

文章编号: 1001-0920(2009)01-0061-05

基于扩展合同网协议的无线传感器网络协作方法研究

于振华^{1,2}, 刘 宇², 蔡远利¹

(1. 西安交通大学 电子与信息工程学院, 西安 710049; 2. 西安应用光学研究所, 西安 710065)

摘 要: 提出一种适用于无线传感器网络协作的扩展合同网协议. 该协议在传统合同网协议中引入了信任度、阈值和优先级等策略, 减少了无线传感器网络的通信开销, 有效均衡了节点的能量消耗. 为确保扩展合同网协议的完整性、正确性和可靠性, 利用面向对象 Petri 网对其进行建模、分析和验证. 仿真结果表明, 扩展合同网协议有效地延长了网络生命周期, 提高了网络的能耗效率, 网络完成任务数也有了显著的增加.

关键词: 无线传感器网络; 协作; 合同网; Petri 网

中图分类号: TP393; TP18 **文献标识码:** A

On wireless sensor networks collaboration based on an extended contract net protocol

YU Zhen-hua^{1,2}, LIU Yu², CAI Yuan-li¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Xi 'an Jiaotong University, Xi 'an 710049, China; 2. Xi 'an Institute of Applied Optics, Xi 'an 710065, China. Correspondent: YU Zhen-hua, E-mail: zhenhua_yu@163.com)

Abstract: A collaboration approach based on an extended contract net protocol for wireless sensor networks (WSN) is presented, in which the trust degree, threshold, and priority are introduced into the classical contract net protocol. The extended contract net protocol reduces the communications consumption and balances the energy load among all nodes. To assure the correctness, completeness and reliability of the extended contract net protocol, object-oriented petri nets are employed to model it. Moreover, the characteristics of the extended contract net protocol are analyzed and verified by using the well-established analysis methods and supporting tools of Petri nets. Simulation results demonstrate that the extended contract net protocol effectively prolongs the network lifetime, improves the energy consumption efficiency, and increases the accomplished tasks.

Key words: Wireless sensor networks; Collaboration; Contract net; Petri nets

1 引 言

无线传感器网络 (WSN) 是由大量具有感知、计算和无线通信能力的传感器节点通过自组织方式构成的网络^[1-3], 它能根据环境自主完成监测、目标发现、识别与跟踪等任务. 由于 WSN 具有随机布设、自组织和隐蔽性强等特点, 使它在军事、工业和商业等领域有着广阔的应用前景和很高的应用价值^[1-3], 已得到人们的高度重视.

由于单个传感器节点的感知、计算、存储和通信能力有限, 在执行数据采集和处理时, 传感器节点必须对资源、任务等进行协调, 进而协作来完成任务. 传感器节点之间的协作可以弥补单个传感器节点能

力的不足, 提高无线传感器网络的容错性和生命周期, 这是无线传感器网络中亟需解决的关键问题之一. 多 Agent 系统 (MAS) 是分布式人工智能研究的一个重要分支, 已成为计算机及自动化领域的一项关键性主流技术和一种重要的计算范型^[4,5]. MAS 是由多个 Agent 组成的 Agent 社会, 具有自治性、并发性、分布性、协调性和自适应性, 并具有自组织能力、学习能力和推理能力. 由于 MAS 特性与 WSN 十分相似, 可将每个节点视为一个具有自治性的 Agent, 利用 MAS 的协作方法研究传感器节点之间的协作问题. 文献 [6-9] 分别将 MAS 中的合同网协议、组织结构设计方法、分布式约束满足和动态联盟等方法应用于 WSN 的协作任务分配问题

收稿日期: 2008-04-15; 修回日期: 2008-07-15.

基金项目: 中国博士后科学基金项目 (20070421121).

作者简介: 于振华 (1977 →), 男, 山东乳山人, 博士, 从事无线传感器网络、多 Agent 系统理论的研究; 蔡远利 (1963 →), 男, 贵州瓮安人, 教授, 博士生导师, 从事飞行器制导与控制、复杂系统的建模与仿真等研究.

