

基于采样数据的时延多智能体系统的动态路径跟踪

杨洪勇,张玉玲,寇光杰,丁 宏
(鲁东大学信息与电气工程学院,山东烟台 264025)

摘 要: 研究了具有动态 Leader 的时延多智能体系统的路径跟踪样本控制.假设由 n 个智能体个体和一个 Leader 组成的多智能体系统是一个有向加权网络,其中 Leader 作为有向网络的全局可达节点.本文应用 Hermit-Biehler 定理研究了具有动态 Leader 的时延多智能体系统的样本控制,通过对时滞闭环系统分析得到了基于采样数据的时延多智能体系统的路径跟踪的充要条件.最后仿真验证了结论的有效性.

关键词: 动态 Leader; 通信时延; 样本控制; 多智能体系统; 路径跟踪

中图分类号: TP181 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013) 09-1760-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.09.014

Dynamic Trajectory Following of Delayed Multi-Agent Systems with Sampling-Data

YANG Hong-yong, ZHANG Yu-ling, KOU Guang-jie, DING Hong
(Information and Electrical Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China)

Abstract: Sampling control of the trajectory following of delayed multi-agent systems with dynamic leader is studied. Suppose multi-agent system is composed of n agents and one leader with a static weighted interconnection topology graph where leader is a globally reachable node. By applying the Hermit-Biehler theorem, the sampling control of delayed multi-agent systems with dynamic leader is researched, a sufficient and necessary condition is presented for the trajectory following of delayed multi-agent systems with sampling-data. Finally, the effectiveness of the results is validated by computer simulation.

Key words: dynamic leader; communication delay; sampling control; multi-agent systems; trajectory following

1 引言

近年来,随着网络化系统的迅速发展,分布式大规模网络化多自主个体之间的协调控制,在实际工程中得到广泛应用,比如,无人驾驶飞行器的编队控制、分布式传感器网络、卫星的姿态控制、海底机器人的合作控制、高级自治监测系统、多服务器组成的云计算系统等,多智能体系统的组织与控制已经成为系统与控制领域的一个重要研究课题^[1~20].

在多智能体系统的相关研究中,现在研究比较多的是多智能体系统的一致性问题,也就是自主个体通过局部相互作用使得在某一个状态量(如:位置、相位、速度、高度等)上趋于相等^[6~13].在实际应用中,由于受通信系统中信道带宽的限制,控制器的综合只能应用离散时刻获得的采样数据.在连续时间动力学系统中,应用采样控制器与应用连续时间控制器相比,基于采样控制器设计的数字控制器在控制精度、控制速度、性价比等方

面有明显的优势;而且数字采样控制器具有较强的抗干扰能力,符合实际工程的应用要求.

现在对于基于采样控制的连续时间多智能体系统的协调控制研究很少.文献[14,15]分别研究了静态有向网络和动态有向网络拓扑下基于采样数据控制的一阶智能体系统的一致性问题.文献[16,17]研究了基于采样数据的二阶多智能体系统的一致性控制问题.文献[18]研究了基于采样数据的随机网络下的二阶多智能体系统的均方一致问题.在现有研究文献中,对于基于采样数据和通信时延的分布式多自主主体系统的编队控制和路径跟踪等问题鲜有报道.

本文拟对具有动态 Leader 的时延多智能体系统的样本控制进行研究.假设多智能体系统由 n 个智能体个体和一个 Leader 组成,多智能体系统中的 Leader 状态是时变的,而且智能个体之间信息传输存在通信时延.本文应用 Hermit-Biehler 定理研究基于采样数据的时延多智能体系统的动态路径跟踪控制.

