

ANGEPS 系统中的局部定位: 单跳自组网的 三维 GPSfree 定位法

陈 茜, 王晓东, 周兴铭

(国防科技大学计算机学院国家并行与分布处理重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘 要: 本文提出了一个自组网中 GPSfree 的三维定位系统 ANGEPS, 阐述了 ANGEPS 的系统结构和其中单跳范围内的局部定位. 在给定的物理模型下, 文中提出了局部三维坐标系的建立与定位算法, 并在数学上加以描述和证明, 在 ns2 模拟器上进行了实验模拟. 模拟结果验证了局部定位方法的有效性.

关键词: 自组网; ANGEPS 定位系统; GPSfree; 最简基准图; 局部点

中图分类号: TP3931.1/14 **文献标识码:** A **文章编号:** 03722112 (2004) 0921422-04

Local Positioning in ANGEPS System: 3D GPSFree Positioning Method in OneHop Ad Hoc Networks

CHEN Xi, WANG Xiaodong, ZHOU Xingming

(National Laboratory on Parallel & Distributed Processing, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: GPS sometimes can not be used in positioning of ad hoc networks due to limits of landform or special applications. For such situations, we propose a GPSfree position system ANGEPS (Ad hoc Networks GPSfree 3d Position System). ANGEPS's architecture and local positioning method are described in detail. Under given physical models, a local 3d coordinate system building and positioning approach is introduced and proved mathematically. Simulation results by ns2 simulator prove that our method is effective.

Key words: ad hoc networks; ANGEPS positioning system; GPSfree; the simplest basal graph; local node

1 引言

自组网 (Ad Hoc Networks) 分为单跳 (Singlehop) 和多跳 (Multihop) 两类, 若一个节点发出的无线信号可直接被所有其它节点接收到, 此时系统称为单跳自组网. 当两个节点不在彼此的无线传输范围内时, 允许通过中间节点实现通信的中继, 这种网络称为多跳网络. 由于自组网灵活的组网方式, 高度的移动性和通信的不稳定性等特点, 使得相关的网络管理和路由方式都呈现出不同于传统固定网络和蜂窝网络的新特点. 其中自组网的位置管理是问题的核心基础. 随着无线通信技术和制造工艺等的发展, 拥有众多更加廉价、功能更强的无线节点的大规模自组网的应用是必然趋势.

由于网络规模的扩大, 路由协议必须具有良好的可扩展性. 为了解决这个问题, 必须依赖位置管理系统. 在 LAR 协议 (Y 2B Ko, et al 1998)^[1], GEO 协议 (T Imielinski, et al 1996)^[2] 中, 节点放弃维护庞大的路由表, 而代之以储存目标的位置信息, 由物理上最接近目标的节点担任转发工作; 在传感网络 (Sensor Networks) 中, 分布放置的传感器必须发回与位置相关的传

感数据; 在一些军事与民事应用中, 临时搭建的自组网发回准确的位置信息更是关键的侦察和救援数据 (Leland Joe, et al 1998)^[3] (E911, 1994)^[4]. 由此可见, 有效的位置信息的获取、分布、更新、作废等管理问题成为研究热点. 其中位置信息的获取问题, 简称定位问题, 又是所有位置管理问题的基础.

理想的自组网的定位系统, 应满足如下的要求:

- (1) 可用性与可扩展性: 避免系统不稳定的同时, 适应网络规模的变化;
- (2) 移动性与实时性: 可以对移动的节点进行跟踪, 动态更新位置数据;
- (3) 自组织性: 不依赖于其它固定设备;
- (4) 精确性: 提供的位置信息可以满足应用需求.

为了满足定位需求, 很多系统全部或部分依赖于 GPS. 这些系统在不同程度上受到 GPS 的限制, 如费用、功耗、信号干扰、精度以及地形制约等. 在一些特殊场合, 如战争条件下, GPS 卫星系统很可能失效. GPS 在自组网中的可用性与自组织性上的弱点阻碍了这些系统性能发挥, 这样就要求有更灵活的定位方式.

在世界范围内, GPSfree 定位的研究刚刚开始, 目前多借助于已知位置节点组成的网格定位, 并且局限于二维平面^[5~8]. 二维坐标的精确性在实际应用中受到很大限制, 在空中、多层建筑物内部以及考虑三维空间的战场侦察、数据传感等领域不适用. 网格定位限制了系统的可扩展性.

