

管道支持移动传感器网络部署和调度研究综述 *

钟经纬^{1,2}, 袁学文¹, 罗更强¹

(1. 深圳远望谷信息技术有限公司, 广东 深圳 518057; 2. 国防科学技术大学 计算机学院, 长沙 410073)

摘 要: 在分析移动传感网络用途的基础上, 综述了移动传感网络部署和调度的研究现状, 提出了基于管道支持的移动传感器网络部署和调度方法, 识别和分析了其当前面临的一组关键挑战, 展望和讨论了其未来的发展方向。

关键词: 移动传感器网络; 调度; 部署

中图分类号: TP393 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2012)01-0012-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.01.003

Survey of on deployment and scheduling of
cable based mobile wireless sensor network

ZHONG Jing-wei^{1,2}, YUAN Xue-wen¹, LUO Geng-qiang¹

(1. Shenzhen Invengo Information Technology Co. Ltd, Shenzhen Guangdong 518057, China; 2. College of Computer Science & Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: On the analysis of mobile sensor network purpose, this paper overviewed the state-of-the-art of researches on the mobile sensors network deployment and scheduling, and proposed deployment and scheduling method of the cable based mobile sensor network to identify and analyze a number of key challenges of such technology. Finally, it outlooked and discussed future development direction.

Key words: mobile sensor network; scheduling; deployment

0 引言

无线传感器网络(wireless sensor networks, WSN)是由大规模部署在监控区域内的传感器节点通过自组织方式形成的无线网络,目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖的地理区域中特定感知对象的信息,并发布给观察者^[1]。由于无线传感器网络无须固定的设备支撑、可以快速部署、使用自组织的灵活组网方式,不受有线网络约束,因此具有广阔的应用前景^[2]。基于各类传感网络节点平台、面向各个领域应用需求的研究项目层出不穷,不仅在工业、农业、军事、环境等传统领域具有巨大的应用价值,在许多新兴领域也逐渐体现其优越性^[3~6]。随着计算成本的下降以及微处理器技术的发展,传感器网络在很多领域已经进入实用阶段,并将逐步深入到人类生产、生活的各个领域。

传统的传感器网络一般采用静态传感器节点,一旦部署,所有节点的位置和感知范围就不再发生变化。如果要进行更高精度的监测,可以采用移动传感器。移动传感器节点比一般的传感器节点的感知、通信能力更强,它可以根据需要移动到应用指定的任意位置,实现网络的动态按需部署。不仅可以避免和弥补覆盖盲区,增强网络的监控能力,还可以辅助数据的收集、避免拥塞、实时可靠地传递紧急数据。但是完全部署移动传感器节点会导致网络的开销较大。另一种可选的方案是

构建一个混合网络,其中包含静止节点和移动节点。此时,静止节点可以采用相对便宜的低精度的部件,它们对目标区域进行完全覆盖;移动节点配备高精度的部件,它们的数量有限。这样就可以用静止节点对目标区域进行粗粒度的监测,然后调度移动节点对感兴趣的事件进行精确监测。近年来已有不少关于无线移动传感器网络的文章发表在 SIGCOMM、MOBI-COM、MOBIHOC 等顶级会议上^[7~11],从一个侧面反映了无线移动传感器网络已成为计算机网络学术界的一个新研究热点。然而现有的研究对移动节点的假设较强,基本都假定节点可以移动到指定的任何区域,这种无限制的移动模型存在一些局限,在很多应用中并不现实:a)被监控的环境可能非常复杂,如煤矿中的坑道在地下纵横交错,在这样的场景中难以让节点随意移动;b)对监控环境进行建模和移动规划需要较高的智能,而传感器节点资源受限,在能力上难以支持;c)节点在监控环境中随意移动会干扰到人们的正常工作,完全暴露在外也容易遭受事故的影响;d)具备任意移动能力的传感器节点(某种程度上可称为机器人)的造价很高,大量部署需要高额的成本。此外,现有的研究多数基于理论的研究,如分析移动网络中的间歇连通延时(inter-contact time)模型、节点在任意移动模型下的动态覆盖模型等,较少考虑现实应用中存在的具体问题。

