

基于虚拟力的传感器网络三维覆盖算法

党小超^{1,2}, 杨冬冬¹, 郝占军^{1,2*}

(1. 西北师范大学 计算机科学与工程学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省物联网工程研究中心, 兰州 730070)

(* 通信作者电子邮箱 zhanjunhao@126.com)

摘要:针对三维无线传感器网络中节点非均匀覆盖需求的问题,提出一种基于虚拟力的三维覆盖算法(3D-CAVF)。该算法是将虚拟力应用在无线传感器网络中实现节点布置,通过虚拟力和拥挤度控制,使节点能够自动覆盖事件,并且使节点和事件的密度呈现一种平衡的效果。在 Matlab 平台上进行仿真实验,将所提算法与基于人工势场的三维部署算法(APFA3D)、基于未知目标精确覆盖的三维部署算法(ECA3D)进行比较,在事件呈 T 型不均匀部署和线型不均匀部署两种情况下进行实验,所提算法的事件集覆盖效能比 APFA3D、ECA3D 算法有 3.6%、3.1% 的提高。仿真实验结果表明所提算法能够有效处理三维无线传感器网络中节点的布置问题。

关键词:无线传感器网络;三维覆盖;虚拟力;拥挤度控制;事件

中图分类号: TP393.3 **文献标志码:** A

Three-dimensional coverage algorithm based on virtual force in sensor network

DANG Xiaochao^{1,2}, YANG Dongdong¹, HAO Zhanjun^{1,2*}

(1. College of Computer Science and Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou Gansu 730070, China;

2. Gansu Province Internet of Things Engineering Research Center, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: To meet the requirement of non-uniform coverage of nodes, a Three-Dimensional Coverage Algorithm based on Virtual Force (3D-CAVF) in sensor network was introduced. In this algorithm the virtual force was applied in wireless sensor network to implement node arrangement. By the means of virtual force and the congestion degree control, the nodes could automatically cover the events, and then the nodes and density of events could present a balanced effect. According to the simulation experiment in Matlab, when the events are in T-shaped non-uniform arrangement and linear non-uniform arrangement, the efficiency of event set covering by the proposed algorithm is 3.6% and 3.1% higher than the APFA3D (Artificial Potential Field Algorithm in Three-Dimensional Space) and ECA3D (Exact Covering Algorithm in Three-Dimensional Space) respectively. The simulation results indicate that the proposed algorithm can arrange the nodes efficiently in three-dimensional wireless sensor networks.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); three-dimensional coverage; virtual force; congestion degree control; event

0 引言

现如今对于无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)^[1-2]的探索与使用已经是一个迅速发展的领域,再加上无线通信技术与电子技术的突飞猛进,促使费用低、能量消耗少、功能丰富的传感器的开发向占用空间更小,并使这些传感器的开发向通信方面发展。尽管无线传感器网络最开始是在军事方面使用,但现在其被研究和运用在许多不同的民用领域,如:车辆跟踪、环境监测、森林河畔监测、地震观测、生物医学或医疗应用以及建筑工程监理等。无线传感器网络拥有可移动的或者可静止的传感器节点,收集被监测地区的一些被感知对象的信息,并且要把这些信息传给网络拥有者。覆盖在无线传感器网络中一直非常受到关注,其与节能问题、连通性问题以及网络重组问题有关。它主要解决如何部署传感器节点实现充分有效覆盖,使服务区内的每个点至少得到一

个传感器节点的监控^[3-4]。

针对无线传感器网络中的覆盖问题,众多学者相继提出一系列的解决方案。于广州^[5]提出了一种覆盖算法,它是针对多类别目标的在线性规划的基础上实现的,此算法通过簇结构得到的全局覆盖集接近最优解;Ren等^[6]分析了4个虚拟力模型参数,然后选择4个评价因子(覆盖增量规模、迭代次数、覆盖效率、节点平均移动距离)评价这些虚拟力模型;衣晓等^[7]证明结合使用单重覆盖和多重覆盖能够有效解决边界区域的覆盖问题;Esnaashari等^[8]提出了一种自学习的部署策略,在没有任何传感器知道它的位置或与其他传感器的相对距离的网络区域指导移动传感器节点的方法;Wang等^[9]提出一种局部虚拟力的方法用来增强移动节点的覆盖效能。