2 动态多智能体系统的样本控制

假设多智能体系统有一个 Leader 和 n 个自主个体组成,智能体之间构成网络拓扑 G . 假设 $G = \{V, E, A\}$ 表示一个有向加权图,其中 $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ 表示具有 n 个节点的集合,它的边集合 $E \subseteq V \times V$. 节点的下标集合 $I = \{1, 2, \dots, n\}$, 邻接矩阵 $A = [a_{ij}]$, 其中矩阵元素 $a_{ij} \geq 0$ 表示节点 i 到节点 j 的连接权重,如果节点 i 可以得到节点 j 的信息,则 $a_{ij} > 0$, 否则, $a_{ij} = 0$. 假设网络图中每个节点没有自连,也就是,对于所有 $i \in I, a_{ii} = 0$.

定义节点 i 的邻居集合为 $N_i = \{j: a_{ij} > 0\}$, 矩阵 $L = D - A$ 为图 G 的 Laplace 矩阵,其中矩阵 $D = \text{diag}\{d_i, i = 1, \dots, n\}$, $d_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}$. 如果对于两个节点 i, j , 存在下标集合 $\{k_1, \dots, k_l\}$, 满足 $a_{jk_1} > 0, a_{k_1 k_2} > 0, \dots, a_{k_l i} > 0$, 则称节点 j 到节点 i 之间存在一条连接路径,也称节点 j 可到达节点 i . 如果对于节点,图中其他节点都存在一条路径到达该节点,则称节点是全局可达的.

引理 1^[5] 假设多智能体系统有 n 个自主个体和一个 Leader 智能体,网络连接拓扑为有向加权网络,Leader 作为网络连接图的全局可达节点. 则矩阵 $L + B$ 为满秩的,其中 L 为 n 个智能体组成的连接拓扑图的 Laplacian 矩阵, $B = \text{diag}\{b_i, i \in I\}$, b_i 为不全为 0 的非负实数.

假设多智能体系统满足下面的动态方程:

$$\dot{x}_i(t) = u_i(t) \quad (1)$$

其中 $x_i(t) \in R^m$ 为智能体的状态, $u_i(t) \in R^m$ 为控制输入. 不失一般性,为了证明书写方便,本文假设 $m = 1$. 文献[7]研究了连续时间多智能体系统的路径跟踪算法:

$$\begin{aligned} \dot{r}_i(t) &= u_i(t) \\ u_i(t) &= \frac{1}{D_i} \sum_{j=1}^n a_{ij} (\dot{r}_j(t) - \gamma(r_i(t) - r_j(t))) \\ &\quad + \frac{a_{i0}}{D_i} (\dot{r}_0(t) - \gamma(r_i(t) - r_0(t))) \end{aligned} \quad (2)$$

其中 a_{ij} 是邻接矩阵 A 的第 (i, j) 个元素. $D_i = \sum_{j=0}^n a_{ij}$, 如果 Leader 是第 i 自主个体的邻居,则 $a_{i0} > 0$, 否则 $a_{i0} = 0$. 控制增益 $\gamma > 0$. $r_0(t)$ 为 Leader 的运动状态,满足

$$\dot{r}_0(t) = f(t, r_0) \quad (3)$$

其中 $f(\cdot, \cdot)$ 为智能体 Leader 的速度,关于 $r_0(t)$ 满足 Lipschitz 条件. 路径跟踪算法的目标是保证

$$\lim_{t \rightarrow \infty} r_i(t) - r_0(t) = 0, i = 1, \dots, n$$

假设多智能体系统有 n 个自主个体和一个 Leader 智能体,网络连接拓扑为有向加权网络,Leader 作为网络连接图的全局可达节点,则每个智能个体(不包含 Leader)都至少能够接受来自其他节点的信息,则 $D_i >$

$0, \forall i \in V$. 对连续时间多智能体系统的路径跟踪算法式(2)进行整理可得

$$\begin{aligned} D_i \dot{r}_i(t) &- \sum_{j=1}^n a_{ij} \dot{r}_j(t) - a_{i0} \dot{r}_0(t) \\ &= -\gamma \sum_{j=1}^n a_{ij} (r_i(t) - r_j(t)) - \gamma a_{i0} (r_i(t) - r_0(t)) \end{aligned}$$

