

DOI: 10.13382/j.jemi.2016.11.005

移动传感器网络保持网络连通性控制*

娄柯¹ 张艳¹ 李浩²

(1. 安徽工程大学 检测技术与节能装置安徽省重点实验室 芜湖 241000; 2. 94860 部队 南京 211101)

摘要:针对移动传感器网络在外部干扰下容易发生网络分裂问题,提出基于多智能体蜂拥算法的移动传感器网络协调控制策略。该策略中网络各个节点和相邻节点仅进行速度和位置信息的交换,并构造一个虚拟的领导者节点,网络各节点作为跟随者对领导者的运动轨迹进行跟踪,实现网络拓扑结构连通性的保持。基于图论、Lyapunov 稳定性理论和 LaSalle 不变原理对控制协议进行理论分析。仿真实验结果表明,在外部干扰下移动传感器网络在所给控制策略下始终保持网络的连通性。

关键词: 移动传感器网络; 连通性保持; 蜂拥; 外部干扰

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8060

Connectivity preservation control of mobile sensor network

Lou Ke¹ Zhang Yan¹ Li Hao²

(1. Anhui Key Laboratory of Detection Technology and Energy Saving Devices, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China; 2. Unit 94860, Nanjing 211101, China)

Abstract: Aiming at the problem that the mobile sensor network is easy to be split under external disturbance, the coordination control strategy of mobile sensor network based on the flocking of multi-agent is proposed. By constructing a virtual leader node and each of the nodes in the network exchanging only speed and position information with adjacent nodes, the nodes in the network can follow the path of the leader's movement, which can maintain the connectivity of the network topology. Based on graph theory, Lyapunov stability theory and LaSalle's invariance principle, the control protocol is analyzed theoretically. The simulation results show that the mobile sensor network under external disturbance always maintains the connectivity of the network under the control strategy.

Keywords: mobile sensor network; connectivity maintenance; flocking; external disturbance

1 引言

作为无线传感器网络中的一种,移动传感器网络除具备无线传感器网络的感知、计算和通信特点外,由于节点拥有移动能力,能够完成诸如自主部署、自主组网和动态目标跟踪等任务^[1-2]。相对于传统的静态传感器网络,无线移动传感器网络的研

究重点主要集中在动态目标跟踪、网络动态拓扑控制、节点自主部署^[3-5]等方面。近年来,已经有大量研究成果发表在国际权威学术刊物上。

目前,有学者把移动传感器节点虚拟成独立的智能体,研究利用多智能体蜂拥控制策略对移动传感器网络进行网络拓扑控制。移动传感器网络的网络拓扑结构通常使用动态的无向图表示,在无向

收稿日期: 2016-07 Received Date: 2016-07

* 基金项目: 国家自然科学基金(61572032, 61403001)、安徽省高校自然科学基金(KJ2016A058)资助项目

图中的边表示两个个体之间的距离小于通信距离,个体之间可以传递信息。保持网络连通性是移动传感器网络进行信息处理的基础,主要有两种实现方法,一种是利用凸优化算法和梯度下降算法把网络图的拉普拉斯矩阵次小特征值最大化的方法^[6]。另一种是采用势能函数保持网络连通性方法^[7-9]。根据系统是否带有领导者,蜂拥控制分为具有领导者的蜂拥控制^[10-12]和无领导者的蜂拥控制^[13-15]。在无领导者蜂拥控制中系统网络保持连通,所有个体速度向量渐近一致到未知的速度向量,而有领导者的蜂拥控制中所有个体速度向量渐近一致到领导者的速度向量,即系统内所有个体渐近跟踪到领导者的运行轨迹和速度。

然而,现有的研究成果很少考虑外部干扰因素对系统网络连通性保持的影响,如文献[7]中仅研究了具有领导者的多智能体系统的网络连通性保持问题。考虑到外部干扰对系统协调控制的影响,文献[16-17]提出了基于领导者的保持网络连通性的控制器设计方法;文献[18]研究了具有外部干扰的无领导者的多智能体系统蜂拥控制问题;文献[19]针对具有外部干扰的多智能体系统的聚集控制问题,建立了一种新型的分布式内部模型,并提出分布式全状态反馈控制器和分布式部分状态反馈控制器设计方法。

事实上,多数情况下,在有领导的蜂拥控制中只有部分的跟随者可以获得领导者的位置和速度信息,并且外部干扰也是不可忽略的影响因素。基于此,本文考虑了外部干扰因素和只有部分跟随者可以获得领导者状态信息的情况,利用领导者跟随者模型研究移动传感器网络保持网络连通性的蜂拥控制问题,基于图论、LaSalle 不变原理、Lyapunov 稳定性理论证明了在所给控制协议下移动节点形成稳定的蜂拥运动,移动传感器网络始终保持网络连通性。