1 相关工作

虚拟力算法(Virtual Force Algorithm, VFA)^[10]是节点随

收稿日期:2015-06-17;修回日期:2015-07-13。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61363059,61363058);西北师范大学青年教师科研能力提升计划项目(NWNU-LKQN-13-24)。

作者简介:党小超(1963-),男,陕西韩城人,教授,CCF会员,主要研究方向:计算机网络;杨冬冬(1991-),女,山东滨州人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络;郝占军(1979-),男,河北邢台人,讲师,硕士,CCF会员,主要研究方向:计算机网络、无线传感器网络。

机抛洒到监测区域后借助物理世界中的范德华力进行重新部署。当两个节点间的距离大于某值时,会产生引力拉近它们的距离,而当距离过近直到小于某一给定的值时,则会产生斥力,依此来调整两者之间的距离,使节点均匀地分布在目标区域。但VFA只适用于二维空间中节点的部署。针对三维空间的VFA3D(Virtual Force Algorithm in Three-Dimensional Space)和ECA3D(Exact Covering Algorithm in Three-Dimensional Space)^[11]相继被提出,算法中的节点能够根据目标区域的不同形态重新部署从而提高区域覆盖率,但它们为了实现完全覆盖使节点均匀地分布在目标区域中,都没有考虑到不同情况对覆盖程度的要求不同,比如要监测热带雨林中的红壤就没有必要监测砖红壤。本文研究了传感器节点在三维无线传感器网络中的非均匀覆盖需求的问题,提出了一种基于虚拟力的传感器网络三维覆盖算法(Three-Dimensional Coverage Algorithm based on Virtual Force in sensor network, 3D-CAVF),此算法将虚拟力应用在三维无线传感器网络中实现节点布置,并且使得节点和事件的散布密度达到互相匹配的目的。

2 基于虚拟力的传感器网络三维覆盖算法

2.1 虚拟力相关模型

为更好地理解本文算法,设计与虚拟力相关的节点覆盖模型,如图1~5所示分别呈现了节点受虚拟力影响最终覆盖事件的过程,黑色的圆点表示被监测的事件^[12],黑色球体表示随机撒入监测区域的传感器节点,箭头表示力的作用。

