

基于熵权的传感反应网络任务分派算法

易军^{1,2} 许磊²

(重庆科技学院电子信息工程学院 重庆 401331)¹ (重庆大学自动化学院 重庆 400044)²

摘要 针对无线传感反应网络中事件频发区域内执行器节点能耗过大问题,提出一种基于熵权的任务分派算法。利用拍卖机制,建立基于熵权的执行代价评估模型,并根据网络的实际情况,将任务元分派建模成平衡或者非平衡整数规划问题,使任务并发执行。仿真实验表明,网络实时性和能耗均衡性都得到了改善。

关键词 无线传感反应网络,任务分派,熵,实时性,能耗均衡性

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Tasks Assignment Algorithm Based on Entropy for Wireless Sensor and Actor Networks

YI Jun^{1,2} XU Lei²

(College of Electronic & Information Engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, China)¹

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)²

Abstract Aimed at "hot zone" problem of wireless sensor and actor networks, a tasks assignment algorithm based on entropy was proposed to make the whole network energy consumption more balanced. Considering network situation, the entropy-based cost of taking action model was established by using auction method. The task assignment problem among actors was formulated as a balanced or non-balanced task assignment optimization problem, different task units were executed in parallel to enhance higher real-time response. The result of simulation shows that the algorithm can provide more balance in energy consumption and higher real-time performance.

Keywords Wireless sensor and actor network, Task assignment, Entropy, Real-time requirement, Energy balancing

无线传感反应网络(Wireless Sensor and Actor Networks, WSANs)是一种新型、自组织的无线异构网络,它由大量随机部署的传感器节点和少量执行器节点组成。为完成各种分布式感知任务和执行任务,传感器节点与执行器节点(Sensor-actor, SA)、执行器节点之间(Actor-actor, AA)需要大量协作。SA协作主要完成感知任务并报告事件,能耗较小。而AA协作负责任务执行,对网络能耗均衡影响相对较大,因此成为WSANs关注的重点^[1]。

AA协作的主要工作是进行任务分配。当事件发生要求执行器节点对事件作出快速响应,同时均衡网络能耗,以避免事件频发区域执行器节点执行能耗过大,降低网络寿命。Tommaso Melodia^[2]等人提出一种适用于无线传感反应网络的分布式协作框架,将基于事件驱动的分簇结构中的AA协作问题转化为混合的整数非线性规划问题来解决,执行器节点之间的谈判通过本地拍卖机制完成。但是每次只选出剩余能量最高的执行器节点执行任务,在事件频发场合,算法暴露出实时性不高的缺点。Kemal Akkaya等人^[3]提出一种新的分布式算法,用来优化网络拓扑结构,关注的重点在于连通度和最小化执行器节点移动距离问题。类似的工作是文献^[4],文中提出的DARA算法,在执行器节点通讯网络中的链路失效后,通过协作多执行器节点重部署来重建通信链路。该文

与文献^[3]一样,协作的目的在于提高网络性能,没有对实时性和能耗均衡问题提出相关策略。

本文提出一种任务分派算法(Tasks Assignment Algorithm, TAA),其主要针对事故频发区域执行器节点能耗过大问题,利用拍卖机制,建立基于熵权的任务执行代价评估模型,根据网络情况将多个任务元分派到多个执行器节点执行,使得任务并发协作完成,提高实时性,同时保证网络能耗均衡。

1 问题描述

事件频发区域内的执行器节点监测到事件发生后,自动成为招标节点,将需要执行的任务分解成若干任务单元,通过广播的形式发出邀请,包括需执行任务元的能耗、事件位置等信息。其他执行器节点同意参与招标,并发回综合代价值进行投标,称为投标执行器节点。招标执行器节点根据收到的综合代价值,确定最佳任务分派方案。

2 基于熵权的任务执行代价评估

投标执行器节点评估任务元执行代价,主要从3个指标进行:设第*i*个执行器节点完成第*j*个任务元的所需能耗、属性和事件发生坐标,建立执行器节点的能耗代价(*E*)、移动时

到稿日期:2010-07-13 返修日期:2010-11-11 本文受国家科技重大专项(2009ZX07528-003-09)资助。

易军(1973-),男,博士,讲师,主要研究方向为无线传感器网络, E-mail: laoyifrcq@163.com; 许磊(1981-),男,博士,讲师,主要研究方向为无线传感器网络。

