

鱼群启发的水下传感器节点布置

夏娜^{1,2} 王长生¹ 郑榕³ 蒋建国^{1,2}

摘要 水下传感器网络 (Underwater sensor networks, UWSNs) 可用于海洋资源勘测、污染监控和辅助导航等领域, 已成为无线传感器网络方向的研究热点. 在开放式复杂的水下环境中监测目标具有高动态和不确定的特点, 节点如何根据环境和目标的变化自主调整位置, 以达到对监测目标的优化覆盖是一个关键问题. 本文描述了水下传感器节点布置问题, 定义了性能评价指标“事件集覆盖效能”, 并提出了一种鱼群启发的水下传感器节点布置算法, 通过模拟鱼群行为, 并结合拥挤度控制, 使节点自主趋向并覆盖事件, 同时实现节点分布密度与事件分布密度相匹配. 大量对比仿真实验结果表明该算法可以有效解决水下传感器节点布置问题, 并具有复杂度低、计算量小、收敛速度快和分布式可实现的优点.

关键词 水下传感器网络, 节点布置, 覆盖效能, 鱼群, 拥挤度

DOI 10.3724/SP.J.1004.2012.00295

Fish Swarm Inspired Underwater Sensor Deployment

XIA Na^{1,2} WANG Chang-Sheng¹ ZHENG Rong³ JIANG Jian-Guo^{1,2}

Abstract Underwater sensor networks (UWSNs) can be applied to sea resources reconnaissance, pollution monitoring, assistant navigation, etc., and they have become a hot field in wireless sensor networks. In open and complicated underwater environments, the monitored target is dynamic and uncertain. It is a key topic for sensors to adjust their positions according to the environment and targets, so as to cover the targets in an optimal manner. This paper defines the underwater sensor deployment problem and its performance evaluation metrics, and then presents a fish swarm inspired sensor deployment algorithm. Simulating the behavior of fish swarm and taking the crowd factor into account, the method can drive the sensors to cover almost all the events, and make the sensors density match the events density. Through extensive comparative simulations, we demonstrate that the proposed algorithm can solve the underwater sensor deployment problem effectively and it is be simple, fast in convergence, and realizable in distributed manner.

Key words Underwater sensor networks (UWSNs), sensor deployment, coverage efficiency, fish swarm, crowd factor

水下传感器网络 (Underwater sensor networks, UWSNs) 是由具有声学通信能力的传感器节点组成的水下监控系统. 由于可以广泛应用于海洋资源勘测、污染监控、辅助导航和战术监视等领域, UWSNs 已引起了各个国家和研究机构的关注^[1]. 近年来, 在无线传感器网络技术快速发展的基

础上^[2-5], 水下传感器网络的研究已涉及声学通信、网络协议、路由算法和定位跟踪等^[6-8], 但对于水下传感器节点布置的研究尚不完善. 水下传感器节点布置与陆地传感器节点布置相比具有特殊性: 因为洋流等因素的影响, 水下环境和监测目标动态性较强, 传感器节点可移动性好, 因此, 传感器节点如何根据环境和目标的变化自主调整位置, 以达到最优的监测质量是急需解决的问题.

1 现有水下传感器节点布置方法

现有的水下传感器节点布置方法可分为: 海底 (Sea-bottom) 和海洋 (Sea-column) 传感器节点布置.

在海底布置方法中, 节点被布置在海底二维平面上. 通常将监测区域划分成三角网格形式, 在栅格顶点布置节点, 并使用最少的节点实现对监测区域的覆盖. 文献 [9] 提出了一种检测融合的节点布置策略, 可降低传感器节点的冗余度, 在使用相同数量节点的情况下达到更大的覆盖范围. 由于水下环境的立体特征, 大部分应用需要传感器节点收集水下三维信息, 因此, 海底布置方法在这些应用中难以满足需求.

收稿日期 2010-11-18 录用日期 2011-09-22
Manuscript received November 18, 2010; accepted September 22, 2011

国家自然科学基金 (61100211), 美国国家科学基金 (CNS-0832084), 中央高校基本科研业务费专项资金 (2011HGZL0010), 中国博士后科学基金 (20110490084) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61100211), National Science Foundation of USA (CNS-0832084), Central High School Basic Research Foundation of China (2011HGZL0010), Postdoctoral Science Foundation of China (20110490084)

本文责任编辑 韩崇昭

Recommended by Associate Editor HAN Chong-Zhao

1. 合肥工业大学计算机与信息学院 合肥 230009 2. 安全关键工业测控技术教育部工程研究中心 合肥 230009 3. 休斯顿大学计算机学院 休斯顿 美国 77204

1. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, P.R. China 2. Engineering Research Center of Safety Critical Industrial Measurement and Control Technology, Hefei 230009, P.R. China 3. Department of Computer Science, University of Houston, Houston 77204, USA

在海洋布置方法中, 节点被布置在水下三维空间中, 以达到对监测区域的立体感知效果. 现有的海洋传感器节点布置方法主要包括两大类.

第一类是均匀覆盖需求 (Uniform coverage requirement) 的节点布置方法, 即传感器节点被均匀地布置在监测区域. 2006 年, Pompili 等^[10-11] 首次对水下传感器节点的三维布置进行研究, 提出了 Bottom-grid 算法, 即在海底三角网格节点布置的基础上, 通过调节节点在水下的深度, 形成三维节点布置方案, 达到用最少的节点无缝覆盖监测区域的目标. 该算法对节点深度的调节需要全局信息, 因此属集中式优化方法; 2009 年, Akkaya 等^[12] 在以上工作的基础上提出 Self-deployment 算法, 通过持续调整节点深度, 进一步减少了相邻节点之间的重复覆盖, 提高了对监测区域的覆盖率. 文献 [13-15] 面向均匀覆盖需求, 在网络出现覆盖漏洞或通信盲区时, 通过加入新节点或移动冗余节点, 提高网络对监测区域的覆盖率, 维持网络的连通性, 增强水下传感器网络的鲁棒性.

