

传感网中目标的移动式定位跟踪研究综述

彭臻¹, 王田¹, 王文华¹, 王国军², 赖永炫³

1. 华侨大学 计算机科学与技术学院, 福建 厦门, 361021;
2. 广州大学 计算机科学与教育软件学院, 广东 广州, 510006;
3. 厦门大学 软件学院, 福建 厦门, 361005)

摘要: 介绍目标跟踪的过程以及移动跟踪的特点; 通过区分目标定位为主的方法和目标探测为主的方法, 介绍定位为主的移动式目标跟踪方法(称为目标的移动式定位跟踪)的研究现状; 分析和比较不同方法的特点和应用领域, 发现现有方法虽然可以提高跟踪质量、降低网络整体能耗, 但是还存在一些问题。基于此, 总结目标的移动式定位跟踪方法在方法类型、网络结构和节点模型等方面可能存在的研究热点, 指出其研究和发展趋势。

关键词: 无线传感器网络; 移动节点; 目标跟踪; 目标定位; 网络能耗

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2017)03-0701-11

Survey of location-centric target tracking with mobile elements in wireless sensor networks

PENG Zhen¹, WANG Tian¹, WANG Wenhua¹, WANG Guojun², LAI Yongxuan³

1. School of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. School of Computer Science and Educational Software, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;
3. School of Software, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The basic process of target tracking and the properties of tracking solutions with mobile elements were introduced. By distinguishing location-centric methods and detection-centric methods, the current research status of the location-centric target tracking methods were reviewed. The properties and application fields of different solutions were analyzed and compared. Although the existing solutions can significantly improve tracking quality and reduce energy consumption of the whole network, there are also some problems. Based on these discoveries, some possible research hotspots of mobile solutions were summarized in many aspects, such as method types, network architecture, node model, and so on, indicating the future direction of research and development.

Key words: wireless sensor networks; mobile elements; target tracking; target localization; network energy consumption

无线传感器网络(wireless sensor networks)由大量小巧的传感器节点组成^[1]。节点通过无线通信建立网络连接, 并通过传感装置感知周围的环境以监测区域

的状态信息, 从而实现信息世界与物理世界的融合^[2]。因此, 无线传感器网络在出现之初便引起了人们极大的关注。美国《商业周刊》认为无线传感器网络是未

收稿日期: 2016-03-10; 修回日期: 2016-06-03

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(61672441); 国家科技支撑计划项目(2015BAH16F00/F01/F02) (Project(61672441) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(2015BAH16F00/F01/F02) supported by the National Key Technology Support Program)

通信作者: 王田, 博士, 副教授, 从事无线传感器网络, 移动计算, 社交网络等研究; E-mail: cs_tianwang@163.com

来全球四大高技术产业之一；MIT 技术评论认为无线传感器网络技术是改变世界的十大新技术之一^[3]。无线传感器网络的相关研究在 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^[4]、环境保护^[5]、建筑体监测^[6]、医疗健康^[7]和城市建设^[8]等领域。目标跟踪是无线传感器网络的重要应用^[9]。与普通环境监测应用不同，目标跟踪中需要跟踪的目标是移动的，例如非法入侵者、野生动物等。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^[10]，并对目标进行持续感知以获得其实时信息。当目标移动时，节点需要跟踪目标的移动轨迹，甚至提前唤醒部分节点^[11]，防止目标丢失。由于传感器节点通常由电池供电，部署之后很难更换或充电，一旦节点的能量耗尽，则该节点“死亡”而无法正常工作。当死亡节点越来越多时，监测区域内将出现盲区^[12]，移动到盲区内的目标将无法被网络监测。因此，如何有效地减少跟踪过程中的能耗是研究者关注的主要问题^[13]。有时，为了降低跟踪算法的复杂程度以减少能耗，研究者需要以降低跟踪有效性为代价^[14]。同时，监测区域内往往需要部署大量固定传感器节点以提高网络的健壮性^[15]。随着电子制造工艺和机械制造技术的发展，移动传感器得到了广泛的应用^[16]。相比固定传感器，其适应性更强，可应用范围更广。特别是在目标跟踪应用中，移动节点具有天生的优势。首先，当目标出现在监测区域内时，移动节点可以利用其移动性向目标移动，从而增加对目标的感知数据，提高监测质量^[17]。因此，少量移动节点就能达到大量固定节点的监测强度。并且，当目标移动时，移动节点可以跟随目标运动，有效地减少参与跟踪的固定节点数量。另外，若有节点“死亡”，移动节点能够进行补充以保证网络健壮性和对目标的有效监测^[18]。因此，相比固定传感器网络目标跟踪，移动式目标跟踪方法能更好地监测目标，提高跟踪质量，同时减少节点的能耗，延长网络生存期^[19]。随着越来越多的研究者提出了不同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。目标定位是借助网络中部分位置已知的节点来定位目标^[20]。常用的定位方法分为基于测距的方法和基于非测距的方法 2 种^[21-22]。基于测距的方法需要测量节点与目标间的距离、角度等信息，再使用三边测量、三角测量等方法定位目标^[23]。基于非测距的方法根据网络连通性信息定位目标。对于目标的移动式定位跟踪而言，如何在考虑网络本身特点的情况下得到目标的实时位置是需要解决的主要问题。而目标探测^[24]与目标定位有明显

