

基于事件触发的时变拓扑多智能体系统编队控制

周 川[†], 洪小敏, 何俊达, 杜 鹏

(南京理工大学 自动化学院, 南京 210094)

摘 要: 针对资源受限的时变拓扑多智能体系统的编队控制问题, 提出一种基于复合误差信息事件触发机制以减少不必要的信息传输, 降低带宽占用, 并设计了多智能体系统的编队控制协议和分布式事件触发机制. 通过将多智能体系统的编队控制问题转化为闭环延时系统的稳定性问题, 构造 Lyapunov-Krasovskii 函数并利用线性矩阵不等式技术, 给出多智能体系统实现编队的充分条件. 最后, 通过仿真验证了所提出方法的有效性.

关键词: 多智能体系统; 事件触发; 复合误差; 时变拓扑; 编队控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Formation control of multi-agent systems with time-varying topology based on event-triggered mechanism

ZHOU Chuan[†], HONG Xiao-min, HE Jun-da, DU Peng

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: For the formation control problem of time-varying topology multi-agent systems with resource-constraints, an event-triggered mechanism based on combination error information is presented to reduce the unnecessary information transmission and lower the occupation of bandwidth, and the formation control protocol and distributed event-triggered mechanism are designed for multi-agent systems. By transforming the formation control problem of multi-agent systems into the stability problem of closed-loop time delay system, the Lyapunov-Krasovskii functional is constructed, and the sufficient condition of formation is provided by using linear matrix inequality(LMI) techniques. Finally, a simulation example illustrates the effectiveness of the proposed method.

Keywords: multi-agent systems; event-trigger; combination error; time-varying topology; formation control

0 引 言

随着多智能体系统的协同控制在分布式小卫星群的编队飞行、自动高速公路的调度以及无线传感器网络等领域的广泛应用, 多智能体系统的协同及编队控制已成为控制界的研究热点^[1-2].

文献[3]基于一致性算法研究多智能体系统的编队控制及障碍规避问题, 设计了基于改进的势能函数的障碍规避及分布式控制协议. 文献[4]采用虚拟领导结构, 研究了包含四旋翼飞行器和两轮地面移动机器人的异质多智能体系统的编队问题. 但以上文献均是假设多智能体系统的通信网络是理想且不受限的. 然而, 实际网络化多智能体系统往往存在着资源受限问题并影响其稳定性和性能. 因此, 亟需高效的信息传输控制策略, 利用有限资源完成多智能体系统的协同控制任务. 基于事件触发机制的传输策略因

其可显著降低通信负担而得到了广泛的研究. 在基于事件触发的控制中, 信息传输与否由设计的触发条件(即事件)决定. 事件的设计可分为时间相关的事件^[5]和状态相关的事件^[6]. 基于时间相关事件而设计的事件触发机制因其事件的发生与系统状态无关而具有较大的保守性. 目前, 基于事件触发机制的研究均是针对单个智能体比较其当前的信息与上次触发传输的信息, 若两者的偏差满足触发条件, 则更新信息; 反之则用上次的触发传输的信息代替当前信息. 该类事件触发机制虽然可减小信息传输量, 但未考虑到整个系统的协同控制状态和性能.

随着智能体的运动, 通信拓扑结构和参数也将随着时间而改变. 一些文献针对拓扑变化或切换拓扑的多智能体系统的协调控制进行了研究^[7-8]. 另一方面, 在实际的无线传输中, 由于多径衰减、障碍遮挡、

收稿日期: 2016-04-05; 修回日期: 2016-07-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61074023, 61273120); 江苏省大学生科研创新计划项目(201410288020X).

作者简介: 周川(1970—), 男, 教授, 博士, 从事多智能体系统、网络控制系统等研究; 洪小敏(1991—), 女, 硕士生, 从事多智能体系统一致性控制及应用的研究.

[†]通讯作者. E-mail: njust_zc@126.com

发送器与接收器之间距离变化等不确定性因素的影响,多智能体的通信拓扑的连接权重往往是动态变化的.文献[9-10]研究了具有动态变化的通信拓扑下的多智能体系统一致性问题.

本文基于复合误差信息设计事件触发机制,研究具有网络资源受限及时变通信拓扑的多智能体系统的编队控制问题.主要工作和贡献如下:

1) 考虑实际中通信拓扑随着智能体的运动而变化且无线通信受到多径衰减、遮蔽等不确定因素的影响,研究具有时变通信拓扑的多智能体系统的编队控制问题;

2) 针对具有时变通信拓扑及延时的二阶虚拟领航者-跟随者多智能体系统的编队控制问题,提出一种基于复合误差信息的分布式事件触发机制,在保证系统实现稳定编队的前提下减少不必要的信息传输.

1 问题描述

考虑如下具有二阶积分型的多智能体系统(虚拟领导者编号为0,智能体节点编号为1,2,...,N):

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = v_i(t), \\ \dot{v}_i(t) = u_i(t), \quad i = 0, 1, \dots, N. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x_i(t) \in R^n$, $v_i(t) \in R^n$, $u_i(t) \in R^n$ 分别表示第 i 个智能体节点的位置、速度及控制输入且 $u_0(t) = 0$. 第 i 个智能体节点的结构如图1所示.

