

# 异构无线传感器网络中移动式目标跟踪研究进展

彭臻<sup>1</sup>, 王田<sup>1</sup>, 梁俊斌<sup>2</sup>, 赖永炫<sup>3</sup>, 王国军<sup>4</sup>, 贾维嘉<sup>5</sup>

<sup>1</sup>(华侨大学 计算机科学与技术学院 福建 厦门 361021)

<sup>2</sup>(广西大学 计算机与电子信息学院 南宁 530004)

<sup>3</sup>(厦门大学 软件学院 福建 厦门 361005)

<sup>4</sup>(广州大学 计算机科学与教育软件学院 广州 510006)

<sup>5</sup>(上海交通大学 电子信息与工程学院 上海 200240)

E-mail: cs\_tianwang@163.com

**摘要:** 传统固定无线传感器网络在进行目标跟踪过程中面临跟踪质量较低、网络能耗较高等问题。引入移动节点后所组成的异构无线传感器网络提供了新的解决方法,即移动式目标跟踪。目前的研究大多对被跟踪目标的探测和定位混为一谈,本文区分了以探测为主和以定位为主的两类方法,着重介绍以探测为主的移动式目标跟踪方法的研究现状。通过对比现有方法在跟踪质量和网络能耗等方面的优缺点,揭示了现有研究存在的问题。总结了移动式目标跟踪领域存在的研究热点和趋势。

**关键词:** 异构无线传感器网络; 移动节点; 目标跟踪; 目标探测; 研究进展

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-1220(2017)02-0193-07

## Research Advance of Target Tracking with Mobile Elements in Heterogeneous Wireless Sensor Networks

PENG Zhen<sup>1</sup>, WANG Tian<sup>1</sup>, LIANG Jun-bin<sup>2</sup>, LAI Yong-xuan<sup>3</sup>, WANG Guo-jun<sup>4</sup>, JIA Wei-jia<sup>5</sup>

<sup>1</sup>(College of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

<sup>2</sup>(School of Computer, Electronics and Information, Guangxi University, Nanning 530004, China)

<sup>3</sup>(School of Software, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

<sup>4</sup>(School of Computer Science and Educational Software, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

<sup>5</sup>(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Traditional stationary wireless sensor networks usually encounter some problems during the process of target tracking, such as low tracking quality, high energy consumption and so on. More and more mobile elements, i. e., mobile sensors, are used to build up heterogeneous wireless sensor networks and thus bring new solutions for target tracking. Existing researches usually misidentify detecting the target with locating the target. After distinguishing between detection-centric and localization-centric methods, we review specifically the current research status of the detection-centric target tracking methods. By comparing existing methods' merit and demerit in aspects like tracking quality, energy consumption, etc., their problems are revealed. Therefore, we summarize some possible research hotspots and tendency of mobile solutions in many aspects.

**Key words:** heterogeneous wireless sensor networks; mobile elements; target tracking; target detection; research advance

### 1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)通过无线通信建立网络连接,并使用自身的传感器装置感知周围的环境数据,从而实现信息世界与物理世界的融合<sup>[1,2,3]</sup>。

目标跟踪是WSN的重要应用之一<sup>[4]</sup>。与普通环境监测应用中的静止对象不同,目标跟踪应用中的目标通常是可移动的,例如非法入侵者、野生动物等等。当目标出现在监测区域中时,网络中的传感器节点将从休眠状态切换到活跃状

态<sup>[5]</sup>,甚至提前唤醒部分节点,防止丢失目标<sup>[6]</sup>。跟踪过程中,网络节点的可靠性十分重要。由于传感器节点通常由电池供电,一旦节点的电池耗尽,就意味着该节点已“死亡”而无法再正常工作,监测区域内将出现无法探测到的盲区<sup>[7]</sup>。移动到这些盲区内的目标将无法被网络监测,目标跟踪应用也就失去了意义。因此,如何有效地减少固定传感器网络在跟踪过程中的能量消耗是研究者关注的主要问题<sup>[8]</sup>。

随着电子制造工艺和机械制造技术的发展,搭载有传感器设备的移动传感器得到了越来越广泛的应用<sup>[9]</sup>。相比固定

收稿日期: 2015-12-17 收修改稿日期: 2016-03-18 基金项目: 国家自然科学基金重点项(61532013)资助; 国家科技支撑计划项目(2015BAH16F00/F01/F02)资助; 国家自然科学基金项目(61572206, 61562005)资助; 福建省自然科学基金计划项目(2014J01240)资助。作者简介: 彭臻,男,1990年生,硕士研究生,研究方向为无线传感器网络、移动跟踪; 王田(通信作者),男,1982年生,博士,副教授,研究方向为无线传感网、物联网和移动计算; 梁俊斌,男,1979年生,博士,教授,研究方向为无线传感器网络、分布式系统和网络优化算法; 赖永炫,男,1981年生,博士,助理教授,研究方向为传感器网络数据管理和数据流; 王国军,男,1970年生,博士,教授,研究方向为网络与信息安全、物联网和云计算; 贾维嘉,男,1957年生,博士,教授,研究方向为计算机网络、下一代无线通信和移动计算。

传感器 移动传感器具有天生的优势. 首先, 当目标出现在区域内时, 移动传感器可以利用自身移动性向目标地点移动, 提高监测质量<sup>[10]</sup>. 相比固定传感器网络, 少量移动传感器节点就能达到原本需要大量固定传感器节点才能实现的监测强度<sup>[11]</sup>. 另外, 即使少量节点能量耗尽了, 其他移动节点依然能够通过移动性来保证网络的健壮性, 保持对目标区域的有效监测<sup>[12]</sup>.

