

无线传感器网络中移动目标探测跟踪研究进展*

王田¹, 梁玉珠¹, 彭臻¹, 彭绍亮², 蔡绍滨¹, 贾维嘉³



¹(华侨大学 计算机科学与技术学院, 福建 厦门 361021)

²(国防科学技术大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073)

³(上海交通大学 电子信息与工程学院, 上海 200240)

通讯作者: 王田, E-mail: cs_tianwang@163.com

摘要: 传统的固定无线传感器网络在进行目标跟踪过程中面临着跟踪质量较低、网络能耗较高等问题。移动传感器网络提供了新的解决方法,即移动式目标跟踪。目前的研究大多将被跟踪目标的探测和定位混为一谈。故此,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: 无线传感器网络; 移动目标; 目标跟踪; 目标探测

中文引用格式: 王田, 梁玉珠, 彭臻, 彭绍亮, 蔡绍滨, 贾维嘉. 无线传感器网络中移动目标探测跟踪研究进展. 软件学报, 2017, 28(Suppl. (1)): 115-128. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17012.htm>

英文引用格式: Wang T, Liang YZ, Peng Z, Peng SL, Cai SB, Jia WJ. Research advance of detection-centric target tracking with mobile elements in wireless sensor networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2017, 28(Suppl. (1)): 115-128 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17012.htm>

Research Advance of Detection-Centric Target Tracking with Mobile Elements in Wireless Sensor Networks

WANG Tian¹, LIANG Yu-Zhu¹, PENG Zhen¹, PENG Shao-Liang², CAI Shao-Bin¹, JIA Wei-Jia³

¹(College of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

²(School of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

³(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Traditional stationary wireless sensor networks usually have problems, such as low tracking quality, high energy consumption and so on, during the process of target tracking. More and more mobile elements, i.e., mobile sensors, are used in wireless sensor networks and thus bring new solutions for target tracking. The existing research usually confuses detecting the target with locating the target. After distinguishing between the detection-centric and localization-centric methods, this paper reviews specifically the current research status of the detection-centric target tracking methods. By comparing the merits and demerits of the existing methods in aspects like tracking quality, energy consumption, etc., it reveals their problems. In the end, it summarizes some possible research hotspots and tendency of mobile solutions in many aspects.

Key words: wireless sensor networks; mobile element; target tracking; target detection

* 基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)(2015CB352401); 国家自然科学基金(61532013, 61772148, 61672441); 华侨大学研究生科研创新能力培育计划(17013083005)

Foundation item: National Basic Research Program of China (973) (2015CB352401); National Natural Science Foundation of China (61532013, 61772148, 61672441); The Foster Project for Graduate Student in Research and Innovation of Huaqiao University (17013083005)

收稿时间: 2017-05-15; 采用时间: 2017-09-23

1 引言

无线传感器网络 WSNs(wireless sensor networks)由大量体积小、能量有限的无线传感器节点组成^[1]。部署在固定区域的传感器节点将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。这些数据通过无线方式被发送,并以自组多跳的网络方式传送到用户终端,能够帮助人们掌握监测区域的状态信息,从而实现物理世界、计算世界以及人类社会三元世界的连通^[2]。WSNs 的相关研究在 21 世纪初获得了快速发展,其相关技术正被广泛地应用在国防军事^[3]、环境保护^[4]、建筑体监测^[5]和城市建设^[6]等领域。

目标跟踪是 WSNs 的重要应用^[7]。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^[8],并对目标进行持续感知以获得目标的运动状态信息、节点对移动目标的感知能力以及节点的相对剩余能量水平,自动调整节点工作模式,更高效地跟踪目标^[9]。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,一旦电池的寿命耗尽,就意味着该节点已成为无效节点而无法再正常工作,监测区域内将出现无法探测到的盲区^[10]。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,监测区域内往往需要大密度地部署固定传感器节点以提高网络的健壮性^[11]。

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^[12]。相比固定传感器,移动传感器在目标跟踪应用中具有天生的优势。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。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^[13]。如果能够预测目标的运动轨迹,移动传感器甚至能以较低的移动速度对目标实施跟踪。另外,即使少量节点消亡了,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^[14]。因此,相比传统的固定传感器网络目标跟踪方法,使用移动传感器节点的移动式目标跟踪方法能够更好地监测目标,提高跟踪质量,同时减少节点的能量消耗,延长整个网络的生存期。

随着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,许多研究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^[15]。目标定位是借助网络中部分已知自身位置的节点,迭代三边定位算法,选择多个信标节点通过多次利用三边定位获得未知节点和目标的多个位置,然后综合考虑各个结果所占的权值重新计算得到未知节点和目标的位置信息来对目标进行定位^[16]。目标探测^[17]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^[18]。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是不同的。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^[19]。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 3 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,通信方式将决定网络的组织结构以及节点的数据如何发送.

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网络中全部采用移动节点,构成移动传感器网络 MSNs(mobile sensor networks)^[20],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.如图 1~图 3 所示.