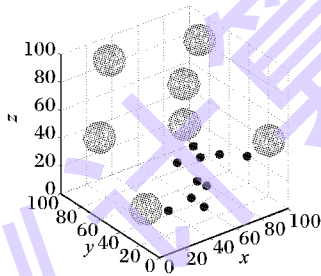


图1 初始状态的节点分布图

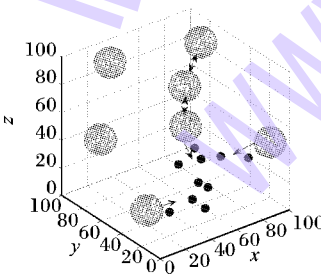


图2 初始状态的节点受力图

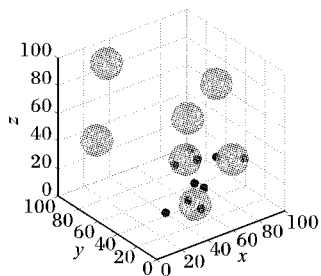


图3 受事件引力与节点间引力节点分布图

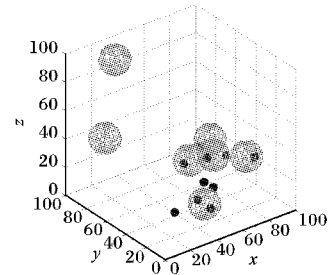


图4 受事件引力与节点间引力最终分布图

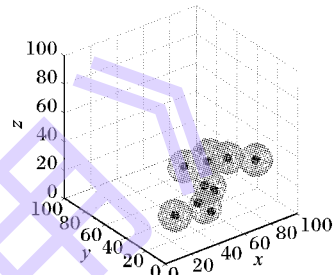


图5 最终效果图

2.2 3D-CAVF的实现

关于虚拟力公式模型的研究截至目前已有很多种,李亨等^[10]借助了范德华力,刘惠等^[13]使用了胡克定律以及库仑定律,本文则借鉴了关于万有引力的模型^[14]。以下是本文中涉及到的虚拟力的分析。在整个监测区域中节点受到的作用力有:节点间的相互作用力 F_{ij} ,事件对节点的吸引力 F_e 以及障碍物和节点之间的斥力 F_b 。

1) 节点间的相互作用力。

$$F_{ij} = \begin{cases} +\infty, & 0 < d_{ij} \leq k_{\min} \\ (k_1 m_i m_j) / (d_{ij}^{a_1}), & k_{\min} < d_{ij} < k_b \\ 0, & d_{ij} = k_b \\ (-k_2 m_i m_j) / (d_{ij}^{a_2}), & k_b < d_{ij} \leq R_c \\ 0, & d_{ij} > R_c \end{cases} \quad (1)$$

其中: k_1, k_2, a_1, a_2 都表示增益系数; m_i, m_j 表示节点质量因子(通常取单位1); d_{ij} 表示节点 i 和节点 j 的欧氏距离; k_{\min} 表示节点间的最小安全距离; k_b 表示节点间的平衡距离; R_c 表示节点的通信半径。当节点之间的距离小于最小安全距离时,节点之间具有无穷大的排斥力;当节点之间的距离在最小安全距离与平衡距离之间时,节点间具有排斥力;当节点之间的距离等于平衡距离时,达到平衡没有作用力;当节点之间的距离在平衡距离与通信半径之间时,节点相互吸引;当节点之间的距离比通信半径大的时候,节点间的作用力消失。

2) 事件对节点的吸引力。

$$F_e = \begin{cases} (-k_3 m_{e_i} m_j) / (d(e_i, j)^{a_e}), & j \in Q(E) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中: k_3, a_e 表示增益系数; $d(e_i, j)$ 表示节点 j 到事件 e_i 的欧氏距离; m_{e_i}, m_j 分别表示事件 e_i 与节点 j 的质量因子; $Q(E)$ 表示事件集 E 产生的引力所作用的区域。当节点在事件集 E 所产生的引力作用范围内时,节点就会被事件吸引。

3) 障碍物和节点之间的斥力。

$$F_b = \begin{cases} (k_4 m_i m_j) / (d_{ij}^{a_b}), & 0 < d_{ij} \leq L \\ 0, & d_{ij} > L \end{cases} \quad (3)$$

其中: k_4, a_b 是增益系数; L 是节点 i 到障碍物的欧氏距离。节

点在移动时可能会与障碍物发生碰撞,所以可在障碍物的一定范围内设置指示节点 j ,当节点运动到指示节点的范围内时,指示节点就会对其产生排斥力。

4) 节点所受虚拟力合力。

节点 i 所受到的虚拟力的合力如式(4)所示:

$$F_i = \begin{cases} F_e + \sum_{j \in S} F_{-ij} + F_b, & i \in Q(E) \cap i \notin E \\ \sum_{j \in S} F_{+ij}, & i \in Q(E) \cap i \in E \\ \sum_{j \in S} F_{-ij} + F_b, & i \notin Q(E) \end{cases} \quad (4)$$