第二类是非均匀覆盖需求 (Non-uniform coverage requirement) 的节点布置方法, 即根据监测目标分布密度的差异非均匀地布置节点. 2007 年, Aitsaadi 等^[16] 在封闭式湖泊水质监测应用中, 针对污染物质的分布特性, 提出了 DDA (Differentiated deployment algorithm) 算法, 采用网状线表示法, 非均匀地布置节点, 实现对监测区域的差异覆盖. 该方法为集中式算法, 且仅适用于静态监测环境和目标; 2008 年, Koutsougeras 等^[17] 采用 SOM (Self organizing maps) 方法, 通过事件 (监测目标) 对节点的吸引作用, 使节点趋向于事件密度高的区域, 达到对事件的有效覆盖; 2010 年, Golen 等^[18] 通过求解极小极大博弈矩阵, 估计水下各子区域内事件出现的概率, 并据此计算各子区域应分配的节点数. 该方法未涉及具体的节点布置方案, 且为集中式算法, 复杂度较高, 难以实现.

在非均匀覆盖需求的节点布置方法中, 明确提出了“事件”的概念, 节点布置的目的不再是均匀覆盖监测区域, 而是覆盖事件, 并且使节点分布密度与事件分布密度尽可能达到一致, 即所谓非均匀布置节点, 此类节点布置方法更加实际有效, 同时也符合水下传感器网络稀疏性的特点, 但现有的这些方法不能完全满足水下传感器网络应用的需求, 主要存在以下问题: 1) 现有方法均为集中式优化方法, 难以通过节点分布式实现; 2) 主要针对确定的事件布置节点, 对于开放式水下环境中不确定事件, 难以动态调整节点布置以保障监测质量; 3) 尚未建立事件驱动的水下传感器节点布置的有效性能评价指标体系.

针对上述问题, 本文研究水下非均匀覆盖需求的传感器节点布置方法. 受鱼群系统运行模式的启发, 提出一种分布式可实现的水下传感器节点布置算法, 通过模拟鱼群觅食等行为, 使传感器节点自主趋向并覆盖事件, 同时结合拥挤度控制实现节点分布密度与事件分布密度相匹配. 引入熵理论构建了事件驱动的水下传感器节点布置性能评价指标.

2 鱼群启发的水下节点布置算法

本文提出一种鱼群启发的水下节点布置算法 (Fish swarm inspired underwater sensor deployment, FSSD). 以下具体介绍该算法.

2.1 问题描述

假设水下监测区域 A , 其中用户感兴趣的动态目标 e 称为事件, 事件集 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$, ($e_i \in A, i = 1, 2, \dots, m$). 设传感器节点集 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, 任意 s_j 具有感知、通信和移动能力: $\mathbf{B}_j = (r_j^s, r_j^c, l_j, \mathbf{P}_j)$, 其中, $r_j^s \geq 0, r_j^c \geq 0, l_j \geq 0$ ($1 \leq j \leq n$) 分别定量描述 s_j 的感知半径、通信半径、最大移动步长, \mathbf{P}_j 是节点的当前位置. 在同构网络中所有节点具有相同的属性, 即 $r_j^s = r^s, r_j^c = r^c, l_j = l$ ($1 \leq j \leq n$). 传感器节点可以感知事件, 并与邻居节点通信以获取邻居节点的状态信息 (覆盖事件数). 节点的任务是覆盖事件并收集事件的信息.

概率覆盖模型. 在水下监测区域 A 内, 对于 $\forall e_i \in A$, 节点 s_j 对 e_i 的覆盖概率为

$$p(e_i, s_j) = \begin{cases} 1, & d(e_i, s_j) \leq \hat{r} \\ e^{-\lambda[d(e_i, s_j) - \hat{r}]}, & \hat{r} < d(e_i, s_j) \leq r^s \\ 0, & d(e_i, s_j) > r^s \end{cases} \quad (1)$$

其中, $d(e_i, s_j)$ 为事件 e_i 和节点 s_j 的欧氏距离; \hat{r} 为节点的自信圆半径; λ 为感知衰减因子, 为节点的物理特性. 概率覆盖模型如图 1 所示.

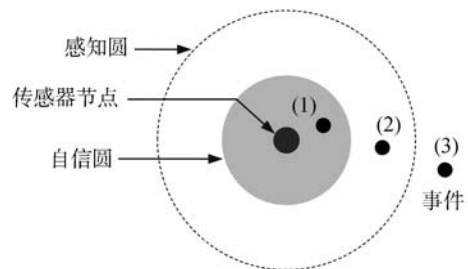


图 1 概率覆盖模型

Fig. 1 Probabilistic coverage model

定义 1 (覆盖度). 事件 e_i 的覆盖度定义为

$$D(e_i) = \sum_{s_j \in S} p(e_i, s_j) \quad (2)$$

定义 2 (有效覆盖度). 给定一种节点布置方案, 事件 e_i 的有效覆盖度定义为

$$C_A(e_i) = \frac{D(e_i)}{1 + \sum_{e_v \in E, e_v \neq e_i} I(d(e_i, e_v) \leq r^s)} \quad (3)$$

式中 $I(\cdot)$ 是一个指示函数, 当条件满足时等于 1, 否则为 0. $d(e_i, e_v)$ 为事件 e_i 和 e_v 的欧氏距离, 因此, $\sum_{e_v \in E, e_v \neq e_i} I(d(e_i, e_v) \leq r^s)$ 为事件 e_i 的邻近事件数.