的区别。首先，两者目的不同，目标定位需要得到目标的实时位置，而目标探测主要关注感知目标时得到的数据，这些数据反映了目标的状态信息。例如有的方法需要识别目标的身份，甚至对目标进行区分^[25]。这就使得目标探测侧重于考虑如何有效地感知目标。其次，由于目的不同，目标探测与目标定位所使用的硬件也不相同。在目标定位中，节点如果需要得到自身位置，往往需要向装备有 GPS(global position system)的锚节点寻求帮助^[26]。而进行目标探测时，针对不同类型的物理量可能需要装备不同的传感器，例如声传感器和光传感器等。总的来说，目标探测重点关注如何通过有效地调度传感器节点来收集目标的状态信息(如温度、声音、振动幅度等)，从而保证目标能一直处于监控之下。而目标定位是目标探测过程的基础，通过定位出目标的实时位置(一般指物理坐标)为节点探测提供跟踪依据。因此，本文将两者区分开，并详细介绍目标的移动式定位跟踪。通过对其方法进行归纳总结和分析它们的异同和特点，揭示方法之间的联系，找到移动式目标定位跟踪需要解决的关键问题，探索可能的研究重点和发展方向，为未来的研究提供参考和建议。

1 目标的移动式定位跟踪概述

1.1 方法概述

传统的目标跟踪通常包括 3 个相关部分：感知方式、定位方式和通信方式^[27]。部署在监测区域内的节点需要对环境进行感知，而感知方式决定了如何调度节点以更好地获取目标信息。通过感知得到的数据将为目标定位提供“原材料”。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。最终，通信方式将决定数据转发方式以及网络的组织结构，例如是平面型网络还是分层型网络。由此可见，目标跟踪方法中包含的 3 个部分相辅相成，而不同方法的侧重点各有不同。

移动式目标跟踪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存在移动节点，网络的性能得到增强。而目标的移动式定位跟踪方法是指在目标跟踪的过程中不断地定位目标的物理或者逻辑位置，以提高目标跟踪的效率和质量。

1.2 主要度量指标

度量指标是用来衡量目标的移动式定位跟踪方法性能高低的标准。对于不同的跟踪方法，由于方法的侧重点不同，度量指标也各不相同。即使是相似的方

法, 由于其采用的建模方法千差万别, 度量指标也会有较大差别。因此, 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。

1) 目标跟踪效率。目标跟踪效率是指在网络生命期中能有效跟踪到目标的时间比例。它取决于网络生命期和在网络生命期中能定位到目标的时间^[28]。

2) 目标定位误差。目标定位误差常常用来衡量定位精度。定位误差的简单形式可表示成目标的测量位置与实际位置之间的欧式距离^[29]。目标定位精度的高低在很大程度上会影响目标跟踪的效率。

3) 节点能耗。能耗是传感器网络的重要度量指标。对于普通传感器节点, 能耗主要产生于数据的感知和传输过程。相关方法中通常将没有参与跟踪的节点转入休眠状态以节约能量。对于移动节点, 还需要考虑其移动的能耗。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^[30]。

1.3 存在的问题和挑战

目标的移动式定位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跟踪目标。移动节点本身的特点使其可以不必被动地等待目标到来, 而是主动向目标靠近。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。这通常需要与定位方式相结合来考虑。

2) 如何有效地对目标进行定位。移动节点对目标的定位方式与固定节点基本相同, 但是定位方式将影响节点移动方式, 例如, 包含目标预测的方法可能更倾向于将节点向预测位置处移动^[31]。

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占有重要地位, 取得了较好的效果。移动节点的加入使得网络结构更加多样, 例如, 既可以是全移动节点组成的平面型网络, 也可以是全移动节点组成的分层型网络, 还可以是固定节点与移动节点组成的分层型网络等等^[32]。

2 目标的移动式定位跟踪分类

在目标的移动式定位跟踪方法中, 不同跟踪方法的特性各不相同, 这些特性包括移动节点比例、移动自主性等。图1所示为目标的移动式定位跟踪方法特性。根据各种跟踪方法特性的不同, 其存在多种分类方法, 下面对各种分类方式进行介绍。

1) 基于移动节点比例的分类。根据移动节点在网络中所占比例不同, 可以分为全移动和部分移动2种。

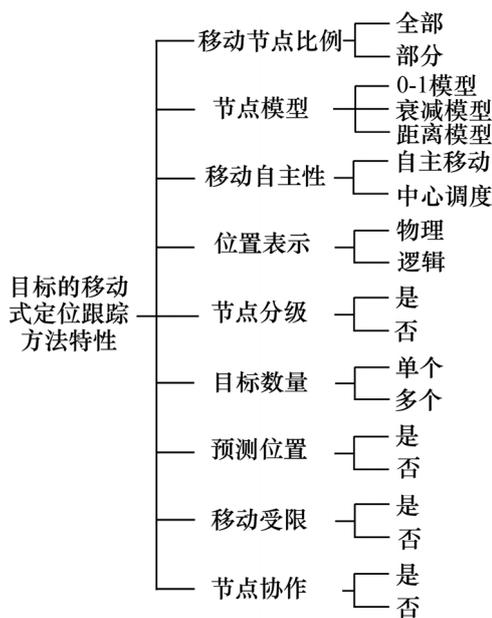


图1 目标的移动式定位跟踪方法特性

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

全移动方法是指组成网络的节点都是移动节点, 这种网络称为移动传感器网络(mobile sensor networks, MSNs)。部分移动方法是指组成网络的节点既有移动节点也有固定节点, 这种网络称为混合传感器网络(hybrid sensor networks, HSNs)^[33]。

