

面向传感器节点定位的移动信标路径获取^{*}

李石坚, 徐从富⁺, 杨 阳, 潘云鹤

(浙江大学 计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310027)

Getting Mobile Beacon Path for Sensor Localization

LI Shi-Jian, XU Cong-Fu⁺, YANG Yang, PAN Yun-He

(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-571-87952308, E-mail: xucongfu@zju.edu.cn, http://www.cs.zju.edu.cn/people/xucf/index.html

Li SJ, Xu CF, Yang Y, Pan YH. Getting mobile beacon path for sensor localization. *Journal of Software*, 2008, 19(2):455-467. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/455.htm>

Abstract: In this paper, firstly, the number of positions for beacon is deduced to send a signal according to the acreage of ROI (region of interest); then a simple method is presented to calculate the coordinates of the sending positions in rectangular ROI; and then, a method is advanced based on virtual force to arrange the positions in arbitrary ROI; further, the wandering salesman problem (WSP) algorithm is applied to the positions sequence so as to get the optimal path touring it. When mobile beacon moves according to the optimal path and emits RF signals at every position, the sensors in ROI could work out their position with multilateration. Experimental results demonstrate that the proposed localization method is efficient and flexible.

Key words: sensor network; sensor localization; mobile beacon; virtual force; optimal path

摘 要: 首先,根据 ROI(region of interest)面积给出了充分三重覆盖此 ROI 所需要的信标发射位置数量计算方法;接着,针对矩形 ROI 提出了一种简单的信标发射位置确定方法;之后,针对任意形状 ROI 提出了利用虚拟力获取信标发射位置坐标的方法;最后,利用流浪旅行商算法获取遍历这些发射位置点的最优路径,并基于多边测量方法进行传感器节点定位.仿真实验表明,采用上述方法可以对传感器节点进行高效且精度可控的定位.

关键词: 传感器网络;传感器定位;移动信标;虚拟力;最优路径

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

在传感器节点组网过程中,由于各个节点采集到的数据必须结合其位置信息才有意义,且传感器网络的覆盖、布局和目标跟踪等操作都依赖于节点的有效定位^[1],所以,如何确定每个节点的自身位置成为无线传感网络领域的基础问题之一,通常称为定位问题.谈到定位,应用 GPS 系统是一个很自然的想法,然而,由于传感器网络中各节点的体积、能源以及整个网络费用方面的限制,在每个节点上装备 GPS 系统并不现实,而且 GPS 也无法在室内等环境下工作.因此,根据各传感器之间的相对距离来进行传感器定位的想法应运而生.根据所采用的不

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60402010, 60573056, 60604029 (国家自然科学基金); the National Basic Research Program of China under Grant No.2006CB303000 (国家重点基础研究发展计划(973)); the China Postdoctoral Science Foundation under Grant No.20060401039 (中国博士后科学基金)

Received 2006-04-30; Accepted 2006-11-21

同定位原理进行分类,目前常用的节点定位方法可分为两种^[2]:Range-Based 和 Range-Free.前者的特点是较为精确,但计算和通信开销较大;后者的特点是定位精度较低,但各方面开销较小,适用于低功耗、低成本的应用领域.因为本文更注重传感器网络在目标跟踪领域的应用,故较高精度的 Range-Based 定位机制是本文的研究重点.

应用 Range-Based 定位机制的传感器网络中的节点可分为两类:一类节点是不具备测量自身坐标能力的节点,我们称其为普通节点或未知节点,它们构成了网络的主体;另一类节点装备了 GPS 之类的定位工具,能够测量自身的坐标,通常被称为参考节点、灯塔节点、信标节点或 Beacon,它们散布在整个传感器网络部署的区域中.通过测量未知节点到信标节点的距离或角度信息,使用三边测量(trilateration)、三角测量(triangulation)或极大似然估计(multilateration)定位法就可以计算出节点位置^[3].显然,在这种定位方式中,信标节点的排布方式和数量对最终的定位精度影响很大^[4,5].但使用的信标节点越多,布设整个网络的开销就越大.此外,一旦定位工作完成后,信标节点就不那么重要了.所以,在传感器网络中,采用过多的信标节点会造成较大的浪费.鉴于此,文献[6-8]提出了基于移动信标(mobile beacon)进行节点定位的思想,利用 1 个或多个信标节点在“感兴趣区域(region of interest,简称 ROI)”中自由移动,同时发送无线电信号,未定位节点可据此测定自身与信标节点的相对距离或角度,然后根据多个测量结果进行定位.据我们所知,在以该方法为代表的各种基于移动信标的传感器定位方法中,除了文献[8]以外,几乎均未涉及信标路径选择问题,即最优的信标移动路径是什么?什么时候或者移动到什么地方信标应向未知节点发送信标数据包?之所以出现这一情况,主要是因为定位之前无法预知未知节点分布在何处,也就无法根据节点分布情况确定信标的最优移动路径.但解决该问题又是此类定位方法在具体应用过程中不可避免的一个重要环节.文献[8]虽然提出了一种螺旋式的信标移动路径,但这种路径无法充分而高效地覆盖 ROI,容易出现信标覆盖盲区,从而降低定位精度.

本文基于移动信标的传感器网络定位问题,着重提出一种新颖的信标最优移动路径获取方法,包括移动信标最优发射位置选择及拓扑结构设计,以及基于虚拟力的信标位置计算方法.本文第 1 节简要介绍传感器网络定位的研究现状.第 2 节论述信标发射位置拓扑设计,并针对矩形 ROI 和任意形状 ROI 给出信标最优路径获取方法.第 3 节给出基于上述方法的一系列仿真实验结果,以证明上述方法的有效性.最后对本文工作和未来研究方向进行总结和探讨.

1 相关工作

传感器定位的一般流程可大致分为 3 步^[9]:(1) 计算传感器到信标节点的距离或到达角度;(2) 用三边测量法(三角测量法、极大似然法等)计算传感器坐标;(3) 用迭代法优化上一步的计算结果.基于移动信标进行传感器定位的原理也大致按照这 3 步进行^[9]:当传感器被散布到 ROI 中后,一个移动的信标节点开始在它们中穿行,同时以一定的发射功率广播信标数据包,信标数据包中含有该信标的坐标.信标节点附近(信标信号传输范围内)的传感器节点可以接收到信标数据包,每个节点在收到包时都测量一下接收信号强度指标(received signal strength indication,简称 RSSI)并计算到信标节点的距离(亦可通过其他手段获取到信标节点的距离或角度等),根据到信标的距离值以及信标数据包中附带的信标位置(X_b, Y_b),每个节点计算自身位置的约束条件;当各节点获取 3 个以上信标数据包时即可通过三边测量法^[10]计算出自身的坐标.基于移动信标进行传感器节点定位具有一些明显的优点^[11]:首先,大量减少了需要的信标数量,从而降低了成本;其次,由于信标节点数量较少(理想情况下只需要 1 个信标),因此,用户可以控制信标的移动路径、广播信标数据包的位置(简称发射位置),从而提高定位效率和改善定位效果.