本文在系统综述移动传感器网络部署和调度的基础上,深层次地识别和分析当前移动传感器网络部署和调度存在的问

收稿日期: 2011-07-25; 修回日期: 2011-08-28 基金项目: 国家自然科学基金—青年科学基金项目(60903224); 2010 年广州市应用基础研究计划项目(2010Y1-C741); 广州市重大科技专项计划资助项目(2009A1-D151)

作者简介: 钟经纬(1978-),男,湖南岳阳人,主任,硕士,博士研究生,主要研究方向为无线传感网、操作系统安全(zhongjingwei@21cn.com); 袁学文(1962-),男,湖南长沙人,总工程师,高级工程师,本科,主要研究方向为无线传感网技术、RFID 技术在食品安全领域中的应用。

题和面临的挑战,并展望了进一步研究的方向。

1 移动传感器网络研究现状

移动传感器网络的用途主要有两大方面:a)增强网络的覆盖和监控能力,b)协助数据收集,避免部分节点负担过重和产生拥塞。这两部分工作主要集中研究移动节点的部署和调度策略。还有一部分工作研究移动传感器网络的间歇连通路由。下面分别从这三个方面分析国内外的研究情况。

1.1 增强网络覆盖和监控

由于随机部署过程中节点位置以及状态的随机性,网络可能会出现覆盖不均衡或者出现盲区的情形。为了扩大网络覆盖和监控面积,需要使用具有移动能力的传感器节点,利用节点的移动能力在初始随机部署之后,调度节点移动进行自组织再部署,以改善网络覆盖质量。

Howard 等人^[12]假定网络全由移动节点构成,将每个可移动的机器人视为一个移动的传感器节点,设计了一种基于人工势场(potential field)的移动节点部署方法。初始条件下节点聚集在一起。通过节点之间以及节点与障碍物之间的排斥力,将聚集在一起的节点向四周扩散,从而扩大网络覆盖区域。进一步,Howard 还设计了一种迭代的自动部署算法,逐个将移动节点部署到应用环境中去。每个新部署节点根据已经部署节点的感知信息来决定其目标位置^[13]。这样,节点能够按照应用需求分步达到优化覆盖的目的。与此类似的工作还包括文献[14~17]。

Wang 等人^[18]考虑了由静态节点和移动节点组成的混合无线传感器网络中可移动节点的部署问题^[18]。静态节点检测到部署区域内存在的覆盖盲区后,向临近的可移动节点发出申请,试图通过可移动节点的移动减少甚至消除覆盖盲区。由于一个可移动节点可能会同时收到来自多个不同静态节点的申请消息,Wang 等人设计了一种竞争协议,使得可移动节点向能获得最大覆盖收益的位置移动。为了最大化网络覆盖面积,Wang 等人^[19]还设计了三个分布式算法:VEC、VOR 和 Minimax 算法。其中,VEC 算法是将节点从高密度区域推向稀疏区域,VOR 算法试图将节点朝局部最大覆盖盲区移动,而 Minimax 算法试图将节点部署在局部 Voronoi 区域中心。另外,Wang 等人^[20]通过节点移动来响应新事件或者消除失效节点的影响,通过改变节点的位置形成更多的无交节点集合,从而有利于延长网络生存时间^[21]。以上工作都是为了弥补初次部署的不足,然后通过节点移动来最大化覆盖区域。但这些策略只考虑了节点的一次再部署,而在移动节点不充足的情况下,一次再部署依然存在覆盖的不均衡问题。

为达到最优覆盖,文献[22]考虑了一次重部署的缺陷,基于马尔科夫模型提出了一个分布式算法,利用可移动节点的连续移动特性来调度节点。此外,文献[23]研究了在全移动传感器网络和混合网络结构中,移动节点数量与网络覆盖度之间的折中关系。

Hwang 等人^[24]提出了一种通过节点的移动来延长网络生存时间的集中式算法。在 SET-K COVER 问题中,网络的生存时间取决于无交节点集个数。该算法首先使用文献[25]提出的方法将网络节点划分为若干无交节点集,再通过改变不属于任何节点集的可移动节点位置来将剩余节点组织成尽可能多的无交节点集。Liu 等人^[8]研究了移动传感器网络的覆盖特

