

文章编号: 1001-0920(2012)09-1353-06

一种目标监测的移动传感器网络覆盖分布式优化算法

涂志亮, 王强, 沈毅

(哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对移动传感器网络中目标监测的节点部署问题, 为保证在无覆盖漏洞的同时减少覆盖冗余, 以六边形棋盘结构 (HTL) 为网络的目标部署结构, 提出一种基于群集控制的分布式部署算法. 该方法只需目标的相对方向和邻居节点的相对位置、速度信息, 可不依赖于通信. 仿真结果表明, 所提出的算法对静止和运动目标均有效, 与基于虚拟力的算法相比所需信息更少, 部署更均匀, 对 HTL 的逼近效果更好, 覆盖更优.

关键词: 群集算法; 移动传感器网络; 覆盖优化; 目标监测; 虚拟力

中图分类号: TP13

文献标志码: A

A distributed coverage optimization algorithm for target monitoring in mobile sensor network

TU Zhi-liang, WANG Qiang, SHEN Yi

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China. Correspondent: TU Zhi-liang, E-mail: hitztu@gmail.com)

Abstract: In this paper, a flocking based distributed deployment algorithm (FBDDA) for target of interest monitoring in mobile sensor network is proposed. To optimize the coverage, sensors are regulated to approach a hexagonal tessellation layout in which coverage redundancy is minimized and coverage hole is avoided. The control input can be computed by only the relative direction to the target, relative positions and velocities of 1-hop neighbors which can be obtained by the local measurement of sensor or 1-hop communicating. Simulation results show that FBDDA is effective for both stationary and mobile targets. Compared with a virtual force based deployment algorithm, FBDDA deploys sensors more uniformly and regulates the network to approach HTL better, hence obtains better quality of coverage.

Key words: flocking control; mobile sensor network; coverage optimization; target monitoring; virtual force

1 引言

近年来, MEMS (micro electro mechanical system) 的快速发展, 使得无线传感器网络 (WSNs) 的应用越来越广泛. WSNs 被广泛用于军事国防、环境监测、抢险救灾、反恐反恐、工农业生产、城市管理、生物医疗和危险区域远程控制等许多领域, 而移动传感器网络 (MSNs) 是一类由具备移动能力节点组成的特殊无线传感器网络, 从而具备感知、计算、通信和移动能力^[1]. 在一些危险场合和动态环境中, 如灾难现场紧急救援和建筑物内危险品泄漏等, 采用传统的静态无线传感器网络部署方法来实现将十分困难, 甚至失效; 而 MSNs 则能够利用其机动能力实现快速、自适应部署, 顺利解决问题, 而且 MEMS 的发展也使得移动节点结构越来越紧凑, 造价越来越低廉, 因此

MSNs 引起了人们的广泛关注. 节点利用 MSNs 的移动能力进行重部署, 能大大改善网络覆盖性能, 保证任务的顺利完成, 因此如何部署移动节点是 MSNs 的一个重要研究方向.

对于移动传感器, 初始时一般采用随机布撒或者人工部署. 随机布撒方式容易产生覆盖漏洞和覆盖冗余, 而人工部署则应用环境受限. 目前解决 MSNs 部署问题的方法主要分为集中式^[2-3]和分布式^[4-8]两种, 其中分布式方法主要分为基于计算几何法^[4]和基于虚拟力法^[5-7]两类. 由于集中式算法往往需知道网络的全局信息 (如位置信息), 使其应用受限, 而且不适合动态环境. 因此, 近几年的研究大多集中在分布式算法上.

现有研究中, 监测区大多是指一给定的有界区

收稿日期: 2011-03-21; 修回日期: 2011-07-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61174016); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目 (61021002).

作者简介: 涂志亮 (1983-), 男, 博士生, 从事无线传感器网络、群集控制的研究; 沈毅 (1965-), 男, 教授, 博士生导师, 从事控制系统故障诊断、导航制导与控制等研究.

