

文章编号: 1001-0920(2012)12-1903-04

基于粒子群优化的大规模传感器网络节点调度策略

刘志刚, 汪晋宽

(东北大学秦皇岛分校 工程优化与智能天线研究所, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 针对资源受限条件下大规模无线传感器网络中协作目标跟踪问题, 提出一个基于粒子群优化的节点调度方案. 该方案利用高斯粒子滤波算法和方差交叉融合算法获得目标状态预测信息, 进而选择下一时刻簇成员节点, 并构造了通信能耗的代价函数, 利用粒子群优化方法选择最佳的簇头节点, 减少了节点调度的计算复杂度, 同时保持了较好的跟踪精度. 仿真结果验证了所提出方案的有效性.

关键词: 无线传感器网络; 粒子群优化; 目标跟踪; 节点调度

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Sensor selection via particle swarm optimization in large-scale wireless sensor networks

LIU Zhi-gang, WANG Jin-kuan

(Institute of Engineering Optimization and Smart Antenna, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China. Correspondent: LIU Zhi-gang, E-mail: zliu@mail.neuq.edu.cn)

Abstract: Under resource-constrained conditions, sensor selection scheme based on particle swarm optimization is proposed for collaborative target tracking in large-scale wireless sensor networks. By using Gaussian particle filtering and covariance intersection, the proposed scheme can predict the target's state next time. Based on the state prediction, this scheme can select the cluster member nodes, design the cost function for communication energy consumption, and obtain the optimal cluster head node by particle swarm optimization. Simulation results show that this scheme reduces the computational complexity, and keeps the good tracking performance.

Key words: wireless sensor networks; particle swarm optimization; target tracking; sensor selection

1 引言

无线传感器网络资源受限特性使得单一节点无法完成目标跟踪任务, 协作跟踪因而成为无线传感器网络热点问题之一. 与传统跟踪算法相比, 协作跟踪更侧重于节点调度. 文献[1]给出了一种基于后验克拉-美劳界的节点调度方案, 随后该方案在文献[2]中被扩展到具有分布式结构的传感器网络. 在规则的密集型异构传感器网络内, Aeron等^[3]针对通信受限的节点调度问题推导出可适用于不同的目标动态模型的节点调度策略, 可以实时选择最佳的传感器集合. 结合信息矩阵, 文献[4]采用基于几何精度衰减因子的代价函数, 根据局部新息向量的绝对值自适应地确定参与跟踪的活动节点数目. 上述节点调度方案的计算复杂度随着网络规模增加而快速增长, 因此无法满

足大规模传感器网络协作跟踪的实时性要求.

受基于凸优化的节点调度方法^[5]的启发, 针对资源受限条件下大规模传感器网络中协作目标跟踪问题, 本文提出了一种基于粒子群优化^[6-7]的节点调度策略. 基于目标状态的预测, 该策略利用预测的位置信息选择下一时刻簇成员节点, 并利用粒子群优化方法选择簇头节点, 在降低网络能量消耗的同时保持了较好的跟踪精度.

2 系统网络模型

本文所研究的网络为具有成千上万节点的大规模的无线传感器网络, 并具有如下特性:

1) 每个节点的感知区域是一个半径为 r 的圆形区域;

收稿日期: 2011-10-15; 修回日期: 2012-04-05.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60874108); 河北省自然科学基金项目(F2011501021); 教育部中央高校基本业务费项目(N110423005).

作者简介: 刘志刚(1975-), 男, 教授, 博士, 从事传感器网络、工程优化的研究; 汪晋宽(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 从事自适应信号处理、工程优化等研究.

2) 每个节点可以通过 GPS 或者定位算法获取自身的位置信息;

3) 每个节点具有簇头 (CH) 和簇成员 (CM) 两种状态;

4) 每个节点能够保存自身的 ID 号、邻居节点的 ID 表、目前的状态、节点的坐标以及剩余能量.