水下节点布置问题就是在水下监测区域 A 内布置传感器节点, 使尽可能多的节点覆盖事件, 同时使所有事件的有效覆盖度趋于相等, 即节点分布密度与事件分布密度相匹配.

以下引入熵对事件的有效覆盖度的均衡性加以评价. 首先构造完备集条件:

$$C'_A(e_i) = \frac{C_A(e_i)}{\sum_{e_u \in E} C_A(e_u)} \quad (4)$$

定义 3 (事件集的覆盖熵). 定量描述事件的有效覆盖度的均衡性, 定义为

$$H_A(E) = \sum_{e_i \in E} C'_A(e_i) \log \frac{1}{C'_A(e_i)} \quad (5)$$

定义 4 (事件集的覆盖效能). 定义为

$$\eta(E) = \alpha \frac{H_A(E)}{\log m} + \beta \frac{\hat{n}}{n} \quad (6)$$

其中, $\alpha, \beta \in [0, 1]$, 且 $\alpha + \beta = 1$, \hat{n} 为覆盖事件的节点总数.

定理 1. 当所有节点都覆盖事件, 且所有事件的有效覆盖度都相等时, 事件集的覆盖效能 $\eta(E)$ 达到最大.

证明. 设随机矢量 $\mathbf{Y} = 1/\mathbf{C}'_A$, 即 $y_i = 1/C'_A(e_i)$. 因为 $\log \mathbf{Y}$ 在正实数集上是 \cap 型函数, 所以有:

$$E[\log \mathbf{Y}] \leq \log(E[\mathbf{Y}])$$

$$\sum_{i=1}^m C'_A(e_i) \log y_i \leq \log \sum_{i=1}^m C'_A(e_i) y_i$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m C'_A(e_i) \log \frac{1}{C'_A(e_i)} &\leq \\ \log \sum_{i=1}^m C'_A(e_i) \frac{1}{C'_A(e_i)} &= \log m \\ H_A(E) &\leq \log m \end{aligned}$$

当 $C'_A(e_i) = 1/m$, 即所有事件的有效覆盖度都相等时,

$$H_A(E) = \sum_{i=1}^m C'_A(e_i) \log m = \log m$$

若同时, 所有节点都覆盖事件, $\hat{n} = n$, 则

$$\eta(E) = \alpha \frac{H_A(E)}{\log m} + \beta \frac{\hat{n}}{n} = \alpha + \beta = 1$$

□

可见, $\eta(E)$ 可以作为水下节点布置的性能评价指标.

2.2 算法设计

人工鱼群算法 (Artificial fish swarm algorithm, AFSA)^[19-21] 是在模拟鱼群行为的基础上, 由李晓磊等在 2002 年提出的一种新型进化算法. 通过对鱼类活动习性的观察, 归纳出鱼类的三种典型行为: 觅食 (Prey)、追尾 (Follow) 和聚群 (Swarm). 觅食行为: 鱼随机游动以搜寻食物; 追尾行为: 当某条鱼发现该处食物丰富时, 其他鱼会迅速尾随而至; 聚群行为: 鱼在游动过程中会自然地聚集成群.

人工鱼群算法本身是一种集中式的优化搜索方法, 本文受人工鱼群系统运行模式的启发, 提出了一种分布式可实现的水下传感器节点布置算法 FSSD. 传感器节点相当于 AFSA 中的人工鱼, 而事件相当于食物, 传感器节点趋向于事件的过程就相当于人工鱼寻找食物的过程.

由第 2.1 节的定义可得节点 s_j 覆盖的事件数可表达为

$$N_{\text{event}}(s_j) = \sum_{e_i \in E} p(e_i, s_j) \quad (7)$$

定义 5 (允许的拥挤度). 监测区域中 A 节点 s_j 处允许的拥挤度定义为

$$\delta(s_j) = \bar{D} \times N_{\text{event}}(s_j) \quad (8)$$

式中, 常数 \bar{D} 为单个事件期望的覆盖度.

节点 s_j 感知范围内的节点数表示为: $N_{\text{near}}(s_j)$.

节点 s_j 的邻居节点集合和邻居节点数分别表示为

$$K(s_j) = \{s_k \mid d(s_j, s_k) \leq r_j^c, k = 1, 2, \dots, n\} \quad (9)$$

$$N_{\text{neighbor}}(s_j) = \text{card}(K(s_j)) \quad (10)$$

初始化: 将 n 个传感器节点随机撒布在水下监测区域 A 中. 节点 s_j 根据自身和邻居节点的状态执行以下操作:

步骤 1. $N_{\text{event}}(s_j) = 0$, 分为以下三种情况.

步骤 1.1. $N_{\text{neighbor}}(s_j) = 0$, 执行觅食行为.

在最大移动步长 l_j 内, 随机移动到新位置 P'_j ,

$$P'_j = P_j + \text{rand}(l_j)\mathbf{T} \quad (11)$$

$\text{rand}(l_j)$ 表示 0 到 l_j 之间的随机数, \mathbf{T} 为任意单位向量. 若 $N_{\text{event}}(s_j)$ 增大, 则觅食成功; 反之觅食失败.

步骤 1.2. $N_{\text{neighbor}}(s_j) > 0$, 执行追尾行为.

