

基于萤火虫算法的无线传感器网络 移动 sink 节点路径规划方法

俸 皓^{1,2}, 罗 蕾¹, 王 勇², 董荣胜²

(1 电子科技大学 计算机科学与工程学院, 四川 成都 611731;

2 桂林电子科技大学 广西高校云计算与复杂系统重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘 要: 为了解决通信范围建模为圆形区域且存在相互重叠的无线传感器网络中移动 sink 路径规划这一 NP 难问题, 提出了一种新的基于萤火虫群的路径规划方法. 首先依据问题的特性对可行解空间进行了压缩; 然后为提高算法在高维解空间的搜索效率, 对离群萤火虫粒子设计了变异操作并设计了个体逐维移动的方式, 提高了算法的求解精度并加快了算法的收敛速度. 通过仿真实验分析及与其他算法的对比, 验证了该方法的有效性.

关键词: 无线传感器网络; 移动 sink; TSPN; 萤火虫优化算法; 进化算法

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2016)05—0047—05

Path Planning in Wireless Sensor Networks for Mobile Sink Based on Glowworm Swarm Optimization Algorithm

FENG Hao^{1,2}, LUO Lei¹, WANG Yong², DONG Rong-Sheng²

(1 School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and

Technology of China, Chengdu 611731, China; 2 Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of

Cloud Computing and Complex Systems, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Mobile-sink shortest path planning problem can be regarded as a special case of TSPN problem, since the neighborhoods are the communication ranges of sensor nodes, which can be modeled as possibly overlapped disks. This problem is NP-Hard. To solve it, a novel glowworm swarm optimization based algorithm is proposed. At first, a search space reduction method is designed for compressing search space and improving efficiency of problem solving according to the nature of the problem. Then, a mutation operator for the outliers of the glowworms and an improved moving method are applied to improve the convergence speed and the quality of the result. The simulation results show that the proposed algorithm can achieve a better result than the related algorithms.

Key words: wireless sensor networks; mobile sink; TSPN; glowworm swarm optimization (GSO) algorithm; evolutionary algorithm

1 引言

大规模随机部署的无线传感器网络由于受到地理环境、自然因素的影响, 很大程度上不能自组织成为全连通的网络^[1], 在其上实施数据采集操作成了

无线传感器网络研究领域的新挑战. 近年来

研究者通过引入具有可控移动能力的 sink 节点代替传统的固定 sink 节点实施数据采集操作, 提高了无线传感器网络的可用性^[2].

收稿日期: 2015—08—13; 修回日期: 2015—09—14

基金项目: 国家科技重大专项(2014ZX03002001); 国家自然科学基金项目(61363070, 61163058, 61172053); 广西自然科学基金(2014GXNSFAA118370); 广西自动检测技术与仪器重点实验室基金资助项目(YQ14204); 广西教育厅基金资助项目(YB2014148); 广西高校云计算与复杂系统重点实验室资助项目(2015209)

在众多使用移动 sink 的数据采集方案中,单跳数据采集^[3]方式由于能最大限度地减少传感器节点的通信能耗、均衡各个节点的负载,且通信链路的质量能够得到更好的保证,受到了较为广泛的研究和应用. 因为移动 sink 优化路径的选择直接影响到网络数据采集的延迟和移动 sink 的能耗,所以成为了研究中的热点问题^[2-3].

考虑了传感器节点的通信范围之后,移动 sink 的路径规划问题可以建模为带有可重叠圆形邻域的 TSPN(TSP with Neighborhoods)问题,该问题已经被证明是 APX-Hard 的^[4]. 为了求取最优解,各种启发式算法^[5-6]、群智能进化算法^[7]被相继提出. 在已提出的算法之中,智能进化算法与启发式算法相比具有更高的求解精度,但同时也具有相对较高的时间复杂度,影响了在工程之中的实际应用.

