

一种无线传感器网络中目标移动轨迹算法*

马寅^{1,2,3}, 王汝传^{1,2,3}, 孙力娟^{1,2,3}, 黄海平^{1,2,3+}

¹(南京邮电大学 计算机学院, 江苏 南京 210003)

²(南京邮电大学 江苏省无线传感网高技术研究重点实验室, 江苏 南京 210003)

³(南京邮电大学 宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210003)

Target Moving Path Algorithm in Wireless Sensor Networks

MA Yin^{1,2,3}, WANG Ru-Chuan^{1,2,3}, SUN Li-Juan^{1,2,3}, HUANG Hai-Ping^{1,2,3+}

¹(College of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

²(Jiangsu High Technology Research Key Laboratory for Wireless Sensor Networks, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

³(Key Laboratory of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology of Ministry of Education, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

+ Corresponding author: E-mail: hhp@njupt.edu.cn

Ma Y, Wang RC, Sun LJ, Huang HP. Target moving path algorithm in wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2011, 22(Suppl. (1)): 32-39. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/11004.htm>

Abstract: Wireless sensor networks are widely used to monitor various kinds of events that happened in the sensing area. On the contrary, in order to avoid being detected, intelligent mobile targets are exerting themselves to seek paths with the least exposure passing the sensing area. Looking at the issue of intelligent moving targets seeking the appropriate moving path, the study analyzed the defects of existing moving path algorithms and proposed the AFMP (Angle First Moving Path) algorithm that generates a moving path via choosing the appropriate direction. Theoretical analysis and simulation results illustrate that the AFMP algorithm does not require global node information and isomorphic sensing radius of nodes. Also, it has a lower sensitivity when compared to the node deployment density and distribution. Therefore, the algorithm is especially suitable for the case when only local node information is known. Moreover, the complexity of the algorithm is lower than that of the Voronoi algorithm and the ideal grid algorithm.

Key words: wireless sensor network; moving path; barrier coverage

摘要: 无线传感器网络一般用于监控传感区域中发生的各种事件;在对立面上,智能移动目标着力于寻找曝光量尽可能低的轨迹来通过传感区域,以免被监测到。针对智能移动目标寻找合适移动轨迹的问题,分析了目前已有的

* 基金项目: 国家自然科学基金(60973139, 61003039, 61003236); 江苏省科技支撑计划(工业)(BE2010197, BE2010198); 江苏省现代服务业发展专项资金; 江苏省高校自然科学基金基础研究项目(10KJB520013, 10KJB520014); 高校科研成果产业化推进工程项目(JH10-14); 江苏省博士后基金(20090451240, 20090451241); 江苏高校科技创新计划项目(CX09B-153Z, CX10B-197Z, CX10B-200Z); 江苏省六大高峰人才项目(2008118); 江苏省计算机信息处理技术重点实验室基金(KJS1022)

收稿时间: 2011-05-02; 定稿时间: 2011-07-29

移动轨迹算法的不足,提出了一种通过选择合适前进方向来生成移动轨迹的 AFMP(angle first moving path)算法.理论分析与仿真结果表明,AFMP 算法无需全局节点信息,对节点的感知半径无同构要求,对节点部署密度和分布有较低的敏感度,特别适用于只知节点局部信息的情况且算法复杂度也低于 Voronoi 算法和理想网格算法.

关键词: 无线传感器网络;移动轨迹;栅栏覆盖

无线传感器网络发展迅猛,已广泛应用于军事侦查、环境监控、健康监测以及工业自动化等等.在监测区域中,节点通过传感器探测来确定目标的存在性^[1].在对立面上,移动目标寻找尽可能的安全轨迹来减少“曝光”的可能性.比如,它可能在传感节点尚未覆盖的区域内选择移动轨迹等.