此外,文献[2]指出,现有的定位系统和算法还存在不少问题,典型的有:(1) 未知节点必须与锚节点直接相邻,锚节点密度过高,例如 Cricket,Cooperative ranging;(2) 定位精度依赖于网络部署条件.例如,DV-Hop 仅适用于密集部署的各向同性网络; n -hop multilateration primitive 和凸规划算法要求锚节点(anchor point)必须部署在网络的边缘;(3) 依靠循环求精过程抑制测距误差和提高定位精度.虽然循环求精过程可以明显地减小测距误差的影响,但不仅产生了大量的通信和计算开销,而且因无法预估循环的次数而增加了算法的不确定性.显然,若能提出有效的信标路径选择算法,将移动信标的传感器定位方法进一步实用化,则可以有效解决上述问题.信

标路径选择的基础是确定最优信标信号发射位置,相当于非移动信标的传感器定位中的信标位置选择问题,一些用于选择传感器位置的算法也可用于解决该问题。

除了 Sichertiu^[6]以外,还有一些研究者也针对基于移动信标的传感器节点定位问题展开了研究。Dutta 和 Bergbreiter 将超声波技术应用于计算传感器与移动目标之间的距离^[12],该技术也可用于计算移动信标和传感器之间的距离。Sun 和 Guo^[8]提出了一种基于移动信标的节点定位策略,首先使用到达时间法(time of arrival,简称 TOA)测算未知节点到信标的距离,再利用加权的质心法估算传感器节点的坐标。文献[13]提出了一种新型的 Range-Free 定位方法,该方法基于初等几何中的“弦的垂直平分线通过圆心”这一性质,选择性地求出两组信标位置连线的垂直平分线的交点,并用该交点坐标作为对未知节点坐标的估计值。上述方法在测定信标节点和未知节点的距离、计算未知节点坐标等环节作出了一定创新和贡献,但是均未涉及移动信标路径选择问题。Sichertiu^[6]在其论文中也仅提出:“移动信标的路径至少要保证每个未知节点可收到 3 个离其较近的非共线数据包;此外,为提高精确度,由信标信号发射位置形成的网格越紧密越好”。

我们扩展了 Sichertiu 的思想,认为选择移动信标路径需要注意如下两点:(1) 当信标沿路径移动时,需要使 ROI 中任意点均至少可以接收到 3 个不同的信标数据包,这样可以保证无论传感器如何散布均可进行定位;(2) 路径上信标发射信号的位置应尽可能地少,这样可以减少定位过程需要的时间,同时可以减少定位过程中传感器节点与信标节点的能量开销。基于这一观点,移动信标路径选择问题可分解为研究一系列信标发射位置对 ROI 的最优三重覆盖问题,以及如何寻找最优遍历这些信标发射位置的最短路径的问题。

2 移动信标路径获取算法

本节首先给出了信标发射位置的优化拓扑(三重优化覆盖),其特点是,当信标节点根据该拓扑发射信号时,信标覆盖范围内的任意点均可接收到 3 次以上信标信号,从而保证信标覆盖范围内的任意未知节点均可确定自身坐标。在此基础上,提出了一种针对矩形 ROI 的信标发射位置选择方法,之后,在虚拟力方法^[14,15]的基础上,提出了一种针对任意形状 ROI 的信标发射位置选择算法。基于旅行商算法最优遍历上述发射位置,即可获取信标移动路径。当信标在路径上移动时,可根据 RSSI 等方法测定信标到传感器的距离,根据多次测定的距离最终实现定位。

2.1 移动信标发射位置选择

第 1 节已经说过,最优信标路径(或最优发射位置序列)是保证定位效果和效率的重要条件。信标路径设计主要考虑两方面:首先,传感器节点的位置在定位前是未知的,所以设计的路径需使信标信号覆盖整个 ROI。由于测定节点坐标采用的是三边测量法(或极大似然法),根据应用该方法所需条件,ROI 中任何位置必须能收到 3 个以上非共线的信标信号;其次,与单个节点定位所需时间相比,信标节点在各个发射位置间移动需耗费较多时间,这将极大地影响整个算法的实施效率。同时,发射信标信号需要消耗信标的能量。因此,最优信标路径上的发射位置数应尽可能地少,路径总长应尽可能地短。

本文假设移动信标与传感器间的测距是通过 RSSI 方法实现的^[16],考虑到无线电信号在空气中传播的损耗,因此,我们假设每个信标发射的数据包仅能被一定区域内的传感器接收到,该区域通常为圆形,半径为信标发射半径 r ,记作信标覆盖范围。此外,还假设信标覆盖范围与 ROI 相比极小。移动信标最优发射位置选择问题对应的几何问题为:如何利用最少数目的半径为 r 的圆充分覆盖某个 ROI 区域,并使 ROI 中除边界外的每个点均至少被 3 个以上的圆覆盖,这些圆的圆心位置即为移动信标最优发射位置。

文献[17,18]提出:当所有传感器节点均具有同样的感知半径 r ,且整个传感器网络完全覆盖区域 ROI 时,最小化工作节点数量的问题即等价于最小化节点间重叠区域的问题。而当相等的 3 个圆 A, B, C 的圆心构成一个边长为 $\sqrt{3}r$ 的等边三角形时, A, B, C 圆形成的无漏洞重叠区域最小。因此有:若传感器网络顶点构成的 Delaunay 三角形均为边长为 $\sqrt{3}r$ 的等边三角形,则传感器网络无漏洞覆盖的区域面积最大。此时,各传感器覆盖范围将 ROI 划分为一系列紧密邻接的正六边形网格,每个网格以传感器所在位置为中心,边长为 r ,如图 1(c)所示。