2 问题描述

考虑具有 N 个移动智能节点的移动传感器网络在 n 维欧氏空间中运行,将移动智能节点视为质点,采用文献[17-18]提出的多智能体系统模型对移动传感器网络进行描述。第 i 个移动智能节点的动力学方程可表示为:

$$\dot{q}_i = p_i$$

$$\dot{p}_i = u_i + d_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中: $q_i \in R^n$ 和 $p_i \in R^n$ 分别是第 i 个智能节点的位置向量和速度向量, $u_i \in R^n$ 是第 i 个智能节点的控制输入向量, $d_i \in R^n$ 是外部干扰, $q_0 \in R^n$ 为领导者的位置向量,并且满足以下方程:

$$\begin{aligned} q_0 &= Fv \\ d_i &= Ev \\ \dot{v} &= Sv \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $v \in R^n$, $S \in R^{n \times n}$ 和 $F, E \in R^{n \times n}$ 为已知常数矩阵。

假设所有的智能节点具有相同的通信半径 r , 智能节点 i 的邻域定义为 $N_i(t) = \{j = 1 \parallel q_i - q_j \parallel < r, j = 1, 2, \dots, N, j \neq i\}$, 其中 $\parallel \cdot \parallel$ 是欧氏范数。

用无向图 $G(t) = (V, E(t))$ 描述该系统的拓扑结构,其中 $V = \{1, 2, \dots, N\}$ 为图 G 的有限节点集合,代表 N 个智能节点; $E(t) = \{(i, j)\} \subset V \times V$ 表示智能节点之间连边的集合,在 t 时刻智能节点 i 和它邻域 $N_i(t)$ 中的智能节点连边。

定义 1 (邻接矩阵) 为了描述节点和边的关系,对于具有 N 个节点的无向图 G ,邻接矩阵 $A = [a_{ij}] (i, j = 1, 2, \dots, N)$ 定义为 $a_{ij} = 1 \Leftrightarrow (i, j) \in E(t)$, $a_{ij} = 0 \Leftrightarrow (i, j) \notin E(t)$ 。

定义 2 (拉普拉斯矩阵) 无向图 G 的拉普拉斯矩阵 $L = [l_{ij}] (i, j = 1, 2, \dots, N)$ 定义为 $l_{ij} = \sum_{k \neq i}^N a_{ik}, l_{ij} = -a_{ij}, \forall i \neq j$ 。

引理 1 设无向图 G 的拉普拉斯矩阵的 N 个特征值为 $\lambda_1(L) \leq \lambda_2(L) \leq \dots \leq \lambda_N(L)$ 。如果图 G 是一个连通图,则有 $0 < \lambda_2(L)$ 。相应的拉普拉斯矩阵定义为 $\hat{L} = L \otimes I_n$, 其中, \otimes 表示 Kronecker 积并且满足 $z^T \hat{L} z = \frac{1}{2} \sum_{(ij) \in E(t)} a_{ij} \|z_j - z_i\|^2$, 其中, $z = col(z_1, z_2, \dots, z_N) \in R^{Nn}$, $z_i \in R^n, i = 1, 2, \dots, N$ 。

引理 2 对于有 N 个节点的无向图 $G = (V, E)$,若图 G 是连通的,则其拉普拉斯矩阵 L 仅有一个零特征值,且其他非零特征值均有正实部,即有 $0 = \lambda_1(L) < \lambda_2(L) \leq \dots \leq \lambda_N(L)$ 。

引理 3 对于有 N 个节点的无向图 G_1 和 G_2 ,若有 $G_1 \subset G_2$,则其相应的拉普拉斯矩阵 L_1 和 L_2 的特征值满足 $\lambda_k(L_1) \leq \lambda_k(L_2), k = 1, 2, \dots, N$ 。

定义 3 对于给定 $\varepsilon \in (0, r)$,对于任何的 $t \geq$

0, 边集 $E(t) = \{(i, j) \mid i, j \in V\}$ 定义如下。

- 1) 初始边集满足 $E(0) = \{(i, j) \mid \|q_i(0) - q_j(0)\| < (r - \varepsilon), i, j = 1, 2, \dots, N\}$;
- 2) 如果 $\|q_i(t) - q_j(t)\| \geq r$, 则有 $(i, j) \notin E(t)$;
- 3) 对于 $i, j = 1, 2, \dots, N$, 如果满足 $(i, j) \notin E(t^-)$ 以及 $\|q_i(t) - q_j(t)\| < (r - \varepsilon), 0 < \varepsilon < r$, 则第 i 和第 j 个智能节点之间在 t 时刻产生一个新边, 即有 $(i, j) \in E(t)$;
- 4) 对于 $i, j = 1, 2, \dots, N$, 如果 $(i, j) \in E(t^-)$ 以及 $\|q_i(t) - q_j(t)\| < r$, 则有 $(i, j) \in E(t)$ 。

