

基于免疫算法的无线传感器网络路由算法

毕晓君, 张艳双

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:针对移动代理(MA)以能量有效的方式收集相关性数据的特点,提出一种基于免疫算法的数据融合路由算法.利用免疫算法的寻优能力对MA路由进行全局优化,并根据节点数据传输和融合能量开销及节能增益,对移动代理迁移到每个节点是否进行数据融合进行选择,以提高信息收集过程中网络能量效率.实验结果表明,该算法具有更好的能量利用效率和较低延时.

关键词:无线传感器网络;数据融合;免疫算法;移动代理

中图分类号: TN914 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2009)01-0067-05

A routing algorithm for wireless sensor networks based on an immune algorithm

B I Xiao-jun, ZHANG Yan-shuang

(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Mobile agents (MA) collect correlated data in an energy efficient way: we proposed an adaptive data fusion routing algorithm based on such an immune algorithm. With this method, a global route optimization was performed using the search ability of our MA immune algorithm. Then, according to data transmission cost and energy gain, the algorithm adaptively determined whether fusion was made for every node the moving agent transmitted, so that energy efficiency in the network was improved in the course of data collection. Simulation results showed that this algorithm has better energy efficiency and low time delay.

Keywords: wireless sensor network; data fusion; immune algorithm; MA

无线传感器网络(wireless sensor networks, WSN)由于其灵活性,可以广泛应用于军事侦察、环境检测和工业生产等领域;然而 WSN 中节点的能量、通信和计算能力较为有限,网络设计需考虑容错性、可扩展性、可靠性和节能等需求.目前,如何节省网络能耗、延长网络生命周期成为 WSN 中研究的重点^[1-3].

数据融合技术可有效消除冗余信息,减少数据传输量,提高数据收集的准确性和效率.针对数据融合的特点, Qi 等学者提出了移动代理^[4] (mobile agent, MA)的概念,可按需移动并靠近数据源进行处理,特别适合“近距离感知”和“以数量换质量”的无线传感器网络,在网络协议设计和信息处理等领域也引起了人们的重视.目前已提出许多有效的移动代理数据融合路由算法^[5-8],其中文献[9]利用遗传

算法决策全局最优的 MA 路由,并且根据能量开销和节能增益自适应决定 MA 迁移到每个节点是否进行数据融合,取得了比较好的能量利用效率,是目前效果最好的方法.但是为了保证数据的完整收集,要求访问网络内所有节点,而采用遗传算法计算 MA 路由时,由于遗传算法自身寻优能力的限制,计算迭代时间比较长,并且遗传算法容易陷入局部最优,最佳路径的选择得不到保证,所以该算法的路由消耗与系统延时相对还比较大.

免疫算法是在遗传算法基础之上发展起来的一种全局优化算法,大多遗传算法能够解决的问题,免疫算法都能够有效解决且效率要比遗传算法好.作者提出了一种基于免疫算法的数据融合路由算法,利用免疫算法良好的寻优能力求解 MA 访问所有节点完成数据收集而总能耗最小的路径,最终实现了减少无线传感器网络的能量消耗、减少网络系统延时的目的.

收稿日期: 2008-09-26

通信作者: 毕晓君. E-mail: bixiaojun@hrbeu.edu.cn

1 基于移动代理的无线传感器网络数据融合模型

基于移动代理的无线传感器网络由 3 个主要部分组成:汇聚节点 (sink)、传感器节点 (node)和通信网络. 传感器节点散布在观察区域内采集与观察对象相关的数据,并将协同处理后的数据传送到 sink 其中 sink 有相对较强的处理、存储和通信能力,并能进行全局优化. sink 可以通过 Internet 或通信卫星实现传感器网络与任务管理节点之间的通信,网络的具体结构如图 1 所示.