整个协作跟踪系统是由目标跟踪、跟踪融合和基于粒子群优化的节点调度 3 部分构成. 具体步骤如下所示.

Step 1: 目标跟踪, 即簇内各节点利用高斯粒子滤波算法^[8]对目标进行跟踪, 得到局部状态信息.

Step 2: 跟踪融合, 即簇头节点使用方差交叉算法^[9]对来自簇成员节点的局部状态信息进行融合, 获得当前的目标状态信息, 并预测下一时刻目标位置.

Step 3: 基于粒子群优化的节点调度, 即基站根据预测的目标位置选择簇成员节点, 并利用粒子群优化算法选择簇头节点, 构建下一时刻的动态簇.

在下一时刻, 新组建的簇重复上述步骤, 直到目标离开监控区域.

3 基于粒子群优化的节点调度

3.1 基于位置预测的簇成员节点选择

簇成员节点选择是基于高斯粒子滤波技术的目标位置预测, 具体步骤如下.

Step 1: 计算每个节点 i 到 S_{t+1} 的距离 $d_i = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2}$, 其中 S_{t+1} 为目标的预测位置, 即 $S_{t+1} = (x_s, y_s)$, 而 i 为节点的 ID 号.

Step 2: 若 $d_i < r$, 则节点 i 被唤醒, 设置为 CM 状态; 否则, 节点继续睡眠.

Step 3: 簇成员节点被唤醒后, 执行跟踪任务.

Step 4: 判断目标是否离开本簇感知区域, 若目标已经离开, 则簇内节点重新睡眠; 否则, 继续跟踪.

3.2 基于粒子群优化的簇头节点选择

1995 年 Kennedy 等^[6]提出了粒子群优化算法, 其原理是将解空间中每一个可能产生的解表述为群中的一个微粒, 每个微粒都有属于自己的速度、位置以及一个由适应度函数决定的适应值. 所有微粒在搜索空间内以一定的速度飞行, 其速度受适应值影响. 最终, 所有微粒到达最优位置.

假设在 N 维搜索空间中有 m 个微粒, 每个微粒的位置表示一个潜在的解. 当迭代次数为 k 时, 第 i 个微粒的位置表述为 $\mathbf{x}_i(k) = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN})$, 飞行速度表述为 $\mathbf{v}_i(k) = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iN})$, 微粒自身的历史最佳位置表述为 pbest_i , 群体的历史最佳位置表述为 gbest . 从 k 步迭代到 $k+1$ 步的过程中, 第 i 个微粒的第 j 维的速度及位置更新公式为

$$v_{ij}(k+1) = wv_{ij}(k) + c_1\varphi_1 \times (\text{pbest}_i - x_{ij}(k)) + c_2\varphi_2 \times (\text{gbest} - x_{ij}(k)), \quad (1)$$

$$x_{ij}(k+1) = x_{ij}(k) + v_{ij}(k+1). \quad (2)$$

其中: w 为惯性权重, c_1 和 c_2 为加速度系数, φ_1 和 φ_2 为区间 $[0, 1]$ 内均匀分布的随机数. 式 (1) 右边由 3 部分构成: 第 1 部分表示粒子维持自己先前速度的趋势, 第 2 部分表示粒子向自身历史最佳位置逼近的趋势, 第 3 部分表示粒子向群体历史最佳位置逼近的趋势.

在形成的簇内, 簇头节点不仅要负责对簇成员信息进行数据融合以获得目标位置的估计值, 还要负责对目标的运动趋势进行预测, 并发送成簇申请至基站节点; 因此, 能量因素是簇头节点选择时的关键指标. 下面根据无线传感器网络节点能耗模型建立粒子群优化算法中的适应度函数.