3 保持网络连通性控制算法

不失一般性, 假设群体中只有前 M 个智能节点可以获得领导者的信息, 对第 i 个智能节点的控制输入为:

$$\begin{aligned} u_i &= - \sum_{j \in N_i(t)} \nabla_{q_i} \psi(\|q_j - q_i\|) + \\ &\sum_{j \in N_i(t)} a_{ij}(\bar{p}_j - \bar{p}_i) - h_i[c_1(q_i - q_0) + \\ &c_2(p_i - p_0)] + U\bar{\eta}_i \\ \dot{\eta}_i &= S\bar{\eta}_i - \kappa \sum_{j \in N_i(t)} a_{ij}(\eta_i - \eta_j), i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (3)$$

其中, 对于 $i = 1, \dots, M, h_i = 1; i = M + 1, \dots, N, h_i = 0$ 。

势能函数 $\psi(\|q_j - q_i\|)$ 在区间 $\|q_j - q_i\| \in (0, r)$ 可导, 并满足以下要求:

- 1) $\frac{\partial \psi(\|q_j - q_i\|)}{\partial \|q_j - q_i\|} < 0, \|q_j - q_i\| \in (0, r_0), \varepsilon < r_0 < r - \varepsilon;$
- 2) $\frac{\partial \psi(\|q_j - q_i\|)}{\partial \|q_j - q_i\|} > 0, \|q_j - q_i\| \in (r_0, r);$
- 3) $\psi(0) = Q_1 \in [Q_{\max}, +\infty], \psi(r) = Q_2 \in [Q_{\max}, +\infty],$

其中, $Q_{\max} = Q(0) + \frac{(N-1)(N-2)}{2} \psi(r - \varepsilon)$, $Q(0)$ 为系统初始能量, 定义见式(5)。

定理 1 考虑由动力学系统(1)和(2)所组成的具有外边干扰的移动传感器网络系统, 假设系统的初始能量为有限值 $Q(0) < Q_{\max}$, 系统初始图 $G(0)$ 为连通图, 控制输入(3)中参数 κ 满足 $\kappa > \frac{1}{\lambda_2(L(0))}(\lambda_{\max}(S) + \frac{\lambda_{\max}^2(U)}{4\lambda_m})$, 其中 $0 < \lambda_m <$

$\lambda_2(L(0))$, 则移动传感器网络在控制输入(3)的作用下为:

- 1) 对于任意时刻 $t > 0$, 图 $G(t)$ 是连通的;
- 2) 对于任意时刻 $t > 0$, 智能节点之间不会生碰撞, 即有 $\|q_i(t) - q_j(t)\| > 0, i, j = 1, 2, \dots, N;$
- 3) 所有智能节点的速度渐近收敛, 即有 $\lim_{t \rightarrow \infty} (p_i(t) - p_j(t)) = 0, i, j = 1, 2, \dots, N$ 。

证明:

令 $\bar{q}_i = q_i - q_0, \bar{p}_i = p_i - p_0, \bar{\eta}_i = \eta_i - v, \bar{u}_i = u_i - Uv$, 其中 $U = FS - E$ 。则系统(1)可以描述为:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{q}}_i &= \bar{p}_i, \\ \dot{\bar{p}}_i &= \bar{u}_i, \\ \bar{u}_i &= - \sum_{j \in N_i(t)} \nabla_{\bar{q}_i} \psi(\|\bar{q}_j - \bar{q}_i\|) + \\ &\sum_{j \in N_i(t)} a_{ij}(\bar{p}_j - \bar{p}_i) - h_i(c_1\bar{q}_i + c_2\bar{p}_i) + U\bar{\eta}_i \\ \dot{\bar{\eta}}_i &= S\bar{\eta}_i - \kappa \sum_{j \in N_i(t)} a_{ij}(\bar{\eta}_i - \bar{\eta}_j), i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (4)$$

定义系统的能量函数为:

$$\begin{aligned} Q(t) &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (\sum_{j \in N_i(t)} \psi(\|\bar{q}_i - \bar{q}_j\|) + \\ &\bar{p}_i^T \bar{p}_i + h_i c_1 \bar{q}_i^T \bar{q}_i + \bar{\eta}_i^T \bar{\eta}_i) \end{aligned} \quad (5)$$