因此越来越多的研究者提出了不同类型的移动式目标跟踪方法. 然而现有研究往往将目标跟踪中的目标定位和目标探测混为一谈, 而实际上两者有着不同的侧重点. 目标定位是借助网络中部分已知自身位置的节点来对目标进行定位<sup>[13]</sup>. 目标探测<sup>[14]</sup>与目标定位有着明显的区别. 首先, 两者所要达到的目的不同. 目标定位需要得到的是目标的实时位置, 而目标探测则主要关注感知目标所得到的数据, 这些数据反映了目标当前的状态信息. 例如有的方法需要对目标的身份进行识别, 甚至对不同的目标进行区分<sup>[15]</sup>. 这就使得目标探测方法侧重于考虑如何更有效地对目标进行感知. 其次, 由于目的不同, 对于传感器节点来说, 进行目标探测与目标定位时所使用的硬件装置很可能不同. 目标定位方法中, 节点如果需要得到自身位置, 往往需要借助所装备的 GPS (Global Position System) 设备或向其他装备有 GPS 的锚节点寻求帮助<sup>[16]</sup>. 而进行目标探测时, 针对不同类型的物理量可能需要装备对应的传感器, 例如声传感器和光传感器等等.

因此, 本文将两者区分开, 专门介绍探测为主的目标跟踪方法, 并对现有的探测为主的移动式目标探测跟踪方法进行总结和归纳. 希望通过分析它们的异同和特点, 揭示方法之间的联系, 找到移动式目标探测跟踪方法需要解决的关键问题, 探索出将来可能的研究重点和发展方向, 为未来的其他研究者提供参考和建议.

本文的剩余部分将组织如下: 第2节对移动式目标跟踪的特点和问题进行概述; 第3节介绍现有方法的不同分类标准; 第4节详细归纳现有的以探测为主的移动式目标跟踪方法; 第5节对这些方法进行比较和分析; 第6节提出移动式目标探测跟踪的未来研究和研究方向; 第7节对全文进行总结.

## 2 移动式目标探测跟踪概述

### 2.1 方法概述

传统的目标跟踪方法通常包括三个相关部分: 感知方式、定位方式和通信方式. 感知方式决定了节点如何进行调度以便更好地获取目标信息. 定位方式需要从节点的众多感知数据中提取出有效的部分, 并通过相应的算法得到目标的当前位置. 定位方式有时还决定了如何对目标位置进行预测, 从而使得节点能够对目标更好地进行感知. 最终, 通信方式将决定节点的数据如何发送以及网络的组织结构.

移动式目标跟踪方法是在传统目标跟踪方法的基础上提出来的, 它的区别和优势在于使用由移动节点和固定节点组成异构传感器网络, 网络的性能得到增强. 对于移动式目标探测跟踪方法来说, 感知方式是主要的研究对象. 其中, 不同的移动式探测跟踪方法在一些具体特性上有所不同, 这些特性包括节点模型、移动自主性、目标数量等等. 图1对移动式目标探测跟踪方法的特性进行了总结.

### 2.2 主要度量指标

度量指标是用来衡量目标跟踪方法性能高低的标准. 对于不同的跟踪方法来说, 由于方法的侧重点不同, 度量指标也各有不同. 以下列出的度量指标是文献中一些相对常见的概念, 而并不是具体的数值定义和表示.

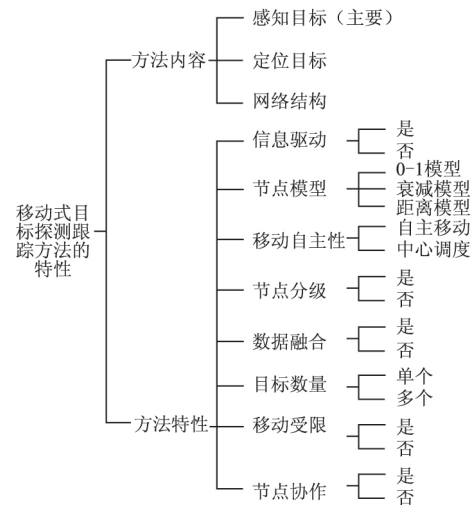


图1 WSN中移动式目标探测跟踪方法的特性

Fig. 1 Properties of target tracking solutions with mobile elements in WSNs

#### 2.2.1 探测质量

节点的探测质量能够衡量节点在所处位置所能获得的探测信息量大小. 费舍尔信息矩阵 (Fisher Information Matrix, FIM) 是表示信息量大小的常用指标. 例如, 可以通过求 FIM 的行列式来评价节点监测值的质量<sup>[17]</sup>. 能够获得较高的信息量意味着算法能够更好地对目标进行探测.

#### 2.2.2 网络覆盖程度

网络覆盖程度反应了所部署在传感器节点对整个或部分监测区域的探测范围大小, 而覆盖率是衡量网络覆盖程度大小的常用指标<sup>[18]</sup>. 一般来说, 覆盖率越大越能有效地减少目标丢失的情况出现. 对于局部覆盖率来说, 往往将目标所在区域作为节点部署的重点区域, 而其他区域内的节点则可以切换到休眠状态以节约能量<sup>[19]</sup>.

#### 2.2.3 网络连通性

网络连通性是网络可靠性的重要衡量标准<sup>[20]</sup>. 当移动节点在网络中移动时, 节点间的相对位置的改变会使得网络的拓扑结构会发生变化, 从而对网络的连通性产生影响. 因此, 有的文献侧重于研究如何保证移动节点在移动过程中进行有效传输或控制拓扑<sup>[21]</sup>. 也有文献将网络的覆盖度作为保证目标跟踪质量和网络连通性的重要标准<sup>[22]</sup>.

