无线传感器网络三维自身定位方法

刘玉恒 蒲菊华 赫 阳 熊 璋

(北京航空航天大学 计算机学院, 北京 100191)

摘 要: 针对部署在三维空间的无线传感器网络,提出了一种传感器节点自身定位方法 APIT-3D (Approximate Point-In-Tetrahedron),通过判断传感器节点是否位于由锚节点组成的四面体的内部,筛选出可能的位置区域,并最终计算这些区域交集部分的重心,作为待定位节点的位置. 仿真实验表明,作为一种不基于测量设备的定位方法,APIT-3D可以达到节点通信半径的 40%以下的较高精度的三维定位,而且通信开销相比于二维定位方法增幅不明显. APIT-3D定位方法无需复杂的测距设备和昂贵的外部设施,且通信协议相对简单,因此是一种低成本、低功耗的无线传感器网络三维自身定位方法.

关 键 词: 无线传感器网络; 自身定位方法; 三维空间

中图分类号: TP 393

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965 (2008) 06-0647-05

Three-dimensional self-localization scheme for wireless sensor networks

Liu Yuheng Pu Juhua He Yang Xiong Zhang

(School of Computer Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A novel three-dimensional (3D) self-localization scheme APIT-3D (approximate point-in-tetrahedron) was presented for wireless sensor networks (WSNs). The target sensor performed APIT-3D test to judge whether it resided inside or outside of tetrahedrons, which narrowed down the possible location areas (PLA). Then, APIT-3D averaged the centers of gravity (COG) of the intersection of PLA as the unknown sensor's estimated location. Simulation results indicate that, as a range-free scheme, APIT-3D can achieve location accuracy within 40% of radio range, while the communication cost remains reasonable comparing with its 2D counterpart. Since APIT-3D depends on no ranging measures or global infrastructure, it presents a low-cost solution for self-localization of densely deployed and large scale WSNs in 3D spaces.

Key words: wireless sensor networks; self-localization schemes; three-dimensional space

在依赖于位置信息的无线传感器网络应用中,只有掌握了传感器节点的具体位置信息,才能够明确感知数据的实际意义[1];同时,了解传感器节点的位置有助于实现无线传感器网络基于地理信息的路由与数据查询协议[2]. 然而,无线传感器网络一般节点众多,分布区域广泛,部署方式随机,因此不可能预先知道所有节点的位置. 所以,无线传感器网络的节点定位问题就显得非常关键,迫切需要解决. 由于传统的全球定位系统(GPS, Global Positioning System)采用了价格高昂的无线通讯与时间同步设备,并不适用低成本、低功耗的无线传感器网络,因此传感器节点必须具备自身定位的能力.

近年来,国内外很多研究机构都开展了无线传感器网络自身定位方法的研究,取得了比较丰富的成果,其中典型的定位系统与方法有麻省理工学院设计开发的 Cricket[3]定位系统,加州大学洛杉矶分校提出的 AHLos (Ad-Hoc Localization System)[4]定位系统以及路特葛斯大学的基于AOA的 APS (Adhoc Positioning System based on

收稿日期: 2007-06-15

基金项目: 中国航空支撑科技基金资助项目 (05E551010); 北京市重点学科基金资助项目 (XK100060423)

作者简介: 刘玉恒 (1980 -),男,山东蓬莱人,博士生, hengly@cse.buaa.edu.cn.

Angle Of Arrival)[5]定位方法等.以上研究工作都是基于测量设备的定位方法,虽然具有较高的定位精度,但专用的测量设备引入了额外的功耗与成本.为了降低节点定位的代价,弗吉尼亚大学的研究者提出了一种不基于测量设备的定位方法APIT(Approximate Point-In-Triangle)[6],不基于任何额外的测距设备,硬件复杂度低,而且在节点随机部署的情况下仍可以实现较高的定位精度.