则

$$\dot{X}_i(t) = Y_i(t) \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} X_i(t) &= D_i r_i(t) - \sum_{j=1}^n a_{ij} r_j(t) - a_{i0} r_0(t), \\ Y_i(t) &= -\gamma \sum_{j=1}^n a_{ij} (r_i(t) - r_j(t)) - \gamma a_{i0} (r_i(t) - r_0(t)). \end{aligned}$$

在实际工程中,控制器一般应用离散时刻获得的样本数据. 控制器表示为

$$u_i(t) = u_i(kT), kT \leq t < (k+1)T,$$

其中 k 表示离散采样时序, T 表示采样周期. 多智能体系统的动态路径跟踪算法式(4)表示为

$$\begin{aligned} X_i[(k+1)T] &= X_i[kT] + TY_i[kT] \\ Y_i[kT] &= -\gamma \sum_{j=1}^n a_{ij} (r_i[kT] - r_j[kT]) \\ &\quad - \gamma a_{i0} (r_i[kT] - r_0[kT]) \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $r_i(kT)$ 表示智能个体 i 在 $t = kT$ 时刻的运动位置, $r_0[kT]$ 表示 Leader 在 $t = kT$ 时刻的位置. 注意到,某一个自主个体的位置根据邻居和自身的前一时刻信息来进行调整.

由于实际应用中,网络节点之间存在数据传输时延和数据处理时延,时延对系统的运动状态具有重要的影响. 对一个系统而言,数据处理时延属于系统内部时延,数据传输时延是外部时延,因此传输时延受周围环境和外部干扰影响. 本文研究具有传输时延和动态 Leader 的多智能体系统的路径跟踪的样本控制. 假设样本时延 $\tau \in (0, T)$ 是固定的,则时延多智能体系统的路径跟踪算法为

$$\begin{aligned} Y_i[t] &= -\gamma \sum_{j=1}^n a_{ij} (r_i[kT - T] - r_j[kT - T]) \\ &\quad - \gamma a_{i0} (r_i[kT - T] - r_0[kT - T]), \\ &\quad t \in [kT, kT + \tau) \\ Y_i[t] &= -\gamma \sum_{j=1}^n a_{ij} (r_i[kT] - r_j[kT]) \\ &\quad - \gamma a_{i0} (r_i[kT] - r_0[kT]), \\ &\quad t \in [kT + \tau, kT + T) \end{aligned}$$

所以,时延多智能体系统的样本控制算法为

$$\begin{aligned} X_i[(k+1)T] &= X_i[kT] + \tau Y_i[kT - T] \\ &\quad + (T - \tau) Y_i(kT) \end{aligned} \quad (6)$$

3 主要结论

引理 2 (Hermit-Biehler 定理)^[19] 假设多项式

$q(s) = \rho_0 + \rho_1 s + \dots + \rho_n s^n$, 记

$$q(i\omega) = m(\omega) + in(\omega).$$

则 $q(s)$ 是 Hurwitz 稳定的, 当且仅当下列条件成立

① $m(\omega) = 0$ 的根 $m_1 < m_2 < \dots$, $n(\omega) = 0$ 的根 $n_1 < n_2 < \dots$, 满足: $m_1 < n_1 < m_2 < n_2 < \dots$, 或者 $n_1 < m_1 < n_2 < m_2 < \dots$.

② $m(0)n'(0) - m'(0)n(0) > 0$.

定理 假设多智能体系统式(2)含有 n 个多智能体和一个动态 Leader, 存在从 Leader 到其它自主个体的有向路径. 系统采样周期 T 和通信时延 τ , 当且仅当满足 $\tau < 1/\gamma$ 且 $\tau < T < 2\tau + 2/\gamma$ 时, 时延多智能体系统能够动态跟踪 Leader 的运动轨迹. 也就是, 对于所有的智能个体, $\lim_{t \rightarrow +\infty} (r_i(t) - r_0(t)) = 0$.

