

二阶多智能体系统量化蜂拥控制

李春光^{1,2}, 刘国栋¹, 娄柯³

(1. 江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 常州工学院 计算机信息工程学院, 江苏 常州 213002;
3. 安徽工程大学 安徽检测技术与节能装置省级实验室, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 针对在多智能体系统的通信网络中需要对交换信息进行量化的客观情况, 研究基于量化信息的二阶多智能体系统蜂拥控制问题. 首先, 假设多智能体系统采用一致量化器对速度和位置信息进行量化, 并且有一个虚拟领导者沿着固定方向匀速运动; 然后, 设计基于量化信息的多智能体蜂拥控制输入, 并利用非平滑系统的Lyapunov稳定性判据和不变集原理证明系统的稳定性; 最后, 利用Matlab对多智能体系统在二维平面上的蜂拥运动进行仿真实验, 仿真结果验证了理论分析的正确性.

关键词: 多智能体; 蜂拥控制; 一致量化器

中图分类号: TP242.6

文献标志码: A

Quantized flocking control of multiple agents with second-order dynamics

LI Chun-guang^{1,2}, LIU Guo-dong¹, LOU Ke³

(1. School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. School of Computer and Information Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China; 3. Anhui Key Laboratory of Detection Technology and Energy Saving Devices, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China. Correspondent: LI Chun-guang, E-mail: leechunguang76@gmail.com)

Abstract: A quantized flocking control of a group of second-order multiple agents is proposed to deal with the problem of the exchange of information needed to quantify. Firstly, it is assumed that the uniform quantizer is used for the exchange of relative position and velocity information between neighboring agents, and the virtual leader moves at a steady speed in a straight line. Then multiple agents flocking controller is designed based on the quantitative information. The Lyapunov stability criterion of nonsmooth systems and invariance principle are used to prove the stability of the systems. Simulation results show the correctness of the theoretical analysis.

Keywords: multiple agents; flocking control; uniform quantizer

0 引言

近年来, 由于智能体系统蜂拥控制在卫星集群控制、无人驾驶飞机协调控制、移动传感器网络节点队控制等方面得到越来越多的应用, 现已成为国内外研究的热点^[1-3].

多智能体之间存在信息交换, 由于智能体能量和带宽的限制, 交换信息一般要经过量化并编码成数字信号, 然后通过无线信道传输. 因此, 研究信号量化对多智能体系统协调控制的影响是十分必要的. Dimarogonasa等^[4]基于矩阵谱理论分别研究了通讯信息在一致量化和对数量化下多智能体系统的一致性问题. Ceragioli等^[5]构建了基于磁滞效应量化的多智能体网络的混杂系统模型, 该混杂系统能够有效

地避免震颤现象, 并进一步分析了系统解的有限时间收敛性. Liu等^[6]研究了3种信号量化器(对数量化器、对称一致量化器和非对称量化器)对二阶多智能体系统一致性控制策略的性能影响问题. Chen等^[7]利用采样数据研究了二阶连续多智能体系统的量化一致性问题, 得到了保证系统一致性误差收敛到以原点为中心的邻域内的采样周期和控制参数的充要条件, 并将所述方法进一步推广到多智能体系统不需要进行速度信息交换就能够实现一致性控制的问题. Guan等^[8]研究了二阶多智能体系统的量化一致性问题, 得到了多智能体系统Laplacians矩阵特征值与量化一致性之间的关系.

上述文献研究的都是基于量化信息的多智能体

收稿日期: 2014-01-03; 修回日期: 2014-04-14.

作者简介: 李春光(1976—), 男, 讲师, 博士生, 从事双足机器人步态规划、机器人蜂拥控制的研究; 刘国栋(1950—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、机器人等研究.

一致性问题,而关于基于量化信息的多智能体蜂拥控制问题的研究尚鲜见报道.基于上述研究背景,本文利用图论和非连续微分方程的Filippov解,研究基于量化信息的二阶多智能体系统蜂拥控制问题,并通过仿真实验验证了理论分析的正确性.