系统能量函数(5)沿着系统(4)关于时间的导数为:

$$\begin{aligned} \dot{Q}(t) &= \sum_{i=1}^N \dot{\bar{q}}_i^T \sum_{j \in N_i(t)} \nabla_{\bar{q}_i} \psi(\|\bar{q}_i - \bar{q}_j\|) + \\ &\sum_{i=1}^N \bar{p}_i^T \dot{\bar{p}}_i + \sum_{i=1}^N h_i c_i \dot{\bar{q}}_i^T \bar{q}_i + \sum_{i=1}^N \bar{\eta}_i^T \dot{\bar{\eta}}_i = \\ &\sum_{i=1}^N \bar{p}_i^T \sum_{j \in N_i(t)} \nabla_{\bar{q}_i} \psi(\|\bar{q}_i - \bar{q}_j\|) + \\ &\sum_{i=1}^N \bar{p}_i^T \bar{u}_i + \sum_{i=1}^N h_i c_i \bar{p}_i^T \bar{q}_i + \sum_{i=1}^N \bar{\eta}_i^T \dot{\bar{\eta}}_i = \\ &\sum_{i=1}^N \bar{p}_i^T \sum_{j \in N_i(t)} \nabla_{\bar{q}_i} \psi(\|\bar{q}_i - \bar{q}_j\|) - \\ &\sum_{i=1}^N \bar{p}_i^T \sum_{j \in N_i(t)} \nabla_{\bar{q}_i} \psi(\|\bar{q}_i - \bar{q}_j\|) - \\ &\sum_{i=1}^N \bar{p}_i^T \sum_{j \in N_i(t)} a_{ij}(\bar{p}_i - \bar{p}_j) - \\ &\sum_{i=1}^N h_i c_i \bar{p}_i^T \bar{q}_i - \sum_{i=1}^N h_i c_i \bar{p}_i^T \bar{p}_i + \sum_{i=1}^N \bar{p}_i^T U \bar{\eta}_i + \\ &\sum_{i=1}^N h_i c_i \bar{p}_i^T \bar{q}_i + \sum_{i=1}^N \bar{\eta}_i^T S \bar{\eta}_i - \\ &\kappa \sum_{i=1}^N \bar{\eta}_i^T \sum_{j \in N_i(t)} a_{ij}(\bar{\eta}_i - \bar{\eta}_j) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^N \bar{\mathbf{p}}_i^T \sum_{j \in N_i(t)} \nabla_{\bar{\mathbf{q}}_i} \psi(\|\bar{\mathbf{q}}_i - \bar{\mathbf{q}}_j\|) - \\
 & \sum_{i=1}^N \bar{\mathbf{p}}_i^T \sum_{j \in N_i(t)} \nabla_{\bar{\mathbf{q}}_j} \psi(\|\bar{\mathbf{q}}_i - \bar{\mathbf{q}}_j\|) - \\
 & \sum_{i=1}^N \bar{\mathbf{p}}_i^T \sum_{j \in N_i(t)} a_{ij}(\bar{\mathbf{p}}_i - \bar{\mathbf{p}}_j) - \\
 & \sum_{i=1}^N h_i c_1 \bar{\mathbf{p}}_i^T \bar{\mathbf{q}}_i - \sum_{i=1}^N h_i c_2 \bar{\mathbf{p}}_i^T \bar{\mathbf{p}}_i + \sum_{i=1}^N \bar{\mathbf{p}}_i^T \mathbf{U} \bar{\boldsymbol{\eta}}_i + \\
 & \sum_{i=1}^N h_i c_1 \bar{\mathbf{p}}_i^T \bar{\mathbf{q}}_i + \sum_{i=1}^N \bar{\boldsymbol{\eta}}_i^T \mathbf{S} \bar{\boldsymbol{\eta}}_i - \\
 & \kappa \sum_{i=1}^N \bar{\boldsymbol{\eta}}_i^T \sum_{j \in N_i(t)} a_{ij}(\bar{\boldsymbol{\eta}}_i - \bar{\boldsymbol{\eta}}_j) = \\
 & - \sum_{i=1}^N \bar{\mathbf{p}}_i^T \sum_{j \in N_i(t)} a_{ij}(\bar{\mathbf{p}}_i - \bar{\mathbf{p}}_j) - \\
 & \sum_{i=1}^N h_i c_2 \bar{\mathbf{p}}_i^T \bar{\mathbf{p}}_i + \sum_{i=1}^N \bar{\mathbf{p}}_i^T \mathbf{U} \bar{\boldsymbol{\eta}}_i + \\
 & \sum_{i=1}^N \bar{\boldsymbol{\eta}}_i^T \mathbf{S} \bar{\boldsymbol{\eta}}_i - \kappa \sum_{i=1}^N \bar{\boldsymbol{\eta}}_i^T \sum_{j \in N_i(t)} a_{ij}(\bar{\boldsymbol{\eta}}_i - \bar{\boldsymbol{\eta}}_j) \quad (6)
 \end{aligned}$$