证明 假设系统采样周期为 T , 通信时延 τ , 则具有时延的多智能体系统式(2)的样本控制算法变为

$$\begin{aligned} X_i[(k+1)T] &= X_i[kT] - \gamma\tau \sum_{j=1}^n a_{ij}(r_i[kT-T] - r_j[kT-T]) \\ &\quad - \gamma\tau a_{i0}(r_i[kT-T] - r_0[kT-T]) \\ &\quad - \gamma(T-\tau) \sum_{j=1}^n a_{ij}(r_i[kT] - r_j[kT]) \\ &\quad - \gamma(T-\tau) a_{i0}(r_i[kT] - r_0[kT]). \end{aligned}$$

令 $p_i[kT] = r_i[kT] - r_0[kT]$, 上式化简得到

$$\begin{aligned} \bar{L}P[(k+1)T] &= \bar{L}P[kT] - \gamma\tau\bar{L}P[kT-T] \\ &\quad - \gamma(T-\tau)\bar{L}P[kT], \end{aligned}$$

其中 $\bar{L} = L + \mathbf{A}$, $\mathbf{A} = \text{diag}\{a_{10}, a_{20}, \dots, a_{n0}\}$, $P[kT] = (p_1[kT], \dots, p_n[kT])^T$. 根据引理 1 矩阵 \bar{L} 可逆, 上式整理可以得到

$$\begin{bmatrix} P(kT+T) \\ P(kT) \end{bmatrix} = \Psi \begin{bmatrix} P(kT) \\ P(kT-T) \end{bmatrix}, k=0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

其中

$$\Psi = \begin{bmatrix} \Psi_{11} & \Psi_{12} \\ I_n & 0 \end{bmatrix}, \Psi_{11} = [1 - (T-\tau)\gamma]I_n, \Psi_{12} = -\tau\gamma I_n.$$

假设系统矩阵 Ψ 的所有特征值在单位圆内, 则闭环系统式(7)渐近稳定. 也就是 $\lim_{k \rightarrow +\infty} p_i(kT) = 0$, 即 $\lim_{k \rightarrow +\infty} r_i(kT) = r_0(t)$. 由于

$$\begin{aligned} \det(zI_{2n} - \Psi) &= \det \left(\begin{bmatrix} zI_n - \Psi_{11} & -\Psi_{12} \\ -I_n & zI_n \end{bmatrix} \right) \\ &= \det(zI_n - \Psi_{11} - \Psi_{12}) \\ &= \prod_{i=1}^n (z^2 - z(1 - (T-\tau)\gamma) + \tau\gamma) \quad (8) \end{aligned}$$

令 $a(z) = z^2 - z(1 - (T-\tau)\gamma) + \tau\gamma = 0$, 我们下面要证明 $a(z) = 0$ 的根都在单位圆内. 为了计算特征根, 应用双线性变换

$$z = \frac{s+1}{s-1},$$

代入 $a(z)$ 得到

$$q(s) = T\gamma s^2 + 2(1-\tau\gamma)s + 2 + 2\tau\gamma - T\gamma. \quad (9)$$

由于双线性变化是一个一一映射, 可以把单位圆内的所有点映射到复平面的左半平面. 因此下面只需证明 $q(s) = 0$ 的特征根都在复平面的左半平面. 令 $s = i\omega$, 则

$$q(i\omega) = m(\omega) + in(\omega), \quad (10)$$

其中 $m(\omega) = -T\gamma\omega^2 + 2 + 2\tau\gamma - T\gamma$, $n(\omega) = 2(1-\tau\gamma)\omega$. 下面应用引理 2,

① 当 $T < 2\tau + 2/\gamma$ 时, 有 $2 + 2\tau\gamma - T\gamma > 0$, 此时 $m(\omega)$ 有两个不同的实根.

$$m_{1,2} = \pm \sqrt{(2 + 2\tau\gamma - T\gamma)/(T\gamma)}.$$

② 当 $\tau \neq 1/\gamma$ 时, $n(\omega)$ 有一个实根 0, 介于 $m(\omega)$ 的两个实根之间.