我们提出一种针对自组网的 GPSfree 的三维定位系统 ANGEPS (Ad hoc Networks Gpsfree 3d Position System), 满足对于自组网定位的四个要求. 本文先描述 ANGEPS 的框架, 再阐述局部三维定位法, 相关其余技术将由后续文章专门论述.

2 ANGEPS 中的局部定位

2.1 ANGEPS 的框架

ANGEPS 不依赖于 GPS 和位置已知点组成的网格, 其基本思想是: 首先, 获知单跳范围内相邻节点间距离, 利用三角函数法完成局部三维定位; 其次, 利用坐标变换, 通过条件泛洪逐步统一网络中所有节点坐标, 进而获得全网统一的三维坐标系. 图 1(a) 展示了 ANGEPS 的系统框架, 由物理测距部

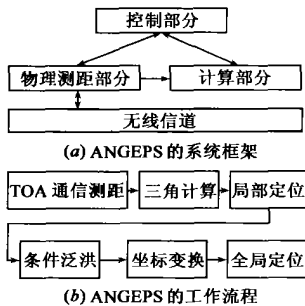


图1 ANGEPS

分完成获取节点间距离的工作, 并提供数据给计算部分; 计算部分负责进行三角计算和坐标变换; 控制部分控制各部分间的数据传递, 控制建立坐标系和泛洪的条件. ANGEPS 的工作流程如图 1(b) 所示. 局部定位指单跳自组网中节点的定位, 是 ANGEPS 定位的中间结果, 是全局定位的基础, 其本身也可单独应用于小型单跳自组网的定位. 本文研究局部定位法, 其余部分将另文发表.

2.1.2 研究假设

首先, 网络具有平坦的、全分布的结构, 即网络中所有节点相互独立, 功能对等, 性质相同, 不存在类似基站这样的中心节点;

其次, 采用理想无线同步通信模型, 网络节点采用无线全向天线互通信, 通信范围是以发射节点为圆心的标准球形;

第三, 使用 AOA/RSSI 方法, 依据节点间通信信号, 判断节点间距离;

第四, 所有网络节点共享无线信道, MAC 协议采用类似 IEEE802.11 标准的随机信道访问协议;

第五, 网络中传输的各种数据类型统一由数据包的形式传递;

第六, 在建立坐标系过程中, 假设节点不动或者少动, 即移动距离与无线通信范围不可比, 节点移动的情况将由另文具体论述.

第七, 节点的个数和分布满足局部坐标系的建立需要.

2.1.3 局部定位问题的形式化描述

一个自组网可在逻辑上抽象为一个连通的无向图 $G=(V, E)$. 其中 V 为节点集合, E 为边集合, $V \times V$

定义 1 $P(u, v) \in V, u \times V, v \times I \in E, (u, v) = x$, 则节点 u, v 叫做单跳邻居节点, 也叫相邻节点, 或称节点 u, v 相邻.

定义 2 设图 $G=(V, E)$. G 称为简单无向图, 若满足:

(1) $P \times I \in E, v \in u, v \in V, u \times V, (u, v) = x$, 且, $P(u, v) \in V, u \times V, v \in u_0 = u, u_1, u_2, \dots, u_{n+1} = v \in V, (u_n, u_{n+1}) \in E$, 即 G 为无自圈的、连通的无向图;

(2) $P(u, v) \in V, u \times V, v \in F = 3x | x \in I \in E, x = (u, v) \in A \in E, |F| = 0$ 或 1, 即任两个节点间至多有一条边.

定义 3 设图 $G=(V, E)$. G 称为基准图, 若满足:

(1) G 是简单无向图;

(2) G 是强连通的;

(3) $|V| \in E, 4$, 且 V 中节点不在一个平面上;

特别的, 当 $|V| = 4$ 时, G 叫做最简基准图.

定义 4 基准图中的节点叫做基准点, 最简基准图中的节点叫做最简基准点.

定义 5 与一个最简基准图中所有节点都相邻的节点组成的集合叫做此最简基准图的局部点集合, 此集合中的节点叫做此最简基准图的局部点.

定义 6 一个节点与其相邻节点无法组成最简基准图, 则这样的节点叫做盲点.

定理 1 局部点集合中的节点三维坐标可由它的最简基准图中的节点(最简基准点)三维坐标线性表出.

