

无线传感执行网络的协调机制研究 *

李洪峻, 李 迅, 马宏绪

(国防科学技术大学 自动控制系, 长沙 410073)

摘 要: 主要研究了无线传感执行网络中执行节点之间的协调,提出了基于单执行节点任务的分布式协调机制。在多执行节点协调算法中,建立了多执行节点协调的数学模型,引入基于进化算法的多目标优化,提高了系统的最优性能。

关键词: 无线传感执行网络; 协调; 多目标优化; 进化算法

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2009)01-0250-03

Study on coordination of wireless sensor and actor networks

LI Hong-jun, LI Xun, MA Hong-xu

(Dept. of Automatic Control, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: This paper focused on studying the coordination between the actors. First presented a distributed coordination based on single actor. Then formulated the multi-actors coordination as a multi-objective optimization. Presented a solution of the multi-objective optimization based on evolutionary algorithm.

Key words: wireless sensor and actor networks; coordination; multi-objective optimization; evolutionary algorithm

0 引言

无线传感执行网络是由部署在监测区域内大量低成本、低功耗、具备感知、数据处理、存储和无线通信能力的传感器节点,以及少量具备处理和通信能力,并能主动对外部环境实施操作,且能量资源丰富(更长的电池寿命或者恒定电源)的执行节点通过自组织方式形成的网络。其目的是由传感节点协作采集、处理和传输网络覆盖区域中被感知对象的信息,执行节点根据传感节点感知信息并对外部环境实施相应的反应。

图 1 是无线传感执行网络体系结构示意图。典型的无线传感执行网络通常包括传感节点(sensor nodes)、执行节点(actor nodes)以及任务管理节点。大量传感节点及少量执行节点通过随机部署或确定部署的方式布撒在监测区域内,并通过自组织方式形成多跳无线通信网络。传感节点负责从环境中收集数据,而执行节点根据从传感节点接收到的数据执行相应的操作。汇聚节点一般远离被监测环境,负责监控整个网络,并通过 Internet 或卫星网络与任务管理节点进行通信,必要时与传感或执行节点进行通信。

在 WSNs 中,感知环境信息和对环境进行操作分别由传感节点和执行节点来实现。对于无线传感执行网络的研究,国内刚刚起步。目前,围绕应用需求以及无线传感执行网络的特点,研究热点主要分为三方面,即管理、协调和通信。

1)管理平台 能量管理平台(power management)主要管理节点如何高效地使用有限能量;移动管理平台(mobility management)检测并注册节点的移动,维护网络的连通性;故障管理平台(fault management)探测和解决节点故障问题。

2)协调平台 依据通信平台和管理平台接收到的数据,决定节点如何操作。协调平台的存在对执行节点来说,比对传感节点更重要。因为在执行决策中,执行节点需要相互协调,以实现任务的分配。

3)通信平台 该平台实现节点之间信息及连接关系的交换和共享,是传感节点和执行节点结构中最重要的一个平台。通信平台包括物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层。WSANs 既有传感节点与执行节点通信,又有执行节点与执行节点通信。通信所需要实现的高效操作均通过传感节点和执行节点的协调来实现,而执行数据收集和协调的汇聚节点并不是必需的。

在 WSNs 中,通信问题主要集中于传感节点和 sink 节点之间。而在 WSNs 中,除了传感节点与执行节点通信外,还存在执行节点之间的通信,以实现应用的目标。因此,为了提供高效的检测和反应能力,在传感节点和执行节点中的局部协调机制是必要的,如传感节点与传感节点协调、传感节点与执行节点协调、执行节点与执行节点协调。传感节点与传感节点协调、传感节点与执行节点协调在 WSNs 中已有所研究,本文主要研究执行节点与执行节点之间的协调。

1 执行节点与执行节点之间的协调

执行节点在不同的应用环境中,需要与其他节点进行通信协调,如接收到传感数据的执行节点的作用范围不足覆盖事件区域,或没有足够能力作出响应时。在执行节点相互通信过程中,协调和任务分配是一个核心问题,本文从以下两个方面来分析。