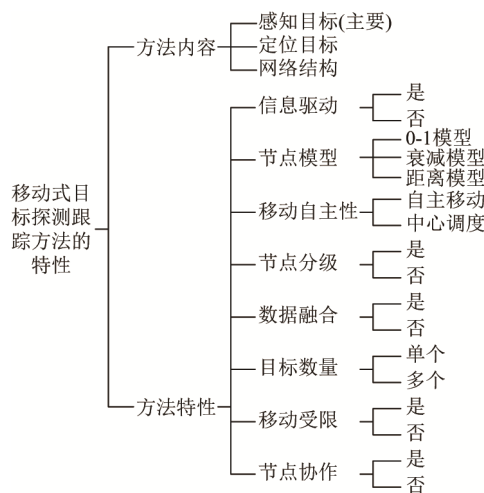


Fig.1 Characteristics of target tracking solutions with mobile elements

图 1 移动式目标探测跟踪方法的特性

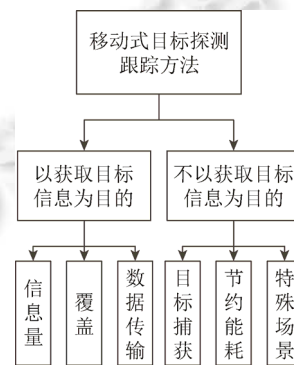


Fig.2 Categories of target tracking solutions with mobile elements

图 2 移动式目标探测跟踪方法的分类情况

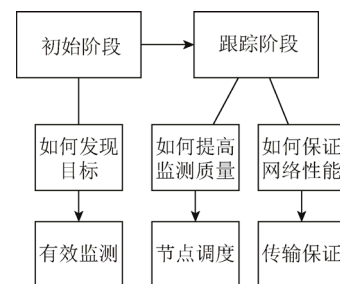


Fig.3 Main research of target tracking solutions with mobile elements

图 3 移动式目标探测跟踪方法的主要研究内容

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,并不是具体的数值定义和表示.

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 FIM(Fisher information matrix)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^[21].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. 网络覆盖程度

网络覆盖程度反映了部署在传感器上的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^[22].一般来说,当目标在监测区域内移动时,覆盖率越大越能够有效地减少目标丢失情况的出现.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^[23].

3. 网络连通性

网络连通性是网络可靠性的重要衡量标准^[24].当移动节点在网络中移动时,节点间相对位置的改变会使得网络的拓扑结构发生变化,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的传输或控制拓扑^[25];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^[26].

4. 节点能量消耗

节点的能量消耗是 WSNs 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^[27].

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,而是可以主动地向目标靠近.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.目前,分层式固定传感器网络在目标跟踪方法中占有重要地位,取得了较好的效果^[28].与此类似,MSNs 既可以是平面型网络,也可以是分层型网络.

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、节点的移动自动性、网络结构等信息进行分类.下面对各种分类方式进行介绍.

1. 基于感知模型的分类

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^[29]、衰减模型^[30]和距离模型^[31]这 3 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.当与目标之间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距离的增大以及环境噪声的影响而连续衰减,从而更加贴近实际情况.而距离模型则关心节点与目标间的距离,并且假设节点的视距非常长.

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^[32].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^[33].

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将节点分出层次,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^[34]、树型方法^[35]和骨干型方法^[36]等等.

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^[37].

以上分类方法中,基于感知模型分类直观地给出了常见的模型以及不同模型的具体说明,可以根据不同的需求,选择相应的感知模型,但却无法知道节点是否可以自主移动以及跟踪目标的数量.基于移动自主性的分

类方法可以直观地了解节点的移动是否受到限制,但是用户只知道具体的概念,不能很好地了解到其网络结构和跟踪目标数量.基于网络结构的分类方法和基于感知模型的分类类似,用户可以直观地了解到的问题模型.但是用户对于节点是否移动受限以及跟踪的目标数量较难获悉.基于跟踪数量的分类方法中,用户可以根据实际的问题选择跟踪目标是单用户还是多用户,这种分类方法的缺点是不能直观地了解方法的感知模型和网络结构.

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按是否以获取目标信息为目的进行分类.以获取目标信息为目的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.而其他方法则会关注其他方面,不以获取目标信息为直接目的,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,并将在后续章节中进行讨论.

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的监测.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可忽略的问题.整个跟踪过程中的主要研究内容如图 3 所示.本节将不同方法按照是否获取目标信息为目的分为两大类.

4.1 获取目标信息为目的

以获取目标信息为目的的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一方面的性能,例如覆盖率、连通性等等.根据方法侧重点的不同,下面将按照面向信息面、面向覆盖和面向数据传输这 3 个方面进行介绍.

4.1.1 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]基于 MSNs 提出一种基于群集控制的移动模型来对单个目标进行跟踪.该文中的群集控制算法 IDMDT(information-driven mobility distributed tracking)基于分布式卡尔曼滤波 DKF(distributed Kalman filter).目标的位置将作为集合地点,移动节点将逐渐向集合地点移动,小的群集最终形成一个大群集(如图 4 所示),从而提高对目标的信息度量值.文献[38]中采用 0-1 模型实现单目标的跟踪,存在的主要问题是 0-1 模型并不完全符合该文作者提到的实验场景,算法的适用性不强.

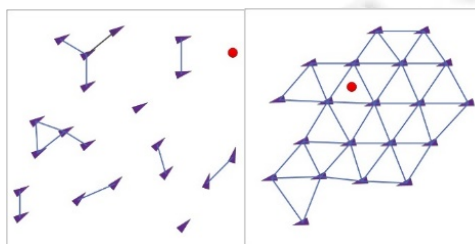


Fig.4 An illustration of IDMDT's implementation

图 4 算法 IDMDT 执行过程示意图

作为该算法的后续研究,文献[39]更进一步地为 MSNs 提出一种移动控制算法 CDEMC(coupled distributed estimation and motion control).该方法使用 FIM 作为信息量的度量标准,并列出了目标函数作为调度移动节点的依

据.同时,利用连续卡尔曼一致性滤波保持节点间的相互距离以避免发生碰撞.在该文作者之后的研究中,文献[40]提出了改进算法 IDFA(information-driven flocking algorithm).该改进算法针对多目标的情况,通过部署少量的移动传感器来对数量更多的目标进行跟踪.该算法是基于 0-1 模型实验的,可进一步把算法应用于衰减模型和距离模型,提高算法的适用性.同时,该算法试图同时提高传感器的覆盖和信息值,并要保持相邻传感器与传感器和感知区域边界之间的最小距离,这个条件也较难达到.