域. Wang 等^[4]基于 Voronoi 图提出了 3 种分布式节点移动方法, 以实现监测区的无漏洞覆盖. Howard 等^[5]提出了人工势场法, 使得移动节点能够均匀地分布在带边界的监测区. 杨等^[6]提出了一种基于虚拟力的节点部署方法, 用以自动建立 Sink 节点到多 Target 之间的通信路径. 近年来, 人们提出的监测区大多是指以某监测目标 (TOI) 为中心的一定感兴趣的范围并非固定区域的情况而受到关注, 而且此 TOI 可以是静止的或者是运动的. 比如在战场监测、核泄漏监测和火场监测中, 节点需围绕指挥部、泄漏源、火源分布. Liu 等^[7]提出了基于胡克定律和库伦定律的虚拟力, 建立了双连接覆盖最大化的网络, 传感器围绕某静态中心点分布. 该方法虽然是分布式算法, 但要求全局坐标系, 需要 GPS 等定位技术的支持. Xu 等^[9]研究了移动传感器以一个兴趣点 (POI) 为覆盖中心的覆盖优化问题, 提出的分布式算法使得节点围绕 POI 分布在严格的六边形棋盘结构上, 从而最优化覆盖效率, 但是该方法同样需要 GPS 的支持, 而且 POI 是静止的. Garetto 等^[8]提出了基于虚拟力的单或多目标围捕式监测方法, 同样只适用于静态环境监测. 当 TOI 运动时, 如何不依赖 GPS 并分布式地配置节点, 依然是一个亟待解决的问题.

群集运动 (Flocking) 是指大量个体利用局部感知和简单规则达到整体协同运动^[10-11]. 在自然界中, Flocking 包括鱼群、鸟群和蚁群等. 群集控制理论已广泛应用于机器人、无人驾驶飞机和无人车等协作编队控制. 群集控制可以保证个体在聚合过程中不发生碰撞的同时, 使得个体间保持固定间距且速度协同一致^[10-11].

本文针对静止和运动 TOI 的无漏洞小冗余覆盖传感器网络部署问题, 在实验室现有移动节点模型基础上提出一种基于群集控制的分布式部署算法 (FBDDA). 该算法只需知道邻居节点的相对位置、速度以及 TOI 的相对方向 (可由摄像头或基于监测数据求梯度获取) 信息. 所需信息均可由传感器本地测量获取, 不依赖 GPS, 易于硬件实现.

2 预备知识及问题描述

2.1 图模型及 Laplacian 矩阵

一个传感器网络可用无向图 $G = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ 表示, 其中 $\mathcal{V} = \{1, 2, \dots, N\}$ 表示传感器节点集合, 边集 $\mathcal{E} \subseteq \{(i, j) | i, j \in \mathcal{V}, i \neq j\} \subset \mathcal{V}^2$. 若 $(i, j) \in \mathcal{E}$, 则称节点 j 为节点 i 的邻居. 节点 i 的邻居集为 $\mathcal{N}_i \triangleq \{j | (i, j) \in \mathcal{E}\}$. 本文采用布尔传感器模型, 即发生在 x_θ 处的事件 θ 被传感器 i 检测到的概率为

$$P(i, \theta) = \begin{cases} 1, & \|x_i - x_\theta\| \leq R_s; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

其中 R_s 为传感半径. 节点间依靠通信获取相对位置等信息时, $\mathcal{N}_i \triangleq \{j | \|x_i - x_j\| \leq R_c\}$, 其中 R_c 为通信半径. 在目标监测中, 节点还可通过自身传感设备 (如摄像头) 获取单跳邻居节点相对位置和速度等信息, 即邻居集还可定义为 $\mathcal{N}_i \triangleq \{j | \|x_i - x_j\| \leq r\}$, 其中 r 为观测半径, 一般有 $r \leq R_c$.

邻接矩阵 $A = [a_{ij}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$, $a_{ij} \neq 0 \Leftrightarrow (i, j) \in \mathcal{E}$. 对于无向图, A 为对称矩阵, $A = A^T$ ^[12]. 本文采用如下定义:

$$a_{ij}(x) = \begin{cases} \rho_h(\|x_i - x_j\|_\sigma / \|R_c\|_\sigma), & (i, j) \in \mathcal{E}; \\ 0, & i = j. \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\rho_h(z) = \begin{cases} 1, & z \in [0, h]; \\ \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\pi \frac{z-h}{1-h} \right) \right], & z \in [h, 1]; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3)$$

$\|z\|_\sigma = \frac{1}{\epsilon} (\sqrt{1 + \epsilon \|z\|^2} - 1)$ 为一可微函数.

Laplacian 矩阵 $L \triangleq \Delta - A$. 其中: A 为邻接矩阵, $\Delta = \text{diag} \left\{ \sum_{j=1}^N a_{1j}, \dots, \sum_{j=1}^N a_{Nj} \right\}$. 对于无向图, L 为半正定阵, 且总有特征值 $\lambda_1 = 0$, 对应特征向量 $\mathbf{1}_N = (1, \dots, 1)^T$, 且有

$$X^T \hat{L} X = \frac{1}{2} \sum_{(i,j) \in \mathcal{E}} a_{ij} \|x_i - x_j\|^2. \quad (4)$$

其中: $X = (x_1^T, x_2^T, \dots, x_N^T)^T \in \mathbf{R}^{nN}$, $\hat{L} = L \otimes I_n$, \otimes 表示 Kronecker 积.