1.1 单执行节点任务(single-actor task, SAT)中分布式协调算法

SAT 是指每项任务只需一个执行节点就能完成。在 SAT 中,如果只有一个执行节点接收到事件信息,并能够执行所需的操作时,它无须与其他执行节点或决策中心进行通信,以避免超过延迟界限。但如果有多多个执行节点从传感节点接收到事件信息,执行节点就需要相互协调,为该事件选出一个最佳执行节点。

对于 SAT, 主要问题在于如何选择单一执行节点。协调算法分为集中式和分布式两种。集中式是指这种决策过程以集中的方式实现的。它使动作决策以一种有组织的方式进行。集中式的缺点在于如果决策中心远离事件区, 将导致通信延迟时间长, 并且当执行节点移动时决策中心很难及时更新网络中执行节点的位置。因此如何选择决策中心的执行节点是集中式算法中一个研究难题。分布式算法是指决策过程以分布的方式实现的。它允许相邻执行节点进行局部协调, 以提供及时的操作和独立于网络规模的协调。本文主要设计分布式协调算法。

在分布式协调算法中,没有专门充当决策中心的执行节点,主要是在接收到事件报告的执行节点之间进行协调,以确定执行事件响应的操作。因此通过初始阶段的传感节点、执行节点的位置信息广播,每个传感节点记录自己相邻的传感节点 ID 号和位置信息,以及所有执行节点的 ID 号和位置信息,而执行节点只需记录其他执行节点的 ID 号和位置信息。根据所接收到的执行节点的位置信息,传感节点选择信号最强的执行节点作为自己的根节点——事件消息报告的目的地。执行节点之间的边界是通过动态构造 Voronoi 图来划分的。

为了避免出现多个执行节点同时对该事件作出响应,造成不必要的资源浪费,引入主决策节点的概念。主决策节点的确定与效能函数有密切的关系。假设执行节点具有相同的能力,在同等等或相近的条件下,距离事件中心越近,执行节点的效能值(即完成对事件响应的的时间)就越大。因此,将包含事件中心的 Voronoi 区域所属的执行节点作为该事件的主决策节点。任何需对事件执行操作的执行节点,都必须得到主决策节点的同意。另外,主决策节点收集传感节点事件报告的计时器的时延,应大于其他执行节点收集事件报告的计时器的时延,以保证在事件的主决策节点计时器超时之前,其他执行节点均能将事件的数据报告给主决策节点。

主决策节点接收到事件的信息熵超过决策阈值时,需要考虑选择什么样的执行节点,以使响应事件的任务顺利完成。因此主决策节点需要先收集周边执行节点当前执行对事件响应任务的效能,然后再选择合适的节点去执行对事件响应的任务。在这里使用基于市场的拍卖规则,用来收集周边执行节点当前执行本事件任务的效能。

拍卖规则定义:主决策节点作为事件的卖家,发送一个开始消息,将事件的 ID 号、位置等信息广播给周边的执行节点,并启动一个计时器,以避免拍卖时间过久,使得应用的实时需求无法满足。周边的执行节点作为事件的买家,在监听到开始消息后,提交能够开始完成任务后所能剩余的能量。在计时器超时后,主决策节点依据周边节点提交的和自己的执行事件任

务的信息,选出一个效能最大的执行节点来执行。

执行节点在接收到开始信息请求时,需要计算自己执行事件的效能。执行节点可利用自身完成任务时的最终时间、位置和所拥有的能量,直接计算执行当前事件所需的效能。主决策节点作出决策后,如果执行节点并非自己,则将执行响应的命令发送给执行节点。

1.2 多执行节点任务(multi-actor task, MAT)协调算法

MAT 是指事件任务需要多个执行节点才能完成。在 MAT 中,无论接收到感知数据的执行节点个数有多少,执行节点都需要相互协调,以确定完成整项任务所需要的节点个数。对于 MAT 来说,主要问题在于除了需要决定执行操作的最佳执行节点个数,还需要从可执行该项任务的执行节点中选出最适合的节点、考虑实时性(时间)等指标。