移动轨迹的研究也被称为栅栏覆盖(barrier coverage)^[2,3],目前的研究包括基于全局节点信息和基于局部节点信息两类,主要利用网格(grid)划分^[4]和 Voronoi 划分^[5]策略来选择路径的下一位置点集合,然后依据各自给出的路径风险程度定义来最优地选择下一位置点,使得移动目标沿着一条“曝光”尽可能最低的轨迹到达终点^[6].

文献[4]提出了一种基于全局节点信息采用网格划分的移动轨迹算法,移动目标穿越区域时沿着划分好的网格边前进.但该算法复杂度高,且实际情况中,移动目标不可能提前获取传感区域内所有传感节点具体分布情况.文献[5]讨论了一种基于局部节点信息采用 Voronoi 图划分的穿越算法,随着移动目标前进,在 Voronoi 图中加入新感知的传感节点并更新 Voronoi 图顶点优先级数.该算法在节点分布不均匀或节点数量较小时生成的穿越路径,与理想路径相差较大.文献[7]在文献[4]的基础上进行了改进,但计算复杂度仍然较高.文献[8]对文献[5]进行了改进,但未能摆脱 Voronoi 图的局限性.且上述文献中的节点均未考虑节点异构的情况.因此,本文提出了以角度为优先的新型算法,能够以较小的代价生成移动轨迹,并支持异构节点情况.

本文第 1 节给出问题描述及相关定义.第 2 节详细描述算法流程.第 3 节通过仿真实验验证了算法,并对比同类算法.文章最后得出结论,并介绍下一步研究计划.

1 相关定义

本文提及的无线传感器网络基于以下假设:

- (1) 无线传感区域 F 内部署了 n 个传感器节点, $S_i \in S, i=1,2,\dots,n$, 其感知半径为 R_{s_i} .
- (2) 移动目标 O 能在发现半径 $R_d(R_d > R_{s_i})$ 内发现传感器节点 S_i 的存在及其感知半径 R_{s_i} .
- (3) 移动目标 O 在无线传感区域内,从起点 $p(t_s)$ 以均匀速度向终点 $p(t_e)$ 前进.

定义 1(智能移动目标 O). 具有移动能力,能合理规划出最佳穿越传感区域移动轨迹、降低自身被传感网络探测可能性的目标(下文简称移动目标).移动目标与传感器节点相比功能更强大:无需担心能耗问题、信号传输问题等.移动目标可能是具有一定智能算法的机器或者人远程遥控下的军事武器等.当然,移动目标还可能会拥有某种设备以使传感网络瘫痪,从而破坏式地穿越网络.例如,破坏部分传感器节点,又或者是屏蔽节点与节点之间的通信等.由于破坏式穿越网络会明显暴露移动目标自身坐标范围等,本文中的移动目标不具备此种破坏型设备.

定义 2(发现概率 S). 一般地,由于传感器节点的理论或物理特性不同,需要建立大量不同的复杂模型来表示其感知能力.但由于存在共性是感知能力随着距离的增加而降低,结合文献[5,9]和实际情况,可定义无线传感器节点 s 对在 q 点的移动目标 O 的发现概率:

$$S(s, q) = \frac{\lambda}{[d(s, q)]^k} \quad (1)$$

其中, $d(s, q)$ 是传感器节点 s 与点 q 的二维平面上的欧几里德距离,正常数 λ 与 k 是与技术和环境相关的参数.

定义 3(轨迹长度 Γ). 当移动目标 O 在区域 F 内沿轨迹 $p(t)$ 从点 $p(t_1)$ 到点 $p(t_2)$ 时,所有相邻点的二维欧几里德距离之和,即轨迹长度:

$$\Gamma(p(t), t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \left| \frac{dp(t)}{dt} \right| dt \quad (2)$$

其中, t 表示时间.