设 $\bar{\mathbf{p}} = [\bar{\mathbf{p}}_1^T, \bar{\mathbf{p}}_2^T, \dots, \bar{\mathbf{p}}_N^T]^T$, 则式(6)可得:

$$\begin{aligned}
 \dot{Q}(t) = & -\bar{\mathbf{p}}^T((\mathbf{L}(t) + c_2 \mathbf{H}(t)) \otimes \mathbf{I}_n) \bar{\mathbf{p}} - \\
 & \bar{\boldsymbol{\eta}}^T(\kappa \mathbf{L}(t) \otimes \mathbf{I}_n - \mathbf{I}_N \otimes \mathbf{S}) \bar{\boldsymbol{\eta}} - \bar{\mathbf{p}}^T(\mathbf{I}_n \otimes \mathbf{U}) \bar{\boldsymbol{\eta}} \quad (7)
 \end{aligned}$$

式中: $\mathbf{H}(t) = \text{diag}(h_1(t), h_2(t), \dots, h_N(t))$ 。

对于任意 $\mathbf{M} \in R^{n \times m}$ 、 $\mathbf{x} \in R^n$ 和 $\mathbf{y} \in R^m$, 有

$$\begin{aligned}
 |\mathbf{x}^T \mathbf{M} \mathbf{y}| \leq & \frac{1}{2}(2\lambda_m \|\mathbf{x}\|^2 + \frac{1}{2\lambda_m} \|\mathbf{M} \mathbf{y}\|^2) \leq \\
 \lambda_m \|\mathbf{x}\|^2 + & \frac{1}{4\lambda_m} \lambda_{\max}^2(\mathbf{M}) \|\mathbf{y}\|^2.
 \end{aligned}$$

因此, 式(7)可得:

$$\begin{aligned}
 \dot{Q}(t) \leq & -\bar{\mathbf{p}}_i^T((\mathbf{L}(t) + c_2 \mathbf{H}(t) - \lambda_m \mathbf{I}_N) \otimes \mathbf{I}_n) \bar{\mathbf{p}} \\
 & - \bar{\boldsymbol{\eta}}^T(\kappa \mathbf{L}(t) \otimes \mathbf{I}_n - \mathbf{I}_N \otimes \mathbf{S} - \frac{\lambda_{\max}^2(\mathbf{U})}{4\lambda_m}) \bar{\boldsymbol{\eta}} \quad (8)
 \end{aligned}$$

存在时刻 $t_1 (0 < t_1 \leq \infty)$, 在时间区间 $[0, t_1)$ 内多智能体系统的拓扑结构是固定不变的, 即满足 $G(t) = G(0)$ 。因为图 $G(0)$ 是连通图, 根据引理 1 可知 $\lambda_2(\mathbf{L}(t)) = \lambda_2(\mathbf{L}(0)) > 0$, 故可以得到 $0 < \lambda_m < \lambda_2(\mathbf{L}(t))$, 又因为 $c_2 > 0$ 和 $\mathbf{H}(t)$ 是半正定矩阵, 所以 $(\mathbf{L}(t) + c_2 \mathbf{H}(t) - \lambda_m \mathbf{I}_N) \otimes \mathbf{I}_n$ 也是半正定矩阵。因为参数 κ 满足下式 $\kappa > \frac{1}{\lambda_2(\mathbf{L}(0))}(\lambda_{\max}(\mathbf{S}) + \frac{\lambda_{\max}^2(\mathbf{U})}{4\lambda_m})$, 所以 $(\kappa \mathbf{L}(t) \otimes \mathbf{I}_n - \mathbf{I}_N \otimes \mathbf{S} - \frac{\lambda_{\max}^2(\mathbf{U})}{4\lambda_m})$ 是半正定矩阵。因此可以得到 $\dot{Q}(t) \leq 0, t \in [0, t_1)$, 故有:

$$Q(t) \leq Q(0) < Q_{\max}, t \in [0, t_1) \quad (9)$$

根据人工势能函数定义可知 $\lim_{\|\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j\| \rightarrow 0} \psi(\|\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j\|) \geq Q_{\max}$, 因此, 在时间区间 $[0, t_1)$ 内智能节点之间不会发生碰撞。