中.但由于 WSN 是一个自适应的柔性动态系统,具有规模大、拓扑结构动态变化、资源严格受限等特点,目前 WSN 协作方法的鲁棒性、可扩展性和动态适应性相对较差,给协作任务分配研究带来了新的挑战.

为满足 WSN 协作的需要,本文以 MAS 协作方法——合同网协议^[10]为基础,引入信任度、阈值和优先级等参数,提出一种新的扩展合同网协议,以提高协作任务分配机制的可扩展性和动态适应性.在协议的设计过程中,可能会引入一些错误,利用传统的仿真方法很难获得足够精确的结果,不能确保协议的完整性、正确性和可靠性.因此,利用面向对象 Petri 网(OPN)^[11]对扩展合同网协议进行分析和验证,以确保协议的完整性和正确性,提高 WSN 协作的可靠性.仿真结果表明,扩展合同网协议有效降低了 WSN 协作的通信开销,均衡了节点的能量消耗,从而延长了网络的生存周期.

2 一种扩展合同网协议

合同网协议是在研究分布式求解问题时提出的.它通过招标-投标-中标这一市场机制进行任务分配,使系统以较低的代价和较高的质量完成任务.后来被广泛应用于多 Agent 系统的协作研究.传统合同网协议在进行协作求解时招标 Agent 采用广播方式发布任务,其缺点是无限定投标 Agent 的范围,这会给系统带来较大的通信开销,使得问题求解效率较低.同时它也难以适应环境和任务的动态变化,导致协作任务过于集中,使得系统负载不均衡.

为满足无线传感器网络的需要,减少合同网模型中的通信开销,本文在传统合同网协议中引入信任度^[12]、阈值和优先级等策略,设计了一种扩展合同网协议.

2.1 信任度

在无线传感器网络中,设传感器节点 Agent a 对节点 Agent b 完成任务的能力的评价称为 a 对 b 的信任度,记为 $\text{Trust}(a, b, t, i)$.信任度主要通过 Agent 完成任务的效果来度量.其中: a 和 b 分别代表 Agent a 及 Agent b , t 表示 a 发布的任务, i 表示 a 和 b 本次交互的时间或序号. $\text{Trust} \in [0, 1]$, 1 意味着 b 对 a 给出的任务完成的能力最强;0 则反之.

Agent a 中有一张本地数据表,存储了对其他 Agent 的信任度.当需要计算 a 对 b 关于任务 t 的信任度时, a 首先查询自己数据表内的相关记录集,记为 $\mathbf{R}(a, b, t)$;然后通过加权平均的方式求出对 b 的信任度,记为 (a, b, t) ,如下式所示:

$$(a, b, t) = \frac{\sum_{r_i \in \mathbf{R}(a, b, t)} (t_i) \text{trust}_i}{r_i \in \mathbf{R}(a, b, t)} \quad (1)$$

各个记录的加权系数与时间有关,交互时间越新的记录其加权系数越大,而且 $\sum_{r_i \in \mathbf{R}(a, b, t)} (r_i) = 1$.这样便可较为准确地反映出 Agent 当前完成任务的能力.

2.2 阈值

具有较大信任度的传感器节点 Agent 可能会收到多次中标通知,这样会造成其任务队列中任务堆积,负载过重,导致能量消耗过快而死亡.因此,从保持整个系统的负载均衡,加快系统执行效率的角度,为每个 Agent 设定阈值 Tr ,限制其接收标书的数目.例如,Agent a 的阈值为 Tr_a , N_a 为 a 中标数(即任务数).当 $N_a < \text{Tr}_a$ 时, a 可以处理新的标书;当 $N_a \geq \text{Tr}_a$ 时, a 直接拒绝新的标书.

信任度的设定可使信任度较高的 Agent 优先中标,提高了任务分配率.阈值的设定均衡了系统的负载,避免使信任度高的 Agent 负载过重,而信任度较低的 Agent 长期空闲.阈值可以使信任度较低的 Agent 也有机会中标,并通过任务的执行提高其信任度,从而也提高了系统任务的执行效率.