文献[41]提出了一种分布式控制方法 ITDCA(information-theoretic distributed control architecture)来控制 MSNs.作者采用粒子滤波来计算信息搜索的目标函数.通过分解目标函数,移动节点相互之间可以利用彼此的信息来提高感知能力.这种体系结构可以用于很多监测应用中,而不止是目标跟踪.但是该文缺乏以更长时间的跨度,进一步分析仿真实验的结果.

文献[42]协同考虑纯方位移动节点的部署和感知问题,提出一种协同算法 CACSA(co-design approach for control and sensing algorithms).通过调整节点的队形来最大化 FIM 的行列式,从而最大化信息量.不过,该文中没有考虑节点的感知范围问题,而是假定节点能够一直探测到目标.

文献[43]提出跟踪单目标的方法 WTA(weighted tracking algorithm).数据中心通过固定节点的 TOA 测量值来估计移动节点和目标的状态,借助半定规划松弛法 SDP(semi-definite programming relaxation)处理多径传播噪声下的定位问题,从而控制移动节点对目标进行跟踪.但其假设移动节点的移动速度大于目标速度,这使得算法的通用性受到了限制.

文献[44]引入了移动 sink 节点,即 tracker,提出了 t -Tracking 方法.当目标向另一面移动时,处于目标移动方向的节点计算及预测目标移动到面的时间,并转发给 tracker 以使其能够移动到目标节点附近而对其进行跟踪.该方法的优点是考虑了传感器节点的能量消耗问题,组成目标所在面之外的节点处于休眠状态,能够减少能耗.另外,此方法减少了对定位的要求,能够降低对节点硬件的要求.

文献[45]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跟踪单个目标.网络中的节点会分成不同的簇,簇内固定节点使用 SIR(sampling importancere-sampling)粒子滤波算法估计目标位置,再利用移动节点对于目标实现 β 层覆盖,即至少有 β 个节点的感知范围能够覆盖目标所在区域.

文献[46]同时考虑相加性和相乘性噪声,使用移动测距节点对单目标进行跟踪,目的是提出最优协调策略来提高跟踪精度.使用概率模型对节点的监测值进行建模,并引入费舍尔信息矩阵(FIM)的行列式作为跟踪精度的度量标准.其思路是对优化组合进行不断简化得到最终可行结果,提出了 3 种算法分别用于选择合适的节点、减少节点的可能组合和优化节点移动.通过前两种算法,即 CTSS(candidate task sensor selection)和 MMCR(minimum-maximum combinations reduction),节点的可能组合得到缩减,最终通过遍历所有剩余可能情况来确定节点的最优组合.然而,所提出的算法只针对单目标跟踪.

4.1.2 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.

文献[47]提出的模型 MNSRSM(mobile nonlinear scalar range sensor model)基于标量距离传感器的测量值和非线性滤波器来估计目标的移动轨迹.不过,该模型中的移动节点将以等边三角形的形式部署,从而保证对目标的 3 层覆盖.这样,对移动节点的部署进行限制不利于算法在实际场景中的应用,同时,算法只能实现对单一目标的跟踪,适用面较窄.

文献[48]提出了一种基于覆盖的局部合作移动模型 PCBMM(physical coverage-based mobility model)来提高 MSNs 中对于固定或移动事件监测的覆盖程度,尽可能地缩小移动传感器之间的重叠区域.不过,该文并未提出相应的跟踪算法.

文献[49]提出优化部署方法 PFOA(particle filtering optimal deployment algorithm).该算法中的每个移动节点利用粒子滤波估计目标的状态.整个方法设计较简单,虽然节点相互通信,但是并没有过多地协作.

文献[50]所研究的是 MSNs 对智能移动目标的跟踪.该文提出一种简单的启发式算法 IMTDA(intelligent

mobile target detection algorithm)来求解移动节点探测到目标所需要的最短时间.该算法以目标覆盖范围和目标数据收集量作为性能指标.但是对于一个具体的场景,并没有足够的素材使其满足算法的条件.并且,节点间不能协作,更不利于做出综合决策.

文献[51]提出了移动控制框架 DMICS(distributed mobility implementation control scheme)希望在最大化多目标跟踪性能的同时考虑能量节约和覆盖保证.但是其中的假设过于理想化:每个移动节点都能通过获得目标信号的 TOA 和 DOA 对目标进行跟踪,且假设每个节点都能单独定位目标.

类似地,针对覆盖的方法还有文献[52]提出 AMCMS(autonomous mobile coordinative moving strategy).该方法在保证目标的每步移动都能够被监测到的情况下最小化所需调度的移动节点数量.该方法利用卡尔曼滤波模型来预测目标的下一位置,通过区间分析(interval analysis)将目标位置表示成矩形区域,并调度移动节点覆盖这些区域(如图 5 所示).移动节点需要均匀地部署到目标的预测区域内,这样才能保证以最少的节点对区域进行覆盖.但是算法只给出了节点的数量,并没有描述每个节点应该移到到哪一位置.