延代价(A)、信用值(G) 3个指标的代价函数 x_{ij} 。

定义1(能耗代价指标 E) 设执行器节点完成第 j 项任务元所需能量为 E_{action} 与该执行器节点剩余能量 $E_{residual}$ 的比值为:

$$E = \frac{E_{action}}{E_{residual}} \quad (1)$$

称 E 为该执行器节点完成任务元 j 的能耗代价指标。

特别地,当 $E > 1$ 时, $x_{ij} \rightarrow \infty$, 表示该执行器节点剩余能量无法完成该任务元。

定义2(移动时延代价指标 A) 已知事件发生位置 P 和执行器节点位置 S , 则它们的距离为 $dist(p, s)$, 有 $dist(p, s) = \|p - s\|_2$, 其中 $\|\cdot\|_2$ 指欧几里德距离。同时, 该执行器节点的移动半径为 R_a , 则有效执行代价指标:

$$A = \frac{dist(p, s)}{R_a} \quad (2)$$

特别地,当 $A > 1$ 时, $x_{ij} \rightarrow \infty$, 表示该任务超出该执行器节点的移动范围。

定义3(信用值 G) 设执行器节点分派任务次数为 $t_{assigned}$, 成功执行次数为 $t_{success}$, 则信用值表明执行器节点在参与竞争中的可信任程度:

$$G = 1 - \frac{t_{success}}{t_{assigned}} \quad (3)$$

在多指标综合评价中, 客观赋权法所依据的赋权原始信息来源于客观环境, 根据各指标的联系程度或各指标所提供的信息量来决定指标的权重。熵权法^[5]属于客观赋权法, 利用信息熵的概念, 客观反映评价对象的动态变化。

设有 m 个任务元、 n 项评价指标, 形成原始指标数据矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$, 将信息论中熵 $H(x) = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \ln p(x_i)$ 作为系统无序程度的度量。对于某项指标 x_j , 指标值 x_{ij} 的差距越大, 则该指标在综合评价中所起的作用越大; 如果某项指标的指标值全部相等, 则该指标在综合评价中不起作用。所以可以根据各项指标值的变异程度, 利用熵计算出各指标的权重, 为多指标综合评价提供依据。

利用熵权法进行综合评价的步骤如下:

①建立评价矩阵:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

②将各指标同度量化, 计算第 j 项指标下第 i 个任务元指标值的比重:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (5)$$

则评价矩阵变为:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

③计算第 j 项指标的熵值:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (7)$$

式中, $k > 0, e_j \geq 0$ 。如果 x_{ij} 对于指标 j 全部相等, 则有:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} = \frac{1}{m} \quad (8)$$

此时 e_j 取极大值, 即:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m \frac{1}{m} \ln \frac{1}{m} = k \ln m \quad (9)$$

若设 $k = \ln \frac{1}{m}$, 于是有 $0 \leq e_j \leq 1$ 。

④计算第 j 项指标的差异性系数 g_j 。

对于给定的指标 j , x_{ij} 的差异性越小, 则 e_j 越大。当 x_{ij} 全部相等时, $e_j = e_{\max} = 1$, 此时对于方案的比较, 指标 x_j 毫无贡献; 当各方案的指标值相差越大时, e_j 越小, 该项指标对于方案比较所起的作用越大。定义差异性系数:

$$g_j = 1 - e_j \quad (10)$$

⑤计算第 j 个指标的熵权:

$$\omega_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j} \quad (11)$$

指标的熵值越小, 其熵权越小, 反映该指标越重要, 提供的有用信息量越大。

⑥计算综合代价值:

$$c_i = \sum_{j=1}^n \omega_j p_{ij}, i = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

式中, c_i 为第 i 个任务元的综合评价价值。

3 多任务元指派

招标执行器节点收到各投标执行器节点的代价值以后, 进行评估, 安排最优执行器节点集合。假设一个多执行器任务可分解成 $n(n > 1)$ 个任务元, 由 $m(m > 1)$ 执行器节点完成, 并且每个任务元都有一个执行器节点完成, 任务元本身没有工序限制, 也就是相互之间没有执行的先后顺序限制, 各执行器节点可以独立执行各任务元。招标执行器节点通过各执行器节点发回的标, 合理分派任务, 使总代价最小。这是一个典型的分派问题^[6] (Assignment Problem, AP)。

设 C 为分派方案的总代价; c_{ij} 为第 i 个执行器节点执行第 j 个任务元所需要的代价; $c_{ij} \rightarrow \infty$ 表示不可能胜任, 则分派问题可以表示成:

$$\begin{aligned} \min C &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} z_{ij}, (m=n) \\ \text{s. t. } &\sum_{j=1}^n z_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, m \\ &\sum_{i=1}^m z_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (13)$$