定义 4(曝光强度 I). 为了定量描述感知区域内移动目标 O “曝光”的程度,本文采用了文献[4]中提出的全局感知区域强度 I_A (all-sensor field intensity):

$$I_A(F, q) = \sum_i^n S(s_i, q) \quad (3)$$

和最近感知区域强度 I_C (closest-sensor field intensity):

$$\begin{cases} I_C(F, q) = S(S_{\min}, q) \\ S_{\min} = s_m \in S | d(s_m, q) \leq d(s, q) \end{cases} \quad (4)$$

定义 5(轨迹暴露量 E). 对于轨迹暴露量(exposure)的计算需用移动目标在时间或空间上的暴露累计来表示,移动目标 O 在区域 F 内沿轨迹 $p(t)$ 从点 $p(t_1)$ 到点 $p(t_2)$, 目标在区间 $[t_1, t_2]$ 沿轨迹 $p(t)$ 的暴露定义 E 为

$$E(p(t), t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} I(F, p(t)) \left| \frac{d(p(t))}{dt} \right| dt \quad (5)$$

$I(F, p(t))$ 可以取 $I_A(F, p(t))$ 或 $I_C(F, p(t))$. 设 $p(t) = (x(t), y(t))$, 则

$$\left| \frac{d(p(t))}{dt} \right| = \sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} \right)^2} \quad (6)$$

进而, 轨迹暴露量 E 可表示为

$$E(p(t), t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} I(F, p(t)) \sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} \right)^2} dt \quad (7)$$

定义 6(探测概率 P). 对于装备全向探测器的移动目标 O 发现周围存在的传感节点 S_i 的能力, 我们采用文献[4]中的探测概率 $p(t, q)$ 来描述:

$$P(t, q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{d(t, q)^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

其中, σ 表示目标探测能力的强弱.

定义 7(发现半径 R_d). 当移动目标 O 对传感器节点发现的概率 $p(t, q)$ 超过给定的阈值时, 移动目标判定发现节点^[9]. 能够探测传感器节点的范围定义为发现半径 R_d .

定义 8(前进方向 α). 移动目标 O 在沿轨迹 $p(t)$ 前进时在某一点的前进方向, 定义为其与坐标系 Y 轴的夹角, 如图 1 所示.

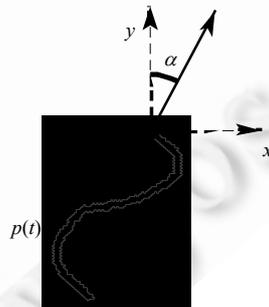


Fig.1 Illustration of direction of moving target O

图 1 移动目标 O 前进方向示意图

定义 9(移动轨迹的优劣评价标准). 第一, 移动目标 O 在传感区域内的时间越长, “曝光”越大. 若速度一定, 即穿越路径长度 l 越短越好, 那么穿越区域所用的时间也就越少, 可以降低移动目标 O 被传感器节点发现的风险, 即:

$$\begin{cases} \min \Gamma(p(t), t_1, t_2) \\ \text{S.T. } p(t) \subset E \end{cases} \quad (9)$$

第二,智能目标 O 的曝光量 E 越低越好,这样,在穿越区域时被网络探测到的可能性也就越低,即:

$$\begin{cases} \min E(p(t), t_1, t_2) \\ \text{S.T. } p(t) \subset E \end{cases} \quad (10)$$

式(9)和式(10)难以同时满足,本文提出的 AFMP 算法生成的移动轨迹 $p(t)$ 在尽可能满足式(9)的前提下,可以降低曝光量 E .

2 移动轨迹 AFMP 算法

在传感区域 F 中,设起始点 $p(t_s)$ 的坐标为 $(0,0)$,且已知终点 $p(t_e)$ 的坐标.如图 2 所示,在传感区域 F 内,移动目标 O 沿路径 $p(t)$ 前进,前进方向为 α ,步长为 λ .由于受物理条件限制,移动目标 O 只能探测到发现半径 R_d 内的节点信息.