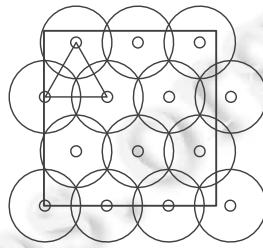


Fig.5 An illustration of AMCMS's scheduling

图 5 算法 AMCMS 调度示意图

文献[53]针对跟踪监测系统动态区域覆盖和目标覆盖问题提出了一种半群集方法 SFA(semi-flocking algorithm).这种方法综合了群集方法(flocking algorithm)和反群集方法(anti-flocking algorithm)的优点来对系统中的节点进行移动调度.一方面,对于每个目标,小部分节点会组成小的群集负责监测目标.另一方面,其他节点将处于自由状态来保证对周围环境的监测.通过这种半群集的方式,该方法将平衡区域监测和目标监测的任务.该算法的主要优点是覆盖面积大,缺点是目标检测时间过短,还存在未被探测到的目标.

文献[54]研究的是利用多个移动节点跟踪单个目标,提出了 AMSPF(adaptive mobile sensor positioning framework)框架.框架中的移动节点为无人机 UAV(unmanned air vehicles),所有节点由基站控制.基站利用扩展卡尔曼滤波 EKF(extended Kalman filter)来估计目标的位置和速度.针对网络中部分受控的移动节点,文献[55]运用机器学习理论为移动节点定义了一种基于核函数的回归模型 FSDKR(first and second derivatives for kernel-based regression).该模型利用目标估计误差的一次、二次导数求解节点的下一位置.其新颖之处在于使用机器学习方法来处理节点数据并规划节点的移动,但是,并没有明确指出所处理数据的物理意义.

文献[56]提出了分布式方法 IDTA(improved decentralized tracking approach)对多个目标进行跟踪.移动目标利用 RSS 信息计算自身位置,并根据位置组成不同的分组,每个分组选择一个距 sink 节点较近并且剩余能量较多的节点作为头节点,头节点收集组内目标的位置信息并转发给 sink 节点来跟踪目标.但其要求移动目标能够根据自身到信标节点的 RSS 信息对自身进行定位,对硬件要求较高.

文献[57]提出 TLIT(target localization improving tracking)方法.当目标移动到某些节点附近时使用 TOA 方法计算目标的坐标进而实现目标的准确跟踪.此方法的缺点是假设网络中节点都能定位到自己的位置并且所有节点都能相互通信,这对节点的硬件要求较高,同时还会增加节点能耗.

4.1.3 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优化部署,保持网络数据的顺利传输.

针对变化环境下的目标跟踪,文献[58]使用群集控制理论来控制移动传感器的移动,设计算法 SGGP(seed

growing graph partition),移动节点将分布式地学习网络的大小变化所引起的各个参数的变化.当移动传感器在跟踪目标过程中需要穿过狭窄障碍时(如图6所示),整个网络的范围和形状将发生协同变化,尽可能地保证网络的连通性.这种方法较好地保证了网络中数据的传输,但是算法的时间复杂度较高,当移动传感器在跟踪目标过程中移动时,再进行分布式学习整个网络的各个参数是没有必要的.

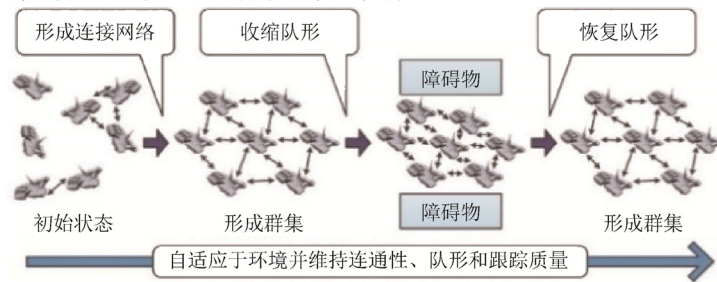


Fig.6 An illustration of SGPP's implementation

图6 算法 SGPP 执行过程示意图

4.2 其他方法

不以获取目标信息为目的的方法没有直接关注获取信息量的大小,而是以其他目的设计跟踪方法,这些目的包括捕获目标、节约节点能耗等等.

4.2.1 目标捕获

部分方法希望通过规划移动节点的运动轨迹对目标进行捕获.

文献[59]将单个移动目标看作老鼠,将多个移动传感器看作猫,以此研究在封闭的网络中老鼠如何避免被猫发现的问题.该文提出了框架 DIMTF(detection of intelligent mobile target framework).当老鼠的感知范围小于或等于猫的感知范围时,需要使老鼠被发现的期望时间尽可能地长.当老鼠的感知范围大于猫时,猫可以进行协同工作,通过减少监测重合区域来尽可能地限制老鼠的活动自由.该问题设定老鼠被猫发现为结束标志.如果设定当老鼠被猫捕获时才视为老鼠躲避失败,问题将更具有挑战性.

文献[60]提出的算法 NCD(new cell-decomposition approach)对多个目标进行监测和捕获.该文提出一种细胞分解算法使网络对目标的监测概率最大化.同时,该算法还考虑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.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.

文献[61]利用几何断面分析方法 GTA(geometric transversals approach)来处理跟踪目标过程中移动节点的运动规划问题.该方法将监测概率表示为时间和目标运动参数的函数,通过求监测概率的最优解来规划节点的移动.但是,该方法需要专门的控制中心来求最优解.

4.2.2 节约能耗

少数跟踪方法以减少移动节点在跟踪过程中的能量消耗为主要目的.

文献[62]提出了算法 MCRS(minimum cost routing scheme),用点对点的方式建立起连接以保证网络对目标的跟踪,并让所有节点在同一时刻消亡.采用点对点方式建立网络虽然可以减少能量的消耗,但其增加了在跟踪过程中数据传送的效率,且只能跟踪单个目标,应用范围较小.

文献[63]提出分布式跟踪算法 CDETA(completely distributed efficient tracking algorithm)利用分簇减少能量消耗.整个网络被规则地分成多个正方形区域,而节点只能在所属的簇内移动.该文对于簇的形状定义有很大的局限性,应该在实际的应用场景中定义更优的簇.