性。通过节点的移动,原来不被覆盖的区域也逐渐被移动到本地的节点所覆盖,因此总的覆盖面积在增加。Liu 等人定义了即时覆盖区域和一段时间内覆盖区域两种覆盖质量度量,利用随机移动模型,研究了覆盖区域同节点的密度与移动速度的关系,给出移动节点的最优移动策略。Wu 等人^[26]利用扫描和维度交换的方式,提出了 SMART 协议,将网络从一个移动节点负载不均衡的状态转移到均衡状态。Bisnik 等人^[7]研究了如何利用移动传感器节点来增强网络的事件捕获能力。一个事件的存在有一定的时长,在事件消失前能被节点感知到就表示事件被捕获。Bisnik 等人还分析了移动节点的移动速度、移动路径和移动节点的数量对事件捕获能力的影响。

在这些工作中,均假定节点具有任意的移动能力,可以移动到指定的任何区域,没有边界条件的限制。在现实的监控环境中,由于存在规划、造价等多方面的限制,任意移动模型难以得到实际的应用。

1.2 协助数据收集

在传感器网络中,数据收集大都采用多到一的通信模式。因此,基站周围的节点将担负网络内的所有负载,成为网络性能的瓶颈,不但降低了网络的吞吐量,而且这些节点将快速失效,会降低网络的寿命。此外,由于部署的随机性,一些区域的节点较少,传输负担较重,容易引发拥塞。因此,需要调度移动节点分担瓶颈节点的负担,协助网络的数据收集。现有移动节点协助数据收集的工作主要有两类:a)移动基站,让基站位于网络的不同位置,轮换将数据发给基站的节点;b)数据骡子,移动节点先缓存数据,当骡子移动到节点附近时再发给它。

Luo 等人^[27]使用了移动基站的方法,并提出了一个将数据路由与基站移动相结合的模式来达到负载平衡。Wang 等人^[28]提出了一种移动中继的方法来收集数据的模式,其中基站是固定不动的,若干分布在基站周围(两跳之内)的中继节点有规律地沿圆环移动,所有两跳外的节点在探测到数据时首先传输给中继节点,然后由中继节点直接传输给基站。这种方法通过引入中继节点来分担基站周围节点的负载,从而解决了网络瓶颈问题。文献[29,30]也采用了移动基站的方法来最大化网络寿命,不同的是,其将基站移动问题模型化为线性规划问题,找寻基站的最优移动计划和特定的停留点。由于基站不停地移动,这种方式只能支持基于查询的数据收集。此外,从数据源到基站需要通过多跳通信,而基站位置的变化会导致频繁构建传输路径,引发的额外开销也比较大。

Shah 等人^[31]提出了数据骡子(data mules)的模式,探测到数据的节点首先将数据缓存起来,当有 mules 移动到该节点附近时,数据单跳传输给 mules,然后由 mules 在移动到后方基站后卸掉数据。这种方式的好处是节点负载较少,但是数据却无法保证及时传输到基站,与之类似的模式有文献[32,33]。文献[34,35]提出了一些启发式算法来调度移动节点,让数据源在被访问之前不产生数据溢出。虽然数据骡子这种方法可以避免移动基站频繁构建路径的开销,但是会引发较长的延迟。如果监控区域较大,移动节点的速度又不够快,延迟会很高。

还有一部分工作结合了多跳传输和数据骡子的优势,使用一种混合模式。文献[8,36]在网络中引入了多个移动元素(mobile element),它们在网络中沿着指定的路径移动。数据源将数据通过多跳通信传送到 ME 的移动路径附近,当移动基站经过时进行数据收集。Wang 等人^[28]指出将 ME 的移动路