萤火虫群优化算法^[7]是近年来提出的新型仿生群智能优化算法,因其在种群规模较小、迭代次数较少的情况下展现出良好的寻优能力,在多源信号追踪及定位^[8]、路径优化^[9]等问题中得到了成功的应用. 为了解决可重叠圆形邻域的 TSPN 问题,本文在萤火虫算法的基础之上,对离群萤火虫粒子设计了基于群体极值的变异算子和萤火虫粒子的移动方式,并结合具体问题对搜索空间进行了裁剪,仿真实验结果表明相对基本萤火虫算法无论是收敛速度还是算法精度都有明显提升,与近似算法的对比也表明了本文提出的算法具有较好的寻优性能.

2 问题描述

假设二维平面上部署有 n 个传感器节点,记为 $\{(v_0, r_0), (v_1, r_1), \dots, (v_i, r_i), \dots, (v_n, r_n)\}$,其中 v_i 表示第 i 个传感器的位置,其通信范围建模为半径为 r_i 的圆形区域. v_0 为基站位置,对应 $r_0 = 0$. 假设移动 sink 节点从基站出发,沿着规划路径依次经过各个传感器节点的通信范围,完成一轮数据采集后返回基站. 将路径与第 i 号传感器节点通信范围的第一个交点称为访问点,记作 p_{π_i} ,移动 sink 在访问点上采用停止 - 等待的方式完成对节点的数据采集工作. 由于移动 sink 的移动速度相对较慢,数据采集的延迟很大程度上是由于 sink 的移动所带来的,因此找到一条通过各个传感器节点通信范围的最短路径,将会降低数据采集的延迟,同时也减少了移动 sink 的能耗. 由此移动 sink 路径规划问题可表示为

$$\min(d(v_0, p_{\pi_1}) + \sum_{i=1}^{n-1} d(p_{\pi_i}, p_{\pi_{i+1}}) + d(p_{\pi_n}, v_0)) \quad (1)$$

式中, $d(p, q)$ 表示平面上两点之间的距离. 式(1)中传感器节点的访问顺序和各个传感器节点所对应的访问点位置均需要进行优化. 前者属于 NP-Hard 的离散变量优化问题,后者属于高度非线性的连续变量优化问题^[4].

3 基于萤火虫算法的求解方法

根据上节的分析,本文将路径规划方法分为两个阶段. 第一阶段采用现有的 TSP 问题求解工具(如 Concorde^[10])获取一条 TSP 路径;第二阶段采用改进的萤火虫算法求取每个传感器节点上的访问点位置.

萤火虫优化算法的灵感来自于萤火虫在觅食、求偶时表现出的群体行为. 它通过设置具有挥发因子的荧光素和可动态变化的个体决策范围,有效避免了其他智能群算法常见的由于群体聚集导致易于陷入局部最优的缺陷,使之在高维函数的优化方面得到了较好的应用. 在萤火虫算法中使用荧光素浓度来表征个体所处位置的好坏,群体中第 i 只萤火虫在 t 时刻的荧光素浓度定义如下:

$$l_i(t) = (1 - \rho)l_i(t-1) + \gamma f(x_i(t)) \quad (2)$$

式中, ρ 为荧光素挥发因子, γ 为荧光素更新率, $f(x_i)$ 为目标函数,本文所用目标函数为式(1)的倒数. 每个萤火虫个体的邻域定义如下:

$$N_i(t) = \{j \mid d_{ij}(t) < r_d^i(t); l_i(t) < l_j(t)\} \quad (3)$$

式中, $d_{ij}(t)$ 表示 t 时刻个体 i, j 间的距离, $r_d^i(t)$ 为萤火虫 i 的动态决策范围,初值设为 r_s . t 时刻萤火虫 i 向其动态决策内的个体 j 移动的概率为

$$p_{ij}(t) = \frac{l_j(t) - l_i(t)}{\sum_{k \in N_i(t)} l_k(t) - l_i(t)} \quad (4)$$