式中, $z_{ij} = 0$ 或者 1, 表示第 i 个执行器节点没有分派或者分派第 j 个子任务。 $m = n$ 表示执行器节点数量与子任务数量相同, 属于平衡分派问题模型, 利用“匈牙利”法解题。

式(13)在 $m > n$ 情况下, 可转化为平衡分派问题模型:

$$\begin{aligned} \min C &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n+k} c_{ij} z_{ij}, (m=n+k) \\ \text{s. t. } &\sum_{j=1}^n z_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, m \\ &\sum_{i=1}^m z_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, n+k \end{aligned} \quad (14)$$

式(13)在 $m < n$ 情况下, 可转化为平衡分派问题模型:

$$\begin{aligned} \min C &= \sum_{i=1}^{m+l} \sum_{j=1}^n c_{ij} z_{ij} (m+l=n) \\ \text{s. t. } &\sum_{j=1}^n z_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, m, m+1, \dots, m+l \end{aligned} \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^m z_{ij} = 1, j=1, 2, \dots, n$$

4 仿真实验

为验证性能,利用 MATLAB 和 NS-2^[7] 仿真平台,针对网络通信开销、任务完成时间、能耗均衡和生存期等指标,与典型的文献[8]中的 KE 算法和文献[4]中的 DARA 算法开展对比仿真实验。监控区域 200m * 200m, 200 个静止传感器节点随机布置, 16 个具有移动功能的执行器节点通过虚拟力算法均匀布置。假设火灾报警事件, 由传感器节点在一定时间内按给定概率随机产生并向本簇执行器节点报告。该事件对应的火灾救援任务分解如表 1 所列, 其他相应实验参数如表 2 所列。

表 1 火灾救援任务

任务描述	对事件发生地进行洒水动作, 并发出声, 光报警信号
任务类型	多执行器任务
任务元分解	洒水、声音报警、闪光报警三个任务元
任务元能耗	洒水: 1J、声音报警: 0.5J、闪光报警: 0.5J

表 2 实验参数

监控区域	200m * 200m	信道模型	TwoRayGround
无线标准	802.11	执行器节点数量	16
传感器节点数量	200	簇半径	25m
执行器节点工作半径	5m	执行器节点移动能耗	0.01 J/m
执行器节点初始能耗	300J	事件发生频率	5 次/分钟
执行器节点移动速率	10 m/s	任务元执行时间	0.5s

4.1 任务完成时间

为检验 TAA 算法的实时性, 将允许招标最大值设置为 1, 并与 KE 算法和 DARA 算法进行比较, 如图 1 所示。

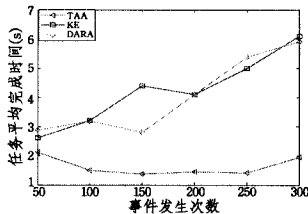


图 1 任务平均完成时间比较图

在首次招标过程中, 通信方面的时延开销较 KE 算法和 DARA 算法大。但是由于任务分解后, 各任务元可以并行执行, 在任务执行时间远大于通信时延的情况下, TAA 算法仍然显示出较好的实时性, 任务平均完成时间小于其他两种算法。经过招标, 在获得了先验数据的情况下, 招标成功率增加, 通信时延减少, 平均任务完成时间也相应减少。KE 算法和 DARA 算法没有任务分解和任务元并发执行过程, 每个任务都由单个执行器节点完成, 整体任务完成时间延长。随着事件发生增加, 能量消耗出现不均衡, 必须重建通讯链路以保证任务执行, 时延增大。由此显示, TAA 算法采取的多执行器节点协作技术, 虽然在通信时延上有一定开销, 却使得任务并发执行, 缩短了任务整体完成时间。

4.2 能耗均衡

为了比较算法能耗均衡问题, 引入执行器节点能耗均衡指数, 将执行器节点的剩余能量与初始能量比值作为能耗均

衡指数:

$$EB_i = E_{i-rest} / E_{i-init} \quad (1 \leq i \leq N) \quad (16)$$

式中, N 为执行器节点总数。随着监测时间的推移, 考察网络中执行器节点对应的方差 V , 如图 2 所示。

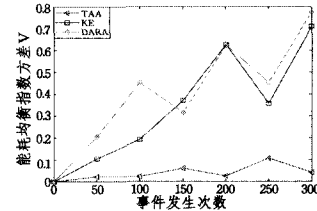


图 2 能耗均衡指数方差比较

TAA 算法将任务分解后, 多执行器节点并发执行, 最大限度地执行能耗分摊到各节点上, 使得节点整体能耗比较均衡。而对于 KE 和 DARA 算法来说, 由于事件随机发生, 导致某些执行器节点能耗过快, 其均衡指数方差波动较 TAA 算法大。