③ 由于 $m(0)n'(0) - m'(0)n(0) = 2(1-\tau\gamma)(2 + 2\tau\gamma - T\gamma)$, 当 $2 + 2\tau\gamma - T\gamma > 0$ 和 $1 - \tau\gamma > 0$ 时, 得到 $m(0)n'(0) - m'(0)n(0) > 0$. 因此有 $\tau < 1/\gamma$.

基于以上分析, 根据引理 2, 当且仅当 $\tau < 1/\gamma$ 且 $\tau < T < 2\tau + 2/\gamma$ 时, $q(s) = 0$ 的特征根都在复平面的左半平面. 也就是, 系统矩阵 Ψ 的所有特征值在单位圆内, 多智能体系统渐近稳定, 这样就得到, 对于所有的智能体 $i \in I$, 有 $\lim_{k \rightarrow +\infty} r_i(kT) = \lim_{t \rightarrow +\infty} r_i(t) = \lim_{t \rightarrow +\infty} r_0(t)$. \square

4 实例分析

假设有 4 个智能个体和一个 Leader, 组成如图 1 所示拓扑结构图(智能体 0 为 Leader). 图中连边的权重在 (0, 1) 随机生成. 假设系统运动方程中参数 $\gamma = 2$, 各智能体的初值在 (0, 5) 内由计算机随机产生, Leader 的运动方程为 $r_0(t) = \sin(0.1t)$. 有定理可知通信时延的临界值 $\tau_{\max} = 0.5$. 下面通过 4 个实例验证结论的正确性.

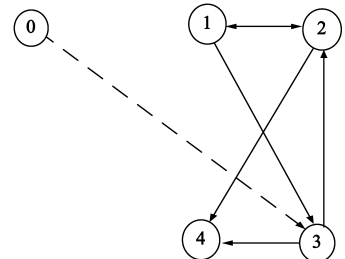


图1 多智能体系统拓扑结构

实例 1 假设 $\tau = 0.4$, $T = 1.5$, 通信时延和样本周期满足定理的条件, 应用计算机仿真, 时延移动多智能体系统的运动轨迹见图 2. 各个智能体的运动状态逐渐与 Leader 的运动轨迹一致. 进一步分析可知, 在满足定理的条件下, 通信时延和样本周期越小, 系统收敛越快.

实例 2 假设 $\tau = 0.4$, 此时样本周期的临界值为 $T_{\max} = 1.8$. 假设样本周期 $T = 1.9$, 通信时延满足定理的条件, 但是样本周期 T 不满足定理的要求. 应用计算机仿真, 时延多智能体系统的运动轨迹见图 3, 各个智能

体的运动状态逐渐发散,无法跟踪 Leader 的运动轨迹。

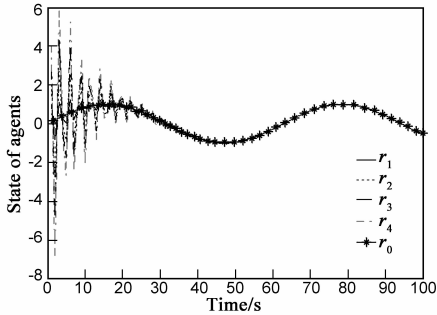


图2 系统的运动状态($\tau=0.4, T=1.5$)

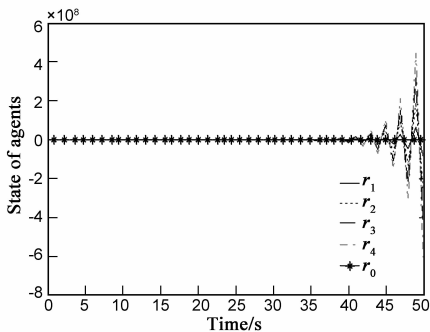


图3 系统的运动状态($\tau=0.4, T=1.9$)