假设只考虑节点通信消耗的能量, 网络节点间传输 n 个比特数据所消耗的能量可以表述为

$$E_{tx} = \begin{cases} nE_{\text{elec}} + ne_{\text{fs}}d^2, & d < d_0; \\ nE_{\text{elec}} + ne_{\text{amp}}d^4, & d \geq d_0; \end{cases} \quad (3)$$

$$E_{rx} = nE_{\text{elec}}. \quad (4)$$

式 (3) 为节点发射时能量损耗模型, 式 (4) 为节点接收时能量损耗模型. 其中: d 为节点间距离, d_0 为通信半径, n 为传输数据的比特数目, E_{elec} 为节点无线收发电路发送或接收 1 bit 数据所消耗的能量, e_{fs} 为发射放大器经单跳将 1 bit 数据传输 1 m 所消耗的能量, e_{amp} 为多路衰减模型的功率放大系数.

定义 t 时刻构建的簇为 C_t , 假设该簇中有成员节点 L 个, 分别定义为 CM_t^l , $l = 1, 2, \dots, L$, 所选簇头定义为 CH_t . 基于以上能耗模型, 假设各节点间传送 n bit 数据, 则该簇 C_t 的总耗能可由如下公式表示:

$$E_{\text{total}} = \sum_{l=1}^L E_{\text{CM}}^l + E_{\text{CH}} = 4nE_{\text{elec}} + ne_{\text{fs}} \sum_{l=1}^L (\text{dis}^l)^2 + ne_{\text{amp}}(\text{Dis})^4. \quad (5)$$

其中: dis 为簇成员与簇头间的距离, 而 Dis 为簇头到基站之间的距离 (假设该距离大于节点通信半径). 由式 (5) 可知, 总能耗包括簇成员到簇头的通信能耗和簇头到基站的通信能耗. 为使总能耗最小, 粒子群优化算法的适应度函数可以表示为

$$f = ne_{\text{fs}} \sum_{l=1}^L (\text{dis}^l)^2 + ne_{\text{amp}}(\text{Dis})^4. \quad (6)$$

根据所建的适应度函数, 利用粒子群优化算法选择簇头节点. 输入参数为设置的终止条件、微粒群的规模、惯性权重和加速度系数; 输出参数为迭代后微粒群取最佳函数适应值时所对应的位置向量. 具体步骤如下所示.

Step 1: 初始化微粒. 产生 m 个微粒, 在允许范围内设置微粒的初始位置和速度, 并设定各个微粒的 $pbest_i$ 为各自的初始位置, 取初始 $gbest$ 为 $pbest_i$ 中最优值.

Step 2: 根据式 (6) 计算每个微粒的适应值.

Step 3: 将每个微粒的适应值与其历史最优位置 $pbest_i$ 的适应值比较, 若优于 $pbest_i$ 的适应值, 则将其目前位置作为最优位置 $pbest_i$.

Step 4: 将每个微粒当前的最优位置 $pbest_i$ 与群体历史最优位置 $gbest$ 比较, 如果优于 $gbest$, 则将其作为群体最优位置 $gbest$.

Step 5: 根据粒子群优化算法速度和位置更新公式调整微粒的速度和位置.

Step 6: 判断终止条件是否满足, 若满足则退出迭代, 否则返回 Step 2.

Step 7: 满足终止条件时, 若输出位置信息处部署有传感器节点, 则选择该节点为簇头; 否则取距离此位置最近的节点设置为簇头.

4 仿真实验

考虑一个目标匀速通过监测区域的情况, 定义状态向量为 $\mathbf{x}_t = [x_t, \dot{x}_t, y_t, \dot{y}_t]^T$, 状态方程和量测方程分别为

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{F}\mathbf{x}_t + \mathbf{G}\mathbf{w}_t, \tag{7}$$

$$z_t^i = \sqrt{(x_t - x_i)^2 + (y_t - y_i)^2} + v_t^i. \tag{8}$$

状态转移矩阵 \mathbf{F} 和过程噪声矩阵 \mathbf{G} 分别为^[8]

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0.5 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

其中: z_t^i 为 t 时刻第 i 个节点的量测值; (x_i, y_i) 为第 i 个节点的坐标; $\mathbf{w}_t = [w_t^x, w_t^y]^T$ 为零均值高斯噪声向量, 方差为 $\mathbf{Q} = \text{diag}([0.01, 0.01])$; v_t^i 为第 i 节点的零均值高斯噪声, 方差为 $R = 0.25$. 初始状态向量的均值和方差分别为 $\mathbf{x}_0 = [5.0, 0.8, 7.0, 0.9]^T$, $\mathbf{P}_0 = \text{diag}([0.5, 0.5, 0.3, 0.01])$.