#### 2.2.4 节点能量消耗

节点的能量消耗是 WSN 中的重要度量指标. 对于普通传感器节点, 能耗主要产生于探测过程和数据传输过程. 对于移动节点, 则还需要考虑其移动过程中的能耗问题. 不过, 现阶段的移动式跟踪方法较少直接考虑移动节点本身的能耗问题<sup>[23]</sup>.

### 2.3 存在的问题和挑战

移动式目标探测跟踪方法存在的问题和挑战主要有以下

3 个方面:

1) 如何合理地调度移动节点对目标进行感知. 移动节点本身的特点使得节点不再需要被动地等待目标到来, 而是可以主动向目标靠近. 这样带来的新问题是选择哪些移动节点向目标靠近以及如何向目标靠近.

2) 如何有效地对收集目标数据. 移动节点靠近目标后, 一方面, 要求提高节点收集到的信息量. 另一方面, 要求在节点移动的情况下保证网络的连通性, 使收集到的数据能够有效传输.

3) 如何选择合适的网络结构. 平面式和分层式固定传感器网络都得到了广泛的应用<sup>[24]</sup>. 移动节点的加入使得网络结构更加多样.

### 3 分类概述

基于不同的分类标准, 移动式目标探测跟踪方法存在多种分类方式. 例如可以根据网络中节点所采用的感知模型、节点的移动自主性、网络结构等信息进行分类. 下面对各种分类方式进行介绍.

#### 3.1 基于感知模型分类

根据网络中节点感知模型的不同, 跟踪方法可以分为 0-1 模型<sup>[25]</sup>、衰减模型<sup>[26]</sup>两种. 0-1 模型中的节点通常使用 1 个比特来表示能否感知到目标. 当离目标距离的距离小于或等于节点的感知半径时, 节点能够感知到目标, 否则无法感知. 相比 0-1 模型的离散判断, 衰减模型通常认为节点接收到的目标信号会随着节点与目标间的距离增大以及环境噪声的影响而连续衰减, 更加贴近实际情况.

#### 3.2 基于移动自主性的分类

根据移动节点移动自主性的不同, 跟踪方法可以分为中心调度和自主移动两种类型. 中心调度方法需要在网络中设立一个调度中心, 网络中的数据都需要传输到数据中心集中处理, 而移动节点也由数据中心根据收集到的数据进行决策后统一调度<sup>[27]</sup>. 自主移动方法即为分布式处理方法, 节点在本地处理收集到的数据, 并自行决策如何进行下一步移动.

#### 3.3 基于网络结构的分类

根据网络结构的不同, 跟踪方法可分为平面型和分层型两种. 平面型方法是指网络中的传感器节点地位平等, 不存在特殊的数据收集节点或命令发布节点. 而采用分层型方法的网络则会节点分出层次, 承担不同的任务. 分层型方法可以按照具体层次的不同再细分为分簇型方法<sup>[28]</sup>、树型方法<sup>[29]</sup>和骨干型方法<sup>[30]</sup>等等.

#### 3.4 基于跟踪目标数量的分类

根据所需跟踪目标数量的不同, 跟踪方法可分为单目标和多目标两种类型. 单目标方法只考虑跟踪单个目标的情况. 而多目标方法则需要考虑如何同时对多个目标进行跟踪<sup>[31]</sup>.

与上述方法不同, 本文根据探测跟踪方法的研究重点将方法分为以信息驱动的方法和非信息驱动的方法. 以信息驱动的方法围绕如何有效地探测目标信息进行研究. 直接的方法有调度节点移动以提高信息量, 而间接的方法包括提高网络的覆盖质量, 以及控制节点间的数据传输等等. 而非信息驱动的方法则会关注其他方面, 例如如何捕获目标, 如何估计目

标状态等等. 具体的分类情况如图 2 所示, 并在后续章节中进行讨论.

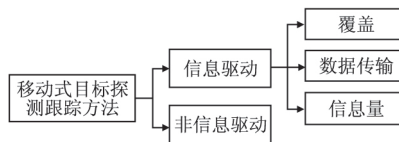


图 2 WSN 中移动式目标探测跟踪方法的分类情况

Fig. 2 Categories of target tracking solutions with mobile elements in WSNs

## 4 典型的移动式目标探测跟踪方法解析

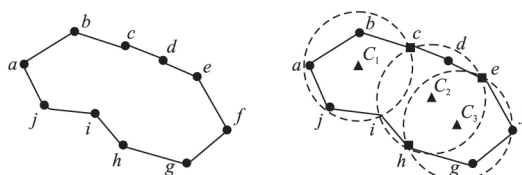
目标探测是对目标实施跟踪过程中的重要步骤. 首先, 探测过程将关注如何快速地发现目标, 这需要监测区域内的节点对整个区域保持有效地监测. 其次, 探测过程将关注如何提高对目标的监测质量. 由于监测环境中存在扰动或信号噪声, 传感器接收到的数据会受到干扰, 如何合理地调度和重新部署移动节点是目标探测中需要解决的问题. 最后, 探测过程需要考虑如何保证网络自身的性能. 节点在移动过程中会使原有的网络拓扑发生变化, 节点之间的信息传输将受到影响. 因此, 如何在跟踪过程中维持网络的有效通信同样是不能忽略的问题. 本节将不同方法按照是否为信息驱动分为两大类.