2.3 优先级

在无线传感器网络中,任务按优先级排序,招标传感器节点 Agent 优先发布级别较高的任务 t_i^{rn} .投标 Agent 中标后,将任务 t_i^{rn} 按级别插入任务队列 T_{que} 中, $T_{\text{que}} = (t_1^{rn}, \dots, t_i^{rn}, \dots)$,确保优先级高的任务最先得到执行.

根据信任度、阈值和优先级等策略,构造如下的扩展合同网协作过程:

- 1) 招标 Agent 接收任务 t ,并将其按优先级存储于任务队列 TaskQueue 中.
- 2) 当 t 到达队首时,招标 Agent 根据投标 Agent 的信任度,向信任度较高的一些 Agent 投放标书,并设定时间期限 $\text{lim}_{\text{time-out}}$.
- 3) 接收到标书的 Agent 根据自己的能力和兴趣,决定是否投标.若能完成任务 t 且其任务数 N_a 没超过阈值 Tr_a ,则向招标者进行投标;否则通知招标者不能完成任务.
- 4) 若在时间 $\text{lim}_{\text{time-out}}$ 内招标者收到若干投标书后,则进行评价,选择特定的投标 Agent 作为中标 Agent,向其发送中标通知,同时通知其他投标者投标失败.若招标者没收到关于任务 t 的投标书,则招标者停止操作,跳转到 9).
- 5) 中标 Agent 收到中标通知后,向招标者发送确认消息.
- 6) 若招标者收到确认消息,则把任务 t 正式分派给中标者.

- 7) 中标者收到任务 t 后,按优先级将其插入队列 T_{que} 中,按顺序执行.执行完毕后,将执行结果返回给招标者.
- 8) 一轮协作处理结束.
- 9) 若招标者决定进行新一轮招标,则跳转到 2).
- 10) 任务协作结束.

3 基于面向对象 Petri 网的扩展合同网协议建模与分析

考虑到 WSN 的特点,设计扩展合同网协议时必须满足能量高效、可扩展性、鲁棒性、实时性、快速收敛性等要求,确保协作的可靠性和实时性.在扩展合同网协议的设计过程中,可能会引入一些错误,不能确保协议的正确性,这将给系统的稳定性、可靠性和安全性等带来巨大的危害^[13].形式化方法可以对协议进行精确的描述,同时可以对协议的控制逻辑及协作过程的动态特性进行分析和验证,消除设计过程中引入的人为错误,确保协议的完整性、正确性和可靠性^[14].

Petri 网作为一种具有严格数学语义的形式化图形建模工具,适合于描述并发、异步和分布式的信息系统,已广泛应用于制造系统、性能评价、软件工程及通信协议的建模与分析等领域.因此本文将利用一种面向对象 Petri 网 OPN 对扩展合同网协议进行建模,并利用 Petri 网的相关数学分析方法和支持工具对协议的可达性、有界性和活性进行分析和验证,确保协议的完整性、正确性和可靠性.