对于移动目标 O 轨迹 $p(t)$ 上下一点的选择,文献[3]的选取集是网格上的点,文献[7]的选取集是 Voronoi 图的顶点.本文中主要侧重考虑的目标前进方向,在方向确定的基础上,计算下一点的坐标.

在图 2 中,移动目标 O 的前进方向为 α_1 ,已发现传感节点 S_2 及感知范围 R_{s_2} ,以及新增传感节点 S_1 及感知范围 R_{s_1} .由于 S_1, S_2 均未影响移动目标 O 的前进方向,因此其前进方向不变.由于移动目标 O 只能感知传感区域 F 中的局部信息,因此传感节点 S_3 此时没有被移动目标感知到.在图 3 中,移动目标 O 发现新增传感节点 S_3 及传感半径 R_{s_3} ,若目标 O 继续沿节点 α_1 前进,会被 S_3 探测发现到.于是目标 O 的前进方向更改为

$$\alpha_2 = \arctan\left(\frac{y_{s_3} - y_o}{x_{s_3} - x_o}\right) - \arcsin\left(\frac{R_{s_3}}{\sqrt{(x_{s_3} - x_o)^2 + (y_{s_3} - y_o)^2}}\right) \quad (11)$$

沿 α_2 方向是目标 O 利用已知节点信息到达目的地且避开传感器的较佳方案.

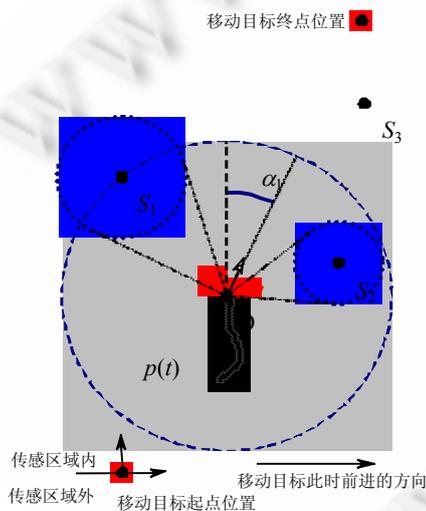


Fig.2 Analysis on direction of moving target O (node S_1, S_2)

图 2 移动目标 O 前进方向分析(节点 S_1, S_2)

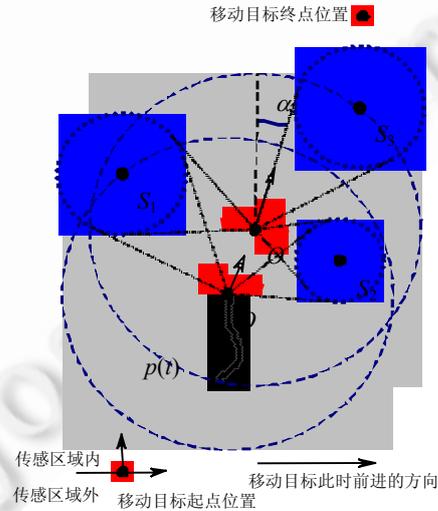


Fig.3 Analysis on direction of moving target O (node S_1, S_2, S_3)

图 3 移动目标 O 前进方向分析(节点 S_1, S_2, S_3)

根据前文所述的思想,本文提出了 AFMP 算法,其具体算法如下:

节点集 $DS = \{\text{移动目标 } O \text{ 在传感区域 } F \text{ 内已发现的活跃节点 } S_i(x_{s_i}, y_{s_i}) \text{ 及其传感半径 } R_{s_i}\}$.

移动目标方向影响集 $\Delta_{p(t)} = \{\text{移动目标 } O \text{ 在某位置受已知的局部节点信息影响的方向范围 } \delta_{s_i}\}$.

(1) 输入移动目标 O 起始点 $p(t_s)$ 的坐标 $(0,0)$, 目的点 $p(t_e)$ 的坐标 (x_{end}, y_{end}) , 传感区域边界, 前进步长 L , 感知半径为 R_d .