判断最优邻居节点 s^* ,

$$s^* = \arg \max_{s_k \in K(s_j)} \{N_{\text{event}}(s_k)\},$$

若 s_j 发现 s^* 覆盖的事件较多, 且 s^* 处不太拥挤, 即 $N_{\text{event}}(s^*) \geq N_{\text{event}}(s_j)$, 且 $N_{\text{near}}(s^*) < \delta(s^*)$, 则向 s^* 移动一步,

$$P'_j = P_j + \tilde{l}_j \frac{(P^* - P_j)}{d(s_j, s^*)} \quad (12)$$

$$\tilde{l}_j = \begin{cases} \frac{1}{2}d(s_j, s^*), & \frac{1}{2}d(s_j, s^*) < l_j \\ l_j, & \text{否则} \end{cases} \quad (13)$$

其中, P^* 为 s^* 的位置, \tilde{l}_j 为移动步长.

若 $N_{\text{event}}(s_j)$ 增大, 则追尾成功, 反之追尾失败.

步骤 1.3. $N_{\text{neighbor}}(s_j) > 1$, 执行聚群行为.

确定邻居节点中心 s_c 的位置:

$$P_c = \frac{1}{N_{\text{neighbor}}(s_j)} \sum_{s_k \in K(s_j)} P_k \quad (14)$$

$$N_{\text{event}}(s_c) = \frac{1}{N_{\text{neighbor}}(s_j)} \sum_{s_k \in K(s_j)} N_{\text{event}}(s_k) \quad (15)$$

$$\delta(s_c) = \bar{D} \times N_{\text{event}}(s_c) \quad (16)$$

$$N_{\text{near}}(s_c) = \frac{1}{N_{\text{neighbor}}(s_j)} \sum_{s_k \in K(s_j)} N_{\text{near}}(s_k) \quad (17)$$

若 s_j 发现 s_c 处事件较多, 且不太拥挤, 即 $N_{\text{event}}(s_c) \geq N_{\text{event}}(s_j)$, 且 $N_{\text{near}}(s_c) < \delta(s_c)$, 则向 s_c 移动一步,

$$P'_j = P_j + \tilde{l}_j \frac{(P_c - P_j)}{d(s_j, s_c)} \quad (18)$$

$$\tilde{l}_j = \begin{cases} \frac{1}{2}d(s_j, s_c), & \frac{1}{2}d(s_j, s_c) < l_j \\ l_j, & \text{否则} \end{cases} \quad (19)$$

若 $N_{\text{event}}(s_j)$ 增大, 则聚群成功, 反之聚群失败.

步骤 2. $N_{\text{event}}(s_j) > 0$, 节点向所覆盖事件的中心移动, 此后, 按步骤 1 的三种情况执行.

2.3 FSSD 算法描述

基于以上讨论, 给出完整的鱼群启发的水下传感器节点布置算法, 如算法 1 所示.

算法 1. FSSD 算法描述

Input: Sensing range r^s , communication range r^c , maximal step length l , the current prey number N_{prey} , the maximal prey number N_{max} , the maximal moving number I

Output: the coordinate sensors in surveillance field

1. $S \leftarrow$ Randomly deploy sensors in underwater surveillance field;
2. **for** $step \leftarrow 1$ to I **do**
3. $N_{\text{event}}(s_j) \leftarrow \text{detect1}(s_j)$ /* detect events covered by s_j */;
4. **if** $N_{\text{event}}(s_j) > 0$ **then**
5. move towards the center of covered events;
6. **end**
7. $N_{\text{neighbor}}(s_j) \leftarrow \text{detect2}(s_j)$ /* detect neighbors of s_j */;
8. $N_{\text{near}}(s_j) \leftarrow \text{detect3}(s_j)$ /* detect near sensors of s_j */;
9. **if** $N_{\text{neighbor}}(s_j) > 0$ **then**
10. find the best neighbor s^* ;
11. find the center of neighbors s_c ;
12. **if** $N_{\text{event}}(s^*) > N_{\text{event}}(s_j)$ and $N_{\text{near}}(s^*) < \delta(s^*)$ **then**
13. move towards s^* ; /* follow */;
14. **else if** $N_{\text{event}}(s_c) > N_{\text{event}}(s_j)$ and $N_{\text{near}}(s_c) < \delta(s_c)$ **then**
15. move towards s_c ; /* swarm */;
16. **else**
17. **for** $N_{\text{prey}} \leftarrow 1$ to N_{max} **do** /* prey */;
18. move randomly;
19. **if** $N_{\text{event}}(s'_j) > N_{\text{event}}(s_j)$ **then break**;
20. **end**
21. **end**
22. **else**
23. **for** $N_{\text{prey}} \leftarrow 1$ to N_{max} **do** /* prey */;
24. move randomly;
25. **if** $N_{\text{event}}(s'_j) > N_{\text{event}}(s_j)$ **then break**;
26. **end**
27. **end**
28. **end**

3 性能分析

采用本文 FSSD 算法对海洋 (3D) 节点布置进行了多组 Monte Carlo 仿真实验. 由于现有水下节点布置算法均为集中式优化方法, 而本文算法是分布式算法, 因此, 对它们进行实验比较意义不大, 但我们仍采用文献 [17] 的 SOM 算法与本文算法进

行实验结果的比较, 以验证本文算法的性能. 本文算法的参数设置和实验参数如表 1 所示. 算法性能的评价指标采用第 2.1 节提出的事件集的覆盖效能 $\eta(E)$, 以及算法的收敛速度. 评价指标 $\eta(E)$ 中, $\alpha = \beta = 0.5$.