1 预备知识以及问题描述

1.1 图论相关知识

用如下无向图表示多智能体系统的通讯网络:

$$G(t) = (V, E(t)).$$

其中: $V = \{1, 2, \dots, N\}$ 为图 $G(t)$ 的有限顶点集合, 顶点 i 代表第 i 个智能体; $E(t) = \{(i, j)\} \subset V \times V$ 为连接节点的边集, 如果在时刻 t 智能体 i 与智能体 j 存在信息通讯, 则这两个智能体之间有边相连. 在无向图中节点对是无序的, 即

$$(i, j) \in E(t) \Leftrightarrow (j, i) \in E(t).$$

1.2 非连续微分方程的Filippov解

考虑如下的常微分方程:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, t), \\ x_0 &= x(t_0). \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $x \in R^n, f: R^{n+1} \rightarrow R^n$ 表示向量场. 假设 $f(x, t)$ 是线性有界的, 即对于任给的 $x \in R^n$ 和 $t \in R$, 存在常数 $\gamma > 0, c_0 > 0$, 使得

$$\|f(x, t)\| \leq \gamma \|x\| + c_0 \quad (2)$$

成立, 则方程(1)的Filippov解定义如下.

定义1^[9] 向量函数 x 在 (t_0, t_1) 上是方程(1)的解, 若 $x(t)$ 在 (t_0, t_1) 上是绝对连续的, 且对于几乎所有 $t \in (t_0, t_1)$ 满足

$$\dot{x} = F[f](x, t), \quad (3)$$

其中

$$F[f](x, t) = \bigcap_{\delta > 0} \bigcap_{\mu(N) = 0} \text{co}\{f(B_\delta(x)/N, t)\}. \quad (4)$$

N 表示在向量场 f 不连续处 x 的集合, $B_\delta(x)$ 是以 x 为中心、 δ 为半径的开球, $\mu(N)$ 为集合 N 的Lebesgue测度, $\text{co}\{S\}$ 为集合 S 的闭包.

由文献[10]可知, 定义1的集值映射 $F[f](x, t)$ 是上半连续的, 且当函数 $f(x, t)$ 关于自变量 x 不连续时, 只要不连续点集的测度为零, 就可以由Filippov解重新定义原微分方程的解. 对于 $f(x, t)$ 关于时间 t 不连续的情况, 定义1仅仅要求在区间 (t_0, t_1) 上几乎处处满足式(4)即可, 显然Filippov解也适用于时间不连续的情况.

引理1^[10] 如果 $f_1, f_2: R^n \rightarrow R^m$ 在 $x_0 \in R^n$ 处是局部有界的, 则有

$$F[f_1 + f_2](x_0) \subseteq F[f_1](x_0) + F[f_2](x_0).$$

定义2^[11] 若函数

$$f: R^n \rightarrow R$$

在 x 附近是Lipschitz的, 向量 $\nu \in D^n$, 则函数 f 在 x 处沿 ν 的广义方向导数定义为

$$f^\circ(x; \nu) = \limsup_{y \rightarrow x, t \downarrow 0} \frac{f(y + t\nu) - f(y)}{h}, \quad (5)$$

其中 $y \in R^n$.

定义3^[11] 若函数

$$f: R^n \rightarrow R$$

在 x 附近是Lipschitz的, 则函数 f 在 x 处的广义梯度定义为

$$\partial f(x) = \{\zeta \in R^n | f^\circ(x, \nu) \geq \langle \zeta, \nu \rangle, \forall \nu \in R^n\}. \quad (6)$$

引理2^[12] 令向量函数 $x(\cdot)$ 在区间 (t_0, t_1) 上是方程(1)的Filippov解, Lipschitz函数 $V: R^n \times R \rightarrow R$ 是正则的, 则 $V(x, t)$ 是绝对连续的, 且 $\frac{d}{dt}V(x, t)$ 几乎处处存在, 并满足

$$\frac{d}{dt}V(x, t) \in \text{a.e.} \dot{V}(x, t), \quad (7)$$

其中

$$\dot{V}(x, t) = \bigcap_{\zeta \in \partial V(x(t), t)} \zeta^T F[f](x, t). \quad (8)$$

引理3^[12] 假设存在紧集 Ω 使得自治系统 $\dot{x} = f(x), x(t_0) = x_0$ 在 Ω 中的Filippov解是唯一的, 且是正不变的, 即 $x(t) \in \Omega, \forall t \geq t_0$, 若存在与时间无关的正则函数 V 使得对于所有的 $\nu \in \dot{V}$ 有 $\nu \leq 0$ (若 $\dot{V} = \emptyset$, 则这一条件自然成立), 则所有的 Ω 中的轨迹都将收敛于 S 闭包中的最大不变集 M , 其中 $S = \{x \in \Omega | 0 \in \dot{V}\}$.