考虑到 MAT 协调是一个复杂的问题,本文把它建模为一个多目标组合优化问题。多目标优化问题的多个优化目标之间往往是互相冲突的,求解时需要在不同的目标之间进行妥协。一般而言,一个目标性能的提高通常会导致其他目标性能的下降。因此,多目标优化问题的解通常不是一个,而是一组,这些解的特点是:无法在改进任何目标函数的同时不削弱至少一个其他目标函数,即综合考虑所有的目标,不存在比它们更优的解。这些解就是 Pareto 最优解,其概念最早由法国经济学家 V. Pareto 提出。本文把精力放在寻找近似最优解或者满意解上。进化算法基于种群的计算特性和隐并行性使得算法能够在一次执行过程中,基于 Pareto 优劣性同时处理多个优化目标,并且生成一组解,这些解体现了在多个目标之间不同的折中程度,能够为决策者提供更多、更全面的信息。进化算法作为多目标优化问题的求解方法是寻求这种满意解的最佳工具之一。进化多目标优化 (evolutionary multi-objective optimization, EMO) 已经成为近年来多目标优化研究的一个热门领域,提出了大量丰富的研究成果。本文通过研究基于多目标优化的适应值计算、多样性保持以及精英策略等关键问题来解决 MAT 协调问题。

假设 S^A 为执行器节点集合, 执行器节点个数为 $N_A = |S^A|$ 。每个执行器节点的作用范围由自身能力决定, 相邻的执行器节点的作用范围可能出现交叉重叠, 如图 2 所示。

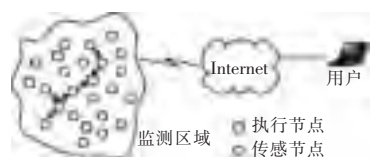


图 1 无线传感执行网络系统结构

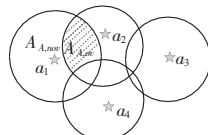


图 2 执行节点交叉覆盖范围示意图

设 $A_{A,non}$ 和 $A_{A,ov}$ 为非重叠区域和重叠区域。设 $S_{A,ov}^{A,m}$ 为可以在第 m 个重叠区域执行任务的执行节点的集合。设 P_A 为执行器节点 A 能用来执行任务的总能量,把执行节点 A 的能量分为 l 个等级, P_A^m 为执行节点 A 的第 m 等级的能量,即 $P_A^m = mP_A/l$ 。无线传感执行网络中执行器节点之间的协调问题可以看做多目标寻优问题,定义如下:

a) X^m 为二值矩阵, 矩阵的元素 $x_{a,p}^m$ 等于 1 当且仅当执行器节点 a 利用第 p 等级的能量执行区域 $A_{a,ov}^m$ 的任务;

b) $T_{a,p}^m$ 为执行器节点单独在第 m 个重叠区域使用第 p 等

级的能量完成任务的总时间;

c) $h_a = 1$, 当且仅当执行器节点 a 被选中去执行任务 T_h ;

d) 任务 T_h 需要完成的总工作时间为 T ;

e) 事件 event 发生地点与 actor 的距离为 $d(\text{event}, \text{ACTO-}R_a)$, actor 移动速度为 v_a 。

多目标优化问题 $P_{\min; \text{request-energy}}^{\min; \text{task-time}}$ 用数学描述如下:

给定无线传感执行网络参数: $N_A, l, T_{a,p}^m, T, \gamma$;

求解
$$X^m = [x_{a,p}^m], h_a \quad (1)$$

使得
$$\text{minimize } F(p) = (E_{avg}^{req}, \sum_{a=1}^{N_A} T_{a,p}^m) \quad (2)$$

约束条件如下:

对于
$$\forall a, E_a^{res} = E_a^{Av} - E_z^{req} \geq 0 \quad (3)$$

对于
$$\forall a, E_a^{res} = \sum_{m=1}^{M_c} (\sum_{p=1}^l x_{a,p}^m P_{a,p}^m / [\sum_{a=1}^{N_A} \sum_{p=1}^l x_{a,p}^m / T_{a,p}^m]) \quad (4)$$

对于
$$\forall a, \forall p, T_{a,p}^m = d(\text{event}, \text{ACTO}R_a) / v_a + T / \sum_{a=1}^{N_A} h_a \quad (5)$$

对于
$$\forall a, \forall m, \sum_{p=1}^l x_{a,p}^m \leq 1; \sum_{a=1}^{N_A} \sum_{p=1}^l x_{a,p}^m \geq 1 \quad (6)$$