2) 基于感知模型的分类。按网络中节点感知模型, 可以分为0-1模型^[34]、衰减模型^[35]和距离模型^[36]3种。0-1模型中节点通常使用1 bit来表示能否感知到目标。当目标在节点的感知半径内时能够感知到目标, 否则无法感知。衰减模型假设节点接收到的目标信号强度会随着其之间距离增大而减弱, 更加贴近实际情况。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。这种模型用于特定的场合, 比如用无人机作为移动节点。

3) 基于移动自主性的分类。根据移动节点移动自主性的不同, 可以分为中心调度和自主移动2种类型。在中心调度方法中, 移动节点由数据中心统一调度。自主移动方法即分布式方法, 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。

4) 基于网络结构的分类。根据网络结构的不同, 可分为平面型和分层型^[32]2种。平面型方法指的是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。而在分层型方法中, 网络则会节点分出层次, 高层的节点往往可以向低层的节点下达指令, 例如唤醒、调度等等。

5) 基于跟踪目标数量的分类。根据所需跟踪目标数量的不同,可分为单目标和多目标 2 种类型。单目标方法只跟踪单个目标,这种方法实现较简单,但不适合实际情况。而多目标方法则需要考虑同时对多个目标进行跟踪,这种方法比较符合实际的应用场景,其需要考虑更多的问题,如移动节点的调度等。

本文将目标的移动式定位跟踪方法分为物理定位方法和逻辑定位方法两大类。物理定位方法通过物理坐标表示目标位置,而逻辑定位方法通过范围或区域来表示目标位置。具体的分类情况如图 2 所示。

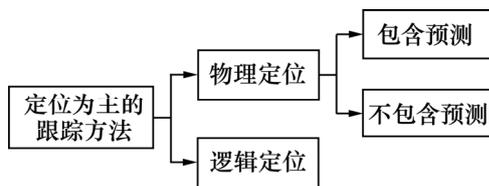


图 2 目标的移动式定位跟踪方法分类

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

3 目标的移动式定位跟踪方法解析

定位是目标跟踪过程中的重要步骤。目标定位是指当目标出现时,通过计算获得其实时位置^[37]。目标跟踪的过程可以看作是不断定位的过程。这一过程中遇到的问题主要集中在 2 个方面。一是如何提高定位精度,保证跟踪质量。二是如何节约能耗,延长网络生命期。因此,关于目标定位的研究大都从这 2 方面展开^[38]。按照位置表示方式的不同将这些研究分成即物理定位和逻辑定位 2 类方法。

3.1 物理定位方法

物理定位方法中目标的位置表示为具体物理坐标的形式,例如直角坐标、极坐标、GPS 坐标等。对目标进行定位之前,网络中的某些节点知道自身的位置,其通常被称为锚节点^[39]。当锚节点感知到目标后,将与其他锚节点通过几何位置关系共同得出目标的物理位置。在目标的移动式定位跟踪中,移动节点由于需要对目标实施跟踪,所以常常也会充当锚节点的角色^[40]。为了更好地跟踪目标,一些方法对目标的运动轨迹进行预测。移动节点根据预测信息提前向目标预测位置移动,从而更有效地对目标进行后续定位及跟踪。根据是否包含预测步骤,本节将物理定位方法分成两类,即包含预测的方法和不包含预测的方法。

3.1.1 包含预测的方法

包含预测的方法通过预测目标的运动轨迹来提前调度移动节点对目标进行持续跟踪。

早期的文献中多采用移动机器人来充当移动节点。文献[41]关注于如何通过控制移动节点的配置来优化对多个目标的估计,提出的 DSPCF(dynamic sensor planning and control framework)方法将配置节点参数的问题形式化为跟踪质量函数,并利用粒子滤波进行估计。基于功能强大的机器人(如图 3 所示),文献[41]所提出的方法具有很强的灵活性,如目标数量、节点数量、函数的特定含意等都可以随情况变化。文献[42]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(unmanned air vehicles, UAV),所有节点由基站控制。基站利用扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)来估计目标的位置和速度。

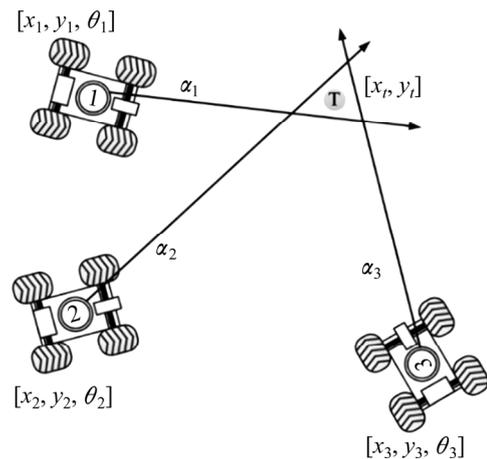


图 3 使用 3 个移动机器人定位目标示意图

Fig. 3 Illustration of target localization using three mobile robots

之后的研究中,移动节点选用更加小巧的传感器节点。文献[31]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 importance re-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。