在萤火虫 i 向 j 移动之后,使用下式更新其位置:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + s \left(\frac{x_j(t) - x_i(t)}{\|x_j(t) - x_i(t)\|} \right) \quad (5)$$

式中, s 是移动步长, Krishnanand 等人给出了建议值 0.03. 完成位置更新后,个体 i 接着使用下式更新自己的动态决策域:

$$r_d^i(t+1) = \min\{r_s, \max\{0, r_d^i(t) + \beta(N_i - |N_i(t)|)\}\} \quad (6)$$

3.1 编码方案

本文提出的路径规划方法属于 TSP 前置型算法,

即先确定节点的访问次序,再优化每个节点所对应的访问点位置.当访问点的位置使用平面直角坐标表示时,对具有 n 个节点规模的传感器网络来说,则有 $2n$ 个变量需要进行优化.利用节点的通信范围为圆形区域这一假设条件和访问点总是位于通信圆盘上这一特性,可以使用访问点所对应的弧度 θ 来表示其位置.因此第 i 个节点对应的访问点的位置可表示为 $p_{\pi i} = (x_i + r_i \cos \theta_i, y_i + r_i \sin \theta_i)$, $\theta \in [0, 2\pi]$ 或 $[-\pi, \pi]$. 因此路径长度变换为 $\theta = \langle \theta_{v_0}, \theta_{v_1}, \dots, \theta_{v_n} \rangle$ 的函数,每个萤火虫个体的编码采用 θ 表示,此种编码方案将待优化连续变量的数目减少了一半.

3.2 解空间的压缩

采用 3.1 节的方法对萤火虫个体进行编码之后,通过进一步的研究发现,最优的访问点位置总位于相邻两个通信圆盘的两条外切线所包围的区间^[11].文献[11]利用这一性质对访问点的取值范围进行了压缩,提高了求解的效率.由于没有考虑前后节点位置对当前访问点的影响,搜索范围仍然较大,为此本文做了如下设计,可以进一步的压缩可行解的搜索范围,提高搜索的效率.为便于说明问题,考虑两个静态节点的情况.如图 1 所示,移动 sink 由基站位置 S 出发,依次对节点 A 、 B 进行访问后回到位置 S .按照文献[11]的压缩方法,节点 A 、 B 所对应的搜索空间分别对应弧段 $\widehat{a_1 a_2}$ 与弧段 $\widehat{b_2 b_1}$ 所覆盖的区间.进一步分析可发现,节点 A 上访问点的可行取值区域可被压缩至弧 $\widehat{a_1 a_2}$ 与弧 $\widehat{a_3 a_4}$ 的交集即弧 $\widehat{a_2 a_3}$ 之间,同理, B 上的可行区域在弧 $\widehat{b_3 b_1}$ 之间.弧段 $\widehat{b_2 b_1}$ 的取值范围为 $[\pi/2 + \alpha - \beta, 3\pi/2 - \alpha - \beta]$, 其中 $\alpha = \arcsin\{(r_B - r_A)/D\}$, $\beta = \arcsin\{(y_A - y_B)/D\}$, D 为节点 A 、 B 间的距离.对于多个静态节点的情形,每个节点对应弧段的起始范围可用类似的方法计算得到,之后对所得弧段求取交集即可得到压缩之后的搜索区间.

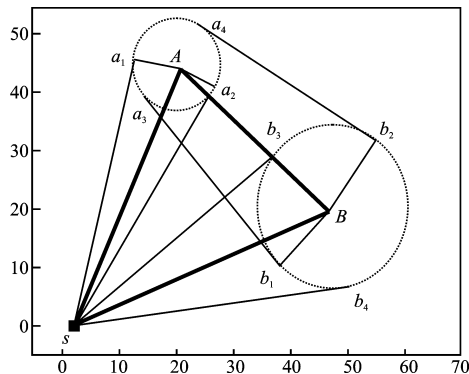


图1 移动 sink 从 S 出发依次访问节点 A 、 B 的通信区域

3.3 变异算子及个体移动方式

本文中的路径规划问题属于高维多模态函数优化问题,萤火虫算法在应用到高维函数的优化问题中时,会产生一定数量的离群萤火虫粒子^[12].离群萤火虫因为在自身的决策范围之内找不到同伴,而无法进行有效的移动,从而大大降低了搜索的效率.针对这一问题,本文设计了针对离群点的变异算子如下:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \text{rand}(1, n) \cdot \left(\frac{x_{\text{best}} - x_i(t)}{\|x_{\text{best}} - x_i(t)\|} \right) \quad (7)$$