径约束在基站附近可以最大化网络的生命周期。但是这些研究都没有考虑让数据的收集工作满足一定的延时需求。Gu 等人^[37]将紧急数据传送到 ME 访问较频繁的数据源以降低传送延迟。但他们假定这种紧急事件发生得并不频繁,因此可扩展性不强。Xing 等人^[38]提出了一种基于集合点 (rendezvous point) 的方法,将数据传送到指定的集合点,当 ME 经过这些集合点时收集数据。在确定集合点时,要求满足保证延时约束的情况下最小化网络能耗。如果在集合点发现无法满足延时约束,则使用多跳路由直接传回基站。

这些研究提出的方法虽然有很好的理论指导意义,但它们基本都是采用集中式的方法,部分还要求预知网络的流量分布以规划移动节点的最佳移动路径,这对于动态事件的场景来说并不现实,难以得到实际的应用。

1.3 间歇连通路由

目前对于间歇连通路由的研究主要集中在 DTN (delay tolerant network) 网络中。DTN 网络动态松散连通,连通性随着节点的移动而频繁发生变化,只有当节点相遇时才交换信息,这种连通性质称为间歇连通。由于连通的动态性,节点必须先将数据暂存在自己的数据缓冲区中,等待合适的机会再传输出去,传输时延一般较长,所以称为延迟容忍网络。间歇连通路由可以分为确定性路由和随机性路由两类。

确定性路由协议需要预知整个网络的拓扑结构,节点的运动状态和节点之间的间歇连通状态信息也要求事先可获知,确定性路由依据这些信息计算出数据传输的路径,相关的工作有文献[39~41]等。在确定性路由中,只有在端到端的路径完全建立以后节点之间才能传输数据,然而在多数情况下,网络拓扑无法提前预知,因此在移动传感器网络中,确定性路由算法的应用基础较弱。

在随机性路由中,节点的移动模式完全是随机的。基于这种路由的网络多数是规模较大的 DTN 网络,如星际网^[42]、巴士网^[43~45]等。Vahdat 等人^[46]提出一种流行性路由算法 (epidemic routing)。当数据传送到中间节点时将数据广播到其他邻居,这样数据可以在连通网络中迅速传播,最终到达目的地,但这种方式会带来较大的开销。Tchakountio 等人^[47]改进了这种方法,假定已知目的节点的最后位置,数据只被转发到临近此位置的节点,降低了网络开销。文献[48, 49]基于历史数据对未来节点的运动状态进行预测,有目的地进行数据转发,只将数据转发给能以较高概率传递给基站的节点,否则继续存储等待时机转发。文献[9]考虑了端到端的性能,希望在有限的带宽、存储等约束下最小化传输路径长度和传输延迟等。文献[50]比较和分析了中继、基站、Mesh AP 之间对移动节点数据传输性能影响的差别。

文献[10,11]分析了随机移动模型下间歇连通延时的分布,并指出当节点移动范围存在边界时满足幂率分布,否则将逼近指数分布。其中文献[11]还分析了节点移动模型分别是 Random Walk 和 Random Way Point 时的不同间歇连通延时分布。

在移动传感器网络中研究实时可靠的路由模型依然是个亟待解决的问题,需要更加系统地研究移动网络中的各种行为特征,结合现实应用的特点,分析移动场景下的间歇连通延时模型和传输可靠性模型,设计出满足应用需求的路由和传输协议。

2 基于管道支持移动传感器网络部署

针对上述问题,本文提出一种管道 (cable) 支持的实用移

动传感器网络部署方法。在监控环境中预先部署管道,管道组成了节点的移动主干,移动节点只在固定的管道中移动。管道构成了一个相对平坦的环境,这样可以缓解地形对移动节点的各种限制。管道的引入不但对移动节点的要求大大放松,还可以对移动节点起着保护的作用。

基于管道支持的移动传感器网络是由静态传感器节点和动态节点组成的混合网络,正常情况下,静态节点实施常规的监控任务,一旦感知异常,就通知附近的移动节点。许多事件的监控一般有严格的时间要求,如果在给定的时间内没有节点赶到,就失去了监控的意义。因此,本文扩展了传统的覆盖模型,与圆盘覆盖模型不同,移动节点的可覆盖区域指在给定时间内沿管道可达到的区域,如图 1 所示。显然,在管道模型下,由于覆盖模型的改变,不同位置的可覆盖区域的形状和面积都不一致,控制的复杂程度大大增加,现有的部署和调度方法已不再适用,这成为解决管道支持的无线移动传感器网络中所面临的新问题和新挑战,