基于混合传感器网络中的目标跟踪,文献[43]提出一种分布式能量优化方法 DEOM(distributed energy optimization method)。网络中的节点根据最大熵进行分簇。簇头节点通过平行粒子群优化方法 PPSO

(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进行估计。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[44]提出一种分布式协作跟踪算法 CDTA (cooperative distributed tracking algorithm)。该算法主要包括节点部署和节点移动控制 2 个阶段。节点部署阶段主要通过定义目标函数来优化跟踪精度和网络能耗。节点移动控制阶段利用梯度法来降低跟踪误差。但是,没有对节点的监测能力进行说明,而是认为节点可以监测区域内任何位置的目标。

文献[45]提出了一种移动控制框架 DMICS (distributed mobility implementation control scheme),在优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。

文献[46]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。

文献[47]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,其提出 3 个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 2 个算法即 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。

MEYER 等^[48]提出的方法 CoSLAT(cooperative simultaneous localization and tracking)及其在文献[49]中提出的改进方法 ACoSLAT(advanced CoSLAT)和文献[50]提出的方法 CS-DT(cooperative self-localization and distributed tracking)均是将定位和跟踪相结合来提高定位精度和跟踪效率。其中 CoSLAT 提出基于粒子状态的贝叶斯规则,根据节点之间的通信信息和预测状态不断改变节点和目标的状态信息,但是其需要较高的通信和计算代价。ACoSLAT 对其进行改进,不再使用全部状态信息,而只使用部分重要信息,大大降

低了通信和计算代价。CS-DT 对它们进行了扩展,实现了多目标跟踪,提出了低复杂度的状态信息相乘方案。此方法的缺点是算法对节点硬件要求较高且能耗较大。

目标的移动式定位跟踪方法中,包含预测的物理定位方法是一种得到广泛研究的方法。这类方法的关键在于如何准确、高效地预测目标的下一位置,以及如何根据预测结果对移动节点进行调度和分配。

3.1.2 不包含预测的方法

相比包含预测的方法,不包含预测的方法并不会对目标的运动轨迹进行预测。这些方法往往根据其他的评价指标(例如误差、精度等)来调度移动节点。

在文献[51]中,节点对和单目标形成几何三角形结构来估计目标位置(如图 4 所示)。文中提出一种迭代分布式算法 TBMTTS(triangulation based multi target tracking strategy),为每个目标分配 1 对节点。对于跟踪过程的多个时间片段,算法以最小化节点能耗为标准部署下一时间片节点的位置。该方法的不足在于其假设目标在一段时间内是固定不动的,并且关于定位误差函数的具体定义并没有给出描述。

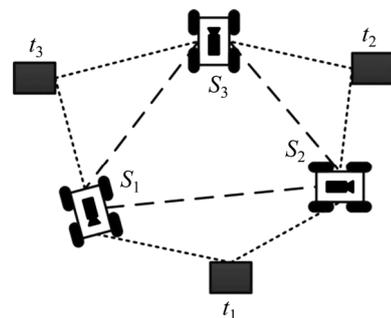


图 4 2 个移动节点的目标跟踪

Fig. 4 Target tracking using two mobile nodes

针对锚节点数量较少的情况,文献[52]提出 FACT (fast and accurate cooperative tracking)方法。网络中的移动节点相互通信以获得其邻居信息,并使用贝叶斯推理来确定移动节点的位置,同时还分别在应用于室外和室内环境中时引入了无迹卡尔曼滤波(UKF)和多模粒子滤波来降低环境因素对位置预测的影响。缺点是此方法能降低能耗,但是并没有给出能耗方面的数据,无法说明其在能耗方面的优越性。

文献[53]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(semi-definite programming relaxation, SDP)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。但是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。

针对网络中部分受控的移动节点,文献[54]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[55]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结点,头结点收集组内目标的位置信息并转发给 sink 节点来跟踪目标。但是其要求移动目标能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。

不包含预测的物理定位方法需要借助除位置以外的其他信息来规划节点的移动和工作周期,常用的信息有能耗和误差等。因此,这类方法的难点也在于如何通过这些信息来合理地调度移动节点。

3.2 逻辑定位的方法

相对于物理定位方法,逻辑定位方法得到的目标位置表示成一个范围或是用区域内某些位置元素代替。目前,通过定位目标的逻辑位置来实现目标跟踪的方法较少,主要的研究如下。

文献[56]提出了方法 CMACO(controlled mobility ant colony optimization)。网络由规则部署的固定节点和受控的移动节点构成。通过区间分析(interval analysis),目标的预测位置用矩形区域表示(如图 5 所示)。并且移动节点将进行重新部署来优化对目标预测区域的覆盖。由于这是针对规则部署的固定节点和受控的移动节点组成的混合网络,所提出的算法采用的是中心式的处理方式。