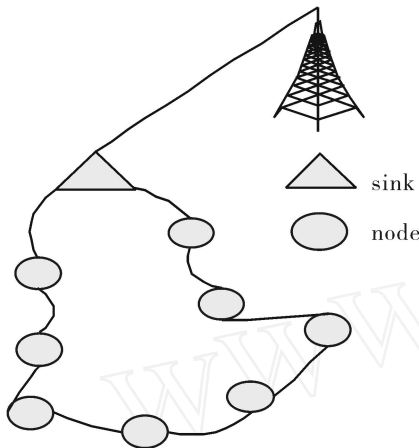


图 1 基于移动代理的无线传感器网络
Fig 1 Wireless sensor networks based on MA

移动代理 (MA) 本质上是一个程序实体,拥有一定的智能和判断能力.它可以在自己的控制下,按照一定的规程在网络节点间迁移,完成特定的任务. MA 由 sink 节点产生并根据当前的网络状态,决策 MA 的最优路由. MA 从 sink 出发,沿着事先设计的路由访问每一个节点,收集、融合感兴趣的数据,并将之带回 sink 用一个无向全连通图 $G = (V, E)$ 来代表无线传感器网络,顶点 $v \in V$ 代表网络中的一个传感器节点,边 $e = (u, v) \in E$ 代表顶点 u 和 v 所对应的传感器节点能够直接通信. 根据文献 [6-9] 做出以下定义:

定义 1 设任意节点 $v \in V$ 的权重为传输数据量 $w(v)$,边 $e = (u, v)$ 的权重为 $w(e) = w(u)$,其中: u 为起点, v 为终点.

定义 2 设 $c(e)$ 为单位传输能量,边 e 的数据传输能量为

$$t(e) = c(e)w(e). \tag{1}$$

定义 3 设 $q(e)$ 为单位融合能量, $\tilde{w}(\cdot)$ 为数据融合前的权重, $w(\cdot)$ 为数据融合后的权重,边 e 不进行数据融合的能量为

$$f(e) = q(e) (w(u) + \tilde{w}(v)) \tag{2}$$

数据融合率 α_{uv} 是数据融合路由协议的关键因素之

一,由此点 v 数据融合后的权重为

$$w(v) = (w(u) + \tilde{w}(v)) (1 - \alpha_{uv}). \tag{3}$$

综合式 (1)、式 (2) 得节点 v 的融合方程为

$$w(v) = (w(u) + \tilde{w}(v)) (1 - \alpha_{uv}) \cdot (1 - \alpha_{uv} x_{uv}). \tag{4}$$

计算移动代理路由的目的就是找到一条 MA 访问所有节点完成数据融合和收集且消耗总能量最小的路径,即在以传感器节点为顶点的无向全连通图 G 中找到一个可行的最优子图 $G^* = (V, E^*) \subseteq G$. 最优子图 G^* 应该满足:

$$G^* = \arg \min_{G^*} \min_{e \in E_f^*} (f(e) + t(e)) + \min_{e \in E_n^*} t(e). \tag{5}$$

其中:

$$E_f^* = \{e \mid e \in E^*, x_e = 1\},$$

$$E_n^* = \{e \mid e \in E^*, x_e = 0\}.$$

2 免疫算法基本原理

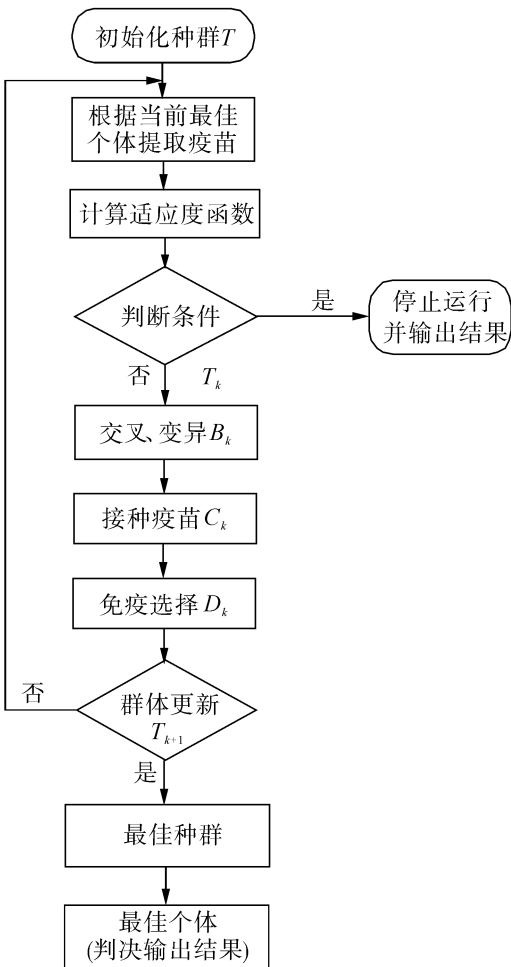


图 2 免疫算法流程图

Fig 2 Flowchart of immune algorithm

免疫算法将生命科学中免疫的概念和理论应用到遗传算法中,在原有标准遗传算法的框架基础上引入了免疫算子 (immune operator). 免疫算子由接种疫苗和免疫选择两部分构成,其中疫苗指的是依据人们对待解问题所具备的或多或少的先验知识,从中提取出的一种基本的特征信息. 疫苗的正确选择对算法的运行效率具有十分重要的意义,是免疫操作得以有效地发挥作用的基础与保障. 但是疫苗的优劣,生成抗体的好坏并不涉及到算法的收敛性,因为免疫算法的收敛性归根结底是由免疫选择来保证的. 在计算移动代理路由问题的中止条件是由设定的进化代数决定的,所以其过程一定是收敛的. 为了加快算法的收敛速度并有效地解决进化过程中可能出现的退化现象,文中在免疫选择的过程中采用了择优操作. 该算法的运行流程如图 2 所示.

3 基于免疫算法的 MA 改进路由算法实现

MA 路由问题可转化为 NP (non-deterministic polynomial) 完全问题^[10],通常采用启发式算法计算近似最优解. 进化计算是一种全局最优的启发式方法,需要获得网络全局拓扑信息和各节点的访问代价,解空间的复杂度对算法收敛速度和解的质量非常关键. 它在此处对应的是 MA 需要访问节点个数,它随着节点数增多而增大. 一般情况下,无线传感器网络内的节点少则几十个,多则上百甚至上千,这导致路由问题的解空间复杂度比较高. 求解移动代理路由问题,需要访问网络中的每一个节点以保证信息的有效收集. 采用遗传算法时,由于算法本身的寻优能力的限制,迭代时间比较长从而增加了系统的延时,并且遗传算法易于陷入局部最优,最佳路径的选择得不到保证. 所以选用寻优能力良好的免疫算法求解 MA 全局最佳路径,来节约能量消耗和减少系统延时.

在将免疫算法应用到求解 sink 节点和网络中传感器节点之间的总体能耗达到最小的最佳路径问题时,将最低能耗问题对应为抗原,相应的路径对应于抗体. 在对抗体编码时,采用遍历所有簇首节点的次序排列进行编码,每一抗体码串形式如下: V_1, V_2, \dots, V_n , 其中, V_i 表示遍历所有节点的序号. 程序中抗体定义为一维数组 $T(N)$, N 为网络中的节点个数与 sink 个数之和,数组中的各个元素 $T(i)$ ($i \in \{1, 2, \dots, N\}$) 的取值为 $1 \sim N$ 的一个整数,分别表示节点的序号. 根据问题的约束条件,每一数组内的各元素值互不相同. 抗体以遍历所有节点的排列顺

序进行编码. 算法实现过程如下:

1) 初始化. 设定算法终止条件,交叉概率 p_c , 变异概率 p_m , 记忆库规模 T_c . 随机产生初始种群 $T^0 = \{T_1^0, T_2^0, \dots, T_{N+1}^0\}$, 种群为所有节点访问顺序的随机排序,种群进化代数为 H , 其中个体 $h \in \{1, 2, \dots, H\}$ 的路由为 $\{S_{T_i^h}^0, S_{T_i^h}^1, S_{T_i^h}^2, \dots, S_{T_i^h}^m, S_{T_i^h}^0\}$, 根据每个路径排序,计算此路径下的能量消耗,目标函数是:

$$E_{\text{cost}}(T_i^h) = E_{\text{cost}}(S_{T_i^h}^0, S_{T_i^h}^1) + \sum_{e_{T_i^h}^r \in E_n} c(e_{T_i^h}^r) w(S_{T_i^h}^r) + \sum_{e_{T_i^h}^p \in E_f} c(e_{T_i^h}^p) w(S_{T_i^h}^p) + q(e_{T_i^h}^p) [w(S_{T_i^h}^p) + \tilde{w}(w(S_{T_i^h}^{p+1}))]. \tag{6}$$

式 (6) 中第 1 部分是 sink 节点发送移动代理到第 1 个节点消耗的能量,第 2 部分则是移动代理访问网络内所有节点后回到 sink 所消耗的能量,其中:

$$E_n = \{e_{T_i^h}^u \mid x_{e_{T_i^h}^u}^u = 0, u \in \{1, \dots, m\}\}, \\ E_f = \{e_{T_i^h}^u \mid x_{e_{T_i^h}^u}^u = 1, u \in \{1, \dots, m\}\}.$$

2) 计算亲和度. 当前种群 T_m 中的每一个抗体 T_i 根据适应度函数

$$F(T_i^h) = 1/E_{\text{cost}}(T_i^h), \tag{7}$$

计算得出抗体亲和度 $F(T_i^h)$, 求出当前种群中的最佳个体,截取其中某一段作为疫苗.

3) 算法终止条件判断. 判断是否满足迭代终止条件. 若满足,确定当前种群中的最佳个体作为算法最终寻找的解,否则,按照以下步骤进行.

4) 对于当前的第 k 代父本种群 T_k 进行交叉和变异操作,得到种群 B_k .

5) 对 B_k 接种疫苗. 即按一定的比例在当前种群中抽取一定数量的个体,并按先前提取的疫苗对这些个体的某些基因位上的基因进行修改,使所得个体以较大的概率具有更高的适应性.

6) 免疫选择. 即对接种了疫苗的个体进行适应度检测,若其适应度不如父代,则取消疫苗接种,否则保留该个体进入下一代. 令 $k = k + 1$, 返回 2), 直到设定的进化代数.

7) 在得到的最佳种群中选择适应度函数值最大的个体作为最佳个体 T_{best} , 该个体就是全局最优 MA 路由的个体.

4 实验仿真与结果分析

为了验证提出算法的性能,这里进行了仿真实验,并与目前解决 MA 路由问题效果最好的自适应数据融合遗传算法 (adaptive fusion genetic algo-

rithm, AFGA)^[9]进行性能比较. 实验在 Pentium CPU 2.60GHz、内存 1024MB 的计算机上运行的, 程序采用 MATLAB 7.0 语言编写.

实验中, 将传感器节点随机抛洒在一个 50 m × 50 m 的区域中, sink 点坐标为 (25, 30), 每个节点产生 1 500 byte 数据包, 发送单位比特数据耗能为 $c(e) = d^r +$, 其中: d 为节点之间的欧式距离; 无线通信的可调参数为 $r = 100 \text{ pJ}/(\text{bit} \cdot \text{m}^2)$; $r = 2$; 接收单位比特数据能量为 $r = 100 \text{ nJ}/\text{bit}$. 相关节点的数据相关性可由相关系数来表示. 当 $d = r_s$ 时, $r = 1 - d/r_s$, 反之 $r = 0$. 因此当在节点 v 进行数据融合时, 节点 v 处数据量为

$$w(v) = \max(w(u), \tilde{w}(v)) + \min(w(u), \tilde{w}(v)) (1 - r_{uv}). \quad (8)$$