假设在 t_1 时刻传感网络的网络扑结构发生改变, 即 $G(t) = G(0), t \in [0, t_1); G(t_1) \neq G(0)$ 。

假设初始时刻连通的一对智能节点在 t_1 时刻断开, 即有 $(i, j) \in E(0), (i, j) \notin E(t_1)$ 。根据系统网络图 $G(t)$ 的边集规则可以得到 $\lim_{t \rightarrow t_1^-} \|\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j\| = r$, 同时根据人工势能函数定义可知 $\psi(r) \geq Q_{\max}$, 因此有 $Q(t_1^-) \geq Q_{\max}$, 显然和式(9)是矛盾的, 因此假设不成立, 即在 t_1 时刻不会有已存在的边断开, 只可能有新边加入图 G , 故可以得到 $G(t_1) \Leftrightarrow G(0)$ 。又因为图 $G(t)$ 中边的数量是有限的, 因此存在有限的 k 使得 $G(t) = G(0), t \in [0, t_1); G(t_1) = G(t_i) \Leftrightarrow G(t_{i-1}), t \in [t_i, t_{i-1}), i = 1, \dots, k-1; G(t) = G(t_k) \Leftrightarrow G(t_{k-1}), t \in [t_k, \infty)$, 根据引理 2 可知 $0 < \lambda_m < \lambda_2(\mathbf{L}(0)) \leq \lambda_2(\mathbf{L}(k))$, 同上理可以得到 $\dot{Q}(t) \leq 0, t \geq t_k$, 进一步可以得到 $Q(t) \leq Q(0) < Q_{\max}, t \geq t_k$ 。

因此, 对于任意时刻 $t \geq 0$ 网络是连通的, 并且对于任意两个智能节点有 $\|\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j\| > r$, 即智能体之间不会发生碰撞。

因为有 $Q(t) \leq Q_{\max}, t \geq 0$, 所以可以得到

$$\|\bar{\mathbf{p}}_i\| \leq \sqrt{2Q_{\max}}.$$

因为对于任意时刻 $t \geq 0$ 网络是连通的, 所以有 $\|\bar{\mathbf{q}}_i\| < (N-1)r, \forall i, j \in E(t)$ 。

定义集合 $\Omega = \{(\bar{\mathbf{q}}_i, \bar{\mathbf{p}}_i) \mid Q(t) \leq Q_{\max}\}$, 因此集合 Ω 是正不变紧集。根据 LaSalle 不变原理, 取正不变紧集 Ω 中最大不变集 $S = \{(\bar{\mathbf{q}}_i, \bar{\mathbf{p}}_i) \mid \dot{Q}(t) = 0\}$, 可以得到始于 Ω 内的每个解都会趋于最大不变集 S 。根据式(8)可以得到 $\bar{\mathbf{p}}_i = 0$, 即有 $p_1 = p_2 = \dots = p_N = p_0$, 这表明所有智能节点的速度渐近收敛到领导者的速度。

4 实验仿真

仿真实验模拟了由 10 个跟随者 1 个领导者组成的移动传感器网络在二维平面上的运动, 每个跟随者的速度和初始位置分别随机产生于 $[0, 2] \times [0, 2]$ 和 $[0, 15] \times [0, 15]$, 领导者初始位置和速度分

别是 $[5,5]$ 和 $[-6, -3]$,智能节点的邻域半径 $r=8.5$ 。

图 1~3 是在控制输入(3)作用下,移动传感器网络在平面上的运动示意图。在图中五角星符号代表领导者,10 个跟随者用实心点表示。在两个点之间的实线代表邻域关系,表示两个移动智能节点处在通信距离内,可以互相获取到对方的信息,箭头表示智能体速度向量。

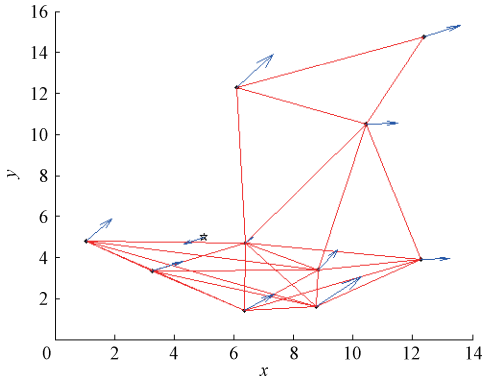


图 1 移动传感器网络初始状态

Fig. 1 Initial state of mobile sensor network

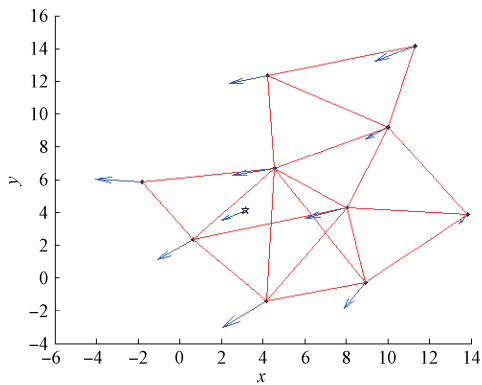


图 2 移动传感器网络 $t=0.5$ s 的运动示意图
Fig. 2 Schematic diagram of movement of mobile sensor network at time $t=0.5$ s