上述研究工作均是局限在二维空间中进行节点定位,而部署在三维空间的无线传感器网络相比于二维空间中的无线传感器网络具有更丰富的位置信息,且网络规模和分布密度也都有所增加,因此现有的二维定位系统受限于功耗与成本,很难推广到实际的三维空间应用中.而代表性的二维定位方法APIT的理论基础是面向二维平面的,并不能直接应用到三维立体空间中.因此需要研究一种节能而且廉价的方法解决三维空间中无线传感器网络的自身定位问题.本文提出一种适用于三维空间的无线传感器网络自身定位方法APIT-3D,能够在三维空间中有效的估计传感器节点的位置,且具有相对较低的通信开销.

1 APIT-3D定位方法

首先,假设研究对象是静止的无线传感器网络.网络中部署了少数已知自身位置的锚节点(Anchor Nodes),而且锚节点配备有高发射功率的无线收发器.为了确保三维立体的通信范围,锚节点和传感器节点都装备有全方位天线.APIT-3D定位方法的基本思想是:若未知节点判断自身位于某个由任意4个锚节点组成的四面体内部,则认为该四面体为一个可能位置区域(PLA, Possible Location Area).通过循环的选取不同的四面体进行测试,筛选出所有是PLA的四面体,从而不断缩小未知节点的周边区域,实现位置估计.因此,首先需要提供一种方法来判定传感器节点是否位于某个四面体之内,本文提出PIT-3D(Point-In-Tetrahedron)测试定理解决这个问题.

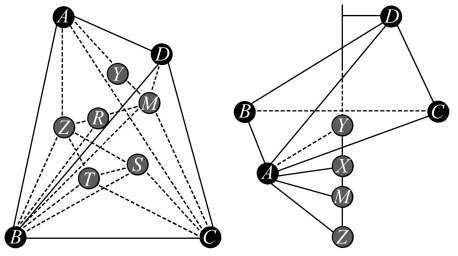
1.1 PIT-3D测试定理

要判定传感器节点是否位于某个四面体之内,可以将该问题形式化为:给定4个锚节点:$A(a_x, a_y, a_z)$, $B(b_x, b_y, b_z)$, $C(c_x, c_y, c_z)$和$D(d_x, d_y, d_z)$判断未知传感器节点M位于▲$ABCD$(▲表示四面体)内部或外部.

首先,可以提出如下2个命题:

命题1 若某点M位于▲$ABCD$内部,则当M沿任何方向移动时,新位置必定接近或远离A, B, C和D中的至少一个顶点(如图1a所示).

命题2 若某点M位于▲$ABCD$外部,则必定存在一个方向,当M沿此方向移动时,新位置会同时接近或远离所有4个顶点A, B, C和D(如图1b所示).



a 命题1 b 命题2

图1 PIT-3D定理证明示意图

命题1的证明如下:

证明 首先证明点M的新位置比M更靠近4个顶点中A, B, C和D中的至少一个顶点.如图1a所示,令点M在▲$ABCD$内部任意移动一小段距离,新位置记为点X,则分为以下2种不同的情况考虑:

1) 点X位于AM, BM, CM或DM中的任意一条线段上.在不失一般性的前提下,假设点X在AM上,命名为点Y,显而易见,$|AY| < |AM|$,即新位置比点M更靠近顶点A,得证.

2) 点X位于▲$MABC$, ▲$MBCD$, ▲$MACD$或▲$MABD$的任意一个四面体内部.同样,可以不失一般性的假设点X位于▲$MABC$内部.从点M做△ABC(△表示三角形)所在平面的垂线,该垂线与平面的交点记为Z.尽管Z可能位于△ABC的内部或者外部,但易于证明,这并不与不失一般性的前提冲突.仍然分为2种情况考虑:

①点X在线段MZ上,命名为点R.由于$|ZR| < |ZM|$,则根据勾股定理,$|BR| < |BM|$,说明新位置更靠近顶点B,得证.