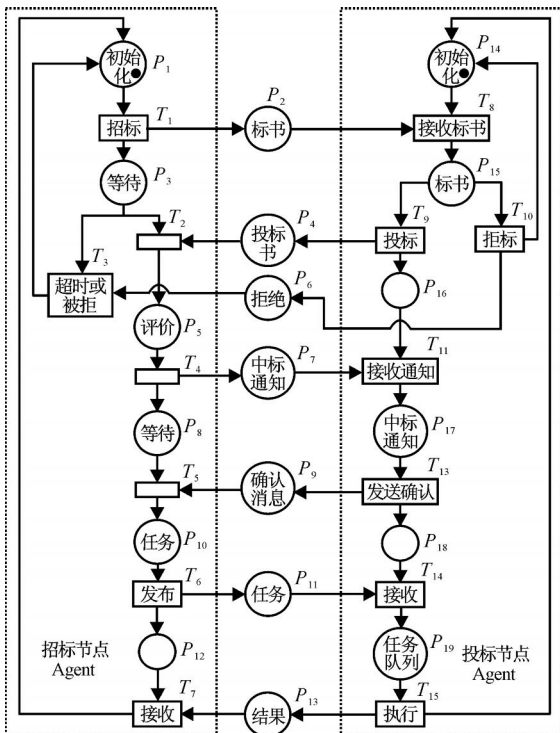


图 1 扩展合同网协议 OPN 模型

证,确保协议的完整性、正确性和可靠性.

扩展合同网协议的 OPN 模型如图 1 所示.为使模型简洁,省略了模型中的颜色集、变量及弧表达式等,并且在图 1 中只显示了 1 个招标传感器节点 Agent 和 1 个投标 Agent.

建立了扩展合同网协议的形式化模型后,要对模型进行分析,以确保模型的正确性.首先对模型进行简化,把模型中的抽象库所和变迁作为着色网 CPN 中的一般库所,这样的约简并不影响系统性质的分析^[15];然后利用 Petri 网分析工具 INA^[16]分析系统的有界性、可达性和活性等特性.

根据 INA 分析的结果,图 1 所示的模型是有界的,可达状态有 13 个,且模型是活的,不存在死锁,可以确保协议的完整性和正确性,该协议可正常运行.

4 仿真实验与分析

通过 OPN 对扩展合同网协议的建模与分析,可确保协议的完整性、正确性和可靠性.下面利用 Matlab 通过仿真来评价协议的性能.

4.1 仿真环境设置

实验模型由 100 个传感器节点组成,它们随机均匀分布在 100 m × 100 m 的感知区域内,用于入侵目标的监测与跟踪.当目标进入该区域时,若某个传感器节点发现声音强度超过阈值,则通知其他节点处理突发事件,启动目标跟踪任务.各个传感器节点利用基于声音传感器阵列的声源定位技术对目标进行定位.

假设该网络具有如下性质:

- 1) 在传感器网络中,节点部署后不再移动;
- 2) 所有节点都是同构的,而且节点都有一个唯一的标识符 ID;
- 3) 节点可根据接收者的距离来调整其发射功率以节约能量;
- 4) 传感器节点时间同步,通信链路是对称的,节点可根据接收信号的强度计算发送者到自己的近似距离.

不失一般性,假定基站位于感知区域的中心.该网络采用理想的 MAC 协议,忽略无线链路中可能发生的包冲突及丢包等错误.网络路由由协议采用分簇路由协议 LEACH^[17],簇头分别采用扩展合同网协议和传统合同网协议发布任务,然后将簇内成员采集的数据进行融合,最后把结果发给基站.

本文采用与文献[17]相同的无线通信能量消耗模型.节点发射 l 比特的数据到距离为 d 的位置,消耗的能量由发射电路消耗和功率放大消耗两部分组成,即

$$E_{Tx}(l, d) = E_{Tx\text{-elec}}(l) + E_{Tx\text{-amp}}(l, d) = \begin{cases} lE_{\text{elec}} + l f_s d^2, & d < d_0; \\ lE_{\text{elec}} + l_{mp} d^4, & d \geq d_0. \end{cases} \quad (2)$$

其中 E_{elec} 表示发射电路消耗的能量. 若传输距离小于阈值 d_0 , 则功率放大消耗采用自由空间模型; 否则采用多路径衰减模型. f_s 和 l_{mp} 分别为这两种模型中功率放大所需的能量. 节点接收 l 比特的数据所消耗的能量为

$$E_{Rx}(l) = E_{Rx\text{-elec}}(l) = lE_{\text{elec}}. \quad (3)$$

在 WSN 中, 簇头对数据进行融合也消耗一定的能量, E_{DF} 表示融合单位比特数据需消耗的能量.