采用的免疫算法初始种群规模设定为 20, 交换概率为 0.85, 变异概率为 0.01. AFGA 算法中遗传算法的种群规模为 20, 交叉概率为 0.85. 两种优化算法的初始进化代数均为 200, 进化代数随节点数的不同而不同. 节点数 n 分别选取 50、100、150、200、250、300, 进行多次实验并取平均值. 图 3 为不同节点规模情况下, 本文算法和 AFGA 的能量消耗对比情况, 其中 $r = 80 \text{ nJ}/\text{bit}$, 相关距离 $r_s = 35 \text{ m}$, 经过多次实验, 计算 MA 收集网络中所有节点的信息并返回 sink 的平均能量消耗.

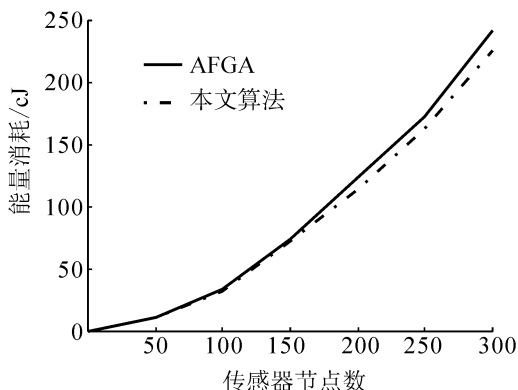


图 3 不同节点规模下两种算法能耗

Fig 3 Energy consumption of two algorithms in different nodes

由图 3 可见在不同节点规模情况下, 本文算法在能量消耗方面要优于 AFGA 算法, 并且随着节点数的增加能量消耗小的优势更加明显. 这是因为, 免疫算法相对于遗传算法, 收敛到全局最优解的能力比较高, 在计算 MA 路由时, 遗传算法容易得出局部最优而计算出能量消耗较小的路径, 而免疫算法却能计算出能耗更小的全局最佳路径, 所以最终实现了节约能量消耗的目的.

另外还进行了算法执行时间实验, 即延时情况

实验, 这也是判定一个算法优劣的重要指标. 为了对比本文算法与 AFGA 算法在延时方面的性能, 实验中将两种算法的实验仿真时间进行了比较, 节点数 n 分别选取 50、100、150、200、250、300, 进行多次实验并取平均值, 结果如图 4 所示.

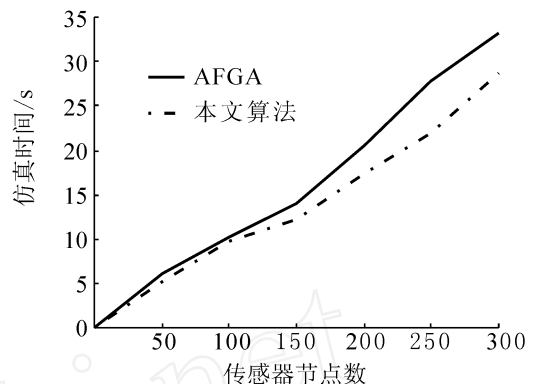


图 4 不同节点数两种算法仿真时间

Fig 4 Simulations time of two algorithms in different nodes

由图 4 可以看到, 提出的算法的仿真时间比 AFGA 要小一些, 节点数比较少时, 二种算法的时间相差不大; 但是随着节点数的增加, 本文算法的优势就显现出来. 这是因为遗传算法和免疫算法的运行时间都与进化代数有关, 而节点数目的增加会造成解空间复杂度的增加, AFGA 中遗传算法须持续增加进化代数以保证能够寻到全局比较精确的最优解, 而免疫算法具有良好的寻优能力, 可以设置相对较少的进化代数; 所以随着节点规模的增加, 提出的算法比 AFGA 算法具有更少的计算时间, 实现了降低延时的目的, 适合无线传感器网络中一些对于延时要求较高的应用.