在高斯粒子滤波算法中, 粒子数为 500, 粒子群优化算法的参数设置^[10]如表 1 所示, 粒子群优化算法的终止条件为粒子位置向量在 X 轴及 Y 轴的分量差值 $\sigma < 0.1 \text{ m}$. 所用的仿真软件为 Matlab 7.1.

表 1 粒子群优化算法的仿真参数表

参数	设定值
惯性权重	0.728
加速度系数	2
粒子数	5
粒子范围	[0,100]
最大速度/(m/s)	100

4.1 实验 1

在不同节点数目下进行了 10 次簇头节点选择实验, 所得数据如表 2 所示.

表 2 簇头节点选择所需时间对照表

节点数目	粒子群优化算法/s	遍历搜索算法/s
100	0.6686	0.0702
500	1.1132	0.3169
1000	1.0782	0.7016
1500	1.0752	1.0531
2000	1.1624	1.1874
2500	1.0874	1.7671
3000	1.1872	2.1420
5000	1.5860	3.9295

从表 2 可知, 遍历搜索算法所需时间与部署的节点数目成正比, 随着节点数目的增加而增大. 当节点数目大于 2000 时, 粒子群优化算法所需时间小于遍历搜索算法. 与遍历搜索算法相比, 粒子群优化算法在小规模的传感器网络中耗时较长, 在簇头节点选择的实时性上不具有优势, 但是适应于大规模部署的传感器网络.

4.2 实验 2

为了验证本文所提出节点调度方案的目标跟踪性能, 将其与最近邻居方法相比较, 经过 20 次的蒙特卡罗仿真实验, 得出目标位置和速度的均方根误差曲线如图 1 和图 2 所示, 其中 PSO 表示所提出方案, 而 NN 表示最近邻居方法.

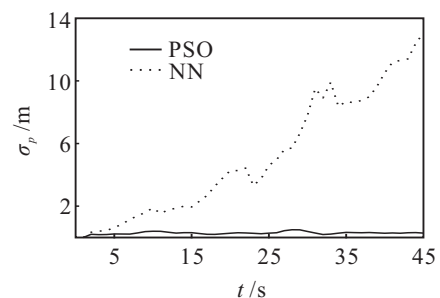


图 1 位置均方根误差对比

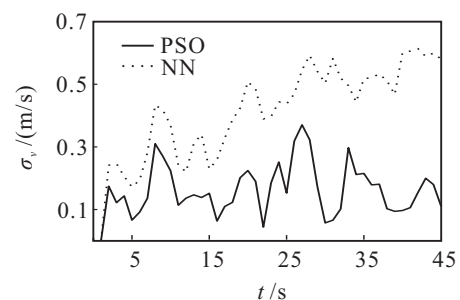


图 2 速度均方根误差对比

由图 1 和图 2 可知, 不论位置还是速度, 所提出方案的均方根差都小于最近邻居方法的均方根差. 这说明, 所提出方案在跟踪过程中具有较好的跟踪性能.

5 结 论

针对资源受限条件下大规模无线传感器网络中协作目标跟踪问题,提出了一个基于粒子群优化的节点调度方案.该方案根据目标位置预测信息选择,选择下一时刻簇成员节点,并利用粒子群优化方法选择簇头节点,可以有效降低计算复杂度.

仿真实验表明,当节点数目大于2000时,粒子群优化算法更适应大规模部署的传感器网络,且在跟踪过程中保持较好的跟踪性能.