实例 3 假设 $\tau = 0.6, T = 1.5$. 根据定理 1 的结论, 样本周期 T 满足定理的条件, 但是通信时延大于时延临界值, 不满足定理的要求. 应用计算机仿真, 时延多智能体系统的运动轨迹见图 4, 各个智能体的运动状态逐渐发散, 无法跟踪 Leader 的运动轨迹。

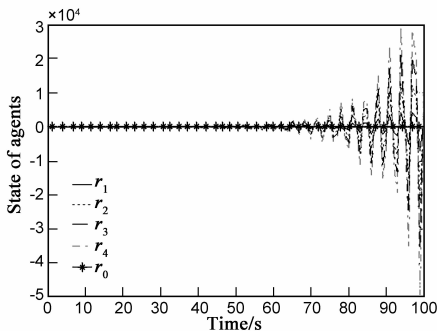


图4 系统的运动状态($\tau=0.6, T=1.5$)

实例 4 假设 $\tau = 0.5, T = 1.8$, 此时通信时延等于临界值 τ_{\max} . 样本周期满足定理的要求, 但是通信时延与定理给出的通信时延的临界值相同. 应用计算机仿真, 基于采样数据的时延多智能体系统的运动轨迹见图 5, 各个智能体的运动状态呈现周期震荡运动, 但是无法跟踪 Leader 的运动轨迹。

5 结论

本文研究了时延多智能体系统的路径跟踪样本控

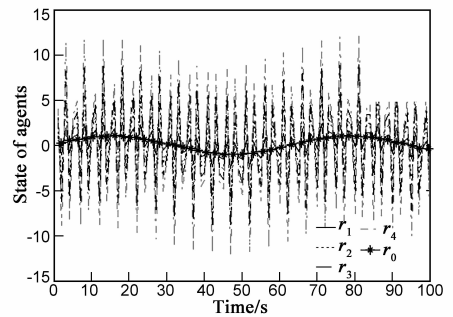


图5 系统的运动状态($\tau=0.5, T=1.8$)

制问题. 假设多智能体系统中的 Leader 状态是时变的, 而且智能个体之间通信存在通信时延. 如果多智能体系统存在从 Leader 到其他智能个体的有向路径, 本文给出了基于采样数据的时延多智能体系统的路径跟踪的充要条件. 本文研究结果对于多智能体系统的实际应用具有很重要的指导意义。

参考文献

- [1] Couzin I D, Krause J, James R, Ruxton G D, Franks N R. Collective memory and spatial sorting in animal groups[J]. Journal of Theoretical Biology, 2002, 218(1): 1 - 11.
- [2] Olfati-Saber R, Murray R M, Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. IEEE Transactions Automatic Control, 2004, 49(9): 1520 - 1533.
- [3] Vicsek T, Cziroo'k A, Ben-Jacob E, Cohen I, Shochet O. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles[J]. Physical Review Letter, 1995, 75(6): 1226 - 1229.
- [4] 刘春阳, 谭应清, 柳长安, 等. 多智能体强化学习在足球机器人中的研究与应用[J]. 电子学报, 2010, 38(8): 1958 - 1962.
Liu Chun-yang, Tan Ying-qing, Liu Chang-an, et al. Application of multi-agent reinforcement learning in robot soccer[J]. Acta Electronic Sinica, 2010, 38(8): 1958 - 1962. (in Chinese)
- [5] Ren W, Beard R W, Atkins E M. Information consensus in multivehicle cooperative control: Collective group behavior through local interaction[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2007, 27(2): 71 - 82.
- [6] Yang Hongyong, Zhang Zhenxing, Zhang Siying. Consensus of second-order multi-agent systems with exogenous disturbances[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2011, 21(9): 945 - 956.
- [7] Cao Yongcan, Ren Wei, Li Yan. Distributed discrete-time coordinated tracking with a time-varying reference state and limited communication[J]. Automatica, 2009, 45(5): 1299 - 1305.
- [8] 陈凤东, 洪炳 ■. 基于特征地图的移动机器人全局定位与自主泊位方法[J]. 电子学报, 2010, 38(6): 1256 - 1261.
Chen Feng-dong, Hong Bing-rong. A global localization and self-Docking method for mobile robot based on feature map