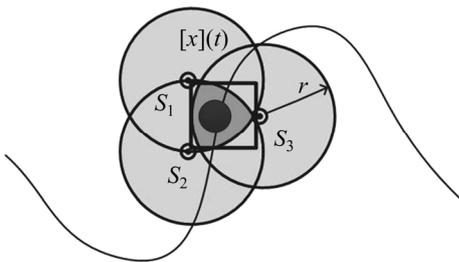


图 5 估计目标位置

Fig. 5 Estimating of target position

类似地,文献[57]提出的 CMPSO(controlled mobility particle swarm optimization)和文献[58]提出的 HSNPSO(hybrid sensor network particle swarm optimization)方法均是用于解决混合网络中的单目标跟踪问题。CMPSO 和 CMACO 的思想基本相同,只是引入了粒子群优化算法。HSNPSO 方法同样通过粒子群优化算法(particle swarm optimization)使移动节点以移动距离最短的方式向目标估计位置移动,并以目标为质心形成等边三角形来表示目标位置。

文献[59]提出一种协同跟踪方法 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位置,利用区间分析(interval analysis)将目标位置被表示成矩形,并调度移动节点覆盖这些区域,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(如图 6 所示)。但是算法只给出了移动节点的数量,没有给出各节点应该移动到的位置。

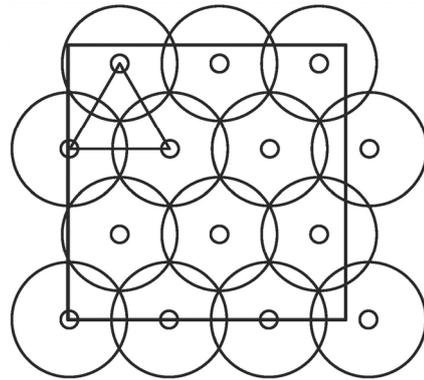


图 6 最少节点的区域覆盖

Fig. 6 Covering area with least nodes

文献[60]针对固定传感器网络的目标跟踪应用提出了方法 RPL(repositioning prediction localization)。该方法通过卡尔曼滤波器预测目标的下一位置,并考虑如何优化 sink 节点的移动来延长网络的生命期。算法中目标当前位置与下一位置之间矩形区域内的节点都将被激活,这可能导致大量的能量消耗。

文献[61]提出方法 Face Track,即将网络区域通过不同的节点组合分割成很多个面(Face),在目标跟踪过程中只需要定位移动目标是否在某个特定的面中即可。文献[62]在此基础上引入了移动 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并预测目标移动到

面的时间,并转发给 tracker 以使其能够移动到目标节点附件对其进行跟踪。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。

使用逻辑定位的移动式跟踪方法并不是很多。可以看到,移动节点通过调整自身位置可以更好地估计目标位置,在定位目标时显示出特有的优势。

4 现有方法比较与分析

表 1 所示为目标的移动式定位跟踪方法中各个属性的比较。由表 1 可知:

1) 对于单个节点来说,节点感知模型主要有 0-1 模型、衰减模型和距离模型 3 种,大多数方法中使用 0-1 模型,这是因为这种模型简单易实现;一些方法

中使用了比较符合实际情况的衰减模型,只有少数使用了距离模型。对于整个网络来说,有小部分定位方式采用的是中心式的调度,大部分方法都由移动节点自主移动进行目标定位跟踪。

2) 目标定位主要使用物理定位来准确表示目标位置。小部分采用逻辑定位将目标位置表示成一个区域。另外,大多数研究只考虑对单目标的跟踪而没有考虑如何将其扩展为对多目标的跟踪。而且大部分跟踪方法会预测目标的位置,这样可以提前调度移动节点向预测的位置移动,提高定位精度和跟踪效率。

3) 大部分方法采用的是平面型的网络,这样能够减少方法的复杂性。同时,绝大多数方法都会使用多个节点相互协作的方法,这是因为对目标进行定位往往需要多个节点参与,由不同节点的数据共同确定目标的位置。另外,大部分的方法都只考虑固定节点的能耗,而没有考虑移动节点本身的能耗问题。

根据分析比较可以看出根据不同的应用,各种方

表 1 目标的移动式定位跟踪方法特点比较

Table 1 Properties comparison between location-centric target tracking solutions with mobile elements