5 结束语

基于移动代理的数据融合技术, 能够消除冗余信息, 减少数据传输量, 从而有效地节省能量, 延长网络生命, 有着很大的实际研究价值. 利用免疫算法的寻优能力进行全局路由优化, 并通过比较融合能量与节省的传输能量, 自适应调整 MA 在节点是否进行数据融合. 实验结果表明, 提出的算法能够减少能量消耗, 提高了网络能量效率, 并能减少延时, 适应无线传感器网络多节点应用的要求, 具有重要的实际应用价值.

参考文献:

- [1] ACDLY IF, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. Wireless sensor networks: A survey [J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.
- [2] CHONG C Y, KUMAR S. Sensor networks: Evolution, op-

- portunities, and challenge [J]. Proceedings of the IEEE, 2003, 91(8): 1247-1256
- [3] WANG Feng, TAN Qichuan, GAO Quanyue, et al A study of sensor management base on sensor networks [C]// Proceedings of 2003 IEEE International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing. Changsha, China, 2003, 2: 8-13.
- [4] QI Hairong, NYENGAR S S, CHAKRABARTY K Multiresolutions data integration using mobile agents in distributed sensor networks [J]. IEEE Transaction Systems, Man and Cybernetics-Part C: Applications and Rev, 2001, 31(3): 383-391.
- [5] RAJAGOPALAN R, MOHAN C K, VARSHNEY P, et al Multi-objective mobile agent routing in wireless sensor networks [J]. IEEE Transaction Congress on Evolutionary Computation, 2005, 5(5): 1730-1737.
- [6] HYDER A K, SHANBAZAN E, WALTZ E Multisensor fusion [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [7] WU Qishi, RAO N S V, BARHEN J, et al On computing mobile agent routes for data fusion distributed sensor networks [J]. IEEE Transaction Knowledge and Data Engineering, 2004, 16(6): 740-753.
- [8] 王 2, 曹涌涛, 糜正琨. 无线传感器网络 Mobile Agent 路由问题的模拟退火解法 [J]. 南京邮电大学学报, 2007, 27(1): 64-68.
- WANG Jun, CAO Yongtao, MI Zhengkun Simulation annealing solution for the routing problem of mobile agents in wireless sensor networks [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2007, 27(1): 64-68.
- [9] 胡海峰, 杨 震. 无线传感器网络中基于移动代理的自适应数据融合路由算法 [J]. 电子与信息学报, 2008, 30(9): 2254-2258.
- HU Haifeng, YANG Zhen Mobile-agent-based adaptive data fusion routing algorithm in wireless sensor networks [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(9): 2254-2258.
- [10] HENZELMAN W, CHANDRAKASAN A, BALLADRY-SHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks [C]// Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences Hawaii, USA, 2000: 1-10.

作者简介:



毕晓君,女,1964年生,教授,博士生导师,博士,中国图像图形学会会员,黑龙江省生物医学工程学会常务副理事长,黑龙江省人工智能学会常务理事.主要研究方向为图像处理、语音识别合成技术、信息智能处理技术.先后承担省部级

科研项目 7 项,获得省部级科学技术进步二等奖 2 项、三等奖 3 项.发表学术论文 31 篇,其中 9 篇被 EI 收录.



张艳双,男,1984 年生,硕士研究生,主要研究方向为通信与信息系统、无线传感器网络、人工智能.

第 2 届智能机器人与应用国际会议

The 2nd International Conference on Intelligent Robotics and Applications

The 2nd International Conference on Intelligent Robotics and Applications (ICIRA2009) will be held at Orchard Hotel, Singapore in 16-18, December 2009. ICIRA2009 conference welcomes contributions of quality papers presenting new research, new applications, and new technological developments at the hardware and/or software levels for intelligent and autonomous robots

Important Dates:

Submission of Full Papers: 15 June 2009

Paper Acceptance: 15 August 2009

Submission of Final Papers: 15 September 2009

Early Bird Registration: 30 September 2009

Technical Program: 30 September 2009

Conference: 16 - 18 December 2009

E-mail: james_lee@robotics.sg

Website: <http://icira2009.robotics.sg/index.php>