### 4.1 信息驱动

信息驱动方法指的是以更好地探测和收集目标当前状态信息为目的的方法. 一方面, 这些方法通过调度移动节点来更好地探测目标. 另一方面, 可以通过移动来提高网络某方面的性能, 例如覆盖率、连通性等等. 根据方法侧重点的不同, 以下将按照面向覆盖、面向数据传输和面向信息面加以介绍.

#### 4.1.1 面向覆盖

面向覆盖的方法关注于如何有效地保证网络对监测区域的覆盖, 从而保证跟踪质量.



(a) 探测区域内存在空洞 (b) 移动节点填补空洞

图 3 MSC 算法将调度最小数量的移动节点填补簇中的覆盖空洞

Fig. 3 MSC use minimum number of mobile nodes to fill up coverage holes in clusters

文献[32]关注于如何使用移动节点填补固定传感器网络簇中的覆盖空洞. 当目标出现时, 固定节点将根据目标的当前位置和预测位置, 通过可扩展的部署算法 DCBDA (Dynamic Cluster-Based Deployment Algorithm) 建立簇结构对目标实施跟踪, 并调度一定数量的移动节点来填补簇中的覆盖空洞 (如图 3 所示). 论文提出基于最小覆盖圆 (Minimum Spanning Circle, MSC) 的算法, 通过求解 MSC 得到能够填补空洞的最小数量的移动节点. 论文中所提出的算法将建簇和填补空洞分开进行, 但如果将两个步骤整合可能是有效的改进策略.



文献[33]提出一种移动性辅助跟踪算法 MATA (Mobility Assisted Tracking Algorithm), 用于在混合传感器网络中对单个移动目标进行跟踪. 网络中的节点会分成不同的簇, 簇内固定节点使用 SIR (Sampling Importance Re-sampling) 粒子滤波算法对目标位置进行估计, 再利用移动节点对于目标实现  $\beta$  层覆盖, 即至少有  $\beta$  个节点的感知范围能够覆盖目标所在区域.

文献[34]针对混合传感器网络中的目标跟踪应用提出一种分布式能量优化方法 DEOM (Distributed Energy Optimization Method). 所有节点将根据最大熵进行分簇, 簇头节点通过平行粒子群优化方法 (Parallel Particle Swarm Optimization) 来调度移动节点, 从而最大化节点覆盖并最小化能量消耗. 目标的位置通过改进的粒子滤波法进行估计, 这样就能根据探测精度和能量消耗来动态地唤醒目标周围区域的节点对目标进行跟踪. 但是该方法并没有提出明确的跟踪算法, 而是对跟踪过程的一种优化.

文献[35]提出一种基于网格的分布式方法 GBDA (Grid-Based and Distributed Approach) 来跟踪单个移动目标. 该方法的主要目的是使用混合传感器网络对目标实施最大范围的区域覆盖, 这主要通过调度移动节点填补区域中的覆盖空洞来实现. 调度过程中, 要考虑的主要问题是如何最小化所需要的移动节点数量和如何得到移动节点与空洞间的最佳匹配. 最终, 这两个问题被转化为圆形覆盖问题和最小费用流问题, 由所提出的多项式时间复杂度的算法求解.

这一类面向覆盖的方法是信息驱动方法的重要部分, 吸引了较多的研究者进行研究. 通过调度移动节点部署到特定的位置, 可以对监测区域一定范围内实现完全感知, 从而保证目标在此范围内的跟踪质量. 这也体现了移动节点能够改变自己位置的优势.

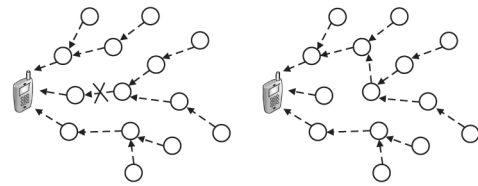
#### 4.1.2 面向数据传输

面向数据传输的方法主要考虑如何在调度移动节点的过程中保持网络数据的顺利传输.

针对固定传感器网络中加入多个移动 sink 节点后的连通性问题, 文献[36]提出一种动态 sink 树 (Sink Oriented Tree, SOT) 构建算法 SOTBA (Sink Oriented Tree Building Algorithm). 网络中的 sink 节点在网络中移动并进行数据收集, 由持有移动 sink 终端的用户充当. 固定节点对目标的跟踪数据以多跳的形式传送给移动 sink 节点. 由于 sink 节点位置的变化, 数据传输的通路会出现断开现象, 这就需要节点形成新的通路输送数据. 论文提出的构建算法以移动 sink 为根节点构建 SOT. 如果 SOT 出现断裂, 节点将根据部分链路反转算法 (Partial Link Reversal Algorithm, PLRA) 建立新的 SOT (如图 4 所示), 从而保证移动 sink 节点能够有效地收集目标的位置信息. 然而, 缺点是由于 SOT 主要由固定节点组成, 如果固定节点的连通性出现问题, 有可能无法找到其他通路. 若利用 sink 节点的移动性构建新的 SOT 树也许能够更好地解决该问题.

针对由一个移动机器人和许多固定节点组成的网络, 文献[37]提出一种跟踪框架 SFTF (Sensing and Following Tracking Framework). 这个框架的特殊之处在于其中的移动机器人本身并不能探测目标, 而是需要从其他固定节点处收集目标信息. 这些固定节点只是简单的二进制传感器, 即只能判断到目标是否进入了感知范围, 但是无法获得目标

的确切位置. 文章提出了两个算法来控制节点间的消息传递, 分别适用于内存容量低的节点和更强大的节点, 并保证在短暂丢失目标后依然能够恢复跟踪. 因此, 该方法主要关注于节点间的通讯过程, 而不是传统的跟踪方法.