1.3 问题描述

由 N 个跟随者与一个虚拟领导者组成的多智能体系统为

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i, & i = 1, 2, \dots, N. \\ \dot{v}_i = u_i, \end{cases} \quad (9)$$

其中: $x_i \in R^n$ 和 $v_i \in R^n$ 分别是第 i 个跟随智能体的位置向量和速度向量, $u_i \in R^n$ 是第 i 个跟随智能体的控制输入. 虚拟领导者沿着一个固定速度 v_d 运动, 即

$$\begin{cases} \dot{x}_\gamma = v_d, \\ \dot{v}_\gamma = 0. \end{cases} \quad (10)$$

其中: $x_\gamma \in R^n$ 和 $v_\gamma \in R^n$ 分别是领导者的位置向量和速度向量, 初始值为 $(x_\gamma(0), v_\gamma(0)) = (x_0, v_d)$.

2 多智能体量化蜂拥控制

文献[13]在没有考虑虚拟领导者的情况下, 设计了基于排斥力和速度匹配的蜂拥控制器, 即

$$u_i = - \sum_{j \in N_1(i)} a_{ij} (\|x_j - x_i\|) \left(\frac{x_j - x_i}{\|x_j - x_i\|} \right) -$$

$$\sum_{j \in N_2(i)} (v_i - v_j). \quad (11)$$

其中

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 - \frac{z}{r_1}, & 0 \leq z \leq r_1; \\ 0, & z > r_1. \end{cases}$$

r_1 为智能体排斥力半径; $N_1(i)$ 为第 i 个智能体排斥力邻域, $N_1(i) = \{j \mid \|x_j - x_i\| < r_1, j \neq i, j = 1, 2, \dots, N\}$; $N_2(i)$ 为第 i 个智能体速度匹配邻域, $N_2(i) = \{j \mid \|x_j - x_i\| < r_2, j \neq i, j = 1, 2, \dots, N\}$, r_2 为智能体速度匹配半径, 并且有 $r_2 \geq r_1$.

本文考虑在多智能体系统中每个智能体均通过数字通信的方式获取其邻域内其他智能体速度和位置的量化信息, 并且有一个共同虚拟领导者的情况, 则将式 (11) 中控制器 u_i 重新设计如下:

$$u_i = - \sum_{j \in N_1(i)} a_{ij} (\|q(x_j - x_i)\|) \frac{q(x_j - x_i)}{\|q(x_j - x_i)\|} - \sum_{j \in N_2(i)} q(v_i - v_j) - q(x_i - x_\gamma), \quad (12)$$

其中 $q(\cdot) : R^n \rightarrow R^n$ 表示量化函数.

这里主要考虑两种量化器, 即一致量化器 $q_u(\cdot) : R \rightarrow R$ 和对数量化器 $q_l(\cdot) : R \rightarrow R$, 分别定义如下:

$$q_u(z) = \left\lfloor \frac{z}{\delta_u} + \frac{1}{2} \right\rfloor \delta_u. \quad (13)$$

$$q_l(z) = \begin{cases} e^{q_u(\ln z)}, & z > 0; \\ 0, & z = 0; \\ -e^{-q_u(\ln(-z))}, & z < 0. \end{cases} \quad (14)$$

其中 δ_u 为正标量.

向量 $v = [v_1, v_2, \dots, v_d]^T \in R^d$ 的两种量化器分别定义为

$$q_u(v) \triangleq [q_u(v_1), q_u(v_2), \dots, q_u(v_d)]^T,$$

$$q_l(v) \triangleq [q_l(v_1), q_l(v_2), \dots, q_l(v_d)]^T.$$

如果没有特别说明, 用 $q(\cdot)$ 表示一致量化器或对数量化器.