②点X位于▲$MABZ$, ▲$MBCZ$或▲$MACZ$中的任意一个四面体内部,根据不失一般性的前提,假设点X位于▲$MBCZ$的内部,命名为点S,经点S作△BCZ所在平面的垂线,交于点T,且点T位于△BCZ内部.在△BCZ中,可以假设:$|BT| \geq |BZ|$且$|CT| \geq |CZ|$.则可以得到$\angle BZC \geq \angle BTZ + \angle CTZ > \pi$,显然这是矛盾的,因此,假设不成立,即$|BT| < |BZ|$和$|CT| < |CZ|$中至少有一个成立,假设$|BT| < |BZ|$.因为$|ST| < |MZ|$,则根据勾股定理,$|BS| < |BM|$,说明新位置更靠

近顶点 B,得证.

连接线段 AX, BX, CX 和 DX,同理可证明点 M 比点 X 更靠近 A, B, C 和 D 中至少一个顶点,即点 M 的新位置比点 M 更远离至少一个顶点.

证毕

证明　命题 2的证明如下:

如图 1b所示,对 ▲$ABCD$ 外部的任意一个点 M 来说,四面体的 4个平面总会有一个平面使得第四个顶点与点 M 分别位于这个平面的两侧. 在不失一般性的前提下,假设 △ABC 所在平面即为此平面,点 M 与顶点 D 分别位于此平面的两侧. 从点 M 做此平面的垂线,交点为 Y. 当点 M 沿此垂线向上移动到点 X 时,根据勾股定理, $|AX| < |AM|$, $|BX| < |BM|$, $|CX| < |CM|$ 且 $|DX| < |DM|$,说明新位置同时靠近所有 4个顶点 A, B, C 和 D;若点 M 选择此垂线作为移动线路,当点 M 沿此垂线向下移动到新位置点 Z 时,同理可证新位置同时远离所有 4个顶点 A, B, C 和 D.　证毕

根据以上 2个真命题,定义 PIT-3D 测试定理为:若存在一个方向,使得某点 M 在此方向上的一个邻居点比 M 同时接近或远离 ▲$ABCD$ 所有的 4个顶点 A, B, C 和 D,则 M 位于 ▲$ABCD$ 的外部,否则 M 位于 ▲$ABCD$ 的内部.

PIT-3D 测试定理能够准确的判断一个点位于某个四面体内部或外部. 因此,在静止的无线传感器网络中应用 PIT-3D 测试定理,必须解决如下 2个问题:

1) 未知节点如何判断邻居节点在某一个方向上比自己更远离还是更靠近锚节点;

2) 未知节点如何对所有方向都进行上述的判断.

然而在节点静止不动的情况下,这 2个问题都难以有精确的解决方法,因此必须提供一种近似精确的手段解决上述 2个问题.

1.2　近似实现 *PIT*-3*D* 测试定理

1.2.1　节点间的相对距离

问题 1) 可以通过比较未知节点与邻居节点各自测量的来自同一个锚节点的接收信号强度 (RSS, Received Signal Strength)来解决:在三维空间中,给定传播方向,无线信号的接收强度随传播距离单调递减. 这意味着,在给定的传播方向上,传感器节点接收到来自某个锚节点的信号强度越弱,则说明该传感器节点距离该锚节点就越远. 相邻 2个节点据此就能够判断出彼此相对于某一个锚节点的距离远近.

由于受到反射、多径衰减以及障碍物干扰等因素,无线信号传播会具有一定的不规则性[7]. 可以采用与文献[8]中类似的方法定义无线信号传播的不规则度 (DOI, Degree of Irregularity):

$$RSS_{real} = Random[(1 - DOI)RSS, (1 + DOI)RSS] \quad (1)$$

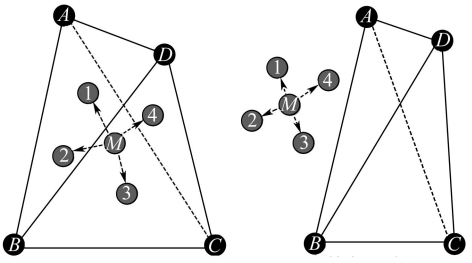
其中, RSS_{real} 表示真实的接收信号强度, RSS表示根据理想化传输模型得到的接收信号强度, Random (a, b) 表示一个均匀分布的随机函数,分布区间为 $[a, b]$, DOI的取值范围是 $[0, 1]$.