(a) 某个节点与sink (b) 形成新的SOT从而使节点之间的链接断开 节点与sink节点得新连接

图4 节点连通断开建立新的 SOT

Fig.4 A new SOT is built up when there is a disconnection

面向数据传输的方法可能并不是具体的目标跟踪方法, 而是针对网络连通情况的维护方法. 因此, 这些方法往往会考虑不同情况下网络的连通情况, 再通过调度单个或多个移动节点维持节点间的连接.

#### 4.1.3 面向信息量

节点探测目标所获得信息量的多少是衡量探测质量好坏的重要标准, 许多方法以此来调度移动节点进行跟踪.

文献[38]提出了一种信息势场方法 IPFA (Information Potential Field Approach) 来计算和控制混合传感器网络中移动节点的移动计划. 该网络中只有一个移动节点, 利用改进的粒子滤波, 该移动节点的测量值可以被描述成正态分布的概率密度函数. 同时, 目标的移动过程通过半马尔可夫跳跃过程 (Semi-Markov Jump Process) 建模. 所提出的信息势场方法利用粒子滤波的输出来计算人工势函数来控制移动节点跟踪目标. 由于计算复杂, 该方法需要中心计算单元控制整个流程.

这类面向信息量的方法使用某个标准值来度量信息量的大小, 例如费舍尔信息矩阵. 并且使用粒子滤波等工具处理信息并估计目标的当前状态.

#### 4.1.4 非信息驱动

非信息驱动的方法没有直接关注获取信息量的大小, 而是从其他角度研究如何跟踪目标, 例如捕获目标、能量消耗等等.

相比单目标跟踪方法, 有关多目标跟踪的研究并不是很多. 文献[39]提出的 NCDA (New Cell-Decomposition Approach) 方法利用移动传感器网络对多个目标进行监测和捕获. 论文提出一种细胞分解算法, 用细胞来代表对应传感器的部署, 目的是使网络对目标的监测概率最大化. 同时, 该算法还将考虑监测区域中存在的障碍对监测目标过程的干扰, 希望在最短的时间内对目标进行捕获. 论文对细胞分解框架进行了详细的描述, 在进行仿真实验时还加入了固定节点进行对比 (如下页图 5 所示). 此外, 该方法假设目标是以直线模型进行运动的, 还有一定的改进空间.

可以看到, 现有的非信息驱动的移动式目标探测跟踪方法并不是很多, 主要是针对一些特殊场景下的目标跟踪应用.

## 5 现有方法比较与分析

上文对现在的移动式目标探测跟踪方法进行了分类讨

论. 本节对上述方法进行比较和分析. 表 1 展示的是目标探测方法对应具体属性的情况. 下面进行如下总结和分析:

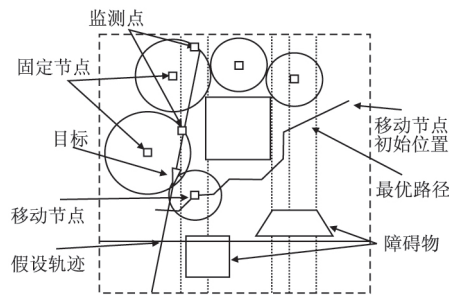


图 5 对目标的捕获实验中加入了固定节点进行对比实验

Fig. 5 In the experiment of capturing target, some fixed nodes are added for comparison

1) 大多数方法是以信息驱动的方法, 小部分方法是非信息驱动的方法. 对于单个节点来说, 节点感知模型有 0-1 模型和衰减模型 2 种, 大多数方法中的节点都采用 0-1 模型. 这种模型相比衰减模型更加简单, 便于分析. 对于整个网络来说, 节点自主移动的方式和中心调度的方式各占一半.

表 1 代表性方法综合比较

Table 1 Comprehensive comparison between typical methods

方法	信息驱动	节点模型	移动自主性	节点分级	数据融合	目标数量	移动受限	节点协作
DCBDA <sup>[32]</sup>	是(覆盖)	0-1 模型	自主移动	是	是	单个	否	否
MATA <sup>[33]</sup>	是(覆盖)	衰减模型	中心调度	是	是	单个	否	否
DEOM <sup>[34]</sup>	是(覆盖)	0-1 模型	中心调度	是	否	单个	否	否
GBDA <sup>[35]</sup>	是(覆盖)	0-1 模型	自主移动	否	否	单个	否	是
SOTBA <sup>[36]</sup>	是(数据传输)	0-1 模型	中心调度	否	否	未知	否	是
SFTF <sup>[37]</sup>	是(数据传输)	0-1 模型	自主移动	否	是	单个	否	否
IPFA <sup>[38]</sup>	是(信息量)	衰减模型	中心调度	否	否	多个	否	否
NCDA <sup>[39]</sup>	否	0-1 模型	自主移动	否	否	多个	否	否

模型可能并不完全相同. 这是因为节点在移动时, 自身的移动本身会对监测产生扰动. 因此, 如何对移动节点建立更完善的感知模型是需要解决的问题.

### 6.2 考虑对网络进行分层

对于 WSN 的其他研究领域, 例如路由、数据收集等等, 分层型网络相比平面型网络都表现出了更大的优势. 目前关于移动式目标跟踪的分层型网络研究数量较少. 分层型网络可能为移动节点的调度带来新的启发.