参考文献(References)

- [1] Tharmarasa T, Kirubarajan T, Hernandez M L, et al. PCRLB-based multisensor array management for multitarget tracking[J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 40(2): 539-555.
- [2] Tharmarasa T, Kirubarajan T, Peng J, et al. Optimization-based dynamic sensor management for distributed multitarget tracking[J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 2009, 39(5): 534-546.
- [3] Aeron S, Saligrama V, Castanon D A. Efficient sensor management policies for distributed target tracking in multihop sensor networks[J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2008, 56(6): 2562-2574.
- [4] Zoghi M, Kahaei M H. Adaptive sensor selection in wireless sensor networks for target tracking[J]. *IET Signal Processing*, 2010, 4(5): 530-536.
- [5] Joshi S, Boyd S. Sensor selection via convex optimization[J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2009, 57(2): 451-462.
- [6] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]. *Proc of IEEE Int Conf on Neural Networks*. New York: IEEE Press, 1995: 1942-1948.
- [7] Dressler F, Akan O B. Bio-inspired networking: From theory to practice[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2010, 48(11): 176-183.
- [8] Kotecha J H, Djuric P M. Gaussian particle filtering[J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2003, 51(10): 2592-2601.
- [9] Chen L, Arambel P O, Mehra R K. Estimation under unknown correlation: Covariance intersection revisited[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(11): 1879-1882.
- [10] Guru S M, Halgamuge S K, Fernando S. Particle swarm optimisers for cluster formation in wireless sensor networks[C]. *Proc of ISSNIP*. Piscataway: IEEE Press, 2005: 319-324.

(上接第1902页)

- [3] Nasiri A. Full digital current control of permanent magnet synchronous motors for vehicular applications[J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 2007, 56(4): 1531-1537.
- [4] 陈荣. 永磁同步电机控制系统[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 7-8.
(Chen R. Control systems of permanent magnet synchronous motor[M]. Beijing: China Water Power Press, 2009: 7-8.)
- [5] Mademlis C, Margaris N. Loss minimization in vector controlled interior permanent magnet synchronous motor drives[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2002, 49(6): 1344-1347.
- [6] 于金鹏, 陈兵, 于海生, 等. 基于自适应模糊反步法的永磁同步电机位置跟踪控制[J]. *控制与决策*, 2010, 25(10): 1547-1551.
(Yu J P, Chen B, Yu H S, et al. Adaptive fuzzy backstepping position tracking control for permanent magnet synchronous motor[J]. *Control and Decision*, 2010, 25(10): 1547-1551.)
- [7] 王玉振, 程代展. 广义哈密顿实现及其在基于能量的准Lyapunov函数构造中的应用[J]. *控制理论与应用*, 2002, 19(4): 511-515.
(Wang Y Z, Cheng D Z. Generalized Hamiltonian realization and its application in construction of energy based Lyapunov candidates[J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(4): 511-515.)
- [8] Ortega R, van der Schaft A J, Maschke B, et al. Interconnection and damping assignment passivity-based control of port-controlled Hamiltonian systems[J]. *Automatica*, 2002, 38(4): 585-596.
- [9] 于海生, 王海亮, 赵克友. 永磁同步电机的哈密顿建模与无源性控制[J]. *电机与控制学报*, 2006, 10(3): 229-233.
(Yu H S, Wang H L, Zhao K Y. Hamiltonian modeling and IDA passivity-based control of permanent magnet synchronous motor[J]. *Electric Machines and Control*, 2006, 10(3): 229-233.)
- [10] Cavallaro C, DiTommaso A O, Miceli R, et al. Efficiency enhancement of permanent magnet synchronous motor drives by online loss minimization approaches[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2005, 52(4): 1153-1160.
- [11] Ortega R, van der Schaft A, Castanos F, et al. Control by interconnection and standard passivity-based control of port-Hamiltonian systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2008, 53(11): 2527-2542.