智能节点的初始位置和速度如图 1 所示,它们生成的拓扑结构为连通图,10 个跟随者的速度均不相同。图 2 和 3 分别是系统在 0.5 和 1.5 s 时刻的所有智能节点的位置和速度示意图。从图 1~3 可以明显看出,随着时间的演化,系统网络始终保持连通。图 4 为整个时间区间内系统的运行轨迹图,粗虚线代表虚拟领导者运行轨迹,细虚线代表跟随者的运动轨迹,可以看出移动传感器网络从图中右上角的初始位置在控制输入作用下,以蜂拥队形移动到左下角位置。在图 5 中,图(a)是跟随者

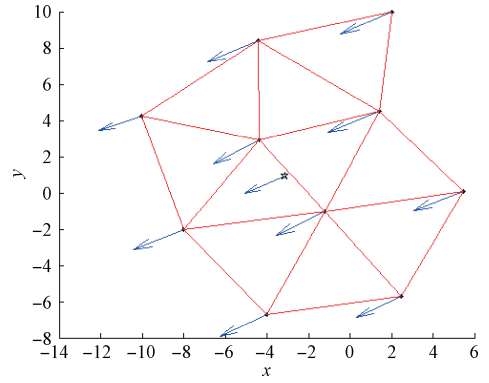


图 3 移动传感器网络在 $t=1.5$ s 的运动示意图
Fig. 3 Schematic diagram of movement of mobile sensor network at time $t=1.5$ s

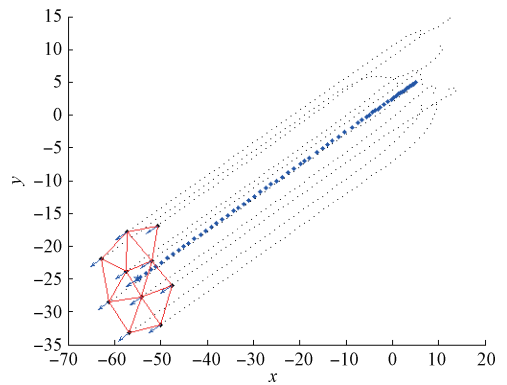


图 4 移动传感器网络运动轨迹
Fig. 4 Trajectories of the mobile sensor network

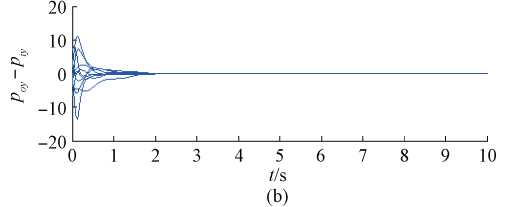
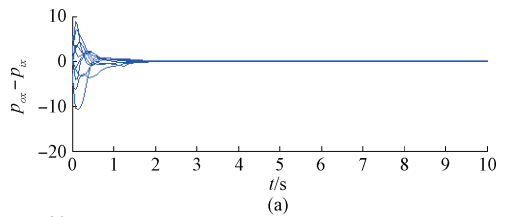


图 5 在控制输入(3)作用下跟随者和领导者的速度差

Fig. 5 Velocity difference between followers and the leader applying algorithm (3)

和虚拟领导者的速度向量差在 x 轴的分量,图(b)是在 y 轴的分量,可以看出随着时间推移,跟随者

同领导者之间速度渐近同步,最终一致。

5 结 论

本文研究了移动传感器网络的保持网络连通性问题,考虑系统受到外部干扰和只有部分跟随者可以获得领导者的信息的情况下,利用势能函数设计控制输入,讨论了在有无向切换网络拓扑情况下的无向图连通性问题,基于图论、LaSalle 不变原理、Lyapunov 稳定性理论证明了系统在所给控制输入下保持网络连通,形成稳定的蜂拥运动。最后给出了保持网络连通性算法的仿真结果,验证了算法的正确性和有效性。