### 6.3 考虑移动节点自身的能耗

能耗问题是 WSN 研究中普遍关注的问题. 对于如何节约固定节点的能耗, 研究者已经提出了许多方法. 但是对于移动式目标跟踪来说, 大部分方法还没有考虑移动节点的能量消耗问题, 而是假设移动节点本身具有无限能量, 可以在监测区域内任意移动. 随着研究的深入, 考虑移动节点的能耗并探讨如何有效地节约移动节点能耗将会是不可避免的问题.

### 6.4 考虑对多目标进行跟踪

目前大部分方法都只适用于单目标跟踪. 相比于单目标跟踪, 多目标跟踪可以应用到更广泛的场景中. 不过, 多目标需要考虑如何更好地分配移动传感器节点以及节点之前的相互配合, 单独将单目标跟踪方法应用到多目标场景并不能很

2) 多数方法针对的是单个目标的网络场景. 此外, 部分方法采用了数据融合方式处理节点的探测数据.

3) 对于整个网络结构而言, 大部分方法都采用平面型的网络, 而只有少数方法考虑了多个移动节点间协作的问题.

4) 几乎没有目标探测方法考虑移动节点自身的能耗问题, 而是认为节点可以在网络中任意移动.

## 6 未来研究方向

目前已有的移动式目标跟踪方法依然存在诸多问题. 一方面, 方法中移动节点与固定节点之间的协作并不充分, 并且对移动节点的移动性有较强的假设. 另一方面, 关于目标跟踪问题的一些评价标准并没有统一, 研究者在提出自己的方法时往往会引用新的具体标准对方法进行度量. 而且移动节点本身依据不同的硬件平台会呈现出性能差异. 这使得多种方法的实验结果参差不齐, 相互之间很难进行比较. 本节将这些问题进行归纳, 指出未来的研究方向, 供今后的研究者参考.

### 6.1 考虑更实际的探测模型

大部分 WSN 中使用的探测模型都是 0-1 模型. 这种模型简单易实现, 但是不贴近实际情况. 有部分方法使用了更实际的衰减模型. 但是移动传感器节点的移动特性与普通的衰减

好地解决问题, 因此还需要未来的深入研究.

## 7 结论

传统的 WSN 由固定节点组成, 节点的移动性限制使其在跟踪过程中常常遇到跟踪质量难以保证、网络整体能耗高等问题. 而移动节点的优势正好在于其能根据需要改变自身位置, 同时拥有较强的计算存储能力和较小的能量限制. 因此, 异构 WSN 的使用可以很好地弥补传统 WSN 的不足. 本文对移动式目标跟踪方法进行了大量调研, 从宏观的角度对以目标定位为主的方法和以目标探测为主的方法进行了区分, 并集中介绍了现有的以探测为主的移动式目标跟踪方法. 通过比较和总结, 发现现有的方法主要从单方面考虑对目标进行跟踪; 大部分方法采用的是简单的 0-1 探测模型; 移动节点的能耗问题往往被忽略而没有受到重视等等. 基于此, 本文指出了未来的研究方向, 例如建立更实际的探测模型、使用分层的网络结构和混合网络、考虑移动节点本身的能耗等等. 这些分析和探索, 势必为将来的研究提供有价值的参考.

## References:

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramanian Y, et al. Wireless sensor networks: a survey [J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-