2.2 势能函数

势能函数用来保持相邻节点的间距. 本文在文献 [10] 的基础上定义改进的势能函数如下:

$$v(X, d^*) = \sum_{i=1}^N v_i(X, d^*), \quad (5)$$

节点 i 的势能 $v_i = \sum_{j \neq i} v_{ij}$. 其中

$$v_{ij}(X, d^*) = \varphi_\alpha(\|x_i - x_j\|_\sigma, d^*), \quad (6)$$

$$\varphi_\alpha(z, d^*) = \int_{\|d^*\|_\sigma}^z \omega_\alpha(s, d^*) \phi_\alpha(s, d^*) ds, \quad (7)$$

d^* 为期望的节点间距; 而

$$\omega_\alpha(s, d^*) = \begin{cases} -\frac{M_1 - 1}{\|d^*\|_\sigma} (s - \|d^*\|_\sigma) + 1, & s \leq \|d^*\|_\sigma; \\ \frac{M_2 - 1}{\|R_c\|_\sigma - \|d^*\|_\sigma} (s - \|d^*\|_\sigma) + 1, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (8)$$

$$\phi_\alpha(z, d^*) = \frac{1}{2} \rho_h \left(\frac{z}{\|R_c\|_\sigma} \right) [(a+b)\sigma_1(z+c - \|d^*\|_\sigma) + a-b]. \quad (9)$$

其中: $\sigma_1(z) = \frac{z}{\sqrt{1+z^2}}$; $0 < a \leq b$; $c = \frac{|a-b|}{\sqrt{4ab}}$; $M_1, M_2 > 1$ 为放大系数. 显然, v 为光滑函数, 当 $\forall i, \forall j \in \mathcal{N}_i, \|x_j - x_i\|_2 = d^*$ 时, $v(X)$ 取到极小值, 但 X^* 不唯一.

2.3 问题描述

研究表明, 采用布尔传感器模型时, 当相邻的3个传感器组成全等三角形时, 覆盖面积最大且保证无覆盖漏洞^[13]. 此时, 若 $R_c \geq \sqrt{3}R_s$, 则最优节点间距 $d^* = \sqrt{3}R_s$; 否则, 为保证网络连通性, $d^* = R_c$. 扩展到多个节点, 假设需监测的 TOI 半径小于传感半径 R_s , 则形成如图 1 所示六边形棋盘结构 (HTL) 时, 网络覆盖面积最大且保证网络内部无覆盖漏洞 (图 1 中待覆盖区是以 TOI 为中心的灰色圆盘).

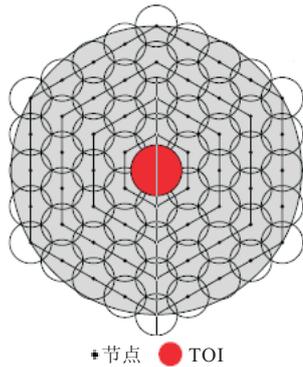


图 1 六边形棋盘结构部署

3 分布式控制算法

3.1 基本控制算法

设 N 个传感器的运动方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i, & i = 1, 2, \dots, N. \\ \dot{v}_i = u_i, \end{cases} \quad (10)$$

其中: $x_i, v_i, u_i \in \mathbf{R}^n$ 分别为节点 i 的位置、速度和简化控制输入, 且 v_i, u_i 有界. 为简化, 定义可导函数

$$\mathbf{1}_{\mathcal{N}_T}(i) = \rho_h(\|x_i - x_T\|_\sigma / \|r\|_\sigma), \quad h \rightarrow 1^-, \quad h \neq 1.$$

基于群集控制, 当 TOI 静止或匀速运动时, 提出如下控制算法:

$$\begin{aligned} u_i^\alpha = & -\omega_1 \nabla_{x_i}^T \sum_{j \in \mathcal{N}_i} v_{ji}(X, d^*) - \\ & \omega_T \nabla_{x_i}^T v_{iT}(x_i, x_T, d_T^*) + \omega_2 \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ji}(x)(v_j - v_i) + \\ & c_1(x_i, x_T) \cdot \vec{x}_{iT} + c_2 \mathbf{1}_{\mathcal{N}_T}(i)(v_T - v_i). \end{aligned} \quad (11)$$

其中: $\mathbf{x}_{iT} = \frac{x_T - x_i}{\|x_T - x_i\|}$ 为 TOI 的相对方向; x_T, v_T 为 TOI 的位置和速度; $\mathcal{N}_T \triangleq \{j | \|x_j - x_T\| \leq r\}$ 表示能直接观测到 TOI 相对位置及速度的节点集; d^* 和 d_T^* 为期望的节点间距及节点与 TOI 的间距; $\omega_1, \omega_T, \omega_2$ 和 c_2 为正常数值, 且 $\omega_T > \omega_1$. 对于 $c_1(x_i, x_T) \geq 0$ 的情况, 稍后将详细讨论.