智能体 i 的位置和速度向量与虚拟领导者的位置和速度向量之间的差值分别记作

$$\begin{cases} \bar{x}_i = x_i - x_\gamma, \\ \bar{v}_i = v_i - v_\gamma. \end{cases} \quad (15)$$

注意到

$$q(\bar{x}_i - \bar{x}_j) = q(x_i - x_j),$$

$$q(\bar{v}_i - \bar{v}_j) = q(v_i - v_j),$$

控制器 (12) 可以表示为

$$u_i = - \sum_{j \in N_1(i)} a_{ij} (\|q(\bar{x}_{ji})\|) \frac{q(\bar{x}_{ji})}{\|q(\bar{x}_{ji})\|} - \sum_{j \in N_2(i)} q(\bar{v}_{ij}) - q(\bar{x}_i). \quad (16)$$

其中: $\bar{x}_{ji} = \bar{x}_j - \bar{x}_i, \bar{v}_{ij} = \bar{v}_i - \bar{v}_j$. 于是, 多智能体群体和虚拟领导者的相对运动动态模型具有以下形式:

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_i = \bar{v}_i, \\ \dot{\bar{v}}_i = - \sum_{j \in N_1(i)} a_{ij} (\|q(\bar{x}_{ji})\|) \frac{q(\bar{x}_{ji})}{\|q(\bar{x}_{ij})\|} - \sum_{j \in N_2(i)} q(\bar{v}_{ij}) - q(\bar{x}_i). \end{cases} \quad (17)$$

定义系统 (17) 能量方程为

$$Q(\bar{x}, \bar{v}) = V_1(\bar{x}) + V_2(\bar{x}) + K(\bar{v}). \quad (18)$$

其中

$$\bar{x} = [\bar{x}_1^T, \bar{x}_2^T, \dots, \bar{x}_N^T]^T,$$

$$\bar{v} = [\bar{v}_1^T, \bar{v}_2^T, \dots, \bar{v}_N^T]^T,$$

$$V_1(\bar{x}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_1(i)} \int_{\|q(\bar{x}_{ji})\|}^{r_1} a_{ij}(s) ds,$$

$$V_2(\bar{x}) = \sum_{i=1}^N \int_0^{\bar{x}_i} q(s) ds,$$

$$K(\bar{v}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \bar{v}_i^T \bar{v}_i.$$

假设智能体的直径均为 ς , 当智能体 i 与 j 发生碰撞时有 $\|x_{ij}\| = \varsigma$, 则产生势能

$$P_{ij} = \int_{\varsigma}^{r_1} a_{ij}(s) ds.$$

定理 1 对于由 N 个跟随者与一个虚拟领导者组成的多智能体系统 (9) 和 (10), 若通信网络图 G 为一个树, 且系统初始能量 $Q(\bar{x}(0), \bar{v}(0))$ 为有限值, 并满足

$$Q(\bar{x}(0), \bar{v}(0)) < P_{ij}, \forall (i, j) \in E(t),$$

则在控制规则 (12) 的作用下, 多智能体之间不会发生碰撞. 当量化器选择对数量化器 (14) 时, 多智能体系统中跟随者的速度渐近收敛到虚拟领导者的速度, 即

$$v_1 = v_2 = \dots = v_N = v_\gamma;$$

当选择一致量化器 (13) 时, 跟随者速度与领导者速度差值渐近收敛到以 0 为圆心、以 $\sqrt{n} \frac{\delta_u}{2}$ 为半径的邻域内.

证明 根据

$$\begin{aligned} \partial Q(\bar{x}, \bar{v}) = & \left[\left(\frac{\partial Q(\bar{x}, \bar{v})}{\partial \bar{x}_1} \right)^T, \left(\frac{\partial Q(\bar{x}, \bar{v})}{\partial \bar{x}_2} \right)^T, \dots, \right. \\ & \left. \left(\frac{\partial Q(\bar{x}, \bar{v})}{\partial \bar{x}_N} \right)^T, \bar{v}_1^T, \bar{v}_2^T, \dots, \bar{v}_N^T \right]^T, \end{aligned}$$

并由引理 2 可以得到, 对于几乎所有的 $t \geq 0$ 有

$$\frac{d}{dt} Q(\bar{x}, \bar{v}) \in \dot{Q}(\bar{x}, \bar{v}), \quad (19)$$

其中

$$\dot{Q}(\bar{x}, \bar{v}) =$$

$$\bigcap_{\xi \in \partial Q(\bar{x}, \bar{v})} \xi^T [\dot{\bar{x}}_1, \dot{\bar{x}}_2, \dots, \dot{\bar{x}}_N, \frac{d}{dt} Q(\bar{x}, \bar{v})] \leq 0, \quad (21)$$

$$F^T[\dot{v}_1], F^T[\dot{v}_2], \dots, F^T[\dot{v}_N]^T =$$

$$\bigcap_{\xi_i \in \partial Q(\bar{x}, \bar{v}) / \partial \bar{x}_i} \left(\sum_i^N \xi_i^T \bar{v}_i + \sum_{i=1}^N \bar{v}_i^T F[\dot{v}_i] \right). \quad (20)$$