4.3 网络寿命

本次仿真将网络寿命定义为从事件发生开始到出现第一个执行器节点能量耗尽的时间, 如图 3 所示。在 KE 算法和 DARA 算法中, 每次事件发生后, 监控区域执行器节点必须独立完成相应任务。当发生地点随机出现时, 一些区域内事件发生频率可能高于其他区域, 导致该区域内的执行器节点执行能耗过大, 网络寿命变短。而 TAA 算法通过协作机制, 根据网络能耗情况动态调整协作范围, 尽量保持能耗均衡, 网络寿命明显提高, 比 KE 算法增加 38%, 比 DARA 算法增加 25.6%。

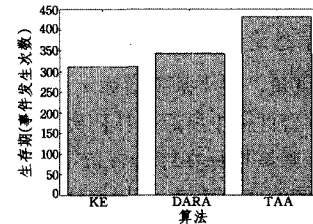


图 3 网络寿命比较

结束语 无线传感器/执行器网络中的 AA 协作, 主要解决任务如何在多执行器节点中的分配问题。提出一种基于熵权的任务分派算法, 通过将任务分解成若干任务单元, 建立基于熵权的执行代价评估标准, 根据网络的实际情况分派任务元, 使得任务可以并发执行, 缩短执行时间。同时尽量将执行能耗分摊到邻居执行器节点, 解决了事件频发区域内节点能耗过快问题, 延长了网络生存期。

参考文献

- [1] Akyldiz F, Kasimoglu I. Wireless Sensor and Actuator Networks: Research Challenges [J]. Ad-hoc Networks Journal Elsevier, 2004, 2(4): 351-367
- [2] Melodia T, Pompili D, Vahbi C. A Distributed Coordination Framework for Wireless Sensor and Actor Networks[C]//Proceedings of the 6th ACM International Symposium on Mobile Ad-hoc Networking and Computing. 2005: 99-110
- [3] Akkaya K, Senel F. Detecting and Connecting Disjoint Sub-networks in Wireless Sensor and Actor Networks [J]. Ad-hoc Networks, Elsevier, 2009, 46(7): 1330-1346

[4] Abbasi A A, Younis M. Movement-assisted Connectivity Restoration in Wireless Sensor and Actor Networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2009, 20(9): 1366-1379

[5] Ferenets R, Lipping T. Comparison of Entropy and Complexity Measures for the Assessment of Depth of Sedation [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2006, 53(6): 1067-1077

[6] Rainer B, Dell'Amico M, Martello S. Assignment Problems [M]. SIAM, 2009

[7] Simulator-NS-2. TheNetwork [EB/OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

[8] Lopez-Nores M, Garcia-Duque J, Pazos J J. Qualitative Assessment of Approaches to Coordinate Activities of Mobile Hosts in Ad-hoc Networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 12: 108-111

(上接第 89 页)

信息的复杂网络节点重要性评估方法。APRA 网络拓扑是北美常用的干线拓扑, 由 21 个节点和 26 条边组成, 网络的平均度数为 2.48。去掉 APRA 网络中的任意一个节点, 网络仍然连通。表 2 是应用本文提出的互信息法与已有的度数法、介数法、生成树法以及 pagerank 算法计算出的 APRA 网络的节点重要程度的对照表。