表 1 参数设置
Table 1 Parameters setting

r^s	r^c	l	\bar{D}	N_{\max}	I
50	100	15	1	5	50

在 $200\text{ m} \times 200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 的海洋监测区域内进行了 3 组实验. 实验 1: 40 个事件随机撒布, 布置 6 个传感器节点; 实验 2: 40 个事件 T 型不均匀撒布, 布置 6 个传感器节点; 实验 3: 40 个事件线型不均匀撒布, 布置 6 个传感器节点.

分别采用 SOM 和 FSSD 算法实现传感器节点的布置, 算法运行结果如图 3~5 所示. 黑色方块表

示事件, 灰色球体表示节点的三维感知范围 (球心为节点位置). 可见, FSSD 算法不仅实现了所有节点覆盖事件, 而且节点分布密度与事件分布密度达到了较好的匹配. 图 6 给出了三组实验中两种算法运行过程中事件集覆盖效能 $\eta(E)$ 的进化比较, 可见 FSSD 算法不仅达到了较高的覆盖效能, 而且节点经过少数几次移动就达到了对事件的优化覆盖, 收敛速度较快. 更为关键的是 FSSD 是分布式算法, 可通过节点自主运行实现, 而 SOM 算法是集中式优化方法, 可实现性差.

表 2 详细列出了上述实验统计结果. 在每组实验中程序运行 20 次, 记录最优的事件集覆盖效能, 并统计出平均覆盖效能和平均运行时间. 平均运行时间表示的是平均每个节点 50 次移动的计算耗时, 计算平台为 Intel Core 2 CPU 2.0 GHz, 1 GB 内存. 可见, 在 3 组实验中平均覆盖效能 $\eta(E)$ 分别达到了 0.9634, 0.9535 和 0.9847; 同时算法程序计算量小, 耗时短, 适合在传感器节点上实现.