根据 RSS判断相对距离的远近并没有使用任何统计模型来根据接收信号强度计算节点间距离,因此仍可以认为是不基于测量设备的传感器网络自身定位方法.

1.2.2　APIT-3D 测试方法

问题 2的解决可以利用无线传感器网络节点密集分布的特点,未知节点选取所有邻居节点判断各自距离锚节点的远近,从而可以在最大程度上近似的实现对所有的方向进行测试.

基于 2个问题的近似解决方法,提出近似 PIT-3D (APIT-3D, Approximate Point-In-Tetrahedron)测试方法:若与某点 M 的所有邻居节点没有一个比 M 同时接近或远离 ▲$ABCD$ 所有的 4个顶点 A, B, C 和 D,则点 M 认为自己位于 ▲$ABCD$ 的内部 (如图 2a);否则,点 M 认为自己位于 ▲$ABCD$ 的外部 (如图 2b). 该方法在不要求节点移动的前提下,能够高度近似的实现 PIT-3D 测试.



a 内部示例　　b 外部示例

图 2　*APIT*-3*D* 测试方法示意图

1.3　*APIT*-3*D* 定位算法

基于 APIT-3D 测试方法,提出了实现 APIT-3D 定位方法. 在此方法中,锚节点向网络内的传感器节点广播信标消息,该信标消息包含了锚节点的 ID、位置信息等数据. 若未知节点能够接收到来自某个锚节点的信标消息,则将该锚节点记录为可见锚节点. 未知节点与邻居节点交换各自的可见锚节点信息,并根据接收信号强度判断自己与邻居节点距离锚节点的远近,从而将周边区

域划分为多个互相重叠的四面体,每个四面体由任意一组可见锚节点组成.未知节点任选一个四面体进行测试,判断自己是否位于这个四面体内部.如果未知节点在某个四面体内部,则称这个四面体为该未知节点的一个 PLA.对不同的四面体循环测试直到穷尽组合,则计算所有 PLA 交集区域的重心,并以此重心坐标的平均值作为未知节点的估计位置.APIT-3D定位方法的伪代码如下:

Receive location beacons $\{(x_i, y_i, z_i)\}$ from N anchors

Exchange N anchors RSS and Location information with neighboring sensor nodes

PLASet = Φ // the set of tetrahedrons in which I reside, also denoted as Possible Location Area

For (each tetrahedron $T_i \in$ $\binom{N}{4}$ tetrahedrons) {

If (APIT-3D(T_i) == TRUE)

PLASet = PLASet ∪ {T_i}

If (Tested Num(PLASet) == MAX) break;

}

/* Center of gravity (COG) calculation */

Estimated Position = (COG ∩ PLASet);

APIT-3D定位方法充分利用了传感器节点密集分布的特点,而这正是无线传感器网络最重要的特性之一,因此,在真实的网络环境中实现APIT-3D是完全可行的.此外,由于 APIT-3D方法是在单个传感器节点上进行的,因此是一种分布式的定位方法,避免了大量数据向中心节点传输而造成的能量损耗,从而延长网络寿命,更加符合无线传感器网络对低功耗、低成本的需要.