- [J]. Acta Electronic Sinica, 2010, 38(6): 1256 – 1261. (in Chinese)
- [9] Chen Fei, Chen Zengqiang, Xiang LinYing, Liu Zhongxin, Yuan Zhuzhi. Reaching a consensus via pinning control[J]. Automatica, 2009, 45(5): 1215 – 1220.
- [10] Lin Peng, Jia Yingmin. Distributed rotating formation control of multi-agent systems[J]. Systems & Control Letters, 2010, 59(10): 587 – 595.
- [11] 杨洪勇, 田生文, 张嗣瀛. 具有领航者的时延多智能体系统的一致性[J]. 电子学报, 2011, 39(4): 872 – 876.
Yang Hong-yong, Tian Sheng-wen, Zhang Si-ying. Consensus of multi-agent systems with heterogeneous delays and leader-following[J]. Acta Electronic Sinica, 2011, 39(4): 872 – 876. (in Chinese)
- [12] Xiao Feng, Wang Long, Chen Jie, Gao Yanping. Finite-time formation control for multi-agent systems [J]. Automatica, 2009, 45(11): 2605 – 2611.
- [13] Yang Hongyong, Zhu Xunlin, Zhang Siying. Consensus of second-order delayed multi-agent systems with leader-following [J]. European Journal of Control, 2010, 16(2): 188 – 199.
- [14] Xie Guangming, Liu Huiyang, Wang Long, Jia Yingmin. Consensus in networked multi-agent systems via sampled control: fixed topology case[A]. Proceedings of the 2009 Conference on American Control[C]. New York: IEEE Control Systems Society, 2009. 3902 – 3907.
- [15] Xie Guangming, Liu Huiyang, Wang Long, Jia Yingmin. Consensus in networked multi-agent systems via sampled control: switching topology case[A]. Proceedings of the 2009 Conference on American Control[C]. New York: IEEE Control Systems Society, 2009. 4525 – 4530.
- [16] Gao Yanping, Wang Long, Xie Guangming, Wu Bin. Consensus of multi-agent systems based on sampled-data control[J]. International Journal of Control, 2009, 82(12): 2193 – 2205.
- [17] Cao Yongcan, Ren Wei. Multi-vehicle coordination for double-integrator dynamics under fixed undirected/directed interaction in a sampled-data setting [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2010, 20(9): 987 – 1000.
- [18] Zhang Ya, Tian Yuping. Consentability and protocol design of multi-agent systems with stochastic switching topology [J]. Automatica, 2009, 45(5): 1195 – 1201.
- [19] Ogata K. Discrete-Time Control System [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1995.

作者简介



杨洪勇 男, 1967年9月出生, 山东庆云人. 2005年毕业于东南大学自动化系, 获得工学博士学位, 现为鲁东大学信息与电气工程学院教授, 主要从事复杂网络、多智能体编队、智能控制、非线性系统控制等领域研究工作.

E-mail: hyyang@ldu.edu.cn



张玉玲 女, 1980年4月出生, 山东烟台人. 2007年毕业于山东大学信息科学与工程学院, 获工学博士学位, 现为鲁东大学信息与电气工程学院副教授, 研究方向为宽带无线移动通信系统的跨层优化、认知传感器网络技术、纠错抗干扰技术、多天线技术等.

E-mail: zhang-yuling@hotmail.com