该控制算法共包含 5 项. 前 2 项基于势能函数, 沿负梯度方向使网络节点间距及节点与 TOI 间距逐渐收敛到期望的 d^* 和 d_T^* ; 第 3 项为一致性项, 通过局部协同, 最后整体速度一致; 第 4 项为方向反馈, 使节点朝 TOI 运动, 保证网络的聚合, 从而确保无覆盖漏洞; 第 5 项为速度协同项, 能直接观测到 TOI 速度的节点快速协同与 TOI 的速度.

下面讨论系统的稳定性. 设 TOI 作匀速运动, 记 $\bar{x}_i = x_i - x_T, \bar{v}_i = v_i - v_T$, 则式 (10) 可重写为

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_i = \bar{v}_i, & i = 1, 2, \dots, N. \\ \dot{\bar{v}}_i = u_i, \end{cases} \quad (12)$$

令 $\bar{X} = (\bar{x}_1^T, \dots, \bar{x}_N^T)^T \in \mathbf{R}^{nN}, \bar{V} = (\bar{v}_1^T, \dots, \bar{v}_N^T)^T$, 则势能函数 $v(X) = v(\bar{X})$.

定理 1 对于由式 (10) 描述的系统, 采用控制律 (11) 时, 有以下结论:

- 1) 几乎对所有初始状态 (\bar{X}_0, \bar{V}_0) , 系统都渐近收敛到状态 $(\bar{X}^*, \mathbf{0}_{nN})$, 其中 \bar{X}^* 是 $U(\bar{X})$ 的局部极小值;
- 2) 所有节点速度渐近一致, $\bar{V} \rightarrow \mathbf{0}_{nN}$.

证明 定义如下 Lyapunov 函数:

$$H(\bar{X}, \bar{V}) = U(\bar{X}) + K(\bar{V}). \quad (13)$$

其中

$$\begin{aligned} U(\bar{X}) = & \frac{1}{2} \omega_1 v(\bar{X}) + \omega_T \sum_i v_{iT}(x_i, x_T, d_T^*) + c_1 \sum_i \|\bar{x}_i\|, \\ K(\bar{V}) = & \frac{1}{2} \sum_i \|\bar{v}_i\|^2. \end{aligned}$$

注意到 $\bar{x}_i \in \mathbf{R}^n \setminus Q_T, Q_T$ 为 $x_i - x_T$ 所占区域, 显然有原点 $O \in Q_T$, 故 $\|\bar{x}_i\|$ 在定义域上对时间可导. H 为正定函数, 对 H 关于时间求导, 得

$$\begin{aligned} \dot{H}(\bar{X}, \bar{V}) = & -\omega_2 \sum_i \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} \bar{v}_i^T (\bar{v}_i - \bar{v}_j) c_2 \mathbf{1}_{\mathcal{N}_T}(i) \sum_i \bar{v}_i^T \bar{v}_i = \\ & -\bar{V}^T ((c_2 W + \omega_2 L) \otimes I_n) \bar{V}, \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $W = \text{diag}\{\mathbf{1}_{\mathcal{N}_T}(1), \dots, \mathbf{1}_{\mathcal{N}_T}(N)\}$. 显然, L 为半正定矩阵. 对于 W , 因控制律中的方向反馈, 节点朝 TOI 运动, 故 $\exists t_1$, 当 $t \geq t_1$ 时, $W \neq \mathbf{0}_{N \times N}$ 为半正定阵, 从而 $\dot{H} \leq 0$, 即 H 为时间 t 的非增函数, 故 $H \leq H(t_0) \triangleq H_0$. 由式 (13) 得

$$\|\bar{x}_i\| \leq H_0 / c_1, \quad \sum_i \|\bar{v}_i\|^2 \leq 2H_0, \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

记水平集 $\Omega_l = \{(\bar{X}, \bar{V}) : H(\bar{X}, \bar{V}) \leq l\}$, 因为 $\dot{H} \leq 0$, 所以任何从 Ω_l 出发的轨迹始终落在 Ω_l 内, 从而 Ω_l 为一不变集, 且有

$$\|(\bar{X}, \bar{V})\|^2 \leq (l/c_1)^2 + 2l, \quad (15)$$

故 Ω_l 为有界集.