证明 由定义知, 最简基准点是空间不共面的四点. 以其中一点为向量起点, 其余三点为向量终点, 可确定空间的三个向量, 不妨记作 R_1, R_2, R_3 , 可证此三个向量线性无关. 否则若此三个向量线性相关, 可导出其中至少有两个向量互为线性表出, 不妨设为 $R_1 = kR_2$, 几何意义即为向量 R_1, R_2 在一条直线上, 亦即向量的共同起点与向量 R_1, R_2 的终点三点共线, 根据过直线和直线外一点有且只有一个平面, 可知最简基准点共面, 与定义矛盾. 由此 R_1, R_2, R_3 线性无关得证. 这三个线性无关的向量可构成三维空间的一个基底, 此三维空间中所有点在理论上都可由此基底线性表出. 证毕.

这样, 局部坐标系建立的问题转化为在基准图内建立坐标系的问题, 最简的, 是在最简基准图内建立坐标系的问题.

2.1.4 局部三维坐标系的建立

局部三维坐标系的建立可由以下算法步骤略说明:

任选网络中一个节点 O 为局部坐标系的原点,

(1) 由节点 O 发出 hello 报文;

(2) 凡是直接接收到该 hello 报文的节点都是节点 O 的单跳邻居节点, 它们各自返回一个 ack 报文; 不妨设节点 O 收到 n 个 ack 报文, 若 $n < 3$, 则报错, 结束; 若 $n \in 3$, 执行以下步骤:

(3) 在节点 O 以及它的所有单跳邻居节点组成的集合中, 对于包含节点 O 在内的 C_3^3 种 4 点组合进行验证, 运行算法 1, 检查该 4 点是否共面, 出现第一组符合条件的 4 点形成最简基准图, 执行下一步; 如果所有 C_3^3 种 4 点组合中没有一组形成最简基准图, 则报错, 结束;

(4) 运行算法 2, 建立局部三维坐标系, 结束.

图 2 是局部三维坐标系建立的示意图, 圆圈所示为最简基准点, 局部三维坐标系的方向取决于最简基准点间的相对位置, 所以这是一个相对坐标系.

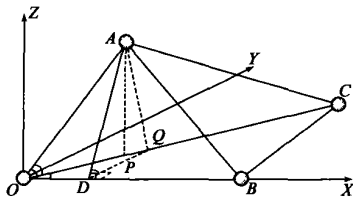


图 2 局部三维坐标系的建立

算法 1 验证最简

基准图 最简基准图是建立局部三维坐标系的必要条件. 算法 1 利用空间四个节点两两之间的距离, 计算验证它们是否共面, 进而确定它们是否组成最简基准图. 此算法中建立的局部二维坐标系是后续局部三维坐标系建立的基础.

如图 2, 应用 AOA/RSSI 方法, 获取节点 OABC 两两之间的距离. 不妨选取其中三个节点 OBC, 先行验证它们是否共线. 根据几何原理, 若 $|OB|$ 、 $|OC|$ 和 $|BC|$ 三者中有一方等于其余两方之和, 则 OBC 共线, 可导出 OABC 共面, 无法组成最简基准图. 若 OBC 不共线, 可由它们确定一个二维坐标系. 不妨选择节点 O 为原点, 以向量 \overrightarrow{OB} 方向为 X 轴正向, 以节点 C 所在 \overrightarrow{OB} 的一侧为 Y 轴正向, 节点 O、B、C 的二维坐标可表示为:

$O(0, 0)$, $B(|OB|, 0)$, $C(|OC| \# \cos N COB, |OC| \# \sin N COB)$, 其中

$$N COB = \arccos \frac{|OC|^2 + |OB|^2 - |CB|^2}{2|OC| \# |OB|}$$

二维坐标系建立完毕, 我们假设节点 A 不在此二维平面上, 就有:

$\cos N ADP = \frac{\cos N AOB - \cos N AOC \# \cos N COB}{\sin N AOC \# \sin N COB}$, 证明过程见附录 A. 当且仅当 $\cos N ADP \in [-1, 1]$, O、A、B、C 才能确定一个最简基准图.

算法 2 建立局部三维坐标系 根据算法 1 的验证过程, 若最简基准图被成功确定, 那么最简基准图中已先行建立了局部二维坐标系. 算法 2 在此二维坐标系的基础上, 依据四个最简基准点的空间关系建立三维局部坐标系.