(2) 移动目标 O 将感知到的节点及其坐标和感知半径 R_{s_i} 加入节点集 DS 中.

(3) 移动目标 O 的坐标为 (x_o, y_o) . 若节点集 DS 中无传感器节点, 则移动目标前进方向为 $\alpha = \arctan \frac{y_{end} - y_o}{x_{end} - x_o}$, 更新移动目标 O 坐标为 $(x_o = x_o + l \cos \alpha, y_o = y_o + l \sin \alpha)$, 转 6). 若节点集 DS 中有传感器节点, 转 4).

(4) 取出此时节点集 DS 节点坐标 $S_i(x_{s_i}, y_{s_i})$ 及其感知半径 R_{s_i} , 计算

$$\begin{cases} \delta_{o-s_i} = \arctan \left(\frac{y_{s_i} - y_o}{x_{s_i} - x_o} \right) - \arcsin \left(\frac{R_{s_i}}{\sqrt{(x_{s_i} - x_o)^2 + (y_{s_i} - y_o)^2}} \right) \\ \delta'_{o-s_i} = \arctan \left(\frac{y_{s_i} - y_o}{x_{s_i} - x_o} \right) + \arcsin \left(\frac{R_{s_i}}{\sqrt{(x_{s_i} - x_o)^2 + (y_{s_i} - y_o)^2}} \right) \end{cases} \quad (12)$$

将 $\delta_{s_i} \in (\delta_{o-s_i}, \delta'_{o-s_i})$ 加入 $\Delta_{p(t)}$ 集. 计算 $\alpha = \arctan \frac{y_{end} - y_o}{x_{end} - x_o}$. 若 α 不在 $\Delta_{p(t)}$ 集中, 则更新移动目标 O 的坐标为 $(x_o = x_o + l \cos \alpha, y_o = y_o + l \sin \alpha)$, 转 6). 若 α 在 $\Delta_{p(t)}$ 集中, 转 5).

(5) 移动目标 O 在 $(-\pi, \pi)$ 集合内除去 $\Delta'_{p(t)}$ 集的范围得到集 $\Delta'_{p(t)}$, 在集 $\Delta'_{p(t)}$ 中取与 α 角度差最小的 δ' , 更新移动目标 O 的坐标为 $(x_o = x_o + l \cos \delta', y_o = y_o + l \sin \delta')$.

(6) 判断移动目标 O 的坐标是否为目的点 $p(t_e)$ 的坐标 (x_{end}, y_{end}) , 若已到达, 程序结束.

若未到达, 转 3).

3 仿真与分析

为了验证本算法的正确性和有效性, 初始仿真场景及相关参数设定如下: 传感区域 $F=800\text{m} \times 800\text{m}$, $\lambda=1, k=4$, 布置 50 个全向无线传感器节点, 半径 R_{s_i} 分别在 30m~50m 之间随机取值, 移动目标 O 匀速运动 $v=1\text{m/s}$. 假设移动目标 O 从无线传感区域 F 左边框上随机生成起点 $p(t_s)$ 出发, 搜索路径穿越感知区域 F 抵达目的地为右边框上随机生成的终点 $p(t_e)$, 以传感区域边界为限, 建立直角坐标系.

实验 1. 比较同一场景下, 移动目标 O 的感知半径 R_d 取值变化时, 对其移动轨迹的影响.

移动目标 O 的感知半径 R_d 决定在多大范围内探测到影响前进方向的无线传感器节点, 因此感知半径 R_d 大小的设定具有重要意义. 当 R_d 取值小于传感器节点感知半径时, 移动目标 O 将无法避免地被节点探测到, 此时的数据没有参考价值. 本实验中, 分节点部署稀疏和密集两种情况.