其中 S 表示传感器节点集。当节点 i 在事件引力范围内并且 i 没有覆盖事件时,节点 i 受到事件的吸引力、节点间的吸引力以及障碍物的斥力;当节点 i 在事件引力范围内并且 i 覆盖事件时,节点 i 只受节点间的斥力影响;当节点 i 不在事件引力范围内时,节点 i 受到节点间的吸引力和障碍物的斥力的作用。

2.3 算法描述

1) 算法假设。

①任意传感器节点拥有感知能力、通信能力以及移动能力;

② $R_c = 2R_s, R_s$ 为感知半径;

③传感器节点能够感知它所覆盖的事件;

④可以测量得到监测区域中的节点个数 n ;

⑤节点的最大移动步长为 dir_{max} ;

⑥节点 i 覆盖的事件数为 $N_{event}(i)$;

⑦节点 i 的邻居节点数为 $N_{neighbor}(i)$;

⑧节点 i 处允许的拥挤度为 $\delta(i)$ ^[12];

2) 算法流程。

步骤1 在被监测的区域 D 中随机撒布 n 个传感器节点。通过判断自己的状态以及邻居节点的状态,节点 i 执行以下操作。

步骤2 当传感器节点 i 没有覆盖事件时分为两种情况。第一种情况是当此节点 i 没有邻居节点时,节点 i 会在最大移动步长 dir_{max} 内,随机移动到新位置 P_{ni} ;第二种情况是当此节点 i 有邻居节点时,节点 i 会在相应虚拟力作用下移动。而当传感器节点 i 覆盖了事件,节点 i 也会在相应虚拟力的作用下进行移动。伪代码如下:

```
For loop = 1:Maxloop; //循环迭代次数
    While  $N_{event}(i) = 0$ 
        Do If ( $N_{neighbor}(i) = 0$ )
            Then  $P_{ni} = P_i + random(dir_{max})O_r$ ;
            //在最大移动步长 $dir_{max}$ 内,随机移动到新位置 $P_{ni}$ 。
            //其中 $random(dir_{max})$ 表示0到 $dir_{max}$ 之间的随机数,
            // $O_r$ 表示任意单位向量。
        Else If ( $N_{neighbor}(i) > 0$ )
            Then 根据式(4)计算 $F_i$ ;
            While  $N_{event}(i) > 0$ 
                Do 根据式(4)计算 $F_i$ ;
    End For
```

步骤3 当传感器节点覆盖了所有事件,这些传感器节点就会在拥挤度的控制下进行更优化的部署,伪代码如下:

```
While  $N_{event}(i) < \delta(i)$ 
    Do 根据合力及移动距离重新部署节点。
```

2.4 算法分析

事件 e_i 被节点 j 所覆盖的概率由式(5)计算:

$$p(e_i, j) = \begin{cases} 1, & d(e_i, j) \leq \hat{r} \\ e^{-\lambda[d(e_i, j) - \hat{r}]}, & \hat{r} < d(e_i, j) \leq R_s \\ 0, & d(e_i, j) > R_s \end{cases} \quad (5)$$

其中: $d(e_i, j)$ 表示事件 e_i 与节点 j 的欧氏距离; \hat{r} 表示节点的自信圆半径^[12]; λ 表示感知衰减因子, λ 是节点的物理特性。

事件集 E 的覆盖度由式(6)计算:

$$C(E) = \sum_{e_i \in E} \sum_{j \in S} p(e_i, j) \quad (6)$$

其中 $\sum_{j \in S} p(e_i, j)$ 表示事件 e_i 的覆盖度。

假设在三维传感器网络中有一事件 $e_i(x_i, y_i, z_i)$,则这个事件与撒布在三维传感器网络中的一个节点 $j(x_j, y_j, z_j)$ 的欧氏距离是在不受虚拟力时的距离为:

$$d(e_i, j) = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2} \quad (7)$$

而在虚拟力的作用下,节点 j 会随虚拟力的合力大小和方向进行移动,因此事件 e_i 与节点 j 的欧氏距离也会发生相应的改变:

$$d'(e_i, j) = d(e_i, j) + dir_j \quad (8)$$

由式(8)减去式(7)得到:

$$d'(e_i, j) - d(e_i, j) = dir_j = \arctan(F_i) \times \frac{2}{\pi} \times dir_{max} \quad (9)$$