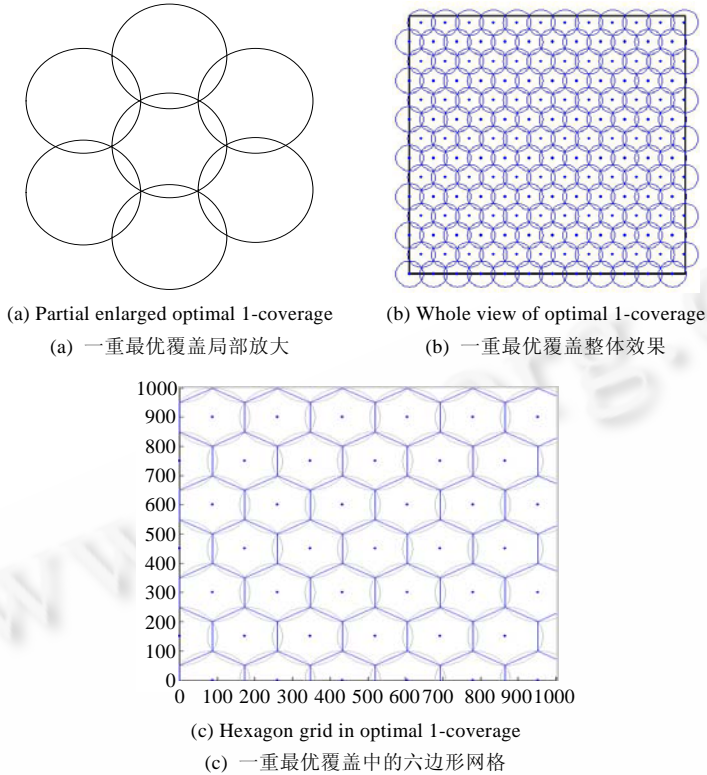


Fig.1 Optimal 1-coverage

图 1 一重最优覆盖

将上述结论应用于本文场景可知,当信标发射位置形成的 Delaunay 三角形均为边长为 $\sqrt{3}r$ 的正三角形时,可实现对 ROI 的重叠最小的完全覆盖,即对 ROI 的最优一重覆盖,如图 1(b)所示.进一步可给出如下定义:

定义 1. 若某信标发射位置集合 B_k 可被分成 K 个不相交的子集 $\{B_k^1, B_k^2, \dots, B_k^K\}$,且其中任意子集 B_k^i 均构成对 ROI 的一重最优覆盖,则称为 $B_k K$ 重优化覆盖 ROI.

K 重优化覆盖是很节约传感器资源且对 ROI 完全覆盖的一种覆盖模式^[19],已在 Ad hoc 网络的广播协议等问题中取得了较好的应用结果.由于三重覆盖即可保证 ROI 中任意位置均可收到 3 个以上的信标信号,足以完成定位过程,因此本文主要关注三重优化覆盖.

应用三重优化覆盖的前提是确定三重优化覆盖任意形状 ROI 所需的信号发射次数(即发射位置数量),我们首先考虑一重最优覆盖.根据其定义可知,一重最优覆盖 ROI 所需的发射位置数量即为覆盖该 ROI 最少所需的边长为 r 的正六边形数(如图 1(c)所示).当 ROI 面积远大于信号覆盖范围 πr^2 时,可忽略边界效应,此时可认为覆盖 ROI 的正六边形数与 ROI 形状无关,而仅与 ROI 面积有关.此时易知,一重最优覆盖任意形状 ROI 所需的正六边形数(即发射位置数)为

$$Hex_num_1_layer = \frac{Acreage_ROI}{Acreage_Hexagon} = \frac{Acreage_ROI}{\frac{3\sqrt{3}}{2}r^2} \tag{1}$$

由定义 1 可知,三重优化覆盖任意形状 ROI 所需的发射位置数是一重最优覆盖所需数量的 3 倍,故有

$$Hex_num_3_layer = 3 \times Hex_num_1_layer = \frac{3 \times Acreage_ROI}{\frac{3\sqrt{3}}{2}r^2} \tag{2}$$

符合三重优化覆盖的信标位置拓扑有许多,如图 2(a)所示为由 3 组一重最优覆盖组成的三重优化覆盖,但

由于无法用一种统一的数量关系描述图 2(a)中各位置点间的距离,故难以在实践中将这种拓扑转化为坐标系中的一组坐标.为此,我们考虑图 2(b)所示的拓扑.图 2(b)也是由 3 组一重最优覆盖组成,是另一种对 ROI 的三重优化覆盖,其中各位置点又构成了边长为 r 的正三角形,我们称其为等距三重优化覆盖.等距三重优化覆盖较容易转化为坐标系中的一组坐标,如图 3 所示为在一个矩形 ROI 中获取的构成等距三重优化覆盖的发射位置点集,它们形成了一组正三角形网格(边缘区域除外).鉴于等距三重优化覆盖在工程实践中的便利性,以下着重讨论如何在任意形状的 ROI 中实现这种拓扑.

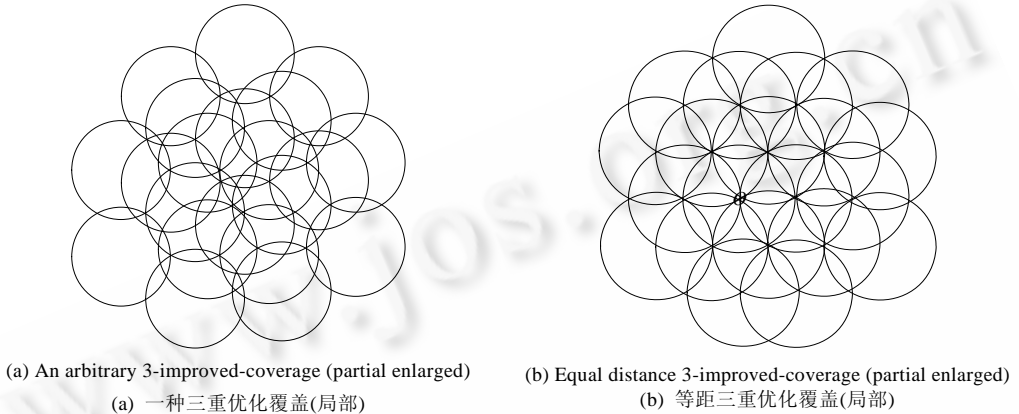


Fig.2 3-Improved-Coverage
 图 2 三重优化覆盖

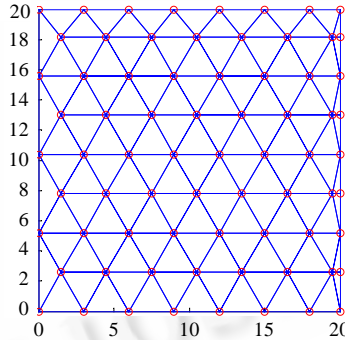


Fig.3 Equal distance 3-improved-coverage deployment of sending position
 图 3 等距三重优化覆盖的发射位置分布

2.2 移动信标最优路径获取

上一节对移动信标发射位置的优化拓扑——等距三重优化覆盖——进行了分析,但如何在某个 ROI 中找到形成等距三重优化覆盖的一组发射位置坐标,仍需进行繁琐的计算,特别是当 ROI 面积很大、形状不规则且发射位置很多的情况下,计算难度更大.

本节将讨论如何实现该优化拓扑,并寻找遍历该拓扑的最优路径.首先将针对矩形 ROI 给出一种简单的路径获取方法,随后进一步给出另一种更为普适的方案.