4.2.3 特殊场景

文献[64]描述的场景比较特殊,它研究的是分子环境中的移动生物纳米传感器网络的目标跟踪问题.网络由生物纳米机器设备组成,它们的跟踪目标是病原体、传染性微生物、生化武器等等物质.该文使用偏微分方程集对问题进行建模,提出了 MBNM(mobile bionanosensor networks model)模型.

由此可知,以获取目标信息为目的的方法不但可以通过调度移动节点来更好地探测目标,而且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.其中,面向信息面的方法只关注获取信息量的大小,没有考虑网络中的结构以及数据传输的问题.面向覆盖的方法只关注于如何有效地保证网络对监测区域的覆盖,忽略了节点所处具体位置以及节点协作等问题,面向数据传输的方法关注如何更好地调度移动节点更好地实现数据传输,这种方法存在的缺点是没有考虑如何传输满足信息量最大化以及网络覆盖问题.不以获取目标信息为目的的方法中其主要缺点是只关注传感器网络中某一方面性能的提高,如节点耗能问题、特殊场景等,而忽略了用户最关注的如何获取更多信息量的问题.

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.本节将以表格的形式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.下面进行相应的总结和分析.

1. 大多数方法以获取目标信息为目的.对于单个节点来说,节点感知模型有 0-1 模型、衰减模型和距离模型这 3 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,大部分方法都采用节点自主移动的方式,只有少部分方法采用中心调度的方式.

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

3. 对于整个网络而言,大部分方法都采用平面型的网络结构.有许多方法考虑了多个移动节点间协作的问题,通过多个移动节点协作可以更好地探测目标信息.而且,几乎没有哪种目标探测方法考虑移动节点的能耗问题,而是认为节点可以在网络中任意移动.

Table 1 Characteristics comparison between detect-oriented solutions

表 1 探测为主方法特点比较

方法	获取目标信息为目的	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
IDMDT ^[38]	是(信息量)	0-1 模型	自主移动	否	是	单个	否	是
CDEMC ^[39]	是(信息量)	0-1 模型	自主移动	否	否	单个	否	是
IDFA ^[40]	是(信息量)	0-1 模型	自主移动	否	否	多个	否	是
ITDCA ^[41]	是(信息量)	0-1 模型	自主移动	否	是	单个	否	是
CACSA ^[42]	是(信息量)	0-1 模型	自主移动	否	否	单个	否	是
WTA ^[43]	是(信息量)	衰减模型	中心调度	否	是	多个	否	否
T-Tracking ^[44]	是(信息量)	0-1 模型	自主移动	否	否	单个	否	否
MATA ^[45]	是(信息量)	衰减模型	中心调度	是	是	单个	否	否
CTSS&MMCR ^[46]	是(信息量)	衰减模型	自主移动	否	否	单个	否	是
MNSRSM ^[47]	是(覆盖)	0-1 模型	自主移动	否	是	单个	否	否
PCBMM ^[48]	是(覆盖)	0-1 模型	自主移动	否	否	未知	否	否
PFODA ^[49]	是(覆盖)	0-1 模型	自主移动	否	否	单个	否	否
IMTDA ^[50]	是(覆盖)	0-1 模型	自主移动	否	是	多个	否	否
DMICS ^[51]	是(覆盖)	衰减模型	自主移动	否	是	多个	否	是
AMCMS ^[52]	是(覆盖)	衰减模型	自主移动	否	是	单个	否	是
SFA ^[53]	是(覆盖)	0-1 模型	自主移动	否	否	多个	否	是
AMSPF ^[54]	是(覆盖)	距离模型	中心调度	是	是	单个	否	是
FSDKR ^[55]	是(覆盖)	距离模型	中心调度	否	是	未知	否	是
IDTA ^[56]	是(覆盖)	距离模型	自主移动	是	是	多个	否	是
TLIT ^[57]	是(覆盖)	0-1 模型	自主移动	是	否	单个	否	是
SGGP ^[58]	是(数据传输)	0-1 模型	自主移动	否	否	单个	否	是
DIMTF ^[59]	否(目标捕获)	0-1 模型	自主移动	否	否	单个	否	是
NCDA ^[60]	否(目标捕获)	0-1 模型	自主移动	否	否	多个	否	否
GTA ^[61]	否(目标捕获)	0-1 模型	中心调度	否	否	单个	否	否
MCRS ^[62]	否(节约能耗)	衰减模型	自主移动	否	否	单个	是	是
CDETA ^[63]	否(节约能耗)	0-1 模型	中心调度	是	是	单个	否	是
MBNM ^[64]	否(特殊场景)	0-1 模型	中心调度	否	否	单个	否	否

可以看出,根据不同的背景环境,研究者提出方法的具体内容不尽相同,所使用的评判标准多种多样.但是

总的来说,这些方法所针对的问题集中在两个方面:数据质量和能量效率.数据质量指的是节点感知到的数据测量值的有效性以及由测量值所计算得到的结果值的精确性.对于目标探测方法来说,如何更有效地获得对目标测量值及提高感知数据质量则是问题关键.在能量效率方面,由于传感器网络自身的特点,如何减少节点的能量消耗是两类方法中都会涉及的问题.但是由于移动式目标跟踪所使用的移动传感器能够在一定程度上缓解能量的有限性,许多方法并没有对网络能耗进行分析和说明.实际上,数据质量的提高往往意味着网络能耗的增加.这是由于为了提高数据质量,需要网络提供对监测区域更好的覆盖以及对目标进行更多感知,这些都需要节点更多地参与到目标跟踪当中,因此,将会增加节点的能耗.要想在提高跟踪质量的同时减少能量的消耗是十分困难的.这可能也是许多方法并没有讨论移动节点能耗问题的原因.