其中 $\arctan(F_i) \times (2/\pi) \times dir_{max}$ 是一个小于零的数^[13],所以得出 $d'(e_i, j) < d(e_i, j)$,因此 $d'(e_i, j)$ 小于 \hat{r} 的可能性更大,也就说明在虚拟力的作用下事件集的覆盖度更高。

3 仿真实验和性能分析

为了验证本文算法的性能,将本文算法与 APFA3D (Artificial Potential Field Algorithm in Three-Dimensional Space)^[11]和 ECA3D^[11]在 Matlab 中进行仿真比较。假设无线传感器网络部署在 $100\text{ m} \times 100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的立方体服务区内,在此监测服务区内分别对事件呈 T 型不均匀部署和事件呈线型不均匀部署展开实验,仿真参数如表 1 所示。

表 1 参数设置

参数名称	参数值
监测区域 D	$100\text{ m} \times 100\text{ m} \times 100\text{ m}$
事件个数 m	30
节点数目 n	6
通信半径 R_c	25 m
感知半径 R_s	15 m
节点移动单位距离的能耗	30 单位能量
d_{max}	$R_s \times 5\%$
k_{min}	8 m
k_b	17 m
α	0.5
β	0.5

假设无线传感器网络部署在 $100\text{ m} \times 100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的立方体服务区内,在此监测服务区内进行 2 组实验。

在实验 1 中将 30 个事件呈 T 型不均匀部署,7 个传感器节点随机撒布,实验如图 6 所示,其中黑色小圆点代表事件,黑色球体代表传感器节点在三维空间中的感知范围。

从图 6 中可以看出:APFA3D 虽然对事件密集的地方进

行了覆盖,但是还是存在覆盖漏洞;ECA3D 虽然较 APFA3D 覆盖程度高,但是并没有对事件密集的地方进行更好地覆盖;本文的 3D-CAVF 由于使用虚拟力并且将覆盖目标作为事件,不仅是传感器节点具有虚拟力,事件集同样具有虚拟力,在虚拟的引力和斥力的作用下,传感器节点与事件能够更好地匹配。本文的 3D-CAVF 较 APFA3D 与 ECA3D 有更高的覆盖

率,并且实现了传感器节点和事件的分布密度互相匹配。

在实验 2 中,将无线传感器网络部署在 $100\text{ m} \times 100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的立方体服务区中,在此监测服务区中将 30 个事件呈线型不均匀部署,并且随机撒布 7 个传感器节点,实验如图 7 所示,其中黑色小圆点代表事件,黑色球体代表传感器节点在三维空间中的感知范围。