2 仿真实验与性能评估

2.1 实验参数

采用 Matlab对 APIT-3D定位方法进行仿真实验.实验中评估了以下实验参数对定位方法性能的影响:

1) 未知节点密度 (ND, Node Density):每个传感器节点的通讯半径区域内的平均节点数目;

2) 可见锚节点数目 (AH, Anchor Heard):每个传感器节点能够接收到信标的锚节点数目;

3) 锚节点与传感器节点的通讯半径比 (ANR, Anchor to Node Range Ratio);

4) 无线信号不规则度 DOI

2.2 实验结果与分析

2.2.1定位精度与可见锚节点

图 3是定位精度随着 AH变化曲线图.此图

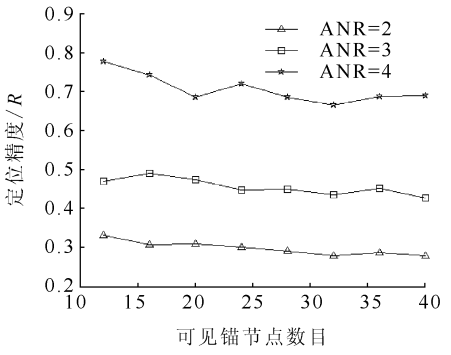


图 3 定位精度与可见锚节点数目的关系 (ND=30, DOI=0.1)

表明,定位精度随着 AH增多而逐渐提高.这是由于参与位置估计的锚节点数目越多,筛选出来的 PLA体积就越小,从而定位精度就越高.此外,还可以从图中发现,ANR越小,APIT-3D的定位性能表现的越好,这是因为 ANR越大,意味着锚节点分布的越稀疏,误差累计就越大,从而定位精度也就越低.当 AH≥40时,定位精度均可以控制在 0.4R(R表示节点通信半径的大小)左右,这是一般无线传感器网络可以接受的定位精度[6].

2.2.2 定位精度与节点密度

图 4定位精度随着 ND变化的曲线图.可见,随着传感器节点数目的增多,定位精度呈现微弱的增加趋势,这是因为 APIT-3D算法依赖于传感器节点彼此间的交互通讯,邻居节点越多,APIT-3D测试作出的判断可信度就越高.

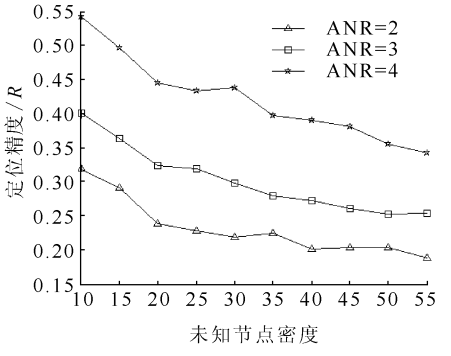


图 4 定位精度与节点密度的关系 (AH=32, DOI=0.1)

2.2.3 定位精度与信号传输不规则度

图 5描述了定位精度与 DOI的变化关系.从图中可见,定位结果随着 DOI的增大而略有恶化,这是因为信号传输的不规则会使得未知节点对锚节点的距离远近做出误判,导致 APIT-3D测试的错误率上升,从而降低了定位精度.但是 APIT不依赖节点间的跳数,因此 DOI对 APIT-3D的定位精度影响并不十分剧烈,这说明 APIT-3D

定位方法对于信号传输的不规则性具有较好的鲁棒能力.

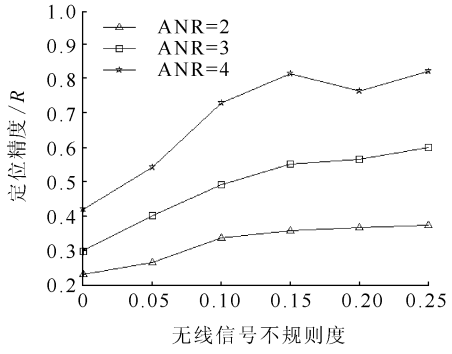


图 5　定位精度与信号传输不规则度的关系
(AH = 32, ND = 30)

2.2.4　通信开销

本实验在无通信冲突的传感器网络中,分别使用 APIT和 APIT-3D方法定位单个未知节点的通信开销情况.假设未知节点每发送 1 B的数据消耗 1个单位的能量,而由于锚节点的通讯半径是传感器节点通讯半径的 ANR倍,则可以粗糙的认为锚节点每发送 1 B的功耗是 ANR^2个单位.在二维空间中,假设未知节点接收到的可见锚节点的信标消息长度为 $B(\alpha)$,未知节点与邻居节点彼此交互可见锚节点位置信息表的交换消息长度为 $S(\beta)$,则此次定位过程的通信开销为

$$C_{APIT} = ANR^4 \cdot AH \cdot AD \cdot B(\alpha) + ND \cdot S(\beta) \quad (2)$$