方法	移动节点比例	节点模型	位置表示	移动自主性	节点分级	目标数量	预测位置	移动受限	节点协作
DSPCF ^[41]	全部	距离模型	物理	自主移动	否	多个	是	否	是
AMSPF ^[42]	全部	距离模型	物理	中心调度	否	单个	是	否	是
MATA ^[31]	部分	衰减模型	物理	中心调度	是	单个	是	否	否
DEOM ^[43]	部分	0-1 模型	物理	中心调度	是	单个	是	否	否
CDTA ^[44]	全部	0-1 模型	物理	自主移动	否	多个	是	是	是
DMICS ^[45]	全部	衰减模型	物理	自主移动	否	多个	是	否	否
TLIT ^[46]	部分	0-1 模型	物理	自主移动	是	单个	是	否	是
CTSS&MMCR ^[47]	全部	衰减模型	物理	自主移动	否	单个	是	否	是
CoSLAT ^[48]	全部	0-1 模型	物理	自主移动	否	单个	是	否	是
ACoSLAT ^[49]	全部	0-1 模型	物理	自主移动	否	单个	是	否	是
CS-DT ^[50]	全部	0-1 模型	物理	自主移动	是	多个	是	否	是
TBMTTS ^[51]	全部	衰减模型	物理	自主移动	是	多个	否	是	是
FACT ^[52]	部分	0-1 模型	物理	自主移动	否	多个	否	是	是
WTA ^[53]	部分	衰减模型	物理	中心调度	否	单个	否	否	否
FSDKR ^[54]	部分	距离模型	物理	中心调度	否	未知	否	否	是
IDTA ^[55]	部分	距离模型	物理	自主移动	是	多个	否	否	是
CMACO ^[56]	部分	0-1 模型	逻辑	中心调度	否	单个	是	否	是
CMPSO ^[57]	部分	0-1 模型	逻辑	中心调度	否	单个	是	是	是
HSNPSO ^[58]	部分	0-1 模型	逻辑	自主移动	否	单个	否	是	是
AMCMS ^[59]	全部	0-1 衰减模型	逻辑	自主移动	否	单个	是	否	是
RPL ^[60]	部分	0-1 模型	逻辑	自主移动	是	多个	是	否	否
T-Tracking ^[62]	部分	0-1 模型	逻辑	自主移动	否	单个	是	否	否

法的具体内容不尽相同。但是总的来说, 这些方法所针对的问题均集中在 2 方面: 数据质量和能量效率。数据质量是指节点感知到的数据测量值的有效性, 以及由测量值所得结果的精确性。对于能效方面, 移动性节点能够缓解对固定节点的能量要求, 但是移动节点自身的能耗成为一个新的问题。实际上, 数据质量的提高往往意味着能耗的增加。在提高跟踪质量的同时减少能耗是十分困难的, 这可能也是许多方法没有讨论移动节点能耗问题的原因。

5 未来研究方向

如前所述, 在目标跟踪中移动节点可以很好地弥补固定节点在目标跟踪中跟踪效率低、可靠性差等缺点。由此, 提出了许多在普通传感网中无法实现的方法。但是, 这些方法依然存在诸多问题。本节归纳这些问题, 指出未来研究方向。

1) 多采用混合型网络。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, 又能最大限度保证网络的稳定性, 因此, 会成为目标跟踪研究的发展趋势。

2) 提出统一的度量标准。现有研究中所采用的度量标准参差不齐, 很难对各种方法进行深入比较。因此, 若能对移动目标的定位跟踪提出统一的度量标准, 可以使研究者清楚地比较各种方法的效能, 更加便利于今后的研究。

3) 考虑移动节点自身的限制。现有研究多假设移动节点的能量和移动不受限制。但通常移动节点的能量也是有限的, 并且在实际应用中其移动会受到各种因素的限制, 因此, 在以后的研究中需要考虑移动节点自身的限制, 比如可以考虑对节点充电来缓解其能耗限制, 在仿真网络场景中设置障碍等, 使其更加符合实际的应用场景。

4) 目标位置采用逻辑表示。目前, 目标的移动式定位跟踪研究中, 目标的位置表示多采用物理坐标。实际上, 确定目标的大致位置就能够对其进行跟踪, 因此, 可以更多地使用逻辑坐标的方式。另外, 采用逻辑坐标还能够降低对目标定位精度的要求, 降低对节点的硬件要求和能耗。

5) 建立更实际的感知模型。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。

6) 考虑使用分层网络。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。

6 总结

传统的无线传感器网络由固定节点组成, 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。而移动节点的优势正好在于其能根据需要改变自身位置。因此, 移动节点的加入可以为目标跟踪应用提供新的解决方法。本文对目标的移动式定位跟踪方法进行了大量调研, 通过比较和总结, 指出了其存在的种种问题并指出了未来的研究方向。这些分析和探索将为以后的研究提供有价值的参考。

参考文献:

- [1] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. Wireless sensor networks: a survey[J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.
- [2] 王文华, 王田, 吴群, 等. 传感网中时延受限的移动式数据收集方法综述[J]. 计算机研究与发展, 2016, 53(11): 1-19.
WANG Wenhua, WANG Tian, WU Qun, et al. Survey of delay-constrained data collection with mobile elements in WSNs[J]. Journal of Computer Research and Development, 2016, 53(11): 1-19.
- [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.
LI Jianzhong, GAO Hong. Survey on sensor network research[J]. Journal of Computer Research and Development, 2008, 45(1): 1-15.
- [4] DURISIC M P, TAFA Z, DIMIC G, et al. A survey of military applications of wireless sensor networks[C]// 2012 Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO).

- Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 196–199.
- [5] WANG Tian, PENG Zhen, LIANG Junbin, et al. Detecting targets based on a realistic detection and decision model in wireless sensor networks[C]// International Conference on Wireless Algorithms, Systems and Applications. Berlin: Springer International Publishing, 2015: 836–844.
- [6] LIU Xuefeng, CAO Jiannong, TANG Shaojie, et al. A generalized coverage-preserving scheduling in WSNs: a case study in structural health monitoring[C]// INFOCOM, 2014 Proceedings IEEE. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 718–726.
- [7] DÍAZ-RAMÍREZ A, BONINO F A, MEJÍA-ALVAREZ P. Human detection and tracking in healthcare applications through the use of a network of sensors: human behavior understanding in networked sensing[M]. Berlin: Springer, 2014: 171–190.
- [8] ZHANG Desheng, HUANG Jun, LI Ye, et al. Exploring human mobility with multi-source data at extremely large metropolitan scales[C]// Proceedings of the 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2014: 201–212.
- [9] WANG Tian, PENG Zhen, LIANG Junbin, et al. Following targets for mobile tracking in wireless sensor networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), 2016, 12(4): 31.
- [10] 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.
WANG Sheng, WANG Xue, BI Daowei. Dynamic sensor selection optimization strategy for wireless sensor networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2008, 45(1): 188–195.
- [11] RAMYA K, KUMAR K P, RAO V S. A survey on target tracking techniques in wireless sensor networks[J]. International Journal of Computer Science and Engineering Survey, 2012, 3(4): 93–108.
- [12] WANG Tian, JIA Weijia, WANG Guojun, et al. Hole avoiding in advance routing with hole recovery mechanism in wireless sensor networks[J]. Adhoc & Sensor Wireless Networks, 2012, 16(1/2/3): 191–213.
- [13] GAO Deyun, ZHU Wanting, XU Xiaoyu, et al. A hybrid localization and tracking system in camera sensor networks[J]. International Journal of Communication Systems, 2014, 27(4): 606–622.
- [14] PINO-POVEDANO S, ARROYO-VALLES R, CID-SUEIRO J. Selective forwarding for energy-efficient target tracking in sensor networks[J]. Signal Processing, 2014, 94(1): 557–569.
- [15] CAIONE C, BRUNELLI D, BENINI L. Distributed compressive sampling for lifetime optimization in dense wireless sensor networks[J]. IEEE Trans on Industrial Informatics, 2012, 8(1): 30–40.
- [16] XING Guoliang, LI Minming, WANG Tian, et al. Efficient rendezvous algorithms for mobility-enabled wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(1): 47–60.
- [17] AHMED R, AVARITSIOTIS J N. Mobile element based localization and tracking using path-loss model in WSNs[C]// Science and Information Conference (SAI). Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 1023–1026.
- [18] WANG Tian, PENG Zhen, CHEN Yonghong, et al. Continuous tracking for mobile targets with mobility nodes in WSNs[C]// International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP). Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 261–268.
- [19] WANG Tian, PENG Zhen, WANG Cheng, et al. Extracting target detection knowledge based on spatiotemporal information in wireless sensor networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2016, DOI: 10.1155/2016/5831471.
- [20] WANG Wenhua, WANG Tian, BHUIYAN M Z A, et al. Improving the localization probability and decreasing communication cost for mobile users[C]// Security, Privacy and Anonymity in Computation, Communication and Storage: SpaCCS 2016 International Workshops. Berlin: Springer International Publishing, 2016: 197–207.
- [21] XIAO Qingjun, XIAO Bin, CAO Jiannong, et al. Multihop range-free localization in anisotropic wireless sensor networks: a pattern-driven scheme[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(11): 1592–1607.
- [22] HAN Guangjie, XU Huihui, DUONG T Q, et al. Localization algorithms of wireless sensor networks: a survey[J]. Telecommunication Systems, 2013, 52(4): 2419–2436.
- [23] MISRA S, KAPRI N R, WOLFINGER B E. Selfishness-aware target tracking in vehicular mobile wimax networks[J]. Telecommunication Systems, 2015, 58(4): 313–328.
- [24] AHMED N, RUTTEN M, BESSELL T, et al. Detection and tracking using particle-filter-based wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(9): 1332–1345.
- [25] 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.
- [26] WANG Jing, GHOSH R K, DAS S K. A survey on sensor localization[J]. Journal of Control Theory and Applications, 2010, 8(1): 2–11.
- [27] BIAN G R, ZHANG H H, KONG F C, et al. Research on warehouse target localization and tracking based on KF and WSN[J]. Sensors & Transducers, 2014, 163(1): 255–261.
- [28] PENG Zheng, WANG Tian, BHUIYAN M Z A, et al. Dependable cascading target tracking in heterogeneous mobile camera sensor networks: algorithms and architectures for parallel processing[C]// Algorithms and Architectures for Parallel