实验 1.1. 节点稀疏部署情况. 图 4 是传感区域 F 中 50 个无线传感器节点随机布置情况, 其中 4 条具有代表性的路径是 R_d 分别取传感器节点感知半径最大值 $\text{Max}(R_{s_i})$ 的 1 倍(50m)、1.5 倍(75m)、2 倍(100m)、2.5 倍(125m) 时而生成的. 表 1 中轨迹长度 I 和轨迹暴露量 E 的数值是 R_d 的取值在 50m~500m 之间 8 次实验的结果, 其中 $I(F, p(t))$ 取 $I_d(F, p(t))$.

从表 1 中的数据可以看出, 当 R_d 取值在 50m~125m 区间时, 轨迹长度 I 稳定在 $1190\text{m} \pm 10\text{m}$ 附近, 暴露量 E 随着 R_d 的增加有明显降低. 当 R_d 取值在 150m~250m 区间时, 轨迹长度 I 较上一个区间, 长度明显增大, 稳定在 $1220\text{m} \pm 10\text{m}$ 附近, 暴露量 E 随着 R_d 的增加也呈降低趋势. 当 R_d 取值为 500m 时, 轨迹长度 I 增加明显, 暴露量 E 有所降低. 从总体上来看, 当 R_d 增大时, 移动目标 O 能及早地发现节点信息并及时避让, 能降低轨迹暴露量; 但也可能导致轨迹 I 长度随之变长. 在本场景中, R_d 取值为传感器节点感知半径最大值 $\text{Max}(R_{s_i})$ 的 1.5 倍~2.5 倍较为合适.

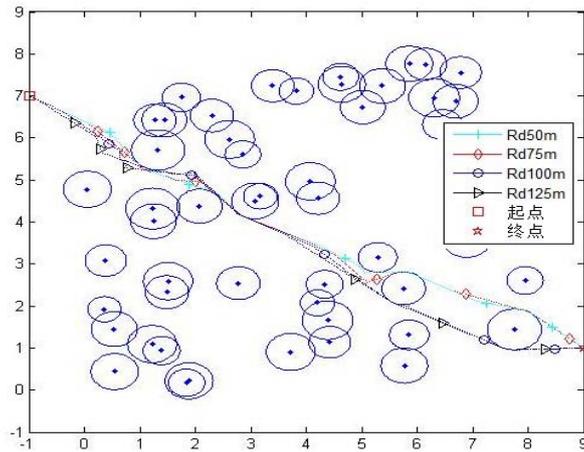


Fig.4 Typical paths with different R_d value in experiment 1.1
图 4 实验 1.1 中, R_d 不同取值时的典型轨迹

Table 1 Data of R_d path, length Γ and track exposure E in experiment 1.1
表 1 实验 1.1 中, R_d 、轨迹长度 Γ 和轨迹暴露量 E 数据

R_d (m)	轨迹长度 Γ (m)	轨迹暴露量 E
50	1 185	0.301 1
75	1 190	0.234 7
100	1 192	0.233 5
125	1 199	0.231 9
150	1 217	0.234 2
200	1 210	0.229 4
250	1 225	0.234 3
500	1 381	0.229 3

实验 1.2. 节点密集部署情况.图 5 是传感区域 F 中 100 个无线传感器节点随机布置情况.其他参数与实验 1.1 保持一致.在图 5 中,5 条具代表性路径是 R_d 分别取传感器节点感知半径最大值的 1 倍(50m)、1.5 倍(75m)、2.5 倍(125m)、6 倍(300m)、10 倍(500m)时生成的.表 2 中轨迹长度 Γ 和轨迹暴露量 E 的数值是 R_d 的取值在 50m~500m 之间 8 次实验的结果,其中 $I(F,p(t))$ 取 $I_A(F,p(t))$.