其中, x_{best} 表示当前最优萤火虫粒子的位置, $\text{rand}(1, n)$ 为 n 维服从 $0 \sim 1$ 随机分布的空间向量.上式表示离群萤火虫向当前最优解的位置移动一步,有效避免了离群萤火虫的停滞搜索现象.

基本萤火虫算法在高维函数优化中的另一个问题是:由式(5)所确定的萤火虫个体整体移动策略,并不能保证新位置的目标函数值优于原来的位置^[13].为此,本文借鉴人工蜂群算法中觅食蜂的行为,将萤火虫个体的整体移动变为逐维移动,设计了新的个体移动策略如下:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + s \left(\frac{x_j(t) - x_i(t)}{\|x_j(t) - x_i(t)\|} \right) \text{rand}(1, n) \quad (8)$$

3.4 改进的萤火虫群算法

综上所述,本文设计了具有变异机制的萤火虫算法(MGSO)用于路径规划问题的求解,具体流程如下.

步骤 1(获取 TSP 路径). 使用 Concorde 求解工具获取一条 TSP 路径.

步骤 2(算法初始化). 初始化算法的各个参数,令迭代次数 $t=0$.按照 3.2 节的方法对定义域进行压缩.

步骤 3. 使用式(2)对各个萤火虫进行荧光素的更新.

步骤 4. 根据式(3)求取每只萤火虫决策范围内的邻居集合.若邻居数目大于 0,则使用式(4)计算各个邻居的被选中概率.

步骤 5. 对于邻域内没有邻居的萤火虫,采用式(7)进行变异操作更新自身位置,转至步骤 7.

步骤 6. 对于邻居集合非空的每一个萤火虫 i ,根据轮盘赌法则选择吸引其移动的目标 j ,并使用式(8)对 i 的位置进行更新.

步骤 7. 使用式(6)对每一只萤火虫的动态决策范围进行更新.

步骤 8. 记录当前世代的群体极值 $S_g(t)$, 若小于最优值 G_{best} , 则更新当前 G_{best} 及其对应的位置 X_{best} .

步骤 9. 令 $t=t+1$, 判断是否达到最大迭代次数 I_{max} , 如果是, 则输出最优解 G_{best} 和最佳位置 X_{best} , 算法结束; 否则跳转到步骤 3 开始下一次迭代过程.

4 仿真实验

仿真实验使用 Matlab2012 进行. 首先通过一个实例演示算法的运行结果及与经典 GSO 算法的收敛性和精度对比, 再通过大规模的模拟实验进行性能评测, 同时与同类算法进行对比.

假设在 $500\text{ m}\times 500\text{ m}$ 的监控区域内均匀随机部署 50 个传感器节点, 每个节点的通信范围均为 20 m. 算法的参数设置为: $\rho=0.6, \gamma=0.6, \beta=0.08, N_t=5, l_0=5, s=0.03$, 种群规模为 100, 为便于与基本萤火虫算法进行比较, 最大迭代次数 I_{max} 设为 300. 使用 MGSO 算法得到的路径如图 2 所示.