由 LaSalle 不变引理^[10], 所有轨迹均收敛到 $D = \{(\bar{X}, \bar{V}) \in \Omega_l : \dot{H} = 0\}$ 中的最大不变集. 由式(14)得

$$\bar{V}^T (L \otimes I_n) \bar{V} = 0, \quad \bar{V}^T (W \otimes I_n) \bar{V} = 0.$$

由前述讨论可知 $\bar{v}_1 = \bar{v}_2 = \dots = \bar{v}_N$, 且当 $t \geq t_1$ 时, $\exists i, \mathbf{1}_{N_T}(i) = 1$, 故 $\bar{v}_i = \mathbf{0}_n$, 从而 $\bar{V} = \mathbf{0}_{nN}$, 且 $K(\bar{V}) \rightarrow 0$, 因此系统渐近收敛到极值 $(\bar{X}^*, \mathbf{0}_{nN})$, 使得 $\nabla U(\bar{X}^*) = 0$.

并非所有 \bar{X}^* 均为极小值点, 因为从极大值点或鞍点出发的轨迹将无变化; 但是, 除极小值点外的其他点均为非稳定平衡点. 因此, 几乎所有轨迹均收敛到极小值点 \bar{X}^* . \square

3.2 自适应调整 c_1

由上述讨论知, $c_1 \rightarrow 0$ 时, 有

$$U(\bar{X}) \rightarrow \frac{1}{2} \omega_1 v(\bar{X}) + \omega_T \sum_i v_{iT}(x_i, x_T, d_T^*). \quad (16)$$

此时, 若 $U(\bar{X}^*) = U_{\min}$, 则邻居节点间距以及节点与 TOI 间距将会分别等于期望值 d^* 和 d_T^* ; 但是, c_1 过小时易出现覆盖漏洞^[10]. 因此, 对于静止或匀速运动的目标, 可自适应调整 c_1 , 即

$$c_1(t_c) = f(t_c, T_A, c_1(t_0)). \quad (17)$$

其中: f 为非增函数; t_c, T_A 为当前和达到平衡状态的时间. 实际上, T_A 可由经验预设或根据网络收敛状态推算得到. 本文取

$$f = c_1(t_0) \left(1 - \frac{t_c}{T_A}\right)^2.$$

3.3 网络结构进一步优化

综上所述, 由于 $U(\bar{X})$ 局部极小不唯一, 网络间距虽然可以收敛到期望间距, 但这并不足以保证网络结构为严格的 HTL. 结合前人的研究^[9,11], 在控制律 u^α 作用下整个网络能趋近 HTL, 但不能保证严格满足. 如图 2 所示, 期望网络为 2 层覆盖, 但本应位于第 2 层 l_2 上的节点 n_1 却位于第 3 层上, 而 l_2 上 x_2 处则缺少节点, 产生覆盖漏洞. 因此, 对于 TOI 静止和匀速运动的情况, 可进一步优化覆盖结构.

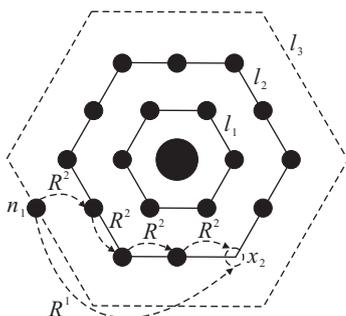


图 2 部分节点运动逼近 HTL

定义 1 假设节点 i 的 x 轴指向 TOI, 若邻居节点 j 的角度 $\angle j_i \in [-\pi, \pi]$, 则节点 j 称为 i 的前向邻居, 前向邻居集记为 \mathcal{N}_i^F .

设预设覆盖层数为 K 层, 能直接观测 TOI 并且距离其最近的节点为第 1 层, 则所处层数为

$$l^i = \min(l^{\mathcal{N}_i^F}) + 1, \quad (18)$$

其中 $l^{\mathcal{N}_i^F}$ 为节点 i 前向邻居所处的层数集.

当存在节点 $i, l^i > K$ 时, 必有覆盖漏洞产生. 针对此问题, 令冗余集 $C = \{i | l^i > K\}$, 漏洞集 Hol 为产生漏洞本应该有的节点的位置. 下面提出两种策略.

1) 轮转策略: 冗余集 C 中的节点逆(顺)时针沿网络外层转动, 逐一填补覆盖漏洞.