2.2.1 针对矩形ROI的信标最优路径获取

当 ROI 形状是标准矩形时(不妨假设其大小为 $A \times B$),可根据 ROI 的各项点坐标快速估算信标发射位置坐标.具体步骤如下:

步骤 1. 首先根据 ROI 长度 A 计算每行中发射位置的数量;接着根据 ROI 宽度 B 计算行数.

$$NodeNum_line=A/r \tag{3}$$

$$LineNum = 2 \times B / \sqrt{3}r + 1 \quad (4)$$

步骤 2. 计算第 i 行第 j 号发射位置横、纵坐标.

奇数行和偶数行的发射位置横坐标计算方法不同,分别为:

若 i 为奇数,则第 j 号发射位置横坐标

$$X_{ij} = (j-1) \times r \quad (5)$$

若 i 为偶数,则第 j 号发射位置横坐标

$$X_{ij} = A - (j-1) \times r \quad (6)$$

当每行发射位置的纵坐标仅与行号相关时,计算公式为:第 i 行所有发射位置的纵坐标

$$Y_{ij} = (i-1) \times \sqrt{3} / 2 \times r \quad (7)$$

当依照上述公式算出的发射位置纵、横坐标越过 ROI 边界时,直接用相应边界线坐标替换算出的发射位置坐标即可.

步骤 3. 基于流浪旅行商算法遍历各发射位置,获取最优遍历路径.

以上即为矩形区域中的灯塔位置获取及路径算法,简称 BOLQR (beacon optimizing location in quadrate ROI). 该方法的优点是计算速度快,使用简单,缺点是较为粗糙,需要较多信标发射位置才能保证信标信号充分覆盖 ROI,且难以推广至任意形状的 ROI.

2.2.2 针对任意形状 ROI 的信标最优路径获取

为了获取任意形状 ROI 中的信标路径,首先需要将一定数量的信标位置布局到 ROI 中,使之形成等距三重优化覆盖.为了合理布局这些信标位置,不妨参考传感器网络布局领域的一些解决思路.虚拟力方法就是其中的一种代表性方法^[14,15],其主要思想如下:ROI 中各传感器节点均可对周边节点施加大小不等的引力或斥力,且各节点将根据其受力的大小和方向移动相应的距离,直到受力平衡为止.当所有传感器均停止移动时,可认为传感器网络的节点分布达到了优化状态.

在本文中,应用虚拟力方法的关键是定义各信标之间的虚拟力公式,该公式可表达信标间的虚拟力随信标间距的变化,从引力逐渐变为斥力的过程.其中一个关键参数是平衡距离 D_{th} ,当信标间距等于 D_{th} 时,相互间的虚拟力为 0;当所有相邻信标间距均近似等于 D_{th} 时,系统趋于平衡.显然,根据第 2.1 节中得到的结果,本文中 D_{th} 等于信标发射半径 r .信标间虚拟力公式为公式(8).

$$\vec{F}_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{if } C_{th} < d_{ij} \\ (W_{Ass} \times (d_{ij} - D_{th})^{\beta_1}, \alpha_{ij}), & \text{if } D_{th} \leq d_{ij} \leq C_{th} \\ (W_{Rss} \times (d_{ij}^{-\beta_2} - D_{th}^{-\beta_2}), \alpha_{ij} + \pi), & \text{if } d_{ij} < D_{th} \end{cases} \quad (8)$$

其中: \vec{F}_{ij} 表示信标 i 对信标 j 的作用力; d_{ij} 表示两者间的直线距离; C_{th} 是信标间距上限,两信标间距若超过 C_{th} ,则相互作用力为 0, C_{th} 可用来简化信标间相互作用力的计算,本文中 $C_{th} = 1.2 \times r$; α_{ij} 为有向线段,指示虚拟力方向(信标 i 指向信标 j); W_{Ass} 和 W_{Rss} 分别表示信标间的虚拟吸引力系数和虚拟排斥力系数(常量); β_1 和 β_2 是常量,可根据所采用的信标类型而调整,通常可取为 2.

此外,信标 i 还可能受到边界对它的作用力,见公式(9).

$$\text{If } d_{i_bound} < C_boundary, \text{ then } \vec{F}_{i_boundary} = -\frac{P_i P_{Center}}{|P_i P_{Center}|} \times W_bound \quad (9)$$

其中, d_{i_bound} 为信标 i 到 ROI 边界的距离,当它小于预设常量 $C_boundary$ 时,信标就受到边界的作用力; $\vec{P}_i P_{Center}$ 是由 ROI 中心指向信标 i 的向量; W_bound 是边界对信标 i 的作用力常量,通常比较大.

一个信标所受到的虚拟力是它所受到的作用力的矢量和,见公式(10).

$$\vec{F}_i = \sum_{j \neq i}^N \vec{F}_{ij} + \vec{F}_{i_boundary} \quad (10)$$

一旦受力结果计算完毕,信标就根据该合力的方向和大小移动到一个新的位置,单步移动最大距离为

MaxStep, 信标每次受力之后的移动距离与所受合力的大小正相关, 同时不超过 MaxStep. 计算方法如下:

$$x_{new} = \begin{cases} x_{old}, & \text{if } |\overline{F_{xy}}| \leq F_{th} \\ x_{old} + \frac{F_x}{F_{xy}} \times \text{MaxStep}, & \text{if } |\overline{F_{xy}}| > F_{th} \end{cases} \quad (11)$$

$$y_{new} = \begin{cases} y_{old}, & \text{if } |\overline{F_{xy}}| \leq F_{th} \\ y_{old} + \frac{F_y}{F_{xy}} \times \text{MaxStep}, & \text{if } |\overline{F_{xy}}| > F_{th} \end{cases} \quad (12)$$

其中, F_{xy} 是信标所受合力; F_x, F_y 分别是 x, y 方向所受分力; (x_{new}, y_{new}) 表示信标移动后的新位置. 当某个信标每次所受合力小于预设门限 F_{th} 时, 则可认为它已达到稳定状态, 该节点不需再移动. 此时, 该信标与周围信标的间距近似等于 D_{th} . 当所有信标节点静止时, 布局过程结束, 各个信标的新位置即为所要寻找的优化位置. 用一个移动信标遍历这些位置, 在这些位置发射信标信号, 即可帮助散布在 ROI 中的传感器进行定位. 移动信标最优路径即为遍历这些位置的最短路径, 用经典旅行商问题(TSP 问题)的变形——流浪旅行商问题(wandering salesman problem)——的相应算法可以解决该问题. 整个计算过程如图 4 中的 BOLAR 算法所示.

Beacon Optimizing Location in Arbitrary ROI (BOLAR)

Step 1. Calculating the number of beacon positions, denoted as N , according to acreage of ROI based on Equation (1) and Equation Eq (2).

Step 2. Randomly getting N points in ROI as the initial coordinates of beacon positions.

Step 3. Working out the optimal coordinates of beacon positions based on VF algorithm.

Step 4. Based on a TSP algorithm and the result of Step 3, touring every coordinate of beacon positions, and getting the optimal beacon trajectory.