在合同网协议中, 网络通信量主要由招标通信量和投标通信量两部分组成. 相对而言, 中标通知和拒标等通信量较少, 可以忽略. 为便于分析, 本文假定在传统合同网协议和扩展合同网协议中的招标标书大小为 V_{cfp} , 投标报文为 $V_{bidding}$, LEACH 协议运行一轮时, 协作次数为 N , 簇中节点数为 M , 则传统合同网协议一轮所引起的网络通信量为

$$V_1 = N \times (V_{cfp} + V_{bidding} \times M). \quad (4)$$

扩展合同网协议一轮所引起的网络通信量为

$$V_2 = N \times (V_{cfp} + V_{bidding} \times L), \quad (5)$$

其中 L 为簇中信任度较高的节点数, $L < M$.

实验中所用的参数如表 1 所示.

表 1 实验参数

参数	取值
传感器节点初始能量	0.5 J
E_{elec}	50 nJ/bit
f_s	10 pJ/(bit · m ²)
l_{mp}	0.0013 pJ/(bit · m ⁴)
d_0	87 m
E_{DF}	5 nJ/(bit · signal)
数据包大小	4000 bits
V_{cfp}	1000 bits
$V_{bidding}$	800 bits
N	10

4.2 仿真实验分析

图 2 给出了网络中存活节点数随时间的变化关系. 从图 2 可以看出, 由于扩展合同网协议引入了信任度、阈值和优先级等策略, 在一定程度上减小了网络的通信开销, 同时均衡了节点的任务负载, 因而采用扩展合同网协议的网络存活节点数要多于利用传统合同网协议的网络, 有效延长了网络生命周期.

图 3 显示了采用两种不同协议的节点剩余能量的变化关系. 显然, 采用扩展合同网协议的节点剩余能量要高于采用传统合同网协议的节点.

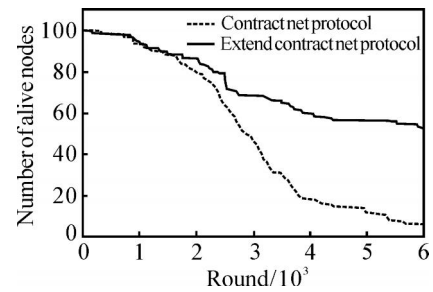


图 2 网络中存活节点数随时间的变化

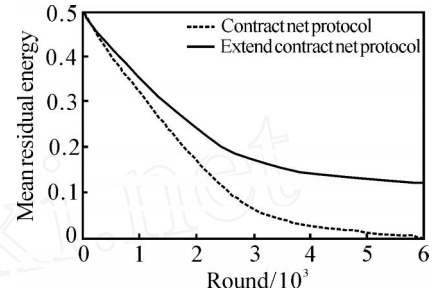


图 3 节点平均剩余能量随时间的变化

图 4 为采用两种不同协议网络完成任务数的变化. 由于采用传统合同网协议的网络节点很快死亡, 用于协作的节点较少, 直接导致了完成任务数的减少.

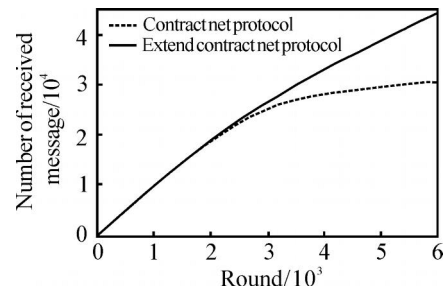


图 4 网络完成任务数随时间的变化

5 结论

针对传统合同网协议在应用于无线传感器网络协作时存在通信开销较大、负载不均衡及动态性较差等缺点, 本文在传统合同网协议中引入了信任度、阈值和优先级等策略, 建立了一种扩展合同网协议. 为了确保扩展合同网协议的完整性、正确性和可靠性, 利用面向对象 Petri 网对协议进行建模, 并利用 INA 对协议的可达性、有界性和活性进行了分析和验证. 仿真实验表明, 与传统合同网协议相比, 扩展合同网协议减少了无线传感器网络的通信开销, 在一定程度上均衡了节点的负载, 显著地延长了网络的存活时间, 完成任务数也得到显著增长.