2) 接力策略: 通过无线通信建立漏洞集 Hol 到 C 的由网络边缘节点组成的最短通信链路. 链路上的节点采取接力方式向 Hol 运动, 即距离 Hol 最近的节点先移动填补漏洞, 链路上后续节点依次替代前一节点位置.

对于以上两种策略, 策略 1) 较策略 2) 简单, 但策略 2) 速度更快、负载更均衡. 图 2 中, 路径 R^1 和 R^2 分别为轮转和接力策略.

3.4 任意机动目标监测

以上讨论的均是基于目标 TOI 静止或匀速运动的情形. 对于目标机动性更高的情形, 描述如下: 当

$$\begin{cases} \dot{x}_T = v_T, \\ \dot{v}_T = \gamma(x_T, v_T) \end{cases} \quad (19)$$

时, 采用如下控制律:

$$u_i^\beta = u_i^\alpha + \mathbf{1}_{N_T}(i) \gamma(x_T, v_T). \quad (20)$$

控制律(20)是在 u_i^α 的基础上加入了目标加速度的反馈项, 但仅对于距离目标近, 且能直接观测到其加速度的节点此项才不为 0. 若 $\mathbf{1}_{N_T}(i) = 1, i = 1, 2, \dots, N$, 即所有节点均能获取目标加速度信息时, 通过同样的方法推导, 可得到以下结论.

定理 2 对于由式(10)描述的系统, 采用控制律(20)时, 有以下结论:

1) 几乎对于所有初始状态 (\bar{X}_0, \bar{V}_0) , 系统都能渐近地收敛到状态 $(\bar{X}^*, \mathbf{0}_{nN})$, 其中 \bar{X}^* 是 $U(\bar{X})$ 的局部极小值;

2) 所有节点速度渐近收敛到 v_T .

实际中, 对于 $\mathbf{1}_{N_T}(i) = 1 (i = 1, 2, \dots, N)$ 的要求, 利用第 1 层传感器的观测, 通过通信和坐标转换便可在全网获取 $\gamma(x_T, v_T)$, 但这会增加通信负载和时延, 只有网络规模不大且控制律更新频率低时, 该方法才是可行的. 这里仍取

$$\mathbf{1}_{N_T}(i) = \rho_h(\|x_i - x_T\|_\sigma / \|r\|_\sigma), \quad h \rightarrow 1^-, h \neq 1.$$

下文的仿真结果表明, 当只有部分节点获知 TOI 加速度时, 尽管速度未能严格一致, 但网络均匀程度依然能够得到很大改善.

4 仿真与分析

在 $[-20\text{ m}, 20\text{ m}]^2 \setminus \odot(x_T, 2)$ 中随机布撒 36 个节点, 其中 $\odot(x_T, 2)$ 表示由 TOI 为圆心在 x_T 处半径为 2 m 的圆柱. 采用如下参数: $d^* = 6\text{ m}$, $d_T^* = 4\text{ m}$, $R_s = \frac{6}{\sqrt{3}}\text{ m}$, $r = R_c = 2R_s$, 仿真步长 $\text{step} = 0.5\text{ s}$, 定义节点间距集 $\Xi = \{\|x_i - x_j\| \mid (i, j) \in \mathcal{E}\}$. 定义如下势能函数来评价节点间距与期望距离 d^* 的偏离程度:

$$F(X) = \frac{1}{(|\mathcal{E}(X)| + 1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (\|x_i - x_j\| - d^*)^2, \tag{21}$$

其中 $|\mathcal{E}(X)|$ 为 \mathcal{E} 所含边的个数.

4.1 TOI 静止

设置 $\omega_1 = 0.05, \omega_2 = 0.05, \omega_T = 0.25, c_1(t_0) = 1, \epsilon = 0.1, a = b = 5, h = 0.2, v_{\max} = 0.2\text{ m/s}, u_{\max} = 1\text{ m/s}^2$.

文献 [7] 提出了一种基于胡克定律和库伦定律虚拟力的分布式部署算法 (VFBMC). 该算法需要知道 TOI 以及邻居节点的位置信息, 依赖 GPS 和通信, 而 FBDDA 所需要的所有信息均可由自身测量获取. 图 3 为 FBDDA 与 VFBMC 的覆盖效果和性能比较. 由图 3 可以看到, FBDDA 得到的覆盖结果基本上为期望的三层严格 HTL, 节点间距以及节点与 TOI 间距都与 d^* 和 d_T^* 的偏差很小, 且 $\forall z \in \Xi, z \in [5.99\text{ m}, 6.01\text{ m}]$, 而对于 VFBMC, $z \in [5.86\text{ m}, 6.37\text{ m}]$. 与 VFBMC 相比, 显然 FBDDA 能够快速收敛, 覆盖更优的部署. 这是因为 FBDDA 采用方向反馈且自适应调整 c_1 , 网络结构更能趋近严格 HTL.