而在三维空间中,节点坐标比在二维空间中要增加 1个单位的消息长度,因此 APIT-3D方法定位单个未知节点的通信开销为

$$C_{APIT\text{-}3D} = ANR^4 \cdot AH \cdot ND[B(\alpha) + 1] + ND[S(\beta) + 1] \quad (3)$$

式(2)与式(3)相减,得到 APIT-3D方法与 APIT方法定位单个节点时的通信开销之差:

$$\Delta_C = ANR^4 \cdot AH \cdot ND + ND \quad (4)$$

由式(4)可见,在 ANR与 ND一定的情况下,三维定位比二维定位有较大的通信开销,增加量随着可见锚节点数目的增多呈线性增加的趋势.但由于三维定位比二维定位需要更丰富的位置信息和更高的协议复杂度,因此这种线性增加的通信开销是合理的并可以接受的.

图 6描述了实验中 2种定位方法的通信开销随着可见锚节点数目的变化趋势.实验结果与式(4)是吻合的.

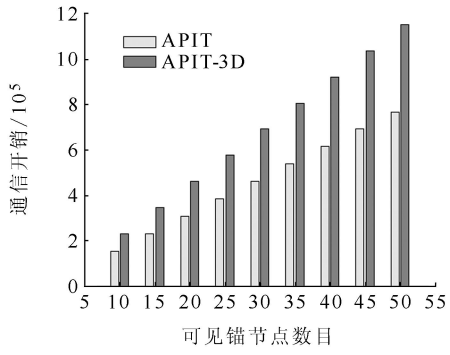


图 6　单节点定位通信开销与可见锚节点的关系
(ND = 30, ANR = 4)

3　结束语

在证明近似 PIT-3D测试定理的基础上,提出了无线传感器网络的三维定位方法 APIT-3D,并对该方法进行了大量的仿真实验.实验结果表明,APIT-3D定位方法在不显著增加通信开销的情况下,可以达到比较理想的定位精度.此外,APIT-3D定位方法对于不规则的无线信号传输具有较好的鲁棒性.本文的下一步工作将是研究一种适合资源受限的传感器节点的轻量级数据融合算法,尽可能的降低节点随机分布引入的误差.

参考文献 (References)

[1] Dragos N. Positioning in ad hoc sensor networks[J]. IEEE Network, 2004, 18(4): 24 - 29

[2] Rao A, Ratnasamy S, Papadimitriou C, et al. Geographic routing without location information[C]//MobiCom. San Diego: ACM Press, 2003: 96 - 108

[3] Priyantha N B, Chakraborty Anit, Balakrishnan H. The cricket location-support system[C]//MobiCom. New York: ACM Press, 2000: 32 - 43

[4] Savvides A, Han C C, Strivastava M B. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors[C]//MobiCom. Rome: ACM Press, 2001: 166 - 179

[5] Niculescu D, Nath B. Ad hoc positioning system (APS) using AOA[C]//InfoCom, IEEE. San Francisco: IEEE Press, 2003: 1734 - 1743

[6] He Tian, Huang Chengdu, Blum B M, et al. Range-free localization schemes for large scale sensor networks[C]//MobiCom. San Diego: ACM Press, 2003: 81 - 95

[7] Zhou Gang, He Tian, Krishnamurthy S, et al. Impact of radio irregularity on wireless sensor networks[C]//MobiSys. Boston: ACM Press, 2004: 125 - 138

[8] Hu Lingxuan, Evans D. Localization for mobile sensor networks[C]//MobiCom. Philadelphia: ACM Press, 2004: 45 - 57

(责任编辑:吴　琼)