参考文献(References)

- [1] Akyildiz L F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: A survey [J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.

- [2] Akyildiz L F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114.
- [3] 于海斌, 曾鹏, 梁韡. 智能无线传感器网络系统[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
(Yu H B, Zeng P, Liang W. Intelligent wireless sensor networks systems[M]. Beijing: Science Press, 2006.)
- [4] Jennings N R, Sycara K, Wooldridge M J. A roadmap of agent research and development [J]. Autonomous Agent and Multi-agent Systems, 1998, 1(1): 7-38.
- [5] Zambonelli F, Omicini A. Challenges and research directions in agent-oriented software engineering [J]. Autonomous Agents and Multi-agent Systems, 2004, 9(3): 253-283.
- [6] Lesser V, Ortiz C, Tambe M. Distributed sensor networks: A multiagent perspective [M]. Boston: Kluwer Publishers, 2003.
- [7] Horling B, Mailler R, Sims M, et al. Using and maintaining organization in a large-scale distributed sensor network [C]. Proc of the Workshop on Autonomy, Delegation, and Control. Melbourne, 2003.
- [8] Krishnamachari B, Wicker S B, Beldar R, et al. On the complexity of distributed self-configuration in wireless networks[J]. Telecommunication Systems, 2003, 22(1-4): 33-59.
- [9] Soh L K, Tsatsoulis C. Reflective negotiating agents for real-time multisensor target tracking[C]. Proc of the Int Joint Conf on Artificial Intelligence. Seattle, 2001: 1121-1127.
- [10] Smith R G. The contract net protocol: High level communication and control in distributed problem solver[J]. IEEE Trans on Computers, 1980, 29(12): 1104-1113.
- [11] 于振华, 蔡远利. 基于面向对象 Petri 网的软件体系结构描述语言[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(12): 1236-1240.
(Yu Z H, Cai Y L. Software architecture description language based on object-oriented Petri nets[J]. J of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(12): 1236-1240.)
- [12] Huynh T D, Jennings N R, Shadbolt N R. An integrated trust and reputation model for open multi-agent systems[J]. J of Autonomous Agents and Multi-agent Systems, 2006, 13(2): 119-154.
- [13] Xiong C, Murata T, Tsai J. Modeling and simulation of routing protocol for mobile Ad Hoc networks using colored Petri nets[C]. Proc of the Conf on Application and Theory of Petri Nets: Formal Methods in Software Engineering and Defence Systems. Adelaide, 2002: 145-153.
- [14] Haines R J, Clemo G R, Munro A T D. Petri-nets for formal verification of MAC protocols [J]. IET Software, 2007, 1(2): 39-47.
- [15] Shatz S M, Tu S, Murata T, et al. An application of Petri net reduction for Ada tasking deadlock analysis [J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 1996, 7(12): 1307-1322.
- [16] Roch S, Starke P H. INA: Integrated net analyzer, Version 2.2[EB/OL]. www2.informatik.huberlin.de/~starke/ina.html, 2007.
- [17] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.

(上接第 60 页)

- [17] Graham R L, Lawler E L, Lenstra J K, et al. Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling theory: A survey [J]. Annals of Discrete Mathematics, 1979, 5(1): 287-326.
- [18] 冯大光, 唐立新. 单台批处理机总加权完成时间最小化的启发式算法[J]. 控制与决策, 2006, 21(11): 1293-1297.
(Feng D G, Tang L X. Heuristic algorithms for single batching machine with total weighted completion time [J]. Control and Decision, 2006, 21(11): 1293-1297.)
- [19] 金锋, 宋士杰, 吴澄. 一类基于 TSP 问题 Block 性质的快速 TS 算法[J]. 控制与决策, 2007, 22(3): 247-251.
(Jin F, Song S J, Wu C. Fast TS algorithm based on Block properties of TSP [J]. Control and Decision, 2007, 22(3): 247-251.)