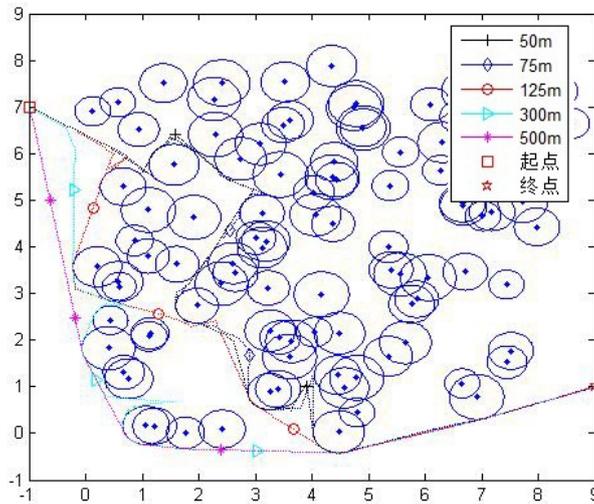


Fig.5 Typical paths with different R_d value in experiment 1.2
图 5 实验 1.2 中, R_d 不同取值时的典型轨迹

从表 2 中数据可以看出,当 R_d 取值在 50m~100m 区间时,轨迹长度 Γ 稳定在 2020m \pm 10m 附近,暴露量 E 随

着 R_d 的增加有降低趋势.当 R_d 取值在 125m~300m 区间时,轨迹长度 L 较上一个区间的长度略有下降,暴露量 E 随着 R_d 的增加呈降低趋势.当 R_d 取值为 500m 时,轨迹长度 L 和 E 暴露量均有所降低.从总体上来看,当 R_d 增大时,移动目标 O 能及早地发现节点信息并及时避让,能降低轨迹暴露量.在本场景中, R_d 取值为传感器节点感知半径最大值 $\text{Max}(R_{s_i})$ 的 2.5 倍以上较为合适.

Table 2 Data of R_d path, length L and track exposure E in experiment 1.2

表 2 实验 1.2 中 R_d 、轨迹长度 L 和轨迹暴露量 E 数据

R_d (m)	轨迹长度 L (m)	轨迹暴露量 E
50	2 027	0.795 3
75	2 013	0.794 7
100	2 029	0.781 6
125	1 905	0.675 4
150	1 976	0.654 2
200	1 981	0.648 8
300	1 934	0.541 9
500	1 776	0.441 4

综合实验 1.1 和实验 1.2 的数据,得出以下结论: R_d 的取值是影响 AFMP 算法生成轨迹优劣的重要因素.随着 R_d 的增加,轨迹暴露量 E 有降低趋势.但轨迹长度 L 与传感区域 F 中节点的具体部署有关.当节点部署较为稀疏时, R_d 取值为 $\text{Max}(R_{s_i}) \sim 3 \text{Max}(R_{s_i})$ 较为合适;当节点部署较为密集时, R_d 取值 $3 \text{Max}(R_{s_i})$ 以上较为合适.

实验 2. 在同一场景下,AFMP 算法对比 FDP 算法^[5]和理想 Grid 算法^[7].

由于 FDP 算法和理想 Grid 算法均要求无线传感器网络节点感知半径 R_{s_i} 相同, R_{s_i} 均取 50m.仿真场景及其他相关参数设定与实验 1.1 一致,移动目标 O 的感知半径 R_d 均取 100m.从图 6 和表 3 数据可知,基于全局信息的网格算法路径最优,曝光度也较低.与 FDP 算法相比,本文提出的算法在路径轨迹长度和曝光量上有了较大提升.综合考虑算法复杂度和实际情况,本文提出的算法具有一定的优势.