Fig.4 Finding beacon optimizing location and path in arbitrary ROI

图 4 任意形状 ROI 中的信标最优位置及路径获取

虚拟力方法极大地扩展了移动信标方法的灵活性, 主要体现在如下几个方面:(1) 因为定义了信标之间及信标与边界之间的作用力, 所以, BOLAR 算法可以适应各种形状的 ROI, 在 ROI 中寻找到合适的信标位置;(2) 随着应用需求的扩展, 当 ROI 中出现一些新情况或新对象时(如特殊的地形、新目标等), 若需要根据应用需求重新寻找信标位置, 则只需修改前述虚拟力方法, 添加针对这些特殊对象的作用力, 然后重排信标位置即可(对特殊对象的虚拟力方法, 可参见文献[14]);(3) 如果某个应用要求精度更高的定位效果, 则需要增加信标信号密度, 只需按照需求增加一定信标, 减小信标间的平衡距离 D_{th} , 然后重新应用虚拟力算法获取信标位置即可;(4) 由于传感器节点的散布通常遵循某种概率分布(例如, 用火箭弹散布的传感器通常以弹着点为中心, 呈正态分布), 因此, 若将节点出现概率较大的区域设置成“热点区域”, 使该区域能够对信标发射位置产生较大的吸引力, 就能使该区域附近的发射位置相对密集, 从而改善定位效果.

需要特别指出的是, BOLQR 和 BOLAR 算法体现了基于最优位置遍历的移动信标路径设计思想, 使移动信标路径设计可与面向不同应用的各种信标布局算法相结合, 通过“布局+最优遍历”的方式得到一系列满足不同性能要求的信标路径, 从而利用移动信标完成原本需要多个信标形成特定布局方能完成的定位工作, 这将大幅度扩展移动信标定位方法的适用范围.

3 实验

以下将对本文第 2.2.1 节和第 2.2.2 节中给出的 BOLQR 和 BOLAR 算法进行仿真实验, 目的是验证上述两种基于移动信标最优路径的定位算法的有效性, 并分析其特点.

Case 1: 在本次实验中, 我们将主要考察物理实验和仿真实验条件下基于 RSSI 方法的测距过程及误差, 以确定仿真参数, 并以此作为后续实验的基础. RSSI 方法的基本思想是: 各未知节点可基于某个信标信号传输模型,

根据自己接收到的信标信号强度(RSSI)来计算自身到信标的距离.测定距离后即可根据参考节点发射位置坐标,利用三边测量法、极大似然方法等算法计算自身位置.

本文中的信标信号传输模型直接采用文献[20]给出的空间传输损耗模型:

$$L(\text{dB}) = PL(d_0) + 10 \times \eta \times \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (13)$$

$$RSSI(d) = P_T - L(\text{dB}) \quad (14)$$

根据文献[21]中的数据,本次实验中我们选择 $P_T = -5\text{dBm}$, $\eta = 4$ (室外开阔地), $PL(d_0) = 55\text{dB}$, X_σ 均值为 0, 方差 $\sigma = 5$, 实验结果如图 5(a) 所示. 与该结果相对应的是文献[22]中进行的基于 433MHz MICA2 传感器平台的实物实验, 该传感器配置了多个 CC1000 无线电收发器, 收发器的发射功率为 -5dBm . 对比两组实验结果可知, 本文采用的实验参数比较符合真实情况, 基于这组仿真参数进行的后续实验是可靠的.

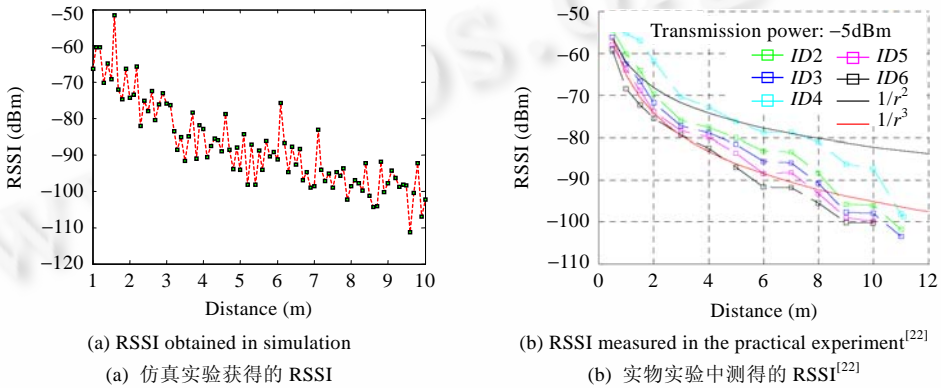


Fig.5 RSSI in simulation and practical experiment

图 5 仿真实验与实物实验中的 RSSI

Case 2: 针对矩形区域的信标位置及路径选择. 该实验主要考察第 2.2.1 节所述 BOLQR 算法应用于矩形 ROI 时, 所获取的信标位置、最优遍历路径和在此基础上的传感器定位效果. 实验参数如下: ROI 大小为 20×20 的矩形, 信标发射半径为 $r = 3$; 根据 ROI 大小计算出信标发射位置为 72 个, 待定位的传感器共 60 个, 均匀随机分布在 ROI 中. 实验结果如图 6 所示. 可以看出, 基于 BOLQR 算法计算出的信标发射位置可以有效地三重覆盖 ROI.

Case 3: 任意 ROI 中基于 BOLAR 算法的信标位置及路径选择. 实验参数如下: ROI 是一个半径为 10 的圆 (可根据应用需求换成其他形状); 根据 ROI 面积可计算出信标发射位置数量约为 40 个, 虚拟力方法相关主要参数为 $r_e = 0.3 \times r$, $C_{th} = 1.2 \times r$, $D_{th} = r$, 其余参数同前. 实验结果如图 7 所示. 从图中可以看出, 发射位置基本上构成一系列正三角网格, 并能够充分三重覆盖 ROI, 这说明虚拟力方法可以有效地寻找到合适的信标发射位置. 最终定位误差为 72%, 但存在数个传感器未能被正确定位 (如图 7、图 8 所示, 可知它们的坐标被定为 (0,0)). 分析实验数据可知, 这是因为这些传感器位于 ROI 边界, 由于边界对信标位置的虚拟排斥力, 使得边界附近信标位置较稀疏, 并使这些传感器处于 1~2 个信标的发射范围内, 因此无法用三边测量法定位. 由多次实验可知, 对边界周围的传感器定位精度不够, 甚至无法定位, 这是虚拟力算法固有的一个局限性, 但通过增加 10% 的 (4 个) 信标发射位置, 定位误差可被减小至 55%, 如图 8(b)、图 8(c) 所示.