对于
$$\forall a, h_a \leq \sum_{p=1}^l \sum_{m=1}^{M_c} x_{a,p}^m \quad (7)$$

对于
$$\forall a, \forall p, \forall m, h_a \geq x_{a,p}^m \quad (8)$$

式(2)给出了目标函数,要求无线传感执行网络完成任务时取得能量消耗最小、工作时间最少的性能指标;式(3)保证节点具有正的能量;式(4)描述了执行器节点完成任务所需要的能量;式(5)定义了执行节点完成任务所耗费的时间;式(6)描述了每个执行节点仅使用其自身一部分能量,并且至少有一个执行节点去执行任务;式(7)(8)描述了变量 h_a 与 $x_{a,p}^m$ 的关系。

进化多目标优化算法主要设计适应值计算、多样性保持以及精英策略三个重要问题。下面主要研究这三个关键问题。

1) 适应值计算 进化算法用于解决单目标优化问题时,适应值计算方法相对简单。个体的适应值可以与目标函数值等价,或者基于优化目标函数值进行一定的变换得到。但是当进化算法解决多目标优化问题时,情况要复杂得多,需要考虑如何将多维的目标函数向量转换为标量的适应值。本文采用基于 Pareto 最优性的赋值策略。

基于 Pareto 最优性的赋值方法是目前的 MOEA 中应用最广的方法,也是 Pareto 最优概念与进化算法的真正结合。这种赋值方法是以 Pareto 优劣性这种偏序关系为基础的,个体的适应值可以通过在种群中支配的个体数目、被支配的个体数目或个体位于的非劣层数来体现。

2) 多样性保持 多目标进化算法找出的是问题的近似 Pareto 最优解集和近似 Pareto 最优层,为了给决策者提供更多的信息,希望找到尽可能多的不同 Pareto 最优解,而且对应的 Pareto 最优层能够体现在多个目标上不同的妥协程度。在 EMO 研究中,多样性保持主要体现在两方面:a) 对个体进行适应值计算时,对于相同 Pareto 优劣性的个体,利用个体的密度信息对基于 Pareto 优劣性的初始适应值进行修正,使得个体被选中的概率随其密度的增大而减少;b) 当利用有限规模的外部种群存储进化过程中找到的非劣解时,为了维持外部种群的规模,对 Pareto 相当的个体,根据密度信息删除邻域密度大的个体,以维持外部种群的规模。

实现多样性保持的关键是在当前的非劣个体集合中对个体的密度信息进行评价。本文采用核函数法(kernel method)。核函数法根据核函数 K 定义个体的邻域,核函数通常以个体到其他个体的距离为变量。对于每个个体,首先计算个体到种

群中所有其他个体 i 的距离 d_i 后得到 $K(d_i)$,所有 $K(d_i)$ 的总和即为该个体的密度评估值。

3) 精英策略 进化过程中,随机因素的存在,会导致有些 Pareto 最优解在进化过程中被丢失。为了避免这一问题,现代 MOEA 设计中均引入了精英策略的思想,这也成为第二代 MOEA 的显著标志。精英策略的基本思想是保留当前高性能的解。精英策略的引入,提高了 MOEA 的收敛效率,改善了近似 Pareto 最优解集的质量,成为目前 MOEA 设计中不可缺少的一部分。

对于多目标优化问题,由于 Pareto 最优解集的存在,精英策略的实现比较复杂。实现精英策略的方法是构建一个外部种群,许多算法中也称之为精英池(archive),存储进化过程中找到的非劣解。外部种群参与到进化过程中时,算法的性能得到很大的提高,加快收敛速度和提高算法的鲁棒性。在采用外部种群的 MOEA 中,需要解决的一个重要问题是如何随着进化过程的进行更新外部种群。

一般来说,个体进入外部种群的条件是:该个体是当前进化种群中的非劣解并且在外种群中不存在比该个体更优的解。但是,到了进化的晚期,非劣个体的数目可能会很多,因此需要采用一定的策略来控制外部种群的规模。为了在控制外部种群规模的同时尽可能地保持近似 Pareto 层的多样性,多数 MOEA 均结合了 Pareto 支配关系和密度评估方法来进行外部种群的更新。对于相同 Pareto 优劣性的个体,优先选择周围个体比较稀疏的个体进入外部种群,而删除邻域密度比较大的个体,这种操作在 MOEA 中一般也称为剪枝(truncate),剪枝算子的具体实现根据采用的密度评估方法不同而不同。