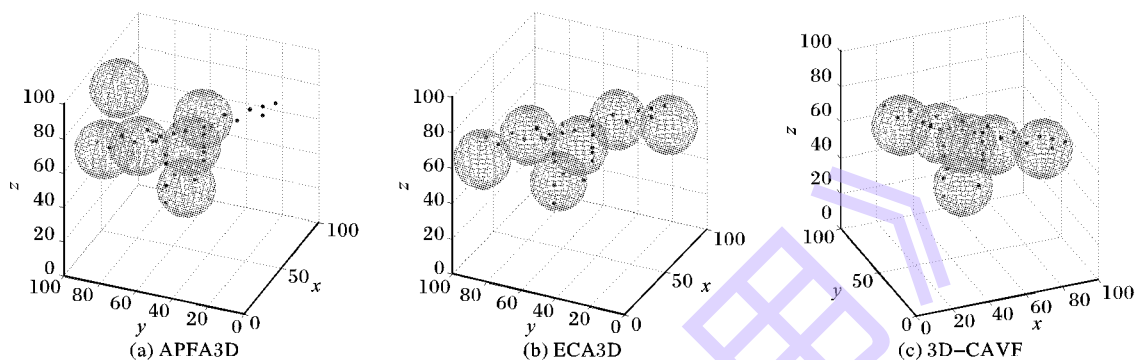


图6 事件T型不均匀分布时3种方法覆盖情况

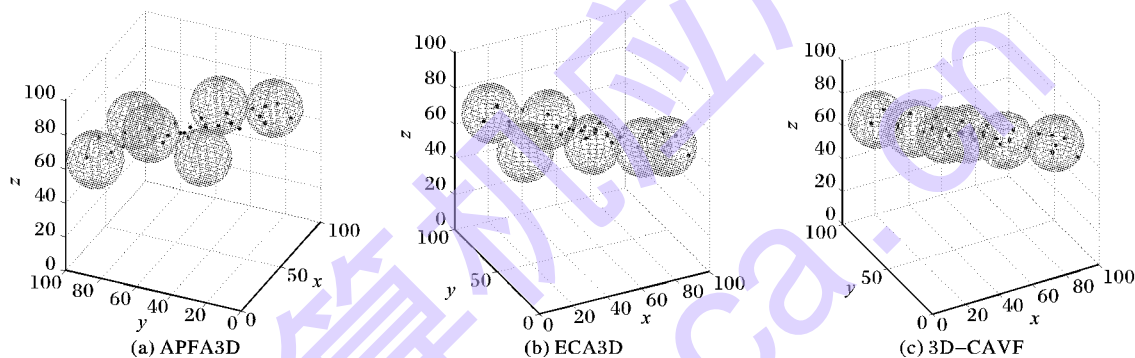


图7 事件线型不均匀分布时3种方法覆盖情况

从图7中可以看出:本文的 3D-CAVF 由于运用虚拟力和拥挤度进行控制,使得事件密度高的区域能够具有更高的覆盖度;虽然 ECA3D 较 APFA3D 能够达到更好地覆盖效果,但是 ECA3D 却不能根据事件的密集程度进行更好的覆盖。本文的 3D-CAVF 较 APFA3D 与 ECA3D 有更高的覆盖率,并且实现了传感器节点和事件的分布密度互相匹配。

本文使用文献[12]中提出的事件集覆盖效能 $\eta(E)$ 作为算法的性能评价指标。图8提供了2组实验中的 $\eta(E)$ 的比较。如图8所示,实验1事件呈T型不均匀分布,三种算法从一开始就表现明显,本文算法在第8次迭代就达到了最优覆盖效能,节点经少数几次运动就达到对事件的优化覆盖,收敛速度也较快,APFA3D 在第20次才达到最优,虽然 ECA3D 较 APFA3D 要好但也是在大约第15次时达到最优。实验2事件呈线型不均匀部署,在第20次迭代以前 APFA3D 较本文算法与 ECA3D 有明显优势且收敛速度快,从第25次迭代开始 ECA3D 赶超 APFA3D,从第20次开始本文算法表现出了优势。可以看出本文算法较其他两种算法具有较高的事件集覆盖效能并且算法的收敛速度也较其他两种算法快。

4 结语

本文研究了传感器网络的覆盖问题,针对传感器网络的非均匀覆盖需求,将虚拟力应用在无线传感器网络中实现三维覆盖。本文的 3D-CAVF 对无线传感器网络中的节点进行受力分析,根据不同的情况实现相应的部署。文中通过与

APFA3D 和 ECA3D 比较,验证了本文 3D-CAVF 较高的事件集覆盖效能。作为下一步的工作,我们将解决本文算法能量消耗的问题并在实际环境中对本文算法进行测试。