- 422.
- [2] Ren Feng-yuan ,Huang Hai-ning ,Lin Chuang. Wireless sensor networks[J]. Journal of Software 2003 ,14( 7) : 1282-1291.
- [3] Li Jian-zhong ,Gao Hong. Survey on sensor network research [J]. Journal of Computer Research and Development 2008 45( 1) : 1-15.
- [4] Zhou Liang-yi ,Wang Zhi ,Wang Ying-guan. Multi-view cooperative tracking of multiple mobile object based on dynamic occlusion threshold [J]. Journal of Computer Research and Development , 2015 51( 4) : 813-823.
- [5] Wang Sheng ,Wang Xue ,Bi Dao-wei. Dynamic sensor selection optimization strategy for wireless sensor networks [J]. Journal of Computer Research and Development 2015 45( 1) : 188-195.
- [6] Liu Xu ,Li Jin-bao ,Guo Long-jiang et al. Energy-efficient algorithm for mobile target prediction and tracking in wireless sensor networks [J]. Journal on Communications 2010 31( 9A) : 135-143.
- [7] Nordio A ,Chiasserini C. Field reconstruction in sensor networks with coverage holes and packet losses [J]. IEEE Transactions on Signal Processing 2011 59( 8) : 3943-3953.
- [8] Caione C ,Brunelli D ,Benini L. Distributed compressive sampling for lifetime optimization in dense wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics 2012 8( 1) : 30-40.
- [9] Ren Xiu-li ,Tang Yi-bo ,Liu Shan-shan. Data collection method in wireless sensor networks based on mobile base station and collecting-tree[J]. Journal of Chinese Computer Systems 2014 35( 5) : 1022-1026.
- [10] Wang Tian ,Peng Zhen ,Chen Yong-hong ,et al. Heterogeneous wireless sensor networks for continuously tracking mobile targets [J]. Journal of Chinese Computer Systems 2015 36( 3) : 503-507.
- [11] Xing G ,Wang J ,Yuan Z et al. Mobile scheduling for spatiotemporal detection in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems 2010 21( 12) : 1851-1866.
- [12] Wang T ,Peng Z ,Chen Y ,et al. Continuous tracking for mobile targets with mobility nodes in wsns [C]. Proceedings of the International Conference on Smart Computing ( SMARTCOMP ) ,IEEE , 2014: 261-268.
- [13] Lin Jin-zhao ,Li Guo-jun ,Zhou Xiao-na et al. DPM-based method for tracking maneuvering targets in wireless sensor networks [J]. Journal on Communications 2010 31( 12) : 90-96.
- [14] Wang T ,Peng Z ,Wang C et al. Extracting target detection knowledge based on spatiotemporal information in wireless sensor networks [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks , doi: 10. 1155/2016/5831471 2016.
- [15] Jindal A ,Liu M. Networked computing in wireless sensor networks for structural health monitoring [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking 2012 20( 4) : 1203-1216.
- [16] Wang J ,Ghosh R K ,Das S K. A survey on sensor localization [J]. Journal of Control Theory and Applications 2010 8( 1) : 2-11.
- [17] MartiNez S ,Bullo F. Optimal sensor placement and motion coordination for target tracking [J]. Automatica 2006 42( 4) : 661-668.
- [18] Yu X ,Huang W ,Lan J et al. A novel virtual force approach for node deployment in wireless sensor network [C]. Proceedings of the IEEE 8th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems ( DCOSS ) ,IEEE 2012: 359-363.
- [19] Ding L ,Wu W ,Willson J et al. Constant-approximation for target coverage problem in wireless sensor networks [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications ( INFOCOM ) ,IEEE 2012: 1584-1592.
- [20] Rizvi S ,Qureshi H K ,Khayam S A ,et al. A1: An energy efficient topology control algorithm for connected area coverage in wireless sensor networks [J]. Journal of Network and Computer Applications 2012 35( 2) : 597-605.
- [21] Liu Y ,Zhang Q ,Ni L M. Opportunity-based topology control in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems 2010 21( 3) : 405-416.
- [22] Zorbas D ,Glynos D ,Kotzanikolaou P ,et al. Solving coverage problems in wireless sensor networks using cover sets [J]. Ad Hoc Networks 2010 8( 4) : 400-415.
- [23] Zhang S ,Cao J ,Li-Jun C ,et al. Accurate and energy-efficient range-free localization for mobile sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing 2010 9( 6) : 897-910.
- [24] Heinzelman W B ,Chandrakasan A P ,Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications 2002 1( 4) : 660-670.
- [25] Teng J ,Snoussi H ,Richard C. Decentralized variational filtering for target tracking in binary sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing 2010 9( 10) : 1465-1477.
- [26] Wang T ,Peng Z ,Liang J et al. Detecting targets based on a realistic detection and decision model in wireless sensor networks [M]. Springer International Publishing ,Wireless Algorithms ,Systems , and Applications 2015: 836-844.
- [27] Mourad F ,Chehade H ,Snoussi H et al. Controlled mobility sensor networks for target tracking using ant colony optimization [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing ,2012 ,11( 8) : 1261-1273.
- [28] Chamam A ,Pierre S. A distributed energy-efficient clustering protocol for wireless sensor networks [J]. Computers & Electrical Engineering 2010 36( 2) : 303-312.
- [29] Incel Ö D ,Ghosh A ,Krishnamachari B ,et al. Fast data collection in tree-based wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing 2012 11( 1) : 86-99.
- [30] Du H ,Ye Q ,Wu W et al. Constant approximation for virtual backbone construction with guaranteed routing cost in wireless sensor networks [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications ( INFOCOM ) ,IEEE 2011: 1737-1744.
- [31] Wang T ,Peng Z ,Chen Y ,et al. Continuous tracking for mobile targets with mobility nodes in wsns [C]. Proceedings of the 2014 International Conference on Smart Computing ( SMARTCOMP ) , IEEE 2014: 261-268.
- [32] Shan X ,Tan J. Mobile sensor deployment for a dynamic cluster-based target tracking sensor network [C]. Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems ( IROS 2005 ) ,Piscataway ,NJ: IEEE 2005: 1452-1457.
- [33] Wimalajeewa T ,Jayaweera S K. Mobility assisted distributed tracking in hybrid sensor networks [C]. Proceedings of the Int Conf on Communications ( ICC ) ,Piscataway ,NJ: IEEE 2010: 1-5.
- [34] Wang X ,Ma J ,Wang S ,et al. Distributed energy optimization for target tracking in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing 2010 9( 1) : 73-86.
- [35] Lin J-W ,Tang S-C. A grid-based coverage approach for target

tracking in hybrid sensor networks [J]. Journal of Systems and Software 2011 84(10): 1746-1756.

- [36] Hwang K-i, In J, Yun Y-h, et al. Dynamic sink oriented tree algorithm for efficient target tracking of multiple mobile sink users in wide sensor field[C]. Proceedings of the 60th Vehicular Technology Conference (VTC2004-Fall), Piscataway, NJ: IEEE, 2004: 4607-4610.
- [37] Okane J M, Xu W. Energy-efficient information routing in sensor networks for robotic target tracking [J]. Wireless Networks 2012, 18(6): 713-733.
- [38] Lu W, Zhang G, Ferrari S, et al. A particle-filter information potential method for tracking and monitoring maneuvering targets using a mobile sensor agent[J]. The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology 2014, 11(1): 47-58.
- [39] Ferrari S, Fierro R, Perteet B, et al. A geometric optimization approach to detecting and intercepting dynamic targets using a mobile sensor network [J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 2009 48(1): 292-320.