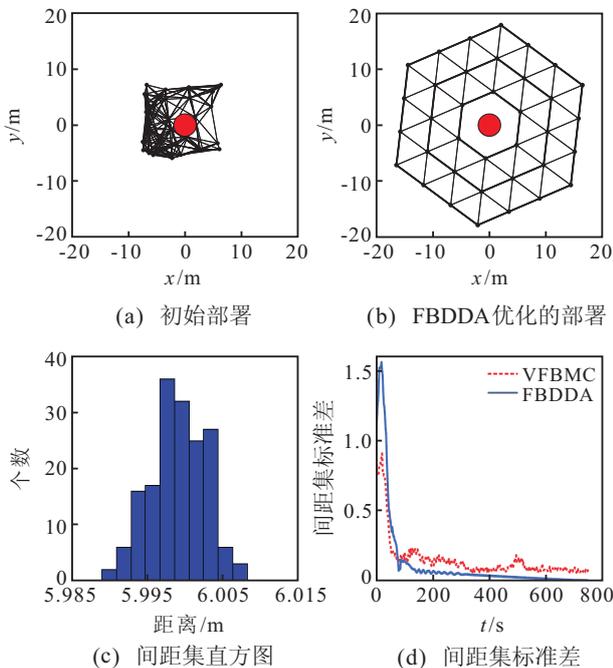


图 3 TOI 静止时的覆盖及性能比较

4.2 TOI 匀速运动

设 $v_T = 0.1\text{ m/s}$, 定义中心间距

$$C_d = \left\| x_T - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \right\|.$$

势能 $F(X)$ 反映了节点间距与期望值的偏差, 而中心间距表明了 MSN 追踪 TOI 的性能. 图 4 为 FBDDA 和 VFBMC 的势能 $F(X)$ 与中心间距的收敛曲线. 由图 4 不难看出, FBDDA 的覆盖更优, 追踪效果更好. 这是由于 FBDDA 包含速度一致性项, 在使 MSN 趋近 HTL 的同时协同整体速度; 而 VFBMC 仅对位置反馈敏感. 图 4 中的曲线均出现振荡, 这是因为仿真是离散的, 仿真步长越大, 振幅也越大.

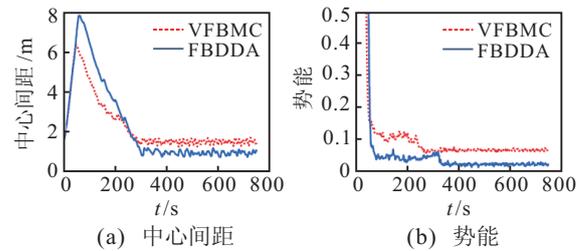


图 4 TOI 匀速运动时监测性能比较

4.3 变速运动

用控制律 (20) 对速度时变的 TOI 进行追踪监测. TOI 初始位置 $x_T(0) = (0, 0)$, 速度 $v_T(0) = (0.05\text{ m/s}, 0.08\text{ m/s})$, 加速度 $a_T(t) = (0, -0.0016 \sin(0.02t))$. 由图 5(a) 和图 5(b) 可以看出, 网络的中心很快便逼近 TOI, 在保持跟踪性能的同时 MSN 的覆盖结构较为理想. 从图 5(b) 能看出, FBDDA 与 VFBMC 在逼近 TOI 的性能上接近, 这是因为 VFBMC 对位置敏感, 当节点机动性足够高时, 能保证良好的包围和覆盖; 但是, 算法需知道 TOI 的位置, 实际应用受限. 从图 5(c) 可以看出, FBDDA 的势能更小, 即部署结构更为均匀, 节点间距更逼近理想间距, 故覆盖更优.