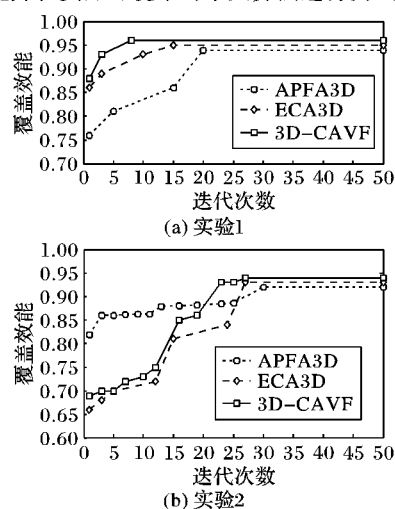


图8 两组实验中3种方法覆盖效能 $\eta(E)$ 的进化过程比较

参考文献:

- [1] REN X, WANG C. Multi-path routing protocol based on three-dimensional space and regional co-evolution in wireless sensor network [J]. Journal of Computer Applications, 2015, 35(3): 610-614. (任秀丽,王冲.基于三维空间与区域协同进化的无线传感网多路径路由协议[J].计算机应用,2015,35(3):610-614.)

- [2] DAI G, CHEN L, ZHOU B, *et al.* Coverage hole detection algorithm based on Voronoi diagram in wireless sensor network [J]. *Journal of Computer Applications*, 2015, 35(3): 620 – 623. (戴国勇, 陈麓屹, 周斌彬, 等. 基于 Voronoi 图的无线传感器网络覆盖空洞检测算法[J]. *计算机应用*, 2015, 35(3): 620 – 623.)
- [3] LIAO W, KAO Y, LI Y. A sensor deployment approach using glow-worm swarm optimization algorithm in wireless sensor networks [J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(10): 12180 – 12188.
- [4] LE D, OH H, YOON S. VirFID: a Virtual Force (VF)-based interest-driven moving phenomenon monitoring scheme using multiple mobile sensor nodes [J]. *Ad Hoc Networks*, 2015, 27: 112 – 132.
- [5] YU G. Multi-class target coverage algorithm based on programming in wireless sensor network [J]. *Computer Engineering*, 2014, 40(3): 152 – 162. (于广州. WSN 中基于线性规划的多类别目标覆盖算法[J]. *计算机工程*, 2014, 40(3): 152 – 162.)
- [6] REN X, CAI Z, LI Z, *et al.* Performance analysis of virtual force models in node deployment algorithm of WSN [C]// *Proceedings of the 2012 International Conference on Control Systems*. Berlin: Springer, 2012, 138: 1 – 9.
- [7] YI X, XUE X, GAO Y. Distributed multiple coverage study against boundary region based on probability perceptual model [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2013, 26(11): 1579 – 1583. (衣晓, 薛兴亮, 高玉章. 基于概率感知模型的边界区域分布式多重覆盖算法研究[J]. *传感技术学报*, 2013, 26(11): 1579 – 1583.)
- [8] ESNAASHARI M, MEYBODI M R. A cellular learning automata-based deployment strategy for mobile wireless sensor networks [J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2011, 71(7): 988 – 1001.
- [9] WANG Y, QIAN K. A coverage-enhancing algorithm based on local virtual force equilibrium for wireless sensor networks [C]// *Proceedings of the 4th International Conference on Computer Engineering and Networks*. Berlin: Springer, 2015: 1273 – 1280.
- [10] LI X, LI X. Research of three-dimensional deployment technology based on virtual force [J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(9): 2412 – 2425. (李享, 李轩涯. 基于虚拟力的三维部署技术研究[J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(9): 2412 – 2425.)
- [11] LI X. Three-dimensional disposition algorithm in aerial sensor network research [D]. Taiyuan: North University of China, 2013: 5 – 54. (李享. 基于空中传感网的三维部署研究[D]. 太原: 中北大学, 2013: 5 – 54.)
- [12] XIA N, WANG C, ZHENG R, *et al.* Fish swarm inspired underwater sensor deployment [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(2): 295 – 302. (夏娜, 王长生, 郑榕, 等. 鱼群启发的水下传感器节点布置[J]. *自动化学报*, 2012, 38(2): 295 – 302.)
- [13] LIU H, CHAI Z, DU J, *et al.* Sensor redeployment algorithm based on combined virtual forces in three dimensional space [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, 37(6): 713 – 723. (刘惠, 柴志杰, 杜军朝, 等. 基于组合虚拟力的传感器网络三维空间重部署算法研究[J]. *自动化学报*, 2011, 37(6): 713 – 723.)
- [14] CHEN H, WANG D, LI X. Precision deployment algorithm based on virtual force in mobile wireless sensor network [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2014, 50(1): 63 – 67. (陈杭, 王东, 李晓鸿. 一种基于虚拟力的移动传感器网络再部署算法[J]. *计算机工程与应用*, 2014, 50(1): 63 – 67.)