#### 附中文参考文献:

- [2] 任丰原, 黄海宁, 林 闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291.
- [3] 李建中, 高 宏. 无线传感器网络的研究进展[J]. 计算机研究与发展 2008 45(1): 1-15.
- [4] 周良毅, 王 智, 王营冠. 基于动态遮挡阈值的多视角多目标协作追踪[J]. 计算机研究与发展 2015 51(4): 813-823.
- [5] 王 晟, 王 雪, 毕道伟. 无线传感器网络动态节点选择优化策略[J]. 计算机研究与发展 2015 45(1): 188-195.
- [6] 柳 絮, 李金宝, 郭龙江, 等. 传感器网络中一种能量有效的移动目标预测跟踪算法[J]. 通信学报 2010 31(9A): 135-143.
- [9] 任秀丽, 汤一波, 刘珊珊. 一种移动基站的树形无线传感网数据收集方法[J]. 小型微型计算机系统 2014 35(5): 1022-1026.
- [10] 王 田, 彭 臻, 陈永红, 等. 异构无线传感器网络对移动目标的连续跟踪[J]. 小型微型计算机系统 2015 36(3): 503-507.
- [13] 林金朝, 李国军, 周晓娜, 等. 基于动态能量管理的无线传感网络移动目标定位跟踪方法[J]. 通信学报 2010 31(12): 90-96.

### 征 稿 简 则

一、**征稿范围** 《小型微型计算机系统》杂志刊登文章的内容涵盖计算技术的各个领域( 计算数学除外) . 包括计算机科学理论、体系结构、计算机软件、数据库、网络与通讯、人工智能、信息安全、多媒体、计算机图形与图像、算法理论研究等各方面的学术论文。

二、**来稿要求**: 本刊主要刊登下述各类原始文稿:

1. 学术论文: 科研成果的有创新、有见解的完整论述. 对该领域的研究与发展有促进意义, 论文字数最好在 10000 字左右.
2. 综述: 对新兴的或活跃的学术领域或技术开发的现状及发展趋势的全面、客观的综合评述.
3. 技术报告: 在国内具有影响的重大科研项目的完整的技术总结.

三、**注意事项**

1. 来稿务求做到论点明确、条理清晰、数据可靠、叙述简练、词义通达.
  2. 来稿必须是作者自己的科研成果, 无署名和版权争议. 引用他人成果必须注明出处.
  3. 本刊采用在线投稿方式, 可登陆 <http://xwxt.sict.ac.cn/> 进行在线投稿.
  4. 格式要求: 题目(中、英文)、摘要(中、英文)、作者的真实姓名(中、英文)、作者的单位、城市(中、英文)、邮政编码、E-mail(便于联系的)、关键词(中、英文 4~7 个)、中图分类号、作者简介、基金项目.
    - (1) 英文部分的作者姓名使用汉语拼音, 单位英文名称须给出英文全称, 不要使用缩略语;
    - (2) 作者简介包含作者姓名、性别、出生年、最高学历、技术职称、研究方向(若作者中有中国计算机学会(CCF)会员, 请注明, 并给出会员号). 凡第一作者为 CCF 会员/高级会员/学生会会员者, 将享受八五折的版面费优惠;
    - (3) 基金项目的类别与项目编号.
  5. 中、英摘要: 文章摘要具有独立性和自明性, 含正文等量的主要信息, 一般为 250~300 字, 采用第三人称表述.
  6. 参考文献: 未公开发表的文献不得列入. 文后所列参考文献统一排序, 且必须在正文中引用. 中文参考文献应给出对应的英文译文, 其具体书写格式为:
    - (1) 图书 [编号]作者姓名(姓在前, 名在后), 书名, 出版社地址, 出版社, 出版年.
    - (2) 期刊 [编号]作者姓名、文章题目、刊物名称, 出版年, 卷号(期号): 起止页码.
    - (3) 会议论文 [编号]作者姓名. 论文题目. 见: 编者、论文集全名、出版地: 出版者, 出版年, 起止页码.
    - (4) 网络文献: 请给出文献作者或单位名, 文章题目、网址、发布日期.
  7. 插图和表: 插图必须精绘并用计算机激光打印, 一般不超过 7 幅. 图应结构紧凑, 不加底纹, 不要做成彩色的, 图宽最好不超过 8 厘米, 图内字号统一使用 6 号宋体, 字迹、曲线清晰, 必要时给出坐标名称和单位. 每个图、表均给出中英文图注(如“图 1: \*\*\*图” “Fig. 1: \*\*\*”)和表注(如“表 1: \*\*\*表”, “Table 1: \*\*\*”).
  8. 计量单位: 稿件中一律使用《中华人民共和国法定计量单位》. 外文和公式中应分清大、小写和正、斜体, 上、下角的字母、数码位置准确, 易混淆的字母或符号, 请在第一次出现时标注清楚.
  9. 本刊在收到作者稿件经初审后立即给作者电子邮箱发“稿件收到通知”. 除作者另有明确要求外, 本刊原则上只与第一作者联系, 作者投稿后若 4 个月无消息, 可自行改投它刊. 通过初审的稿件将收到本刊给予的编号, 并需邮寄审稿费.
  10. 本刊对不拟录用的稿件只发给“退稿通知”, 恕不退回原稿, 请自留底稿.
  11. 稿件一经发表, 将酌致稿酬, 并寄送样刊.
- 本刊文章现被国内外多家数据库收录, 作者著作权使用费与本刊稿酬一并给付. 作者若不同意将文章收录, 请在投稿时说明.
- 编辑部地址: 沈阳市东陵区南屏东路 16 号《小型微型计算机系统》编辑部 邮政编码: 110168  
电 话: (024) 24696120 E-mail: xwxt@sict.ac.cn 网 址: <http://xwxt.sict.ac.cn>