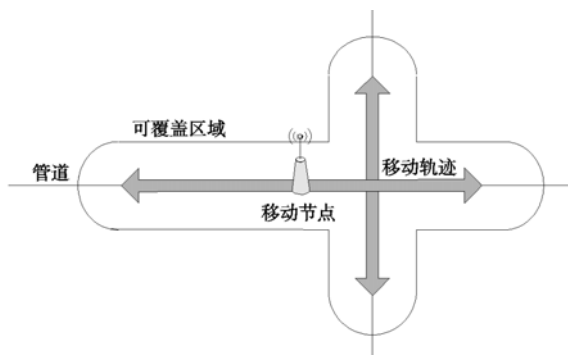


图1 移动节点在给定时间内的可覆盖区域

3 未来研究及展望

综上所述,移动传感器网络已经成为当前无线网络研究的热点领域。从以上的分析来看,当前的研究尚存在许多不足,移动传感器网络的下一步发展将在以下方面进行突破:

- 结合具体应用特点,建立新的更合适的网络模型。放松对移动节点和网络的要求,研究并提出更切合实际应用的方法。
- 拓展移动传感器网络的能力范畴,充分利用移动传感器节点高精度感知和灵活再部署等能力,在应用中挖掘新的移动结合点。
- 深入研究不同感知模型和控制目标下的移动节点部署和调度问题,为移动传感器网络的实际部署提供理论方法和软件工具。
- 丰富和完善移动传感器网络的支撑技术与网络协议,根据应用需求设计相应的移动节点路由和传输协议等。

4 结束语

据笔者所知,目前尚没有专门的工作研究实用性强的移动传感器网络,而许多应用场景特有的复杂情况使人们迫切需要能力更强的监控网络。在后续的研究中,将充分利用移动传感器节点的各种优势,深入研究管道支持的移动传感器网络部署和调度等问题,力争取得一些突破性成果。

参考文献:

[1] TILAK S, ABU-GHAZALEH N, HEINZELMAN W. A taxonomy of

- wireless micro-sensor network models[J]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2002, 6(2): 28-36.
- [2] 孙利民, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [3] NOURY N, HERVE Y, RIALLE V, *et al.* Monitoring behavior in home using a smart fall sensor and position sensors[C]// Proc of IEEE-EMBS Special Topic Conference on Microtechnologies in Medicine and Biology. 2000: 607-610.
- [4] BONNET P, GEHRKE J, SESHADRI P. Querying the physical world[J]. *IEEE Personal Communications*, 2000, 7(5): 10-15.
- [5] LIANG S H L, CROITORU A, TAO C V. A distributed geospatial infrastructure for sensor Web[J]. *Computer & Geosciences*, 2005, 31(2): 221-231.
- [6] Volcano sensor Webs [EB/OL] (2009-08-08) [2011-08-08]. <http://sensorwebs.jpl.nasa.gov/>.
- [7] BISNIK M, ABOUZEID A A, ISLER A A. Stochastic event capture using mobile sensors subject to a quality metric[J]. *IEEE Trans on Robotics*, 2007, 23(4): 676-692.
- [8] LIU Ben-yuan, BRASS P, DOUSSE O, *et al.* Mobility improves coverage of sensor networks[C]// Proc of the 6th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing. New York: ACM Press, 2005: 300-308.
- [9] BALASUBRAMANIAN A, LEVINE B N, VENKATARAMANI A. DTN routing as a resource allocation problem[C]//Proc of ACM SIGCOMM. 2007: 373-384.
- [10] KARAGIANNIS T, Le BOUDEC J Y, VOJNOVI M. Power law and exponential decay of inter contact times between mobile devices[C]// Proc of the 13th Annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking. [S. l.]: ACM Press, 2007: 183.
- [11] CAI Han, EUN D Y. Crossing over the bounded domain: from exponential to power-law inter-meeting time in MANET[C]//Proc of the 13th Annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking. [S. l.]: ACM Press, 2007: 159-170.
- [12] HOWARD A, MATARI'C M J, SUKHATME G S. Mobile sensor network deployment using potential fields: a distributed, scalable solution to the area coverage problem[C]//Proc of the 6th International Conference on Distributed Autonomous Robotic Systems. 2002: 299-308.
- [13] HOWARD A, MATARI'C M J, SUKHATME G S. An incremental self-deployment algorithm for mobile sensor networks[J]. *Autonomous Robots*, 2002, 13(2): 113-126.
- [14] HEO N, VARSHNEY P K. A distributed self spreading algorithm for mobile wireless sensor networks[C]//Proc of IEEE Wireless Communication and Networking. Piscataway: IEEE Press, 2003: 1597-1602.
- [15] HEO N. Distributed deployment algorithms for mobile wireless sensor networks[D]. [S. l.]: Syracuse University Syracuse, 2004.
- [16] ZOU Yi, CHAKRABARTY K. Sensor deployment and target localization based on virtual forces[C]//Proc of the 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. San Francisco: [s. n.], 2003: 1293-1303.
- [17] ZOU Yi, CHAKRABARTY K. Sensor deployment and target localization for tactical surveillance[C]//Proc of the 23rd Army Science Conference. 2002.
- [18] WANG Gui-ling, CAO Guo-hong, PORTA T L. A bidding protocol for deploying mobile sensors[C]//Proc of the 11th IEEE International Conference on Network Protocols. 2003: 315-324.
- [19] WANG Gui-ling, CAO Guo-hong, PORTA T L. Movement-assisted sensor deployment[J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2006, 5(6): 640-652.
- [20] WANG Gui-ling, CAO Guo-hong, PORTA T L. Sensor relocation in mobile sensor networks[C]// Proc of IEEE INFOCOM. New York: IEEE Press, 2005: 2302-2312.
- [21] WANG Gui-ling, CAO Guo-hong, PORTA T L. Proxy-based sensor deployment for mobile sensor networks[C]//Proc of IEEE International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems. 2004: 493-502.
- [22] WANG Dan, LIU Jiang-chuan, ZHANG Qian. Probabilistic field coverage using a hybrid network of static and mobile sensors[C]//Proc of the 15th IEEE International Workshop on Quality of Service. 2007: 56-64.
- [23] SRINIVASAN W W V, CHUA K C. Trade-offs between mobility and density for coverage in wireless sensor networks[C]// Proc of the 13th Annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2007: 39-50.
- [24] HWANG J, DU D H C, KUSMIEREK E. Energy efficient organization of mobile sensor networks[C]//Proc of International Conference on Parallel Processing Workshops. 2004: 84-91.
- [25] SLJEPCEVIC S, POTKONJAK M. Power efficient organization of wireless sensor networks[C]//Proc of IEEE International Conference on Communications. 2001: 472-476.
- [26] WU Jie, YANG Shu-hui. Smart: a scan-based movement-assisted sensor deployment method in wireless sensor networks[C]//Proc of IEEE Conference on Computer Communications. 2005: 2313-2324.
- [27] LUO Jun, HUBAUX J P. Joint mobility and routing for lifetime elongation in wireless sensor networks[C]// Proc of the 24th Annual Conference of IEEE Computer and Communications Societies. Piscataway: IEEE Press, 2005: 1735-1746.
- [28] WANG Wei, SRINIVASAN V, CHUA K C. Using mobile relays to prolong the lifetime of wireless sensor networks[C]//Proc of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. 2005: 270-283.
- [29] GANDHAM S R, DAWANDE M, PRAKASH R, *et al.* Energy-efficient schemes for wireless sensor networks with multiple mobile base stations[C]//Proc of IEEE Global Telecommunications Conference. Washington DC: IEEE Computer Society, 2003: 377-381.
- [30] WANG Z M, BASAGNI S, MELACHRINOUDIS E, *et al.* Exploiting sink mobility for maximizing sensor networks lifetime[C]//Proc of the 38th Hawaii International Conference on System Sciences. Washington DC: IEEE Computer Society, 2003: 30-41.
- [31] SHAH R, ROY S, JAIN S, *et al.* Data mules: modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks[C]// Proc of IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications. 2003: 30-41.
- [32] KANSAL A, SOMASUNDARA A, JEA D D, *et al.* Intelligent fluid infrastructure for embedded networks[C]//Proc of the 2nd International Conference on Mobile System, Applications and Services. New York: ACM Press, 2004: 111-124.
- [33] ZHAO Wen-rui, AMMAR M H, ZEGURA E W. A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile Ad hoc networks[C]//Proc of the 5th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing. [S. l.]: ACM Press, 2004: 187-198.
- [34] GU Yao-yao, BOZDAG D, BREWER R W, *et al.* Data harvesting with mobile elements in wireless sensor networks[J]. *Computer Networks*, 2006, 50(17): 3449-3465.