6 未来研究方向

目前,现有的移动式目标跟踪方法依然存在诸多问题.一方面,MSNs 虽然尽可能地体现了移动节点的优势,但却忽略了移动节点与固定节点之间的协作,并且普遍对移动节点的移动性有较强的假设.其假设的节点移动性模型多为随机漫步模型(random walk mobility model)^[65]和随机路径点模型(random waypoint model)^[66].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.

1. 考虑更实际的探测模型

大部分传感网中使用的感知模型都是 0-1 模型.这种模型简单,易实现,但是不贴近实际情况.有部分方法使用了衰减模型,但是移动传感器节点的移动使其与普通的衰减模型可能并不完全相同.这是因为节点的移动会对监测产生扰动.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.

2. 考虑对网络进行分层

对于 WSNs 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.对于传感网的其他研究领域,例如路由、数据收集等,分层型网络相比平面型网络都表现出了一定的优势.目前关于分层型网络中的移动式目标跟踪研究较少.分层型网络可能为移动节点的调度带来新的启发,因此,这也将成为未来一个新的研究趋势.

3. 考虑组成混合型网络

本文提到的移动式目标跟踪方法均基于 MSNs.实际上,固定传感器的使用非常普遍.如果能够将固定节点加入到 MSNs 中,就能组成新的混合传感器网络,运用于新的场景中.在现有研究中,采用全移动和采用混合网络的研究基本持平,但在全移动网络中,节点的移动会导致网络不稳定、增加网络能耗、移动控制数据增多等现象的产生.而在混合型网络中采用的移动节点数目较少,目标跟踪一般使用固定节点,只有当固定节点无法跟踪到目标时再调度移动节点.这样,既可以减少节点移动产生的能耗,又能最大限度地保证网络的稳定性,因此,会成为目标跟踪研究的发展趋势.

4. 考虑移动节点自身的能耗

能耗问题是 WSNs 研究中普遍关注的问题.对于如何节约固定节点的能耗,研究者们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.

5. 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好地解决问题,因此还需要未来的深入研究.

7 结 论

传统的 WSNs 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、网络整体能耗较高等问题.移动节点可以很好地弥补传统 WSNs 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,将为以后的研究提供有价值的参考.

References:

- [1] Guo S, He L, Gu Y, *et al.* Opportunistic flooding in low-duty-cycle wireless sensor networks with unreliable links. *IEEE Trans. on Computers*, 2014,63(11):2787–2802.
- [2] Wang T, Peng Z, Liang J, *et al.* Following targets for mobile tracking in wireless sensor networks. *ACM Trans. on Sensor Networks*, 2016,12(4):31.
- [3] Durisic MP, Tafa Z, Dimic G, Milutinovic V. A survey of military applications of wireless sensor networks. In: *Proc. of the Mediterranean Conf. on Embedded Computing (MECO)*. IEEE, 2012. 196–199.
- [4] Corke P, Wark T, Jurdak R, Hu W, Valencia P, Moore D. Environmental wireless sensor networks. *Proc. of the IEEE*, 2010,98(11):1903–1917.
- [5] Liu X, Cao J, Tang S, Guo P. A generalized coverage-preserving scheduling in WSNs: A case study in structural health monitoring. In: *Proc. of the INFOCOM*. IEEE, 2014. 718–726.
- [6] Zhang D, Huang J, Li Y, Zhang F, Xu C, He T. Exploring human mobility with multi-source data at extremely large metropolitan scales. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking*. ACM, 2014. 201–212.
- [7] Zhou L, Wang Z, Wang Y. Multi-View cooperative tracking multiple mobile object based on dynamic occlusion threshold. *Journal of Computer Research and Development*, 2014,51(4):813–823 (in Chinese with English abstract).
- [8] Chen L, Yan B, Zhang J, Hu J, Liu Z, Liu Y, Xu Z, Luo Q. Neighbor discovery algorithm in mobile low duty cycle WSNs. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2014,25(6):1352–1368 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4493.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004493]
- [9] Lu X, Cheng L, Luo S. Adaptive node scheduling algorithm for target tracking in wireless sensor networks. *Journal on Communications*, 2015,36(4):70–80 (in Chinese with English abstract).
- [10] Aziz AA, Sekercioglu YA, Fitzpatrick P, *et al.* A survey on distributed topology control techniques for extending the lifetime of battery powered wireless sensor networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013,15(1):121–144.
- [11] Caione C, Brunelli D, Benini L. Distributed compressive sampling for lifetime optimization in dense wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, 2012,8(1):30–40.
- [12] Zhang X, Dai H, Xu L, Chen G. Mobility-Assisted data gathering strategies in WSNs *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2013,24(2):198–214 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4349.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2013.04349]
- [13] Zhu C, Shu L, Hara T, *et al.* A survey on communication and data management issues in mobile sensor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2014,14(1):19–36.
- [14] Wang T, Peng Z, Chen Y, Cai Y, Tian H. Continuous tracking for mobile targets with mobility nodes in wsns. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Smart Computing (SMARTCOMP)*. IEEE, 2014. 261–268.
- [15] Wang T, Wang W, Cao J, *et al.* Interoperable localization for mobile group users. *Computer Communications*, 2017,105:53–65.
- [16] Peng Z, Wang T, Wang W, Wang G, Lai Y. Survey of location-centric target tracking with mobile elements in wireless sensor networks. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017,48(3):701–711.
- [17] Wang G, Bhuiyan MZA, Cao J, *et al.* Detecting movements of a target using face tracking in wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2014,25(4):939–949.