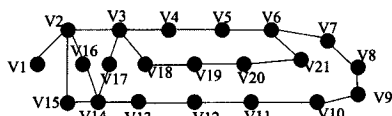


图 2 APRA 网络拓扑结构图

表 2 APRA 网络节点重要程度对照表

编号	度数法	介数法	生成树法	pagerank 法	互信息法
v ₁	2	0.000	0.6262	0.036	-1.099
v ₂	4	0.025	0.9721	0.067	1.674
v ₃	4	0.030	0.9930	0.070	2.079
v ₄	2	0.005	0.8387	0.040	-0.693
v ₅	2	0.005	0.8387	0.041	-0.405
v ₆	3	0.015	0.9836	0.061	1.216
v ₇	2	0.005	0.8797	0.043	-0.405
v ₈	2	0.005	0.8797	0.045	0.000
v ₉	2	0.005	0.8797	0.045	0.000
v ₁₀	2	0.005	0.8797	0.044	0.000
v ₁₁	2	0.005	0.8797	0.042	-0.405
v ₁₂	3	0.015	0.9780	0.057	0.811
v ₁₃	2	0.005	0.8051	0.038	-1.099
v ₁₄	4	0.030	0.9864	0.069	2.367
v ₁₅	3	0.010	0.8787	0.051	-0.170
v ₁₆	2	0.005	0.6639	0.036	-1.386
v ₁₇	2	0.005	0.6977	0.037	-1.386
v ₁₈	2	0.005	0.7701	0.038	-1.099
v ₁₉	3	0.015	0.9671	0.057	0.811
v ₂₀	2	0.005	0.8279	0.041	-0.405
v ₂₁	2	0.005	0.8279	0.042	-0.405

从表 2 可以看出, 提出的基于互信息的评估算法得出的最重要节点是 v₁₄, 而其它的几种方法得出的结果是 v₃ 或 v₁₄。从图 2 中可见, v₃, v₁₄ 两个节点局部的拓扑结构很相似, 它们都是网络中度数最大的节点。不同方法得出不同结果的原因可能是不同方法关注的角度不同。本文提出的基于互信息的评估方法与度的相关性较强, 但是与度数法相比, 本文的方法不仅考虑了局部网络的结构特性, 也考虑了全局网络的结构特性。另外在度数法、介数法、生成树法中, v₇, v₈, v₉, v₁₀, v₁₁ 这 5 个节点的重要性相同。而在本文提出的方法中, 节点 v₈, v₉, v₁₀ 相对于 v₇, v₁₁ 更为重要。观察可以发现, 移除 v₇ 节点后, v₁₂ 节点的负载加重; 而移除 v₉ 节点可能同时造成 v₆ 节点和 v₁₂ 节点的拥塞, 对网络造成的潜在破坏更大。以

上分析表明, 从本文提出的互信息方法求出的结果中, 可以明确地分辨出这些差别。

结束语 本文提出的基于互信息的复杂网络节点重要性评估方法是一种简单准确的评估方法, 而且计算速度快, 特别适用于大型复杂网络节点重要性的计算。实验结果表明, 本方法准确反映了节点重要程度的差异, 可以进一步推广到有向加权网络中。但是本方法只是从网络的结构特性出发, 并未考虑节点的异构性等其它因素, 所以需要更深一步的研究。

参考文献

[1] 周涛, 柏文洁, 汪秉宏, 等. 复杂网络研究概述 [J]. 物理, 2005, 34(1): 31-36

[2] Watts D J, Strogatz S H. Collective Dynamics of Small-world Networks [J]. Nature, 1998, 440-442

[3] Albert R, Barabási A L. Emergence of Scaling in Random Networks [J]. Science, 1999, 286: 509-512

[4] 赫南, 李德毅, 谄文燕, 等. 复杂网络中重要性节点发掘综述 [J]. 计算机科学, 2007, 34(12)

[5] 陈静, 孙林夫. 复杂网络中节点重要度评估 [J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(3)

[6] Enrico N, Guido P, Peter W. Finding the Most Vital Node of a Shortest Path [J]. Theoretical Computer Science, 2003, 29(6)

[7] 饶育萍, 林竞羽, 周东方. 网络抗毁度和节点重要性评价方法 [J]. 计算机工程, 2009, 35(6)

[8] 陈勇, 胡爱群, 胡啸. 通信网中节点重要性的评价方法 [J]. 通信学报, 2004, 25(8)

[9] 李鹏翔, 任玉晴, 席西民. 网络节点(集)重要性的一种度量指标 [J]. 系统工程, 2004, 22(4)

[10] Larry P, Sergey B. The PageRank Citation Ranking: Bringing Order to the Web [C] // Stanford Digital Libraries Working Paper. 1998

[11] Zhang Yi, Liu Yu-hua, et al. Modeling of Scale-free Network Based on Pagerank Algorithm [C] // ICFCC 2010. IEEE Computer Society, Wuhan, China, May 2010; V3-778-782

[12] 谭跃进, 吴俊, 邓宏钟. 复杂网络中节点重要度评估的节点收缩方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2006, 11(11)

[13] 郭伟. 野战地域通信网可靠性的评价方法 [J]. 电子学报, 2000, 28(1)

[14] Wasserman S, Faust K. Social network analysis: methods and applications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994: 218

[15] 傅祖芸. 信息论——基础理论与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2001