- Processing, Springer International Publishing. Berlin: Springer, 2015: 531–540.
- [29] CHEN Hongyang, SHI Qingjiang, TAN Rui, et al. Mobile element assisted cooperative localization for wireless sensor networks with obstacles[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(3): 956–963.
- [30] ZHANG Shigeng, CAO Jiannong, CHEN Lijun, et al. Accurate and energy-efficient range-free localization for mobile sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2010, 9(6): 897–910.
- [31] WIMALAJEewa T, JAYaweera S K. Mobility assisted distributed tracking in hybrid sensor networks[C]// 2010 IEEE International Conference on Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 1–5.
- [32] 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.
- [33] WANG Y C, PENG W C, TSENG Y C. Energy-balanced dispatch of mobile sensors in a hybrid wireless sensor network[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2010, 21(12): 1836–1850.
- [34] 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.
- [35] TAN Rui, XING Guoliang, WANG Jianping, et al. Exploiting reactive mobility for collaborative target detection in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2010, 9(3): 317–332.
- [36] LI Wenling, JIA Yingmin. Consensus-based distributed multiple model UKF for jump markov nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(1): 227–233.
- [37] ZHANG Bowu, CHENG Xiuzhen, ZHANG Nan, et al. Sparse target counting and localization in sensor networks based on compressive sensing[C]// INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE. Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 2255–2263.
- [38] DEMIGHA O, HIDOUCI W K, AHMED T. On energy efficiency in collaborative target tracking in wireless sensor network: a review[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(3): 1210–1222.
- [39] ZHOU Zhong, CUI Junhong, ZHOU Shengli. Efficient localization for large-scale underwater sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2010, 8(3): 267–279.
- [40] HAN Guangjie, XU Huihui, JIANG Jinfang, et al. Path planning using a mobile anchor node based on trilateration in wireless sensor networks[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2013, 13(14): 1324–1336.
- [41] SPLETZER J R, TAYLOR C J. Dynamic sensor planning and control for optimally tracking targets[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2003, 22(1): 7–20.
- [42] ZHAN P C, CASBEER D W, SWINDLEHURST A. Adaptive mobile sensor positioning for multi-static target tracking[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(1): 120–132.
- [43] WANG Xue, MA Junjie, WANG Sheng, et al. Distributed energy optimization for target tracking in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2010, 9(1): 73–86.
- [44] CHEN Wei, FU Yinfei. Cooperative distributed target tracking algorithm in mobile wireless sensor networks[J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2011, 9(2): 155–164.
- [45] FU Yinfei, YANG Le. Sensor mobility control for multitarget tracking in mobile sensor networks[J]. *Int Journal of Distributed Sensor Networks*, 2014(1): 1–15.
- [46] PATEL N B. Target localization improving tracking accuracy and energy efficiency in wireless sensor network[D]. New York: Ahmedabad University. Amrut Mody School of Management, 2015: 1–21.
- [47] YANG Zaiyue, SHI Xiufang, CHEN Jiming. Optimal coordination of mobile sensors for target tracking under additive and multiplicative noises[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(7): 3459–3468.
- [48] MEYER F, RIEGLER E, HLINKA O, et al. Simultaneous distributed sensor self-localization and target tracking using belief propagation and likelihood consensus[C]// 2012 Conference Record of the Forty Sixth ASILOMAR Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR). Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 1212–1216.
- [49] MEYER F, HLAWATSCH F, WYMEERSCH H. Cooperative simultaneous localization and tracking (coslat) with reduced complexity and communication[C]// 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 4484–4488.
- [50] MEYER F, HLINKA O, WYMEERSCH H, et al. Cooperative simultaneous localization and tracking in mobile agent networks[J]. *Computer Science*, 2014(1): 1–15.
- [51] KAMATH S, MEISNER E, ISLER V. Triangulation based multi target tracking with mobile sensor networks[C]// 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 2007: 3283–3288.
- [52] SATHYAN T, HEDLEY M. Fast and accurate cooperative tracking in wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2013, 12(9): 1801–1813.
- [53] XU Enyang, DING Zhi, DASGUPTA S. Target tracking and mobile sensor navigation in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2013, 12(1): 177–186.
- [54] GHADBAN N, HONEINE P, MOURAD-CHEHADE F, et al.

- Mobility using first and second derivatives for kernel-based regression in wireless sensor networks[C]// 2014 International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP). Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 203–206.
- [55] ALHMIEDAT T, SALEM A O A, TALEB A A. An improved decentralized approach for tracking multiple mobile targets through Zigbee WSNs[J]. International Journal of Wireless & Mobile Networks, 2013, 5(3): 61–76.
- [56] 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.
- [57] SELVARAJ K, BALAJI S. Controlled mobility sensor networks for target tracking using particle swarm optimization[C]// 2013 International Conference on Current Trends in Engineering and Technology (ICCTET). Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 388–391.
- [58] KUMAR A S, PARVIN R. Energy conserving hybrid sensor network for target tracking in wireless sensor networks[C]// 2013 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP). Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 55–59.
- [59] BAI Jing, CHENG Peng, CHEN Jiming, et al. Target tracking with limited sensing range in autonomous mobile sensor networks[C]// 2012 IEEE 8th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS). Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 329–334.
- [60] RAHMÉ J, BOUKHATEM L, AL AGHA K. Predictive sink mobility for target tracking in sensor networks: advanced infocomm technology[C]// 5th IEEE International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT). Vincent G. Berlin: Springer, 2013: 283–295.
- [61] WANG Guojun, BHUIYAN M Z A, CAO Jiannong, et al. Detecting movements of a target using face tracking in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2014, 25(4): 939–949.
- [62] Bhuiyan M Z A, WANG Guojun, VASILAKOS A V. Local area prediction-based mobile target tracking in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2015, 64(7): 1968–1982.

(编辑 赵俊)