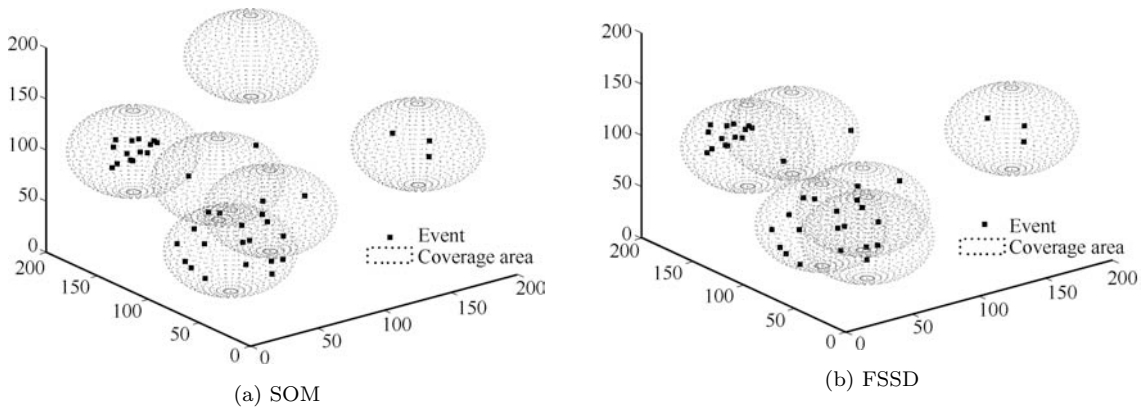


图 3 海洋事件随机分布
Fig. 3 Events distributed randomly

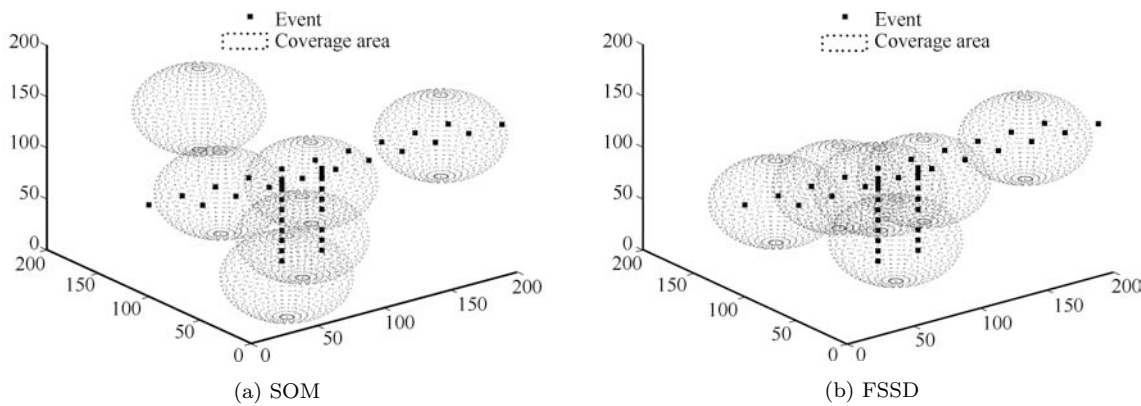


图 4 海洋事件 T 型不均匀分布
Fig. 4 Events distributed non-uniformly in T-type

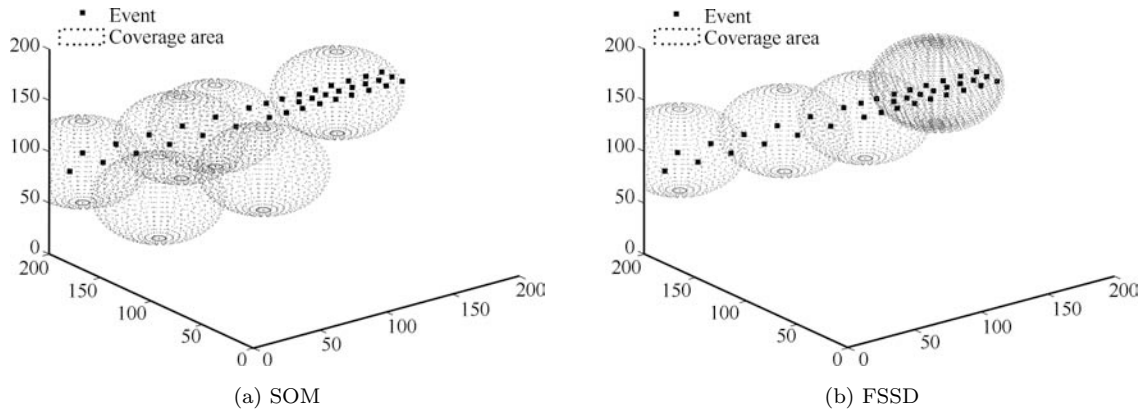


图 5 海洋事件线型不均匀分布

Fig. 5 Events distributed non-uniformly in line-type

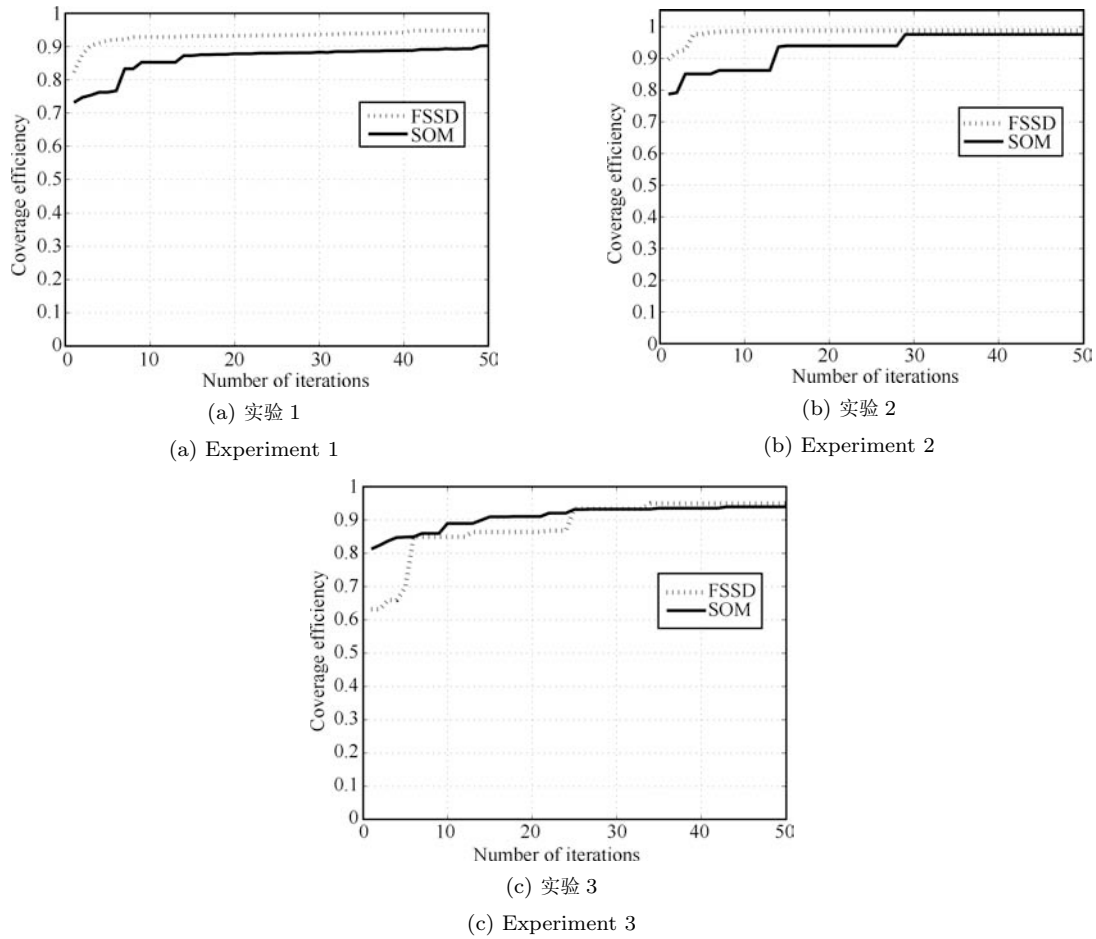


图 6 3 组实验中两种方法覆盖效能 $\eta(E)$ 的进化过程比较

Fig. 6 $\eta(E)$ evolving comparison for two methods in three sets of experiments

表 2 实验统计结果

Table 2 The statistic results of experiments

实验分组	实验 1: 随机分布	实验 2: T 型不均匀分布	实验 3: 线型不均匀分布
最优覆盖效能 $\eta^*(E)$	0.9707	0.9708	0.9860
平均覆盖效能 $\bar{\eta}(E)$	0.9634	0.9535	0.9847
平均运行时间 (ms)	0.0921	0.1003	0.1012