2 性能评估

1) 平均移动距离 在不同的应用中,随着并发事件数的增加,执行节点的移动距离有所增加。在分布式算法中,采用先满足决策阈值的事件先选择事件执行的原则,虽然不能保证执行节点的移动距离是最优的,但可以保证是次优的,不是最坏的。

2) 系统的开销 它主要由初始化、传感节点事件探测和事件报告、反应节点协调及反应节点位置更新的开销构成。首先分析算法中一个事件所对应的反应节点协调的开销:假定传感反应网络中的反应节点个数为 N ,接收到传感节点事件报告的反应节点的个数为 M 。在分布式算法中,因主决策节点采取的策略不同,反应节点协调的开销差别较大。采用拍卖策略,在最坏的情况下,主决策节点将会接收到 $(M-1)$ 个来自其他反应节点的数据报告,同时还要发送加入任务的消息;其他位于通信范围内的反应节点将提交自己执行事件的效能,反应节点有 $(N-1)$ 个;最后主决策节点发送执行命令给执行节点;因此总共有 $(N+M)$ 个。在最好的情况下,竞拍策略也只减少其他反应节点的数据报告和发送命令消息,因此需 N 个。采用设定起拍价的拍卖策略,可以有效地减少其他反应节点提交执行事件的效能。在最好的情况下,只需一个加入执行任务的消息,抑制其他反应节点报告事件信息,因为在自己执行效能高于其他节点时,其他反应节点无须提交执行的效能。在最差的情况下,等同于一般的拍卖策略,也是 $(N+M)$ 个。

对于多执行器节点协调系统,通过已有的多目标优化的研究成果可以得到最优的 MAT 协调效果。 (下转第 265 页)

6 结束语

根据搜索条件及 P2P 中资源分配的特点,提出了基于节点匹配度的广度优先与深度优先结合的资源搜索、评价的方法。新的方法使搜索信息快速在整个网络内扩散并朝最有可能获取高匹配资源的范围进行。根据搜索条件选择广播基点有效地平衡了信息处理的负担。

参考文献:

- [1] ZHANG W, LI J Z, GAO H, *et al.* K-NN query processing in peer-to-peer multimedia database [J]. *Computer Science*, 2002, 29 (8): 190-193.
- [2] GRAVANO L, GARCIA-MOLINA H, TOMASIC A. The effectiveness of GLOSS for the text database discovery problem [C]//Proc of ACM SIGMOD Int'l Conf on Management of Data. New York: ACM Press, 1994: 126-137.
- [3] CALLAN J P, LU Z H, CROFT W B. Searching distributed collections with inference networks [C]//Proc of the 18th Annual Int'l ACM SIGIR Conf on Research and Development in Information Retrieval Seattle. New York: ACM Press, 1995: 21-28.
- [4] TANG C Q, YU Z H, MAHALINGAM M. pSearch: Information retrieval in structured overlays [C]//Proc of ACM SIGCOMM Computer Communication Review. New York: [s. n.], 2003: 89-94.
- [5] BALKE W T, NEJDL W, SIBERSKI W, *et al.* Progressive distributed top-k retrieval in peer-to-peer networks [C]//Proc of the 21st International Conference on Data Engineering. Washington DC: IEEE Computer Society, 2005: 174-185.
- [6] NEJDL W, WOLPERS M, SIBERSKI W, *et al.* Super-peer-based routing and clustering strategies for RDF-based peer-to-peer networks [C]//Proc of International World Wide Web Conf. New York: ACM Press, 2003: 536-543.
- [7] SCHLOSSER M, SINTEK M, DECKER S, *et al.* Hyper cup-hypercubes, ontologies and efficient search on P2P networks [C]//Proc of Workshop on Agents and P2P Computing. Bologna: [s. n.], 2002:

133-134.