- [J]. 信息与控制, 2009, 38(1): 70-74.
- [27] 蒙祖强, 史忠植. 一种新的基于简化二进制可辨矩阵的相对约简算法[J]. 控制与决策, 2008, 23(9): 976-980.
- [28] 赵军, 王国胤, 吴中福, 等. 一种高效的属性核计算方法[J]. 小型微型计算机系统, 2003, 24(11): 1590-1593.
- [29] 刘少辉, 盛秋骥, 吴斌, 等. Rough 集高效算法的研究[J]. 计算机学报, 2003, 26(5): 524-529.
- [30] 徐章艳, 刘作鹏, 杨炳儒, 等. 一个复杂度为 $\max(O(|C||U|), O(|C|^2|U/C|))$ 的快速属性约简算法[J]. 计算机学报, 2006, 29(3): 391-399.
- [31] 葛浩, 李龙澍, 杨传健. 改进的快速属性约简算法[J]. 小型微型计算机系统, 2009, 30(2): 308-312.
- [32] 刘勇, 熊蓉, 褚健. Hash 快速属性约简算法[J]. 计算机学报, 2009, 32(8): 1493-1499.
- [33] 蒋瑜, 刘胤田, 李超. 基于 Bucket Sort 的快速属性约简算法[J]. 控制与决策, 2011, 26(2): 207-212.
- [34] 刘宗田. 属性最小约简的增量式算法[J]. 电子学报, 1999, 27(11): 96-98.
- [35] HU Feng, WANG Guo-yin, HUANG Hai, *et al.* Incremental attribute reduction based on elementary sets[C]//Proc of the 10th International Conference on Rough Sets, Fuzzy Sets, Data Mining and Granular Computing. Heidelberg Regina: Physica-Verlag, 2005: 185-193.
- [36] 胡峰, 代劲, 王国胤. 一种决策表增量属性约简算法[J]. 控制与决策, 2007, 22(3): 268-271.
- [37] 王元珍, 裴小兵. 增量式的高效属性约简算法[J]. 小型微型计算机系统, 2005, 26(11): 193-195.
- [38] 杨明. 一种基于改进差别矩阵的属性约简增量式更新算法[J]. 计算机学报, 2007, 30(5): 815-822.
- [39] 官礼和, 王国胤. 决策表属性约简集的增量式更新算法[J]. 计算机科学与探索, 2010, 4(5): 436-444.
- [40] 冯少荣, 张东站. 一种高效的增量式属性约简算法[J]. 控制与决策, 2011, 26(4): 495-500.
- [41] 谭迪. 改进分辨矩阵下的增量式条件属性约简算法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(9): 1684-1694.
- [42] KUSIAK A. Decomposition in data mining; an industrial case study[J]. IEEE Trans on Electronics Packaging Manufacturing, 2000, 23(4): 345-353.
- [43] BLAZ Z, MARKO B, IVAN B, *et al.* A dataset decomposition approach to data mining and machine discovery[C]//Proc of the 3rd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. [S. l.]: AAAI Press, 1997: 299-303.
- [44] 樊群, 赵卫东, 达庆利. 一种基于粗集的实例分解归纳学习方法[J]. 管理工程学报, 2001, 15(2): 79-81.
- [45] 赵卫东, 李旗号. 复杂决策表的特征提取方法研究[J]. 小型微型计算机系统, 2002, 10(23): 1241-1244.
- [46] HU Feng, FAN Xing-hua, YANG S X, *et al.* A novel reduction algorithm based decomposition and merging strategy[C]//Proc of International Conference on Intelligent Computing. 2006: 790-796.
- [47] 吴子特, 叶东毅. 一种可伸缩的快速属性约简算法[J]. 模式识别与人工智能, 2009, 22(2): 234-239.
- [48] 刘清. Rough 集及 Rough 推理[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [49] 杨明, 吴永芬. 一种基于水平分布的多决策表全局属性核求解算法[J]. 控制与决策, 2008, 23(2): 127-132.