- [18] Jindal A, Liu M. Networked computing in wireless sensor networks for structural health monitoring. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2012,20(4):1203–1216.
- [19] Drawil NM, Amar HM, Basir OA. GPS localization accuracy classification: A context-based approach. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 2013,14(1):262–273.
- [20] Xu Y, Choi J, Oh S. Mobile sensor network navigation using gaussian processes with truncated observations. *IEEE Trans. on Robotics*, 2011,27(6):1118–1131.
- [21] Pakrooh P, Pezeshki A, Scharf LL, *et al.* Distribution of the Fisher information loss due to random compressed sensing. In: *Proc. of the 49th Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computers*. IEEE, 2015. 1487–1489.
- [22] Yu X, Huang W, Lan J, Qian X. A novel virtual force approach for node deployment in wireless sensor network. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*. IEEE, 2012. 359–363.
- [23] Ding L, Wu W, Willson J, Wu L, Lu Z, Lee W. Constant-Approximation for target coverage problem in wireless sensor networks. In: *Proc. of the INFOCOM*. IEEE, 2012. 1584–1592.
- [24] Rizvi S, Qureshi HK, Khayam SA, Rakocevic V, Rajarajan M. A1: An energy efficient topology control algorithm for connected area coverage in wireless sensor networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 2012,35(2):597–605.
- [25] Pantazis NA, Nikolidakis SA, Vergados DD. Energy-Efficient routing protocols in wireless sensor networks: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013,15(2):551–591.
- [26] Mahboubi H, Moezzi K, Aghdam AG, *et al.* Distributed deployment algorithms for efficient coverage in a network of mobile sensors with nonidentical sensing capabilities. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2014,63(8):3998–4016.
- [27] DArienzo M, Iacono M, Marrone S, *et al.* Estimation of the energy consumption of mobile sensors in WSN environmental monitoring applications. In: *Proc. of the 27th Int'l Conf. on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)*. IEEE, 2013. 1588–1593.
- [28] Papotto G, Carrara F, Finocchiaro A, *et al.* A 90-nm CMOS 5-Mbps crystal-less RF-powered transceiver for wireless sensor network nodes. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2014,49(2):335–346.
- [29] Teng J, Snoussi H, Richard C. Decentralized variational filtering for target tracking in binary sensor networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2010,9(10):1465–1477.
- [30] Tan R, Xing G, Wang J, So HC. Exploiting reactive mobility for collaborative target detection in wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2010,9(3):317–332.
- [31] Li WL, Jia YM. Consensus-Based distributed multiple model UKF for jump markov nonlinear systems. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 2012,57(1):227–233.
- [32] Mourad F, Chehade H, Snoussi H, Yalaoui F, Amodeo L, Richard C. Controlled mobility sensor networks for target tracking using ant colony optimization. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2012,11(8):1261–1273.
- [33] Ganganath N, Cheng C-T, Tse C. Distributed anti-flocking algorithms for dynamic coverage of mobile sensor networks. *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, 2016,12(5):1795–1805.
- [34] Hoang DC, Yadav P, Kumar R, *et al.* Real-Time implementation of a harmony search algorithm-based clustering protocol for energy-efficient wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, 2014,10(1):774–783.
- [35] Incel ÖD, Ghosh A, Krishnamachari B, Chintalapudi K. Fast data collection in tree-based wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2012,11(1):86–99.
- [36] Du H, Ye Q, Wu W, Lee W, Li D, Du D, Howard S. Constant approximation for virtual backbone construction with guaranteed routing cost in wireless sensor networks. In: *Proc. of the INFOCOM*. IEEE, 2011. 1737–1744.
- [37] Vo BN, Vo BT, Phung D. Labeled random finite sets and the Bayes multi-target tracking filter. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2014,62(24):6554–6567.
- [38] Olfati-Saber R. Distributed tracking for mobile sensor networks with information-driven mobility. In: *Proc. of the American Control Conf. (ACC)*. IEEE, 2007. 4606–4612.
- [39] Olfati-Saber R, Jalalkamali P. Coupled distributed estimation and control for mobile sensor networks. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 2012,57(10):2609–2614.