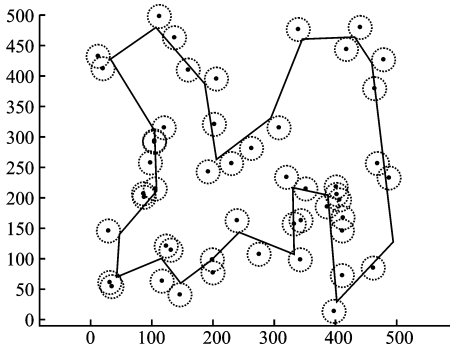


图 2 50 个节点时的路径规划实例

图 3 是 MGSO 与 GSO 算法在参数一致情况下的收敛曲线对比. 从图中可以看出, MGSO 算法无论是在求解精度还是收敛速度上, 都较 GSO 算法有明显的提升.

为了验证算法的有效性, 在不同的场景下与同样采用 TSP 前置方法的 LC 算法^[5] 和 CSS 算法^[6] 进行对比. 首先对比相同通信范围, 不同节点数目下算法的性能. 采用文献[6]相同的参数, 节点数目从 50 开始, 以 10 为增量逐步递增至 100 个. 每种节点数目的场景分别生成 100 个样本, 统计的结果是运行算法 50 次后该场景下所有测试样本的均值. 图 4 给出了测试运行结果, 可以看出 MGSO 算法得到的结果优于 LC 算法和 CSS 算法.

图 5 显示了 50 个节点场景下不同的节点通信

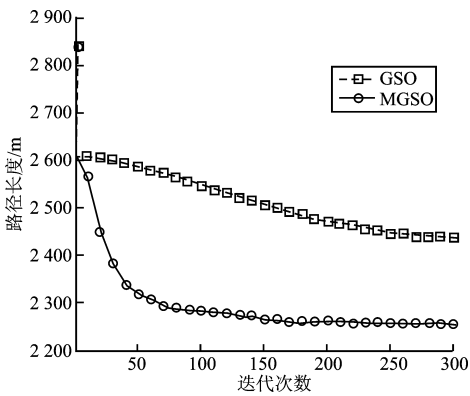


图 3 MGSO 与 GSO 的收敛曲线对比

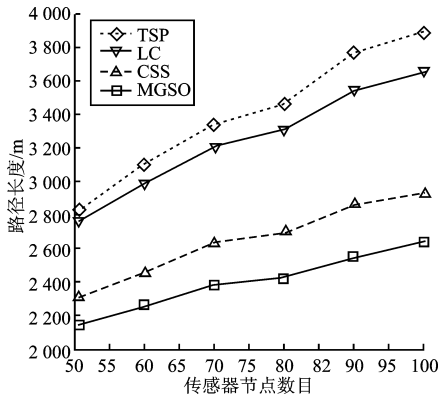


图 4 相同通信范围不同节点数目的对比

距离对路径长度的影响. 可以看出在考虑了通信距离之后, 路径长度与节点通信距离呈反比关系. 由图可见通信距离小于 70 m 时, MGSO 算法较其他算法的优势比较明显, 这也符合实际工程应用中通信范围一般为 20~50 m 的需求. 在通信距离大于 70 m 之后, MGSO 算法优化的结果开始与 CSS 算法相接近, 这是由于随着通信半径的增加, 监控区域基本被通信范围完全覆盖, CSS 算法的结果越来越趋近最优值的原因.

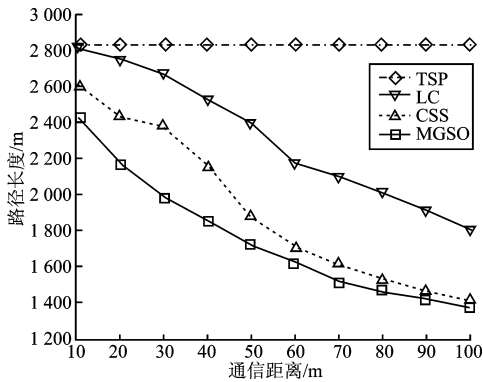


图 5 不同通信距离下路径长度的对比

5 结束语

本文提出了一种基于萤火虫算法的解决移动 sink 数据收集路径规划问题的方法,通过解空间的压缩提高了搜索的效率,通过设计离群萤火虫粒子变异和萤火虫个体的逐维移动机制提高了算法的求解精度和收敛速度.通过仿真及对比实验,验证了算法的有效性.下一步的工作将深入研究监控区域存在障碍物的情况,提高算法的适用性;考虑通过引入多移动 sink 节点,进一步缩短规划路径的长度,减少数据收集的延迟.