本文 FSSD 算法的收敛性主要受视野 (节点的感知半径 r^s) 和步长 (最大移动步长 l) 参数的影响。视野对算法中各行行为都有影响, 它的变化对收敛性能的影响也比较复杂。当视野较小时, 节点的觅食行为和随机移动比较明显; 视野较大时, 节点的追尾和聚群行为成为主导, 节点就越容易发现全局极值并收敛, 因此, 本文算法中的 r^s 为节点的实际感知半径最大值。步长是另一个关键参数, 同样受节点实际移动能力的限制, 节点移动步长取最大移动步长 l 内的随机数或采用步长缩减策略进行取值, 可以使算法具有较好的收敛速度。

4 结论

本文研究了水下传感器节点布置问题, 定义了一种水下传感器节点布置的性能评价指标——事件集的覆盖效能, 它不仅反映了参与事件覆盖的节点总数, 而且通过熵描述了节点对事件覆盖的均衡性。受人工鱼群运行机制的启发, 提出了一种分布式可实现的水下节点布置算法 FSSD。该算法模拟鱼群的觅食、追尾和聚群行为, 使传感器节点自主地趋向于事件区域, 实现对事件的覆盖, 同时结合拥挤度控制实现节点分布密度与事件分布密度相匹配。大量对比仿真实验结果表明该算法应用于水下节点布置可达到较高的事件集覆盖效能, 而且算法复杂度低、计算量小、收敛速度较快。

本文提出的节点布置性能评价指标, 仅用于对算法运行结果进行评价, 不干预算法的运行。该指标越高, 意味着越多的节点参与对事件的覆盖, 同时事件集中每个事件的覆盖度越趋于相等, 此时事件集的覆盖率也就越高。

纵观传感器网络研究领域, 应用群智能 (Swarm intelligence) 理论解决网络层或交叉层的优化问题已经成为研究热点。文献 [22–24] 采用蚁群算法分别研究了陆地无线传感器网络中自组织、节点选择和簇头选择问题; 文献 [25–26] 基于粒子群算法设计了无线传感器网络中能量感知的成簇协议和簇头识别方法; 文献 [27] 基于遗传算法提出了一种最小化监测盲区的节点布置算法。本文首次引入鱼群算法的核心思想, 解决“水下”传感器网络中节点布置问题, 具有天然的一致性, 水下传感器节点趋向并覆盖事件的过程就相当于人工鱼寻找食物的过程, 仿真实验结果也证明了方法的有效性。作为下一步工作, 我们将完善 FSSD 算法收敛性的证明, 并在实际的水下环境中展开实验。

References

- 1 Akyildiz I F, Pompili D, Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges. *Ad Hoc Networks*, 2005, **3**(3): 257–279
- 2 Li Jian-Zhong, Gao Hong. Survey on sensor network research. *Journal of Computer Research and Development*, 2008, **45**(1): 1–15
(李建中, 高宏. 无线传感器网络的研究进展. *计算机研究与发展*, 2008, **45**(1): 1–15)
- 3 Liu Hui, Chai Zhi-Jie, Du Jun-Zhao, Wu Bo. Sensor re-deployment algorithm based on combined virtual forces in three dimensional space. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(6): 713–723
(刘惠, 柴志杰, 杜军朝, 武波. 基于组合虚拟力的传感器网络三维空间重部署算法研究. *自动化学报*, 2011, **37**(6): 713–723)
- 4 Fan Wei-Hong, Liu Yun-Hui, Zhou Dong-Xiang, Cai Xuan-Ping. Motion planning for self-organization of active sensor networks based on multi-robots. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(10): 1409–1416
(樊玮虹, 刘云辉, 周东翔, 蔡宣平. 基于机器人群的主动传感器网络自组织的运动规划. *自动化学报*, 2010, **36**(10): 1409–1416)
- 5 Niu Jian-Jun, Deng Zhi-Dong, Li Chao. Distributed scheduling approaches in wireless sensor network. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(5): 517–528
(牛建军, 邓志东, 李超. 无线传感器网络分布式调度方法研究. *自动化学报*, 2011, **37**(5): 517–528)
- 6 Underwater sensor networks lab [Online], available: <http://uwsn.engr.uconn.edu/usefullinks.html>, May 15, 2011
- 7 Akyildiz I F. Underwater acoustic sensor networks (UW-ASN) [Online], available: <http://www.ece.gatech.edu/research/labs/bwn/UWASN>, Dec 6, 2011
- 8 Guo Zhong-Wen, Luo Han-Jiang, Hong Feng, Yang Meng, Ni Ming-Xuan. Current progress and research issues in underwater sensor networks. *Journal of Computer Research and Development*, 2010, **47**(3): 377–389
(郭忠文, 罗汉江, 洪锋, 杨猛, 倪明选. 水下无线传感器网络的研究进展. *计算机研究与发展*, 2010, **47**(3): 377–389)
- 9 Huang Yan, Liang Wei, Yu Hai-Bin. A deployment strategy for effective coverage in underwater sensor networks. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2009, **31**(5): 1035–1039
(黄艳, 梁韡, 于海斌. 一种高效覆盖的水下传感器网络部署策略. *电子与信息学报*, 2009, **31**(5): 1035–1039)
- 10 Pompili D, Melodia T, Akyildiz I F. Deployment analysis in underwater acoustic wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Underwater Networks*. Los Angeles, USA: ACM, 2006. 48–55
- 11 Pompili D, Melodia T, Akyildiz I F. Three-dimensional and two-dimensional deployment analysis for underwater acoustic sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 2009, **7**(4): 778–790
- 12 Akkaya K, Newell A. Self-deployment of sensors for maximized coverage in underwater acoustic sensor networks. *Computer Communications*, 2009, **32**(7–10): 1233–1244
- 13 Liu B, Ren F Y, Lin C, Yang Y, Zeng R F, Wen H. The re-deployment issue in underwater sensor networks. In: *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference*. New Orleans, USA: IEEE, 2008. 5117–5122
- 14 Domingo M C. Optimal placement of wireless nodes in underwater wireless sensor networks with shadow zones. In: *Proceedings of the 2nd IFIP Wireless Days*. Paris, France: IEEE, 2009. 1–6
- 15 Zeng Bin, Zhong De-Huan, Yao Lu. Research of underwater mobile sensor network algorithm based on water flow. *Application Research of Computers*, 2010, **27**(10): 3926–3928
(曾斌, 钟德欢, 姚路. 考虑水流影响的水下传感器网络移动算法研究. *计算机应用研究*, 2010, **27**(10): 3926–3928)