(上接第 15 页)

- [35] SOMASUNDARA A, RAMAMOORTHY A, SRIVASTAVA M. Mobile element scheduling with dynamic deadlines[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2007, 6(4): 395-410.
- [36] JEA D, SOMASUNDRA A, SRIVASTAVA M. Multiple controlled mobile elements (data mules) for data collection in sensor networks[C]//Proc of IEEE DCSS. 2005: 244-257.
- [37] GU Yao-yao, BOZDAG D, EKICI E. Mobile element based differentiated message delivery in wireless sensor networks[C]//Proc of IEEE International Symposium on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. 2006.
- [38] XING Guo-liang, WANG Tian, XIE Zhi-hui, *et al.* Rendezvous planning in mobility-assisted wireless sensor networks[C]//Proc of the 28th IEEE Real-time Systems Symposium. 2007: 311-320.
- [39] JAIN S, FALL K, PATRA R. Routing in delay tolerant network[C]//Proc of ACM SIGCOMM. [S. l.]: ACM Press, 2004: 145-158.
- [40] HANDOREAN R, GILL C, ROMAN G C. Accommodating transient connectivity in Ad hoc and mobile settings[C]//Proc of Pervasive. 2004: 305-322.
- [41] MERUGU S, AMMAR M H, ZEGURA E W. Routing in space and time in networks with predictable mobility, GIT-CC-04-7[R]. [S. l.]: Georgia Institute of Technology, 2004.
- [42] WANG Yong, JAIN S, MARTONOSI M, *et al.* Erasure-coding based routing for opportunistic networks[C]//Proc of ACM SIGCOMM Workshop on Delay Tolerant Networking. [S. l.]: ACM Press, 2005: 229-236.
- [43] ZHU Hong-zi, ZHU Yan-min, LI Ming-lu, *et al.* HERO: online real-time vehicle tracking in Shanghai[C]//Proc of the 27th IEEE Conference on Computer Communication. 2008: 942-950.
- [44] SKORDYLIS A, TRIGONI N. Delay-bounded routing in vehicular Ad hoc networks[C]//Proc of the 9th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing. New York: ACM Press, 2008: 341-350.
- [45] BALASUBRAMANIAN A, LEVINE B N, VENKATARAMANI A. Enhancing interactive Web applications in hybrid networks[C]//Proc of the 14th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2008: 70-80.
- [46] VAHDAT A, BECKER D. Epidemic routing for partially connected Ad hoc networks, CS-2006-06[R]. Durham: Duke University, 2000.
- [47] TCHAKOUNTIO F, RAMANATHAN R. Tracking highly mobile endpoints[C]//Proc of the 4th ACM International Workshop on Wireless Mobile Multimedia. New York: ACM Press, 2001: 83-94.
- [48] ZHANG Xiao-lan, KUROSE J, LEVINE B N, *et al.* Study of a bus-based disruption-tolerant network: mobility modeling and impact on routing[C]//Proc of the 13th Annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking. [S. l.]: ACM Press, 2007: 195-206.
- [49] ACER U G, KALYANARAMAN S, ABOUZEID A A. Weak state routing for large scale dynamic networks[C]//Proc of the 13th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2007: 290-301.
- [50] BANERJEE N, CORNER M D, TOWSLEY D, *et al.* Relays, base stations, and meshes: enhancing mobile networks with infrastructure[C]//Proc of the 14th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2008: 81-91.