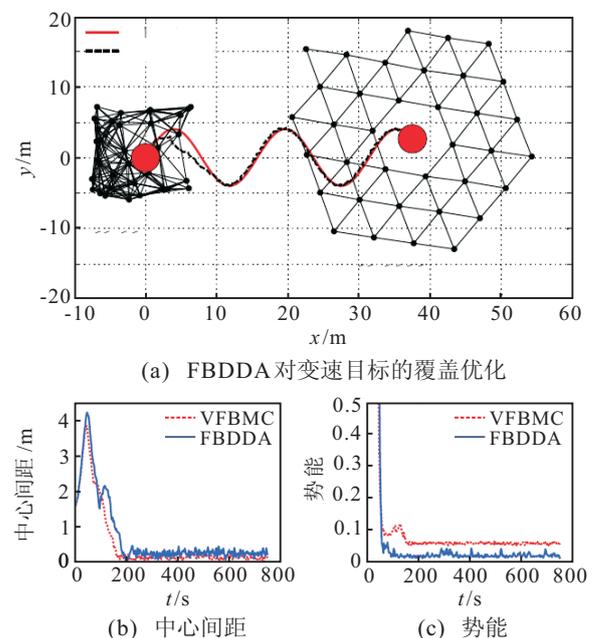


图 5 TOI 变速运动时监测性能比较

5 结 论

本文针对移动传感器网络中静止和运动目标监测的网络覆盖优化问题,以六边形棋盘结构为目标部署结构,提出了一种基于群集控制的分布式控制算法.该算法只需目标的相对方向和单跳邻居节点的位置速度信息,适用于室内外环境,对特定节点无需通信,靠自身测量即可.所提出的控制算法在使网络结构趋于理想部署结构的同时,利用节点间的局部协作实现所有节点和监测目标的速度趋同一致.与传统基于虚拟力的算法相比,计算控制量所需信息更少,覆盖更能趋近理想结构,更能保证低冗余且无漏洞的覆盖,而且能够实现对目标的速度协同.

参考文献(References)

- [1] 庄伟,宋光明,魏志刚,等.具有机动能力的无线传感器网络节点的设计与实现[J].吉林大学学报:工学版,2007,37(4):939-943.
(Zhuang W, Song G M, Wei Z G, et al. Design and implementation of a mobile node for wireless sensor networks[J]. J of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2007, 37(4): 939-943.)
- [2] 靳立忠,常桂然,贾杰.基于差分进化算法的移动传感器网络节点的分布优化[J].控制与决策,2010,25(12):1857-1860.
(Jin L Z, Chang G R, Jia J. Node distribution optimization in mobile sensor networks based on differential evolution algorithm[J]. Control and Decision, 2010, 25(12): 1857-1860.)
- [3] Wu Q S, Rao N S, Du X J, et al. On efficient deployment of sensors on planar grid[J]. Computer Communications, 2007, 30(14/15): 2721-2734.
- [4] Wang G L, Cao G H, Porta T F L. Movement-assisted sensor deployment[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2006, 5(6): 640-652.
- [5] Howard A, Mataric M J, Sukhatme G S. Mobile sensor network deployment using potential fields: A distributed, scalable solution to the area coverage problem[C]. Proc of the 6th Int Conf on Distributed Autonomous Robotic Systems. Fukuoka, 2002: 299-308.
- [6] 杨明华,曹元大,谭励,等.一种移动传感器网络精确部署算法[J].北京理工大学学报,2009,29(1):27-31.
(Yang M H, Cao Y D, Tan L, et al. A precision deployment algorithm in mobile sensor network[J]. Trans of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(1): 27-31.)
- [7] Liu H, Chu X W, Leung Y W, et al. Simple movement control algorithm for bi-connectivity in robotic sensor networks[J]. IEEE J on Selected Areas in Communications, 2010, 28(7): 994-1005.
- [8] Garetto M, Gribaudo M, Chiasserini C F, et al. A distributed sensor relocation scheme for environmental control[C]. IEEE Int Conf on Mobile Adhoc and Sensor Systems(MASS). Pisa: IEEE Press, 2007: 1-10.
- [9] Xu L, Hannes F, Nicola S, et al. Strictly localized sensor self-deployment for optimal focused coverage[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2011, 10(11): 1520-1533.
- [10] Olfati-Saber R. Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2006, 51(3): 401-420.
- [11] Su H S, Wang X F, Lin Z L. Flocking of multi-agents with a virtual leader[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2009, 54(2): 293-307.
- [12] Godsil C, Royle G. Algebraic graph theory[M]. New York: Springer Verlag, 2001: 163-165.
- [13] Zhang H H, Hou J C. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks[J]. Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, 2005, 1: 89-124.

(上接第1352页)

- [10] Ying Ouyang, Chuang Lin, Fengyuan Ren, et al. Design and analysis of a backpressure congestion control algorithm in wireless sensor network[C]. The 8th Int Conf on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies. Adelaide, 2007: 413-420.
- [11] Prawit C. An example of wireless error simulation [EB/OL]. [2010-5-12]. http://blog.chinaunix.net/u2/76263/showart_1768145.html.