Case 4: BOLQR, BOLAR 和螺旋线方法^[8]在同样大小 (20×20) 的矩形 ROI 中的发射位置数量和路径长度比较, 目的是检验上述 3 种算法在性能和开销方面的差别.

螺旋线是文献[8]给出的一种典型的信标路径, 其主要特点是各发射点可构成一条螺旋线, 信标节点在螺旋线上移动并发射信号, 即可对传感器实现定位. 我们在实验中采用的螺旋线方程如下:

$$l = \frac{\sqrt{3}/2}{2\pi} r\theta \quad (15)$$

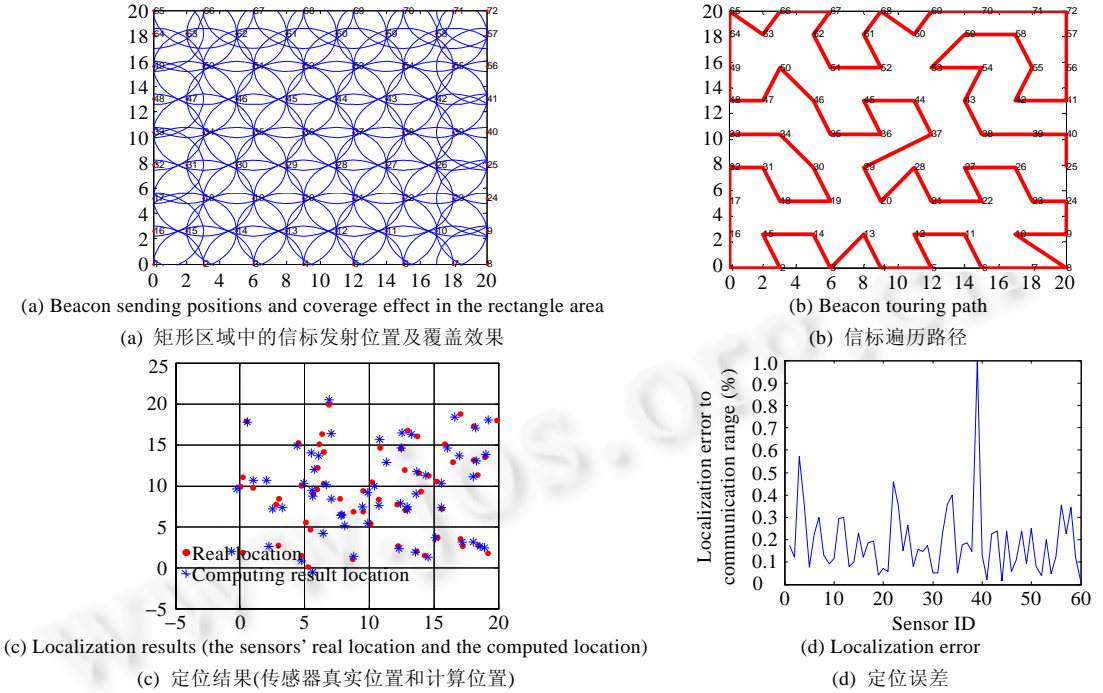


Fig.6 Beacon sending position and path choosing concerning the rectangle ROI
图 6 针对矩形 ROI 的信标发射位置及路径选择

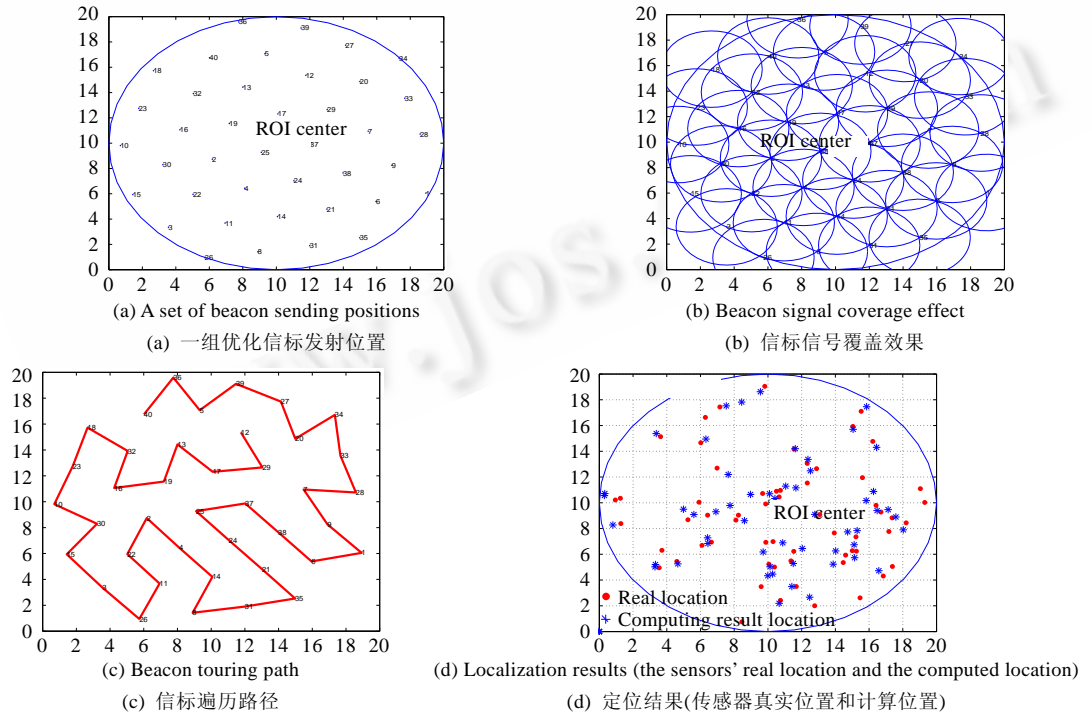


Fig.7 A set of optimal beacon sending positions obtained with virtual forces method
图 7 基于虚拟力方法获取的一组最优信标发射位置