参考文献:

- [1] Wu F J, Yu Chee Tseng. Energy conserving data gathering by mobile mules in a spatially separated wireless sensor network[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2013,13(15):1369-1385.
- [2] Mario Di Francesco, Sajal K Das, Giuseppe Anastasi. Data collection in wireless sensor networks with mile elements; a srvey [J]. ACM Trans on Sensor Networks, 2011,8(1):108-142.
- [3] Ma Ming, Yang Yuanyuan, Zhao Miao. Tour planning for mobile data-gathering mechanisms in wireless sensor networks[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2013,62(4):1472-1483.
- [4] De Berg M, Gudmundsson J, Katz M. J, et al. TSP with neighborhoods of varying size[J]. Journal of Algorithms, 2005, 57(1):22-36.
- [5] Sugihara R, Rajesh K Gupta. Path planning of data mules in sensor networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2011,8(1):1-27.
- [6] He Liang, Pan Jianping, Xu Jingdong. A progressive approach to reducing data collection latency in wireless sensor networks with mbile elements[J]. IEEE Trans

on Mobile Computing, 2013, 12(7):1308-1320.

- [7] Yung Liang Lai, Jehn Ruey Jiang. A genetic algorithm for data mule path planning in wireless sensor networks[J]. Appl Math Inf Sci, 2013,7(1):413-419.
- [8] Krishnanand K N, Ghose D. A glowworm swarm optimization based multi-robot sytem for signal source localization[J]. Design and Control of Intel. Robotic Systems, 2009,177(7):49-68.
- [9] 周永权,黄正新,刘洪霞. 求解 TSP 问题的离散型萤火虫群优化算法[J]. 电子学报, 2012,40(6):1164-1170.
- [10] Cook W. Concorde TSP solver [EB/OL]. (2014-06-02). [2015-07-19]. <http://www.math.uwaterloo.ca/tsp/concorde.html>.
- [11] Yuan Bo, Orlowska M, Sadiq S. On the optimal robot routing problem in wireless censor networks[J]. IEEE Trans on Konowledge and Date Engineering, 2007,19(9):1252-1261.
- [12] 彭硕,欧阳艾嘉,乐光学,等. 求解高维函数的改进萤火虫群优化算法 [J]. 计算机应用, 2013, 33(8):2253-2256.
- [13] 吴斌,崔志勇,倪卫红. 具有混合群智能行为的萤火虫群优化算法研究 [J]. 计算机科学, 2012, 39(5):198-200.

作者简介:

俸皓 男, (1978-), 博士研究生. 研究方向为无线传感器网络、移动计算、嵌入式实时软件等.

E-mail: fengh@guet.edu.cn.

罗蕾 女, (1967-), 教授, 博士生导师. 研究方向为移动计算、嵌入式基础软件研究等.

王勇 男, (1964-), 博士, 教授. 研究方向为智能计算、泛在网研究及应用、计算机网络技术.

董荣胜 男, (1965-), 教授, CCF 高级会员. 研究方向为无线传感器网络、网络可靠性、形式化技术、协议工程.

(上接第 46 页)

作者简介:

黄小康 男, (1992-), 硕士研究生. 研究方向为电路与系统. E-mail: hxk9122@gmail.com.

杜慧敏 女, (1966-), 博士, 教授. 研究方向为计算机体系结

构、计算机图形、大规模集成电路的研究.

李涛 男, (1954-), 博士, 特聘外籍教授. 研究方向为计算机体系结构、计算机图形学、大规模集成电路.

周佳佳 女, (1989-), 硕士研究生. 研究方向为数字集成电路.