参考文献

- [1] 蒋鹏, 宋华华, 王兴民. 基于动态生成树和改进不敏卡尔曼滤波的传感器网络目标跟踪算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(2): 415-421.
JIANG P, SONG H H, WANG X M. Target tracking algorithm for sensor networks based on dynamic spanning tree and improved unscented Kalman filter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(2): 415-421.
- [2] 孙斌, 金心宇. 压缩感知在无线传感器网络目标跟踪中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 8(5): 463-468.
SUN B, JIN X Y. Applications of compressive sensing in target tracking of wireless sensor networks [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 8(5): 463-468.
- [3] 金彦亮, 邓伟, 方昌立. 基于群一致性的大规模无线传感网时间同步[J]. 电子测量技术, 2016, 39(7): 160-164.
JIN Y L, DENG W, FANG CH L. Distributed synchronization in large-scale wireless sensor networks using group consensus protocol [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(7): 160-164.
- [4] 雷斌, 张鑫. 基于 WSN 野外监测系统应用层通信协议的研究[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(2): 43-46.
LEI B, ZHANG X. Research on the application layer protocol of field monitoring system based on wireless sensor network [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(2): 43-46.
- [5] 梁嘉琪, 董浩斌, 葛健. 多传感器高准确度便携式温度测量仪[J]. 国外电子测量技术, 2016, 42(5): 70-74.
LIANG J Q, DONG H B, GE J. High-precision portable temperature measurement system based on three kinds of sensors [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 42(5): 70-74.
- [6] ZAVLANOS M M, EGERSTEDT M B, PAPPAS G J. Graph theoretic connectivity control of mobile robot networks [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(9): 1525-1540.
- [7] SU H, WANG X, CHEN G. A connectivity-preserving flocking algorithm for multi-agent systems based only on position measurements [J]. International Journal of Control, 2009, 82(7): 1334-1343.
- [8] OLFATI S R. Flocking for multi-agent dynamic systems; Algorithms and theory [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(3): 401-420.
- [9] SU H, WANG X, CHEN G. Rendezvous of multiple mobile agents with preserved network connectivity [J]. Systems & Control Letters, 2010, 59(5): 313-322.
- [10] CAO Y, REN W. Distributed coordinated tracking with reduced interaction via a variable structure approach [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(1): 33-48.
- [11] HONG Y, WANG X, JIANG Z. Distributed output regulation of leader follower multi-agent systems [J]. Internal Journal of Robust and Nonlinear Control, 2013, 23(1): 48-66.
- [12] SU Y, HONG Y, HUANG J. A general result on the robust cooperative output regulation for linear uncertain multi-agent systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2013, 58(5): 1275-1279.
- [13] AIORLOU A, MOMENI A, AGHDAM A G. A class of bounded distributed control strategies for connectivity preservation in multi-agent systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55(12): 2828-2833.
- [14] DIMAROGONAS D V, JOHANSSON K H. Bounded control of network connectivity in multi-agent systems [J]. IET Control Theory & Applications, 2010, 4(8): 1330-1338.
- [15] ZHANG H, ZHAI C, CHEN Z. A general alignment repulsion algorithm for flocking of multi-agent system [J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 2011, 56(2): 430-435.
- [16] DONG Y, HUANG J. A leader-following rendezvous problem of double integrator multi-agent systems [J]. Automatica, 2013, 49(5): 1386-1391.

- [17] DONG Y, HUANG J. Leader-following connectivity preservation rendezvous of multiple double integrator systems based on position measurement only [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2014, 59(9): 2598-2603.
- [18] DONG Y, HUANG J. Flocking with connectivity preservation of multiple double integrator systems subject to external disturbances by a distributed control law [J]. Automatica, 2015, 55(5): 197-203.
- [19] SU Y. Leader-following rendezvous with connectivity preservation and disturbance rejection via internal model approach [J]. Automatica, 2015, 57(7): 203-212.

作者简介

娄柯, 1979 年出生, 2000 年于安徽工业大学获得学士学位, 2006 年于江南大学获得硕士学位, 2014 年于江南大学获得博士学位, 现为安徽工程大学副教授, 主要研究方向为移动传感器网络信息融合与协同控制。

E-mail: louke1979@163.com

Lou Ke was born in 1979, and received B. Sc. in computer science and application from Anhui University of Technology in 2000, M. Sc. and Ph. D. in control theory and

control engineering from Jiangnan University in 2006 and 2014, respectively. He is currently an associate professor in the College of Electrical Engineering at Anhui Polytechnic University. His present research interests include information fusion and cooperative control of mobile sensor network.

张艳, 1983 年出生, 2006 年于洛阳师范学院获得学士学位, 2012 年于中南大学获得博士学位, 2014 年于江南大学获得博士学位, 现为安徽工程大学讲师, 主要研究方向为鲁棒控制和网络化控制系统。

E-mail: yanzhang24@yeah.com

Zhang Yan received B. Sc. in applied mathematics from Luoyang Normal University in 2006 and Ph. D. in control theory and control engineering from Central South University in 2012, respectively. She is currently a lecturer in the College of Electrical Engineering at Anhui Polytechnic University. Her research interests include robust control and networked control systems.

李浩, 1978 年出生, 2000 年于安徽工业大学获得学士学位, 现为 94860 部队工程师。

E-mail: airhanson@21cn.com

Li Hao was born in 1978, and received B. Sc. in computer science and application from Anhui University of technology in 2000. He is an engineer in Unit 94860.