根据

$$\frac{\partial Q(\bar{x}, \bar{v})}{\partial \bar{x}_i} = \frac{\partial V_1(\bar{x})}{\partial \bar{x}_{ij}} + \frac{\partial V_2(\bar{x})}{\partial \bar{x}_i},$$

$$\frac{\partial Q(\bar{x}, \bar{v})}{\partial \bar{v}_i} = \bar{v}_i,$$

并由引理 1, 可得

$$\dot{v}_i \in F[u_i] \subseteq$$

$$- \sum_{j \in N_1(i)} F \left[a_{ij}(\|q(\bar{x}_{ij})\|) \frac{q(\bar{x}_{ij})}{\|q(\bar{x}_{ij})\|} \right] -$$

$$\sum_{j \in N_2(i)} F[q(\bar{v}_{ij})] - F[q(\bar{x}_i)],$$

则由式 (20), 可以得到

$$\dot{Q}(\bar{x}, \bar{v}) \subseteq$$

$$\bigcap_{\xi_{ij} \in \frac{\partial V_1(\bar{x})}{\partial(\bar{x}_i - \bar{x}_j)}, \hat{\xi}_i \in \frac{\partial V_2(\bar{x})}{\partial \bar{x}_i}} \left(\sum_{i=1}^N \left(\sum_{j \in N_1(i)} \xi_{ij}^T + \hat{\xi}_i^T \right) \bar{v}_i - \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_1(i)} \bar{v}_i^T F \left[a_{ij}(\|q(\bar{x}_{ij})\|) \cdot \left(\frac{q(\bar{x}_{ij})}{\|q(\bar{x}_{ij})\|} \right) \right] - \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_2(i)} \bar{v}_i^T F[q(\bar{v}_{ij})] - \sum_{i=1}^N \bar{v}_i^T F[q(\bar{x}_i)] \right) =$$

$$\bigcap_{\xi_{ij} \in \frac{\partial V_1(\bar{x})}{\partial(\bar{x}_i - \bar{x}_j)}} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_1(i)} \left(\xi_{ij}^T \bar{v}_i - \bar{v}_i^T F \left[a_{ij}(\|q(\bar{x}_{ij})\|) \frac{q(\bar{x}_{ij})}{\|q(\bar{x}_{ij})\|} \right] \right) +$$

$$\bigcap_{\hat{\xi}_i \in \frac{\partial V_2(\bar{x})}{\partial \bar{x}_i}} \left(\sum_{i=1}^N (\hat{\xi}_i^T \bar{v}_i - \bar{v}_i^T F[q(\bar{x}_i)]) \right) -$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_2(i)} \bar{v}_i^T F[q(\bar{v}_i - \bar{v}_j)].$$

由定义 1 可得到

$$\frac{d}{dt} Q(\bar{x}, \bar{v}) \in \dot{Q}(\bar{x}, \bar{v}) \subseteq$$

$$- \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_2(i)} \bar{v}_i^T F[q(\bar{v}_i - \bar{v}_j)] =$$

$$- \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_2(i)} (\bar{v}_i - \bar{v}_j)^T F[q(\bar{v}_i - \bar{v}_j)],$$

因此, 有

即 $Q(\bar{x}(t), \bar{v}(t))$ 是一个非增函数. 对于任意时间 t , 由方程 (18), 有

$$\int_{\|q(\bar{x}_{ji})\|}^{r_1} a_{ij}(s) ds \leq Q(\bar{x}(t), \bar{v}(t)) \leq$$

$$Q(\bar{x}(0), \bar{v}(0)) < P_{ij} =$$

$$\int_{\varsigma}^{r_1} a_{ij}(s) ds, \quad \forall t \in [0, \infty),$$

故可以得到 $\|q(\bar{x}_{ji})\| > \varsigma$, 即智能体之间不会发生碰撞.