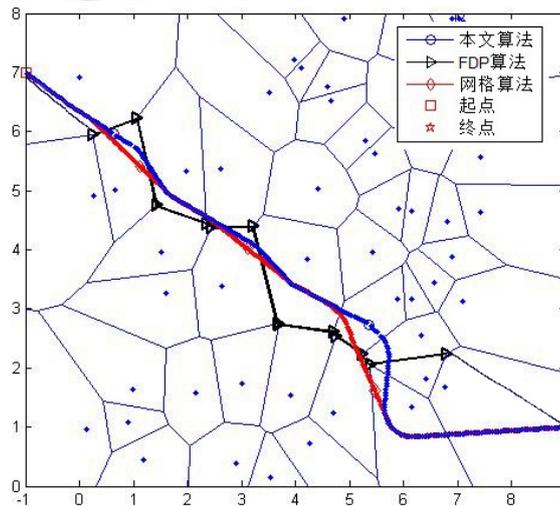


Fig.6 Illustration of paths generated by AFMP, FDP and Grid algorithm

图 6 AFMP 算法、FDP 算法和 Grid 算法生成的轨迹示意图

Table 3 Data comparison of the three algorithms

表 3 3 种算法数据对比

算法	轨迹长度 L (m)	轨迹暴露量 E
FDP	1 983	0.255 1
Grid	1 257	0.189 3
AFMP	1 278	0.194 8

4 总结

在无线传感器网络中,栅栏覆盖已成为覆盖研究的一个重要分支,在本文中转化为移动轨迹的生成问题.本文提出了一种新型算法,该算法优先考虑前进的方向.通过多次仿真实验可知,与已有算法相比,AFMP 算法支持异构节点,且在仅知节点局部信息的情况下,能够发现较好的移动轨迹.下一步的工作,将考虑具有无线传感器节点的探测方向具有方向性以及无线传感器网络中如何部署移动节点增加移动目标的曝光度.

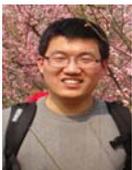
致谢 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的同行,尤其是江苏省无线传感网高技术研究重点实验室的各位同学和老师表示感谢.

References:

- [1] Meguerdichian S, Koushanfar F, Potkonjak M, Srivastava MB. Coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks. In: Bauer F, Cavendish D, eds. Proc. of the IEEE INFOCOM. Anchorage: IEEE Press, 2001. 1380–1387.
- [2] Santosh K, Lai TH, Anish A. Barrier coverage with wireless sensors. In: Proc. of the MobiCom 2005. Cologne, 2005. 284–298.
- [3] Chen A, Kumar S, Lai TH. Local barrier coverage in wireless sensor networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2010, 9(4):491–504.
- [4] Seapahn M, Farinaz K, Gang Q, Giacomino V, Miodrag P. Exposure in wireless sensor networks: Theory and practical solutions. ACM Journal of Wireless Networks, 2002,8(5):443–454.
- [5] Zhang WZ, Li ML, Wu MY. An algorithm for target traversing based on local Voronoi diagram. Journal of Software, 2007,18(5): 1246–1253 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1246.htm> [doi: 10.1360/jos181246]
- [6] Saipulla A, Westphal C, Liu, B, Wang J. Barrier coverage of line-based deployed wireless sensor networks. In: Proc. of the 28th IEEE Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2009). Rio de Janeiro, 2009. 19–25.
- [7] Wang B, Chua KC, Wang W, Srinivasan V. Worst and best information exposure paths in wireless sensor networks. In: Proc. of the MSN. 2005. 52–62.
- [8] Essaddi N, Hamdi M, Habib S, Boudriga N. An evolutionary approach for non-uniform coverage control in wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE Globecom 2010 Workshop on Advanced Sensor Integration Technology. Florida, 2010. 261–265.
- [9] Zhang H, Hou J. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, 2005,1(1-2):89–124.

附中文参考文献:

- [5] 张文哲,李明禄,伍民友.一种基于局部 Voronoi 图的目标穿越算法.软件学报,2007,18(5):1246–1253. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1246.htm> [doi: 10.1360/jos181246]



马寅(1986—),男,江苏泰兴人,硕士生,主要研究领域为无线传感器网络.



孙力娟(1963—),女,教授,博士生导师,主要研究领域为无线传感器网络,信息网络.



王汝传(1943—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机软件,计算机网络,信息安全.



黄海平(1981—),男,副教授,主要研究领域为无线传感器网络,信息安全.