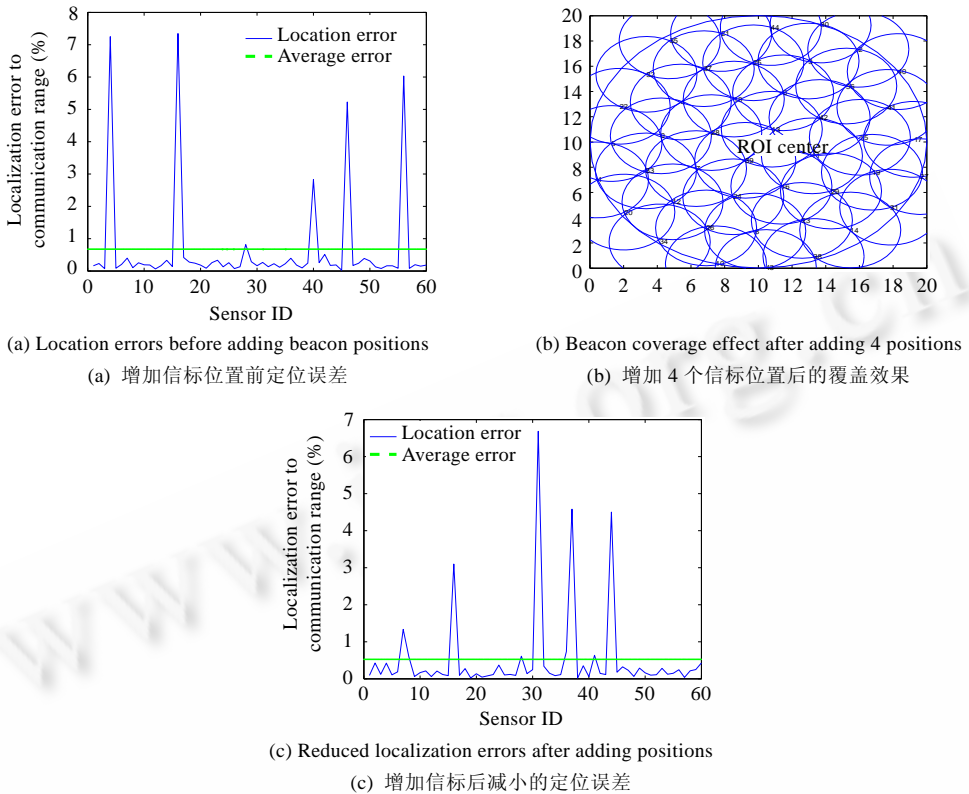


Fig.8 Localization error before and after adding 4 beacon positions in Case3

图 8 Case3 中增加 4 个信标位置前后的定位误差

该螺旋线的特点是,相邻内旋和外旋间距为 $\sqrt{3}/2 \times r$. 信标发射点选择方式为:以 ROI 中心(即螺旋线起点)为第 1 个发射点,每个发射点与螺旋线上前一发射点的间距为信标发射半径 r ,这样可以充分利用信标信号覆盖 ROI.信标发射点确定后,我们仍采用旅行商算法遍历发射点获取最优遍历路径.其他实验参数(包括待定位传感器数量、BOLQR 和 BOLAR 算法参数等)同前.

我们得到的基于螺旋线的传感器定位效果如图 9 所示,BOLQR 算法、BOLAR 算法和螺旋线方法的性能比较如图 10 所示.从实验结果可以看出,BOLQR 算法在矩形区域中的定位精度要好于 BOLAR 算法和螺旋线方法,但 BOLAR 所需要的发射位置数和遍历发射位置的路径长度都要明显小于 BOLQR 算法.螺旋线方法虽然需要的发射位置数和路径长度都较小,但其最大的问题是无法充分覆盖矩形 ROI,这造成它的平均定位精度较差.但同时我们注意到,螺旋线覆盖范围内的传感器定位精度较好,故该方法可用于圆形 ROI 或传感器呈圆形分布的情况.

因此,BOLQR 算法适用于对定位精度要求较高,对定位时间、能量消耗无特殊要求的矩形 ROI;螺旋线方法适用于圆形 ROI;而 BOLAR 算法适用于定位精度要求略低,但需要较短的定位时间和较小能量消耗的应用.尤其难得的是,BOLAR 算法可以在不同形状的 ROI 中工作,这是它特有的优点.

4 结束语

本文给出了一种针对矩形 ROI 的简单的信标信号发射位置优化方法(BOLQR).之后,在虚拟力方法的基础上提出了可适应各种形状 ROI 的信标信号发射位置选择方法(BOLAR),并成功地将旅行商算法用于获取信标的最优移动路径上.传感器定位实验证明,上述方法有效地解决了基于移动信标定位时遇到的信标位置选择问题,并取得了良好的定位效果.此外,本文提出了基于最优位置遍历的移动信标路径设计思想,这一思想很容易与现有的各种基于信标布局的定位算法^[4,5]相结合,得到一系列满足不同性能要求的信标路径,之后即可利用移

动信标完成原本需要多个信标形成特定布局方能完成的定位工作,从而大幅度扩展了移动信标定位方法的适用范围.

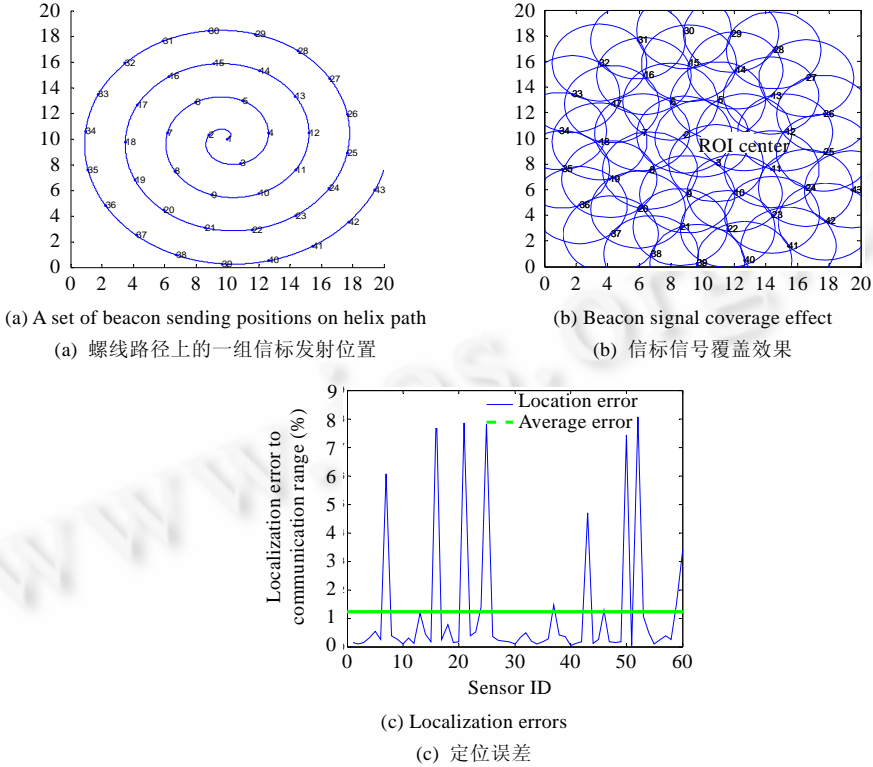


Fig.9 Localization results based on helix path

图9 基于螺线的定位结果

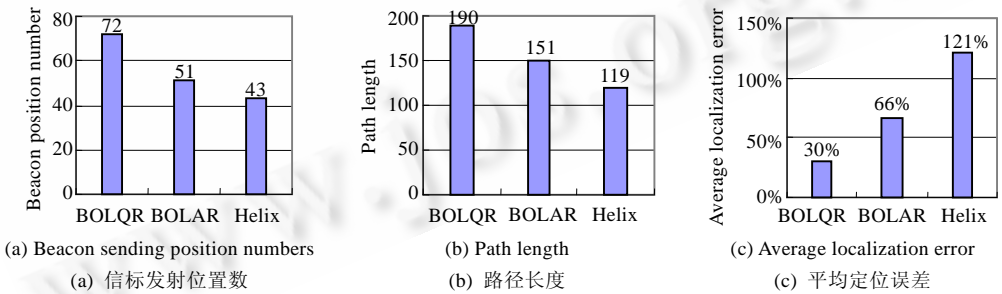


Fig.10 Performance of BOLQR, BOLAR and Helix path in the same ROI

图10 相同 ROI 中,BOLQR,BOLAR 和螺线路径的性能

未来的工作主要有:

