1] Xu Guangyou, Shi Yuanchun, Xie Weikai. Pervasive computing [J]. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(9): 1042-1052 (in Chinese)
(徐光祐, 史元春, 谢伟凯. 普适计算[J]. 计算机学报, 2003, 26(9): 1042-1052)
- [2] G Cabri, L Leonardi, M Mamei, et al. Location-dependent services for mobile users [J]. IEEE Trans on Systems Man and Cybernetics, 2003, 33(6): 667-681
- [3] S Andreas, P Heemin, B S Mani. The n -hop multilateration primitive for node localization problems [J]. Mobile Networks and Applications, 2003, 8(4): 443-451
- [4] D Steer, D Fauconnier. Location services architecture for future mobile networks [C]. The IEEE 51st Vehicular Technology Conference, Tokyo, 2000
- [5] L Koen, R Niels. Distributed localization in wireless sensor networks: A quantitative comparison [J]. Computer Networks, 2003, 43(6): 499-518
- [6] N Dragos, N Badri. Ad hoc positioning system (APS) using AOA [C]. The IEEE INFOCOM 2003, San Francisco, 2003
- [7] P Deng, P Z Fan. An AOA assisted TOA positioning system [C]. In: Proc of the ICCT2000. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000. 1501-1504
- [8] J Hightower, G Borriello. Location systems for ubiquitous computing [J]. IEEE Computers, 2001, 34(8): 57-66
- [9] J Beutel. Geolocation in a PicoRadio environment: [Master dissertation] [D]. Berkeley: UC Berkeley, 1999. 1-120
- [10] B Jehoshua, G Jie, X J An. Localization and routing in sensor networks by local angle information [C]. In: Proc of the 6th ACM Int'l Symp on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc '05). New York: ACM Press, 2005. 181-192
- [11] J Aspnes, D Goldenberg, Y R Yang. On the computational complexity of sensor network localization [C]. In: Proc of the 1st Int'l Workshop on Algorithmic Aspects of Wireless Sensor Networks (ALGOSENSORS). New York: ACM Press, 2004. 32-44
- [12] Cui Li, Ju Hailing, Miao Yong, et al. Overview of wireless sensor networks [J]. Journal of Computer Research and Development, 2005, 42(1): 163-174 (in Chinese)
(崔莉, 鞠海玲, 苗勇, 等. 无线传感器网络研究进展 [J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(1): 163-174)
- [13] Sun Limin, Li Jianzhong, Chen Yu, et al. Wireless Sensor Networks [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 136-139 (in Chinese)
(孙利民, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感器网络 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. 136-139)
- [14] J Ding, L R Hitt, X M Zhang. Markov chains and dynamic geometry of polygons [J]. Linear Algebra and Its Applications, 2003, 367(7): 255-270
- [15] Han Guangjie. Research on reference point selection of location service in ubiquitous computing: [Ph D dissertation] [D]. Shenyang: Northeastern University, 2004 (in Chinese)
(韩光洁. 普适计算中定位服务的参考点选择问题: [博士学位论文] [D]. 沈阳: 东北大学, 2004)
- [16] J Polastre, R Szewczyk, D Culler. Telos: Enabling ultra-low power wireless research [C]. In: Proc of the Information Processing in Sensor Networks. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2005. 364-369



Sun Peigang, born in 1976. Received his B. A. 's and M. A. 's degrees from Changsha Artillery Academy and PLA University of Science and Technology in 1998 and 2004 respectively. He has been a lecturer of Shenyang Artillery Academy and Ph. D. candidate in the School of Information Science and Engineering of Northeastern University since 1998 and 2004 respectively. His main research interests include wireless sensor networks, ubiquitous computing and embedded systems.
孙佩刚, 1976年生, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为无线传感器网络、普适计算与嵌入式系统。



Zhao Hai, born in 1959. Professor and Ph. D. supervisor in Northeastern University. Senior member of China Computer Federation. His main research interests include ubiquitous computing and embedded system, information and data fusion, and complex networks.

赵海, 1959年生, 教授, 博士生导师, 中国计算机学会高级会员, 主要研究方向为普适计算与嵌入式系统、信息与数据融合、复杂网络等。



Han Guangjie, born in 1972. Ph. D. His main research interests include ubiquitous computing and embedded systems, and embedded Internet.
韩光洁, 1972年生, 博士, 主要研究方向为普适计算与嵌入式系统、嵌入式 Internet。



Zhang Xiyan, born in 1981. Since 2005, he has been a Ph. D. candidate in the Northeastern University. His current research interests include wireless sensor networks, and ubiquitous computing and embedded systems.

张希元,1981年生,博士研究生,主要研究方向为无线传感器网络、普适计算与嵌入式系统.



Zhu Jian, born in 1981. Since 2007, he has been a Ph. D. candidate in the Northeastern University. His current research interests include wireless sensor networks, and ubiquitous computing and embedded systems.

朱剑,1981年生,博士研究生,主要研究方向为无线传感器网络、普适计算与嵌入式系统.

Research Background

To serve users well, emerging ubiquitous computing applications need to know the physical location of things so that they can record and report them to users. When a given location attempts to be determined, triangulation can be done via lateration, which uses multiple distance measurements between known points, or via angulation, which measures angle or bearing relative to points with known separation. Owing to inevitable distance or angle error coming from measurements, location error is always in existence. In this paper, the error convergence theorem is presented and proved about how to reduce positioning error, and the law that reference nodes of the different positions cut error area is discovered. Taking the actual application in ubiquitous computing into account, the optimal computing unit of reference nodes selection is produced and the LRNS algorithm is put forward based on the approach of topological extension according to chaotic triangles. With decreasing costs of local computing and wireless connectivity, the LRNS algorithm can help researchers make better choices for the location systems they use in ubiquitous applications to compare the other location algorithms. Our work is supported by the National High-Tech Research and Development Plan of China (2001AA415320) and the National Natural Science Foundation of China (69873007).