由方程 (18) 还可以得到, 对于任意智能体 i , 有

$$\bar{v}_i^T \bar{v}_i \leq 2Q(\bar{x}(0), \bar{v}(0)),$$

于是, $\|\bar{v}_i\| \leq \sqrt{2Q(\bar{x}(0), \bar{v}(0))}$, 这说明任意智能体与虚拟领导者的速度差是有限值. 因为图 G 是弱连通的, 所以存在 $R > 0$ 使得 $\|\bar{x}(t)\| \leq R, \forall t \geq 0$. 于是, 集合

$$\Omega = \{(\bar{x}, \bar{v}) | Q(\bar{x}, \bar{v}) \leq Q(\bar{x}(0), \bar{v}(0))\} \quad (22)$$

是一个正不变紧集. 根据引理 3, 可以得到始于 Ω 内的轨迹都将收敛于

$$S = \{(\bar{x}, \bar{v}) \in \Omega | 0 \in \dot{Q}(\bar{x}, \bar{v})\}, \quad (23)$$

闭包中的最大不变集 M , 在集合 M 中取 $\dot{Q}(\bar{x}, \bar{v}) = 0$.

当量化器选择对数量化器 (14) 时, 有

$$\bar{v}_1 = \bar{v}_2 = \dots = \bar{v}_N = 0,$$

即 $v_1 = v_2 = \dots = v_N = v_\gamma$, 所有的智能体速度都渐近收敛于虚拟领导者的速度. 当选择一致量化器 (13) 时, 根据量化器性质, 有

$$\bar{v}_i - \bar{v}_j \in \left[-\frac{\delta_u}{2}, \frac{\delta_u}{2} \right] \mathbf{1}_n,$$

可得到

$$\|\bar{v}_i - \bar{v}_j\|_2 \leq \sqrt{n} \|\bar{v}_i - \bar{v}_j\|_\infty \leq \frac{\sqrt{n}}{2} \delta_u,$$

即跟随者速度与领导者速度差值渐近收敛到以 0 为圆心、以 $\frac{\sqrt{n}}{2} \delta_u$ 为半径的邻域内.

3 仿真结果

仿真实验模拟了由 20 个智能体组成的二阶多智能体系统的蜂拥运动, 每个智能体的位置和速度向量经过一致量化后发送给相邻的智能体, 相邻智能体之间的通信信息为经过一致量化的位置和速度向量, 每个智能体的速度和初始位置分别随机产生于 $[0, 0.1] \times [0, 0.1]$ 和 $[0, 35] \times [0, 35]$. 领导者的初始位置 $x_\gamma(0) = [12, 12]^T$, 并以 $v_\gamma(0) = [10, 10]^T$ 的初始速度匀速运行. 速度匹配半径和排斥力半径分别取为 $r_2 = 8.4$ 和 $r_1 = 6$. 采用一致量化器 (14) 对需要进行通信的速度和位置信息进行量化, $\delta_l = 0.05$.

图 1 为二阶多智能体系统的在 $t = 0$ 时刻的初始位置. 其中: 小圆为多智能体个体位置, 小圆之间的距离如果小于速度匹配半径 r_2 , 则有实线相连, 表示多

智能体系统的邻域关系;五角星代表领导者. 二阶多智能体系统在控制输入(12)作用下量化蜂拥运行轨迹如图2所示. 其中: 虚线为智能体的运动轨迹, 粗虚线为虚拟领导者的运动轨迹, 带箭头短线表示智能体的速度向量. 图3为所有智能体的速度向量与虚拟领导者速度向量在 x 轴和 y 轴的误差图, 可以看出, 随着时间的增加, 多智能体系统中所有个体速度与虚拟领导者渐近同步, 多智能体之间保持稳定的通信距离, 形成稳定的蜂拥运动.