- (1) 在更复杂的地形中,针对其他定位方法(不同的测距和测角方法)改进和完善本文所提出的算法;
- (2) 目前,本文中的信标发射位置选择是基于已知 ROI 的面积、形状及地形等条件的,今后可考虑如何根据动态获取的 ROI 地形自适应地进行信标路径规划,这一点对传感器网络布局问题也很有参考价值;
- (3) 由于减小能耗是传感器网络中的一个重要问题,今后将考虑如何从能量角度考察并改善本文中的定位方法,并将其实用化;
- (4) 以各种不同的信标布局算法为基础,形成和完善信标路径设计的一系列约束条件,提出具有一定通用

性的信标路径设计规则.

致谢 谨向对本文提出宝贵建议的审稿专家以及参与本文内容讨论的所有同学、老师表示衷心的感谢!

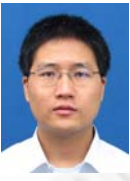
References:

- [1] Hightower J, Gaetano B. Location systems for ubiquitous computing. *IEEE Trans. on Computer*, 2001,34(8):57–66.
- [2] Wang FB, Shi L, Ren FY. Self-Localization systems and algorithms for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2005,16(5): 857–868 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/857.htm>
- [3] Niculescu D, Nath B. Position and orientation in ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 2004,2(2):133–151.
- [4] Savvides A, Han CC, Strivastava MB. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors. In: Rose C, ed. *Proc. of the 7th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking*. Rome: ACM Press, 2001. 166–179.
- [5] Bulusu N, Heidemann J, Estrin D. Adaptive beacon placement. In: Young DC, ed. *Proc. of the 21st Int'l Conf. on Distributed Computing Systems*. Mesa: IEEE Computer Society, 2001. 489–498.
- [6] Sichertiu ML, Ramadurai V. Localization of wireless sensor networks with a mobile beacon. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems*. IEEE Computer Society, 2004. 174–183.
- [7] Patro RK. Localization in wireless sensor network with mobile beacons. In: *Proc. of the 23rd IEEE Convention of Electrical and Electronics Engineers*. IEEE Computer Society, 2004. 22–24.
- [8] Sun GL, Guo W. Comparison of distributed localization algorithms for sensor network with a mobile beacon. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Networking, Sensing and Control*. 2004. 536–540.
- [9] Koen L, Niels R. Distributed localization in wireless sensor networks: A quantitative comparison. *Computer Networks*, 2003,43(4): 499–518.
- [10] Niculescu D, Nath B. Ad hoc positioning system (APS). In: *Proc. of the Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM)*. San Antonio: IEEE Computer Society, 2001. 2926–2931.
- [11] Khan A, Philip SJ, Qiao CM, Tripathi SK. A framework for mobile assisted localization in wireless sensor networks. Technical Report, Buffalo: State University of New York, 2005.
- [12] Dutta P, Bergbreiter S. *MobiLoc: Mobility enhanced localization*. Berkeley: University of California, 2003. <http://www.cccs.berkeley.edu/prabal/projects/cs294-1/>
- [13] Ssu KF, Ou CH, Jiau HC. Localization with mobile anchor points in wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2005,54(3):1187–1197.
- [14] Li SJ, Xu CF, Wu ZH, Pan YH. Optimal deployment and protection strategy in sensor network for target tracking. *Acta Electronica Sinica*, 2006,34(1):71–76 (in Chinese with English abstract).
- [15] Zou Y, Chakrabarty K. Sensor deployment and target localization in distributed sensor networks. *ACM Trans. on Embedded Computing Systems*, 2004,3(1):61–91.
- [16] Shi HC, Li XL, Shang Y, Ma DF. Cramer-Rao bound analysis of quantized RSSI based localization in wireless sensor networks. In: *Proc. of the IEEE/IFIP Int'l Workshop on Parallel and Distributed Embedded Systems (ICPADS)*. Fudooka: IEEE Computer Society, 2005. 32–36.
- [17] Zhang HH, Hou JC. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. *Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*, 2005,1(1-2):89–123.
- [18] Huang CF, Tseng YC. The coverage problem in a wireless sensor network. In: Sivalingam KM, Raghavendra CS, eds. *Proc. of the 2nd ACM Int'l Conf. on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA)*. San Diego: ACM Press, 2003. 115–121.
- [19] Vamsi P, Arjan D, Raj J. Optimized flooding protocol for ad hoc networks. Eprint arXiv:cs/0311013, 2003. <http://www.citebase.org/abstract?id=oai:arXiv.org:cs/0311013>
- [20] Seidel SY, Rappaport TS. 914 MHz path loss prediction models for indoor wireless communications in multifloored buildings. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1992,40(2):207–217.

- [21] Yedavalli K, Krishnamachari B, Ravula S, Srinivasan B. Ecolocation: A technique for RF based localization in wireless sensor networks. In: Proc. of the Information Processing in Sensor Networks (IPSN). Los Angeles: IEEE Computer Society, 2005. 285–292.
- [22] Alippi C, Vanini G. Wireless sensor networks and radio localization: A metrological analysis of the MICA2 received signal strength indicator. In: Proc. of the 29th Annual IEEE Int'l Conf. on Local Computer Networks (LCN). Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2004. 579–580.

附中文参考文献:

- [2] 王福豹, 史龙, 任丰原. 无线传感器网络中的自身定位系统和算法. 软件学报, 2005, 16(5): 857–868. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/857.htm>
- [14] 李石坚, 徐从富, 吴朝晖, 潘云鹤. 面向目标跟踪的传感器网络布局优化及保护策略. 电子学报, 2006, 34(1): 71–76.



李石坚(1979—),男,湖南益阳人,博士,CCF会员,主要研究领域为传感器网络,数据融合.



杨阳(1982—),男,硕士,主要研究领域为传感器网络.



徐从富(1969—),男,博士,副教授,主要研究领域为信息融合,人工智能,传感器网络.



潘云鹤(1946—),男,教授,博士生导师,中国科学院院士,CCF高级会员,主要研究领域为人工智能,智能CAD.