- [40] Jalalkamali P, Olfati-Saber R. Information-Driven self-deployment and dynamic sensor coverage for mobile sensor networks. In: Proc. of the American Control Conf. (ACC). IEEE, 2012. 4933–4938.
- [41] Hoffmann GM, Tomlin CJ. Mobile sensor network control using mutual information methods and particle filters. IEEE Trans. on Automatic Control, 2010,55(1):32–47.
- [42] Wu W, Zhang F. A switching strategy for target tracking by mobile sensing agents. Journal of Communications, 2013,8(1):47–54.
- [43] Xu EY, Ding Z, Dasgupta S. Target tracking and mobile sensor navigation in wireless sensor networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2013,12(1):177–186.
- [44] Bhuiyan MZA, Wang G, Vasilakos AV. Local area prediction-based mobile target tracking in wireless sensor networks. IEEE Trans. on Computers, 2015,64(7):1968–1982.
- [45] Wimalajeewa T, Jayaweera SK. Mobility assisted distributed tracking in hybrid sensor networks. In: Proc. of the 2010 IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC). IEEE, 2010. 1–5.
- [46] Yang Z, Shi X, Chen J. Optimal coordination of mobile sensors for target tracking under additive and multiplicative noises. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2014,61(7):3459–3468.
- [47] Hu J, Hu X. Nonlinear filtering in target tracking using cooperative mobile sensors. Automatica, 2010,46(12):2041–2046.
- [48] Yanmaz E, Guclu H. Stationary and mobile target detection using mobile wireless sensor networks. In: Proc. of the INFOCOM. IEEE, 2010. 1–5.
- [49] Djurić PM, Beaudeau J, Bugallo MF. Non-Centralized target tracking with mobile agents. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2011. 5928–5931.
- [50] Abdel Rahman M, Abu-El-Haija AI, Al-Najjar HM. On the detection of intelligent mobile targets in a mobile sensor network. In: Proc. of the 7th Int'l Wireless Communications and Mobile Computing Conf. (IWCMC). IEEE, 2011. 1268–1275.
- [51] Fu Y, Yang L. Sensor mobility control for multitarget tracking in mobile sensor networks. Int'l Journal of Distributed Sensor Networks, 2014,10(3):1–15.
- [52] Bai J, Cheng P, Chen J, Guenard A, Song Y. Target tracking with limited sensing range in autonomous mobile sensor networks. In: Proc. of the 8th Int'l Conf. on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS). IEEE, 2012. 329–334.
- [53] Semnani SH, Basir OA. Semi-Flocking algorithm for motion control of mobile sensors in large-scale surveillance systems. IEEE Trans. on Cybernetics, 2015,45(1):129–137.
- [54] Zhan P, Casbeer DW, Swindlehurst AL. Adaptive mobile sensor positioning for multi-static target tracking. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2010,46(1):120–132.
- [55] Ghadban N, Honeine P, Mourad-Chehade F, *et al.* Mobility using first and second derivatives for kernel-based regression in wireless sensor networks. In: Proc. of the 2014 Int'l Conf. on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP). IEEE, 2014. 203–206.
- [56] Alhmiedat T, Salem AOA, Taleb AA. An improved decentralized approach for tracking multiple mobile targets through ZigBee WSNs. Int'l Journal of Wireless & Mobile Networks, 2013,5(3):61–76.
- [57] Patel NB. Target localization improving tracking accuracy and energy efficiency in wireless sensor network [Ph.D. Thesis]. New York: Amrut Mody School of Management, Ahmedabad University, 2015. 1–21.
- [58] La HM, Sheng W. Dynamic target tracking and observing in a mobile sensor network. Robotics and Autonomous Systems, 2012,60(7):996–1009.
- [59] Chin J-C, Dong Y, Hon W-K, Ma C Y-T, Yau DK. Detection of intelligent mobile target in a mobile sensor network. IEEE/ACM Trans. on Networking (TON), 2010,18(1):41–52.
- [60] Ferrari S, Fierro R, Pertea B, Cai C, Baumgartner K. A geometric optimization approach to detecting and intercepting dynamic targets using a mobile sensor network. SIAM Journal on Control and Optimization, 2009,48(1):292–320.
- [61] Wei H, Ferrari S. A geometric transversals approach to sensor motion planning for tracking maneuvering targets. IEEE Trans. on Automatic Control, 2015,60(10):2773–2778.
- [62] Mahboubi H, Momeni A, Aghdama A, Sayrafian-Pour K, Marbukh V. Minimum cost routing with controlled node mobility for target tracking in mobile sensor networks. In: Proc. of the American Control Conf. (ACC). IEEE, 2010.

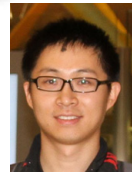
- [63] Prabhavathi M, Rajeshwari R. Cluster-Based mobility management for target tracking in mobile sensor networks. In: Proc. of the Int'l Conf. on Advanced Computing (ICoAC). IEEE, 2011. 198–203.
- [64] Okaie Y, Nakano T, Hara T, Hosoda K, Hiraoka Y, Nishio S. Modeling and performance evaluation of mobile bionanosensor networks for target tracking. In: Proc. of the Int'l Conf. on Communications (ICC). IEEE, 2014. 3969–3974.
- [65] Bar-Noy A, Kessler I, Sidi M. Mobile users: To update or not to update? Wireless Networks, 1995,1(2):175–185.
- [66] Mitsche D, Resta G, Santi P. The random waypoint mobility model with uniform node spatial distribution. Wireless Networks, 2014,20(5):1053–1066.

附中文参考文献:

- [7] 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.计算机研究与发展,2015,51(4):813–823.
- [8] 陈良银,颜秉姝,张靖宇,胡剑波,刘振磊,刘燕,徐正坤,罗谦.移动低占空比传感网邻居发现算法.软件学报,2014,25(6):1352–1368. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4493.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004493]
- [9] 卢旭,程良伦,罗世亮.无线传感器网络自适应目标跟踪节点调度算法.通信学报,2015,36(4):70–80.
- [12] 张希伟,戴海鹏,徐力杰,陈贵海.无线传感器网络中移动协助的数据收集策略.软件学报,2013,24(2):198–214. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4349.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2013.04349]
- [16] 彭臻,王田,王文华,王国军,赖永炫.传感网中目标的移动式定位跟踪研究综述.中南大学学报(自然科学版),2017,48(3):701–711.



王田(1982—),男,福建厦门人,博士,教授,CCF 高级会员,主要研究领域为无线传感器网络,雾计算,移动计算.



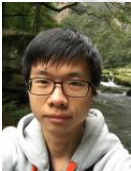
彭绍亮(1979—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为高性能计算,大数据,生物医药,移动计算.



梁玉珠(1994—),男,学士,主要研究领域为雾计算,无线定位.



蔡绍滨(1973—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为无线传感器网络,物联网,水声传感器网络.



彭臻(1990—),男,硕士,主要研究领域为移动计算,无线传感器网络,雾计算.



贾维嘉(1957—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 杰出会员,主要研究领域为Anycast(任播)路由,组播通信,容错计算,无线通信.