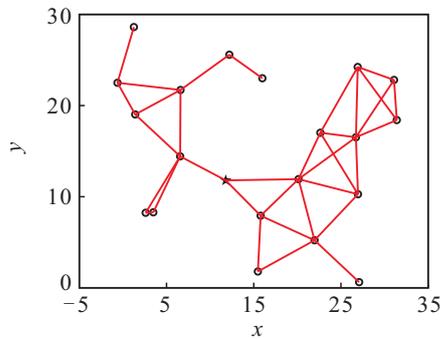


图1 二阶多智能体系统初始位置

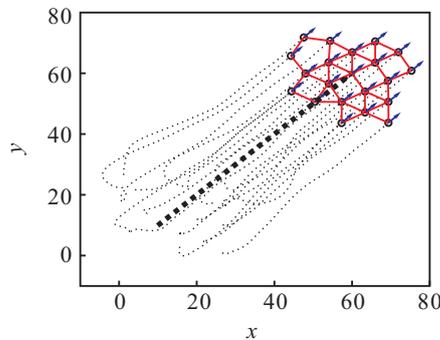


图2 在控制输入(12)作用下多智能体量化蜂拥运动轨迹

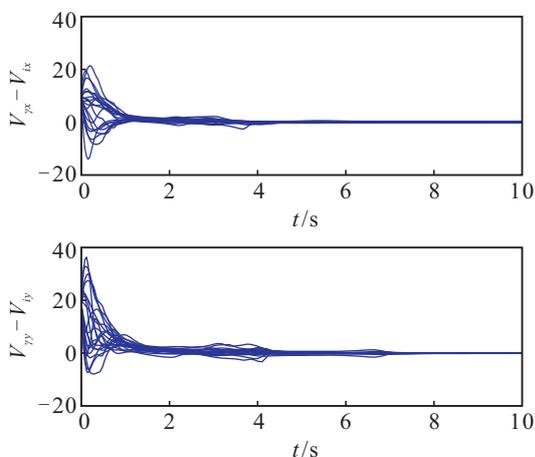


图3 在控制输入(12)作用下, 多智能体与虚拟领导者速度的误差

4 结 论

本文研究了基于量化信息的二阶多智能体系统蜂拥控制问题, 给出了当多智能体之间通信网络使用一致量化器对速度和位置信息进行量化时的蜂拥控

制器, 并通过理论分析和仿真结果验证了所提出控制器的有效性.

参考文献(References)

- [1] Olfati-Saber R. Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2006, 51(3): 401-420.
- [2] 王祥科, 李迅, 郑志强. 多智能体系统编队控制相关问题研究综述[J]. 控制与决策, 2013, 28(11): 1601-1613. (Wang X K, Li X, Zheng Z Q. Survey of developments on multi-agent formation control related problems[J]. Control and Decision, 2013, 28(11): 1601-1613.)
- [3] 娄柯, 崔宝同, 李纹. 基于蜂拥控制的移动传感器网络目标跟踪算法[J]. 控制与决策, 2013, 28(11): 1637-1642. (Lou K, Cui B T, Li W. Target tracking algorithm of mobile sensor networks based on flocking control[J]. Control and Decision, 2013, 28(11): 1637-1642.)
- [4] Dimarogonas D V, Johansson K H. Stability analysis for multi-agent systems using the incidence matrix: Quantized communication and formation control[J]. Automatica, 2010, 46(4): 695-700.
- [5] Ceragioli F, De Persis C, Frasca P. Discontinuities and hysteresis in quantized average consensus[J]. Automatica, 2011, 47(9): 1916-1928.
- [6] Liu H, Cao M, De Persis C. Quantization effects on synchronized motion of teams of mobile agents with second-order dynamics[J]. Systems & Control Letters, 2012, 61(12): 1157-1167.
- [7] Chen W, Li X, Jiao L C. Quantized consensus of second-order continuous-time multi-agent systems with a directed topology via sampled data[J]. Automatica, 2013, 49(7): 2236-2242.
- [8] Guan Z H, Meng C, Liao R Q, et al. Consensus of second-order multi-agent dynamic systems with quantized data[J]. Physics Letters A, 2012, 376(4): 387-393.
- [9] Filippov A F. Differential equations with discontinuous righthand side[J]. American Mathematical Society Translations, 1964, 42(2): 199-231.
- [10] Cortes J. Discontinuous dynamical systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2008, 28(3): 36-73.
- [11] Clarke F H. Optimization and nonsmooth analysis[M]. New York: Wiley, 1983: 45-46.
- [12] Shevitz D, Paden B. Lyapunov stability theory of nonsmooth systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1994, 39(9): 1910-1914.
- [13] Zhang H T, Zhai C, Chen Z Y. A general alignment repulsion algorithm for flocking of multi-agent systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2011, 56(2): 430-435.

(责任编辑: 曹洪武)