如图 2, 我们令向量 \overrightarrow{PA} 的正向为 Z 轴正向, \overrightarrow{PA} 的长度为 A 在 Z 轴上的坐标值, P 在平面 OBC 上的坐标构成 A 在该平面上的 X、Y 二维坐标. 节点 A 的三维坐标可表示为:

$$A(A_x, A_y, A_z) = (|AO| \# \cos N AOB, |AO| \# \sin N AOB \# \cos N ADP, |AO| \# \sin N AOB \# \sin N ADP)$$

另外三个基准点的三维坐标为:

$$O(0, 0, 0), B(|OB|, 0, 0),$$

$$C(|OC| \# \cos N COB, |OC| \# \sin N COB, 0).$$

2.1.5 定位局部点

局部三维坐标系在最简基准图的基础上建立, 这里利用此坐标系定位该最简基准图的局部点. 图 3 是定位局部点的示意图, 假设 A_c 是最简基准图

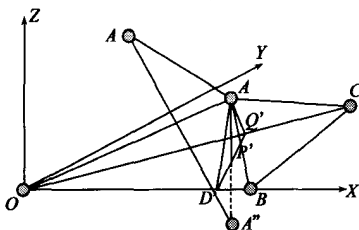


图 3 定位局部点

OABC 的一个局部点, 依据 A_c 和节点 OBC 之间的距离, 可以确定 A_c 的 Z 轴坐标. 由于 Z 轴已定, 这里 A_c 的 Z 轴坐标仅为绝对值, 即这样定位的局部点可能是其真实位置关于平面 OBC 的镜像点 A_d . 关于 A_c 的位置有以下三种可能: (1) A_c 在平面 OBC 上; (2) A_c 在平面 OBC 外, 并与 A 处在该平面同侧; (3) A_c 在平面 OBC 外, 并与 A 处在该平面异侧. 应用算法 1 的中间结果, 可得: $\cos N A_c Dc Pc = \frac{\cos N A_c OB - \cos N A_c OC \# \cos N COB}{\sin N A_c OC \# \sin N COB}$.

A_c 的三维坐标. 可表示为:

$$A_c(A_{cx}, A_{cy}, ? | A_{cz}|) = (|AO| \# \cos N A_c OB, |AO| \# \sin N A_c OB \# \cos N A_c Dc Pc, ? | A_{cz}| \# \sin N A_c OB \# \sin N A_c Dc Pc)$$

我们记

$$|AA_c|_1 = \sqrt{(A_x - A_{cx})^2 + (A_y - A_{cy})^2 + (A_z - |A_{cz}|)^2}$$

$$|AA_c|_2 = \sqrt{(A_x - A_{cx})^2 + (A_y - A_{cy})^2 + (A_z - (|A_{cz}|))^2}$$

根据几何原理易证, 若

$|AA_c| = \min(|AA_c|_1, |AA_c|_2)$, 则 A_c 与 A 处于平面 OBC 同侧, A_c 的 Z 轴坐标取正值; 若

$|AA_c| = \max(|AA_c|_1, |AA_c|_2)$, 则 A_c 与 A 处于平面 OBC 异侧, A_c 的 Z 轴坐标取负值; 若

$\cos N A_c Dc Pc = ? 1$, 则 A_c 与 A 处于平面 OBC 上, A_c 的 Z 轴坐标为 0.

3 实验分析

我们使用网络模拟器 n22 (Network Simulator, version 2) 对以上的定位算法进行模拟, 研究影响算法精度的因素. n22 是美国加州大学伯克利分校及 VINT 项目组开发的离散事件网络模拟器^[9], 它支持从数据链路层到应用层的各种网络协议的模拟, 后来卡内基梅隆大学的 Monarch 项目组在其中增加了无线通信的模块^[10], 当前 n22 已被广泛用于自组网的性能评估中^[11].

在模拟之前, 我们改进了模拟器中的移动节点类等, 使之拥有处理三维坐标的能力; 应用 dumb2agent 嵌入节点, 通过类似 ping 协议获知相邻节点, 并获取节点间的距离. 考虑到 NLOS 误差、测量误差和无线通信的不稳定性, 应用 shadowing 信号传播模式. 无线节点间采用全向天线互通信, 且各节点的无线通信范围相同, 都是半径为 R 的球形, 设节点个数为 N, 随机分布在边长为 L 的三维立方体空间区域内.