(上接第 3020 页)

- [3] YUAN Y, LI X, WANG Q. Cost optimization heuristics for grid workflows scheduling based on serial reduction [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2008, 45(2): 246 – 253. (苑迎春, 李小平, 王茜. 基于串规约的网格工作流费用优化方法[J]. *计算机研究与发展*, 2008, 45(2): 246 – 253.)
- [4] YUAN Y, LI X, WANG Q, *et al.* Grid workflows schedule based on priority rules [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(7): 1458 – 1462. (苑迎春, 李小平, 王茜等. 基于优先级规则的网格工作流调度[J]. *电子学报*, 2009, 37(7): 1458 – 1462.)
- [5] LIU C, ZHANG W, LUO Z, *et al.* Temporal consistency based heuristics for cost optimization in workflow scheduling [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2012, 49(6): 1323 – 1331. (刘灿灿, 张卫民, 骆志刚, 等. 基于时序一致的工作流费用优化方法[J]. *计算机研究与发展*, 2012, 49(6): 1323 – 1331.)
- [6] LIU C, ZHANG W, LUO Z, *et al.* Workflow cost optimization heuristics based on advanced priority rule [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2012, 49(7): 1593 – 1600. (刘灿灿, 张卫民, 骆志刚, 等. 基于改进优先级规则的工作流费用优化方法[J]. *计算机研究与发展*, 2012, 49(7): 1593 – 1600.)
- [7] CHEN S, NEPAL S, LIU R. Secure connectivity for intra-cloud and inter-cloud communication [C]// *Proceedings of the 40th International Conference on Parallel Processing Workshops*. Piscataway: IEEE, 2011: 154 – 159.
- [8] GUO H, CHEN Z, YU Y, *et al.* A communication aware DAG workflow cost optimization model and algorithm [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2015, 52(6): 1400 – 1408. (郭禾, 陈征, 于玉龙, 等. 带通信开销的 DAG 工作流费用优化模型与算法[J]. *计算机研究与发展*, 2015, 52(6): 1400 – 1408.)
- [9] TIAN G. Research on several problems of scheduling multiple DAGs sharing resources [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014: 36 – 45. (田国忠. 多 DAG 共享资源调度的若干问题研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014: 36 – 45.)
- [10] ZHAO H, SAKELLARIOU R. Scheduling multiple DAGs onto heterogeneous systems [C]// *Proceedings of the 20th International Parallel and Distributed Processing Symposium*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2006: 1 – 14.
- [11] TIAN G, XIAO C, XIE J. An cost optimization methods for scheduling concurrent multiple DAGs sharing heterogeneous resource [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(9): 1 – 6. (田国忠, 肖创柏, 谢军奇. 一种多 DAG 任务共享异构资源调度的费用优化方法[J]. *电子学报*, 2014, 42(9): 1 – 6.)
- [12] HONIG U, SCHIFFMANN W. A meta-algorithm for scheduling multiple DAGs in homogeneous system environments [C]// *Proceedings of the IEEE 18th IA STED International Conference on Parallel and Distributed Computing and System*. Piscataway: IEEE, 2006: 147 – 152.