- 16 Aitsaadi N, Achirt N, Boussetat K, Pujolle G. Differentiated underwater sensor network deployment. In: Proceedings of the IEEE Europe Oceans. Aberdeen, UK: IEEE, 2007. 1–6
- 17 Koutsougeras C, Liu Y, Zheng R. Event-driven sensor deployment using self-organizing maps. *International Journal of Sensor Networks*, 2008, **3**(3): 142–151
- 18 Golen E F, Mishra S, Shenoy N. An underwater sensor allocation scheme for a range dependent environment. *Computer Networks*, 2010, **54**(3): 404–415
- 19 Li Xiao-Lei, Shao Zhi-Jiang, Qian Ji-Xin. An optimizing method based on autonomous animats: fish-swarm algorithm. *Systems Engineering-Theory and Practice*, 2002, **22**(11): 32–38
(李晓磊, 邵之江, 钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法. *系统工程理论与实践*, 2002, **22**(11): 32–38)
- 20 Zhang Mei-Feng, Shao Cheng, Gan Yong, Li Mei-Juan. Hybrid artificial fish swarm optimization algorithm based on mutation operator and simulated annealing. *Acta Electronica Sinica*, 2006, **34**(8): 1381–1385
(张梅凤, 邵诚, 甘勇, 李梅娟. 基于变异算子与模拟退火混合的人工鱼群优化算法. *电子学报*, 2006, **34**(8): 1381–1385)
- 21 Li Xiao-Lei, Qian Ji-Xin. Studies on artificial fish swarm optimization algorithm based on decomposition and coordination techniques. *Journal of Circuits and Systems*, 2003, **8**(1): 1–6
(李晓磊, 钱积新. 基于分解协调的人工鱼群优化算法研究. *电路与系统学报*, 2003, **8**(1): 1–6)
- 22 Wang R, Liang Y, Ye G Q, Lu C X, Pan Q. Swarm intelligence for the self-organization of wireless sensor network. In: Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation. Vancouver, Canada: IEEE, 2006. 838–842
- 23 Xia N, Jiang J G, Qi M B, Yu C, Huang Y, Zhang Q. A WSN coalition formation algorithm based on ant colony with dual-negative feedback. In: Proceedings of the 7th International Conference on Computational Science. Beijing, China: Springer, 2007. 1139–1146
- 24 Su Miao, Qian Hai, Wang Xu-Fa. Ant colony-based double cluster-heads algorithm for wireless sensor networks. *Computer Engineering*, 2008, **34**(13): 174–176, 192
(苏淼, 钱海, 王煦法. 基于蚁群的无线传感器网络双簇头算法. *计算机工程*, 2008, **34**(13): 174–176, 192)
- 25 Latiff N M A, Tsimenidis C C, Sharif B S. Energy-aware clustering for wireless sensor networks using particle swarm optimization. In: Proceedings of the 18th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Athens, Greece: IEEE, 2007. 1–5
- 26 Tillet J, Rao R, Sahin F. Cluster-head identification in ad hoc sensor networks using particle swarm optimization. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Personal Wireless Communications. New Delhi, India: IEEE, 2002. 201–205
- 27 Xia N, Vu K, Zheng R. Sensor placement for minimum exposure in distributed active sensing networks. In: Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference. Miami, USA: IEEE, 2010. 1–6



夏娜 合肥工业大学计算机与信息学院副教授. 主要研究方向为无线传感器网络, 导航信息处理, 计算智能及应用. 本文通信作者.

E-mail: xiananawo@hfut.edu.cn

(**XIA Na** Associate professor at the School of Computer and Information, Hefei University of Technology. His research interest covers wireless sensor networks, navigation information processing, and computational intelligence and application. Corresponding author of this paper.)



王长生 合肥工业大学计算机与信息学院硕士研究生. 主要研究方向为水下传感器网络, 计算智能及应用.

E-mail: 3834620@163.com

(**WANG Chang-Sheng** Master student at the School of Computer and Information, Hefei University of Technology. His research interest covers underwater sensor networks, computational intelligence and application.)



郑榕 美国休斯顿大学副教授. 主要研究方向为网络监控和诊断, 信息物理系统, 序列学习和决策理论.

E-mail: rzheng@uh.edu

(**ZHENG Rong** Associate professor in the Department of Computer Science, University of Houston. Her research interest covers network monitoring and diagnosis, cyber physical systems, and sequential learning and decision theory.)



蒋建国 合肥工业大学计算机与信息学院教授. 主要研究方向为智能信息处理, 数字信号处理, 多智能体系统.

E-mail: jgjiang@hfut.edu.cn

(**JIANG Jian-Guo** Professor at the School of Computer and Information, Hefei University of Technology. His research interest covers intelligent information processing, digital signal processing, and multi-agent system.)