- [8] YANG B, GARCIA-MOLINA H. Designing a super-peer network [C]//Proc of the 19th International Conference on Data Engineering. Bangalore: [s. n.], 2003: 49-60.
- [9] MILGRAM S. The small world program [J]. *Psychology Today*, 1967, 1: 60-67.
- [10] ORAM A. Peer-to-peer: harnessing the power of disruptive technologies [M]. Sebastopol: O'Reilly Media, 2001.
- [11] JOVANOVIĆ M A. Modeling large-scale peer-to-peer networks and a case study of Gnutella [D]. Cincinnati: University of Cincinnati, 2000.
- [12] DODDS P S, MUHAMAD R, WATTS D J. An experimental study of search in global social networks [J]. *Science*, 2003, 301 (5634): 827-829.
- [13] ADAMIC L. The small world Web [C]//Proc of the European Conf on Digital Libraries. London: Springer-Verlag, 1999: 443-452.
- [14] CAPKUN S, BUTTYAN L, HUBAUX J P. Small worlds in security systems: an analysis of the PGP certificate graph [C]//Proc of ACM New Security Paradigms. New York: ACM Press, 2002: 28-35.
- [15] WATTS. Small worlds [M]. Princeton: Princeton University Press, 1999.
- [16] ALBERT-LASZLO B. Linked [M]. [S. l.]: Plume, 2003.
- [17] ZHANG Hui, GOEL A, GOVINDAN R. Using the small world modal to improve freenet performance [C]//Proc of International Journal of Computer and Telecommunications Networking. New York: Elsevier North-Holland, 2004: 555-574.
- [18] TANG Yi, ZHANG Lian-kuan. INFO: an improving strategy for searching the small world networks [C]//Proc of IEEE/WIC/ACM International Conference Web. Washington DC: IEEE Computer Society, 2005: 54-57.
- [19] 张连宽, 唐屹. 基于 small world 模型的提高网络安全性的方法研究 [J]. *计算机工程与应用*, 2005, 41 (13): 133-136.

(上接第 252 页)

3 结束语

无线传感执行网络是涉及多学科的新型网络,具有极为广阔的应用前景,对国防和国民经济的发展具有十分重要的意义。本文就无线传感执行网络的协作机制进行了研究和探讨。研究了无线传感执行网络中执行节点之间的协调机制,提出了基于单执行节点任务的分布式协调机制;以基于进化算法的多目标优化为基础,建立了多执行器节点协调的数学模型,提出了多执行节点协调算法,提高系统的最优性能。

参考文献:

- [1] AKYILDIZ I F, KASIMOGLU I H. Wireless sensor and actor networks: research challenges [J]. *Ad hoc Networks*, 2004, 2 (4): 351-367.
- [2] HAENGGI M. Mobile sensor-actuator networks: opportunities and challenges [C]//Proc of the 7th IEEE Int'l Workshop. Frankfurt: IEEE Press, 2002: 283-290.
- [3] AKYILDIZ I F, SU W, CAYIRCI Y S E. Wireless sensor networks: a survey [J]. *Computer Networks*, 2002, 38 (4): 393-422.
- [4] MELODIA T, POMPILI D, VEBIC G. A distributed coordination

framework for wireless sensor and actor networks [C]//Proc of ACM Mobile Ad hoc Networking and Computing. New York: ACM Press, 2005: 99-110.

- [5] 孙利民, 李建中. 无线传感器网络 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [6] CALLAWAY E H. Wireless sensor networks: architectures and protocols [M]. [S. l.]: CRC Press, 2003.
- [7] MELODIA T, POMPILI D, AKYILDIZ I F. A communication architecture for mobile wireless sensor and actor networks [C]//Proc of IEEE SECON. [S. l.]: IEEE Press, 2006.
- [8] 崔逸学. 一种求解高维优化问题的多目标遗传算法及其收敛性分析 [J]. *计算机研究与发展*, 2003, 40 (7): 901-906.
- [9] AGUIRRE A H, RIONDA S B, COELLO C A C. Handling constraints using multiobjective optimization concepts [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2004, 59 (15): 1989-2017.
- [10] DRAGAN C, IAN C P. Preferences and their application in evolutionary multi-objective optimization [J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 2002, 6 (1): 42-57.
- [11] FONSECA C M, FLEMING P J. An overview of evolutionary algorithms in multi-objective optimization [J]. *Evolutionary Computation*, 1995, 3 (1): 11-16.