表 1 为所用物理参数的列表:

表 1 实验参数

参数	参数描述	参数值
N	网络中节点个数	10、20、30、40、60、80
R	无线通信范围(m)	150、250、...、450
L	立方体边长(m)	300

定义节点定位精度误差为节点实际位置与计算位置之间的距离与无线通信范围 R 的比值, 系统定位精度误差为网络中各节点定位精度误差的算数平均值. 盲点的定位精度误差

设为 2。

对于所有实验,节点数 Q 无线通信范围两个参数一定的情况下,将产生 50 次随机节点分布,结果值取这 50 次实验的平均值。

实验结果如图 4 所示,总体看来,随着节点数的增加,系统精度误差有明显的减少趋势,可见在一定区域内,节点数的增加对于系统性能的提高有正面作用。但是随着节点数的进一步增加,

性能的好转趋势变得平缓,最终有一个饱和的值。随着无线通信范围的扩大,系统精度误差也呈现减少,这主要是因为无线信号在传播过程中有衰减,其强度一般是与传播距离平方成反比,无线通信范围大的节点发射功率大,信号强度较大,丢包较少,所以提高了系统性能。在实验中,我们发现当 $R=150$ 时,系统精度误差相对较大,这是因为此时有一些节点在单跳范围之外,无法定位从而成为盲点,极大的影响了系统误差。从这一结果也可看出,盲点对于系统性能的影响巨大,要提高系统性能,可以通过增加节点数和增大节点无线发射功率的办法,更为主要的,是要完成多跳情形下的定位,尽量减少盲点数目。

4 结论与后续工作

本文提出了一种 GPS 自由的三维定位系统 ANGEPS 的框架,并阐述了其中的局部定位部分,局部定位是 ANGEPS 系统定位的中间结果,在理论上是后续工作的前提,在实际中可以单独应用于小型的单跳自组网。理论分析和模拟实验的结果表明,我们的局部定位方法获得了较为理想的效果。后续工作包括在局部定位基础上通过条件泛洪实现全局定位,对于控制泛洪的条件加以研究,加入对于节点移动性的考虑,改进盲点问题,以及对于整个 ANGEPS 系统的优化。

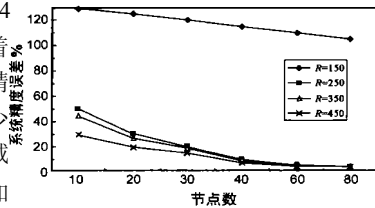


图 4 节点数以及无线通信范围对系统精度误差的影响

参考文献:

- [1] Y B Ko, N H Vaidya. Location-aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks [A]. in the Fourth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBiCom '98) [C]. Dallas, Texas, USA: IEEE, October 1998. 66- 75.
- [2] RFC 2009, GPS-based Addressing and Routing [S]. 1996.
- [3] Leland Joe, Phillip M Feldman. Fundamental Research Policy for the Digital Battlefield [M]. Washington DC, USA: RAND, 1998.
- [4] 94- 102, FCC, Notice of Proposed Rulemaking [S]. 1994.
- [5] T K Ostromann, Bell A. A Data Fusion Architecture for enhanced position estimation wireless networks [J]. IEEE Communication Letters, 2001, 5 (8): 343- 345.
- [6] S Capkun, M Hamdi, J P Hubaux. GPS-free positioning in mobile Ad Hoc networks [A]. Proc Hawaii Int Conf on System Sciences [C]. USA: IEEE, 2001.
- [7] N Bulusu, J Heidemann, D Estrin. GPS-free low-cost outdoor localization for very small devices [J]. IEEE Personal Communications, 2000, 7 (5): 28- 34.
- [8] D Niculescu, Badri Nath. Ad hoc positioning system (APS) [A]. Proc of GLOBECOM 2001 [C]. USA: San Antonio, TX, 2001.
- [9] UCB/LBNL/VINT Network Simulator ns2 (version 2) [DB/OL]. <http://www1.mash1.csl.berkeley1.edu/ns/>
- [10] Wireless and Mobility Extensions to ns2 [DB/OL]. <http://www.monarch.cs.cmu.edu/>
- [11] Research Using ns [DB/OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns2re2search.html>

作者简介:

陈茜女, 1974 年生于北京, 2000 年在国防科技大学计算机学院获得硕士学位, 现为国防科技大学计算机学院博士研究生, 主要研究方向为移动计算, 位置管理等。

王晓东男, 1973 年生于山东巨野, 博士, 主要研究领域包括计算机支持协同工作, 移动计算环境等。

周兴铭男, 1938 年生于上海, 中科院院士, 教授, 博士生导师, 主要研究领域包括超高性能计算机体系结构, 微处理器, 移动计算, 计算机支持协同工作等。