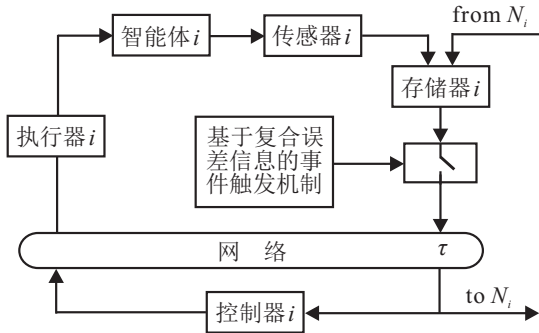


图1 第 i 个智能体节点的结构

假设1 执行器、控制器的工作方式均为事件驱动,传感器的工作方式为时间驱动,其采样周期为 h , $h > 0$.

由于智能体节点的运动以及无线网络中存在多径衰减、遮蔽等导致的不确定性,本文考虑智能体节点 i 与智能体节点 j 的连接权重 a_{ij} 是时变的,用 $a_{ij}(t)$ 表示. 相应多智能体系统的无向时变通信拓扑图可建模为 $G(t) = (\nu, \varepsilon(t), A(t))$. 智能体节点用 $\nu = \{1, 2, \dots, N\}$ 表示, $\varepsilon(t) \subseteq \nu \times \nu$ 表示边的集合, $A(t) = [a_{ij}(t)] \in R^{N \times N}$ 为加权邻接矩阵. 图 $G(t)$ 的 Laplace 矩阵定义为 $L(t) = [l_{ij}(t)] \in R^{N \times N}$, $l_{ij}(t) =$

$-a_{ij}(t)$, $i \neq j$ 且 $l_{ii}(t) = \sum_{j=1}^N a_{ij}(t)$. 智能体 i 的邻接节点 j 为 $N_i(t) = \{j \in \nu | (i, j) \in \varepsilon(t)\}$.

假设2 记 $\hat{L}(t) = L(t) + C(t)$, 满足

$$\hat{L}(t) = \sum_{p=1}^m \eta_p(t) \hat{L}_p.$$

其中: $m > 0$, $\hat{L}_p$ 为常矩阵, $\sum_{p=1}^m \eta_p(t) = 1$, $\eta_p(t) > 0$, $\dot{\eta}_p(t) \leq \eta_{Mp}$, η_{Mp} 为已知常数.

设计如下编队控制协议:

$$u_i(t) = -k_1 \zeta_{ix}(t_{k_i}^i - \tau) - k_2 \zeta_{iv}(t_{k_i}^i - \tau). \quad (2)$$

其中: k_1, k_2 为待设计值; 而

$$\begin{aligned} \zeta_{ix}(t) &= \sum_{j \in N_i(t)} [a_{ij}(t)((x_i(t) - x_{d_i}) - \\ &\quad (x_j(t) - x_{d_j})) + c_{i0}(x_i(t) - x_0(t) - x_{d_i})], \\ \zeta_{iv}(t) &= \sum_{j \in N_i(t)} [a_{ij}(t)(v_i(t) - v_j(t) + \\ &\quad c_{i0}(t)(v_i(t) - v_0(t)))] \end{aligned}$$

为复合误差; τ 为有界常时延且满足 $0 \leq \tau \leq h$, 记 $C(t) = \text{diag}\{c_{10}(t), c_{20}(t), \dots, c_{N0}(t)\}$, 如果智能体 i 与虚拟领导者之间存在通信链路, 则 $c_{i0}(t) > 0$, 否则 $c_{i0}(t) = 0$; $\{t_k\}$ ($k = 0, 1, \dots$) 为触发时间序列, $t_{k_i}^i = \max\{t^i | t^i \in \{t_l^i, l = 0, 1, \dots\}, t^i \leq t\}$ 为智能体节点 i 最近一次触发传输的时刻. 下一次触发时刻由事件触发机制决定, 即

$$\begin{aligned} f_{ix}(t) &= \|e_{ix}(t)\| - \alpha \|\zeta_{ix}(t_{k_i}^i)\|, \\ f_{iv}(t) &= \|e_{iv}(t)\| - \beta \|\zeta_{iv}(t_{k_i}^i)\|. \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $\alpha > 0, \beta > 0$ 为待设计的阈值, 而

$$\begin{aligned} e_{ix}(t) &= \zeta_{ix}(t) - \zeta_{ix}(t_{k_i}^i), \\ e_{iv}(t) &= \zeta_{iv}(t) - \zeta_{iv}(t_{k_i}^i). \end{aligned}$$

本文采用基于复合误差信息的事件触发机制(3)以减少智能体节点的状态信息的传输次数, 从而降低控制器的更新频率以及通过网络传输到邻接智能体节点的通信量. 当 $t = t_{k_i}^i$ 时, $e_{ix}(t) = 0$, $e_{iv}(t) = 0$. 当 $f_{ix}(t) > 0$ 或 $f_{iv}(t) > 0$ 时, 智能体节点 i 的状态将被传输; 否则, 节点 i 的状态不传输且相应的控制器采用零阶保持器保持上次的数据, 即

$$t_{k_i+1}^i = \inf\{t : t > t_{k_i}^i, f_{ix}(t) > 0 \vee f_{iv}(t) > 0\}.$$

由多智能体系统模型(1)和编队控制协议(2)并定义智能体节点的编队状态误差为

$$\begin{cases} \bar{x}_i(t) = x_i(t) - x_0(t) - x_{d_i}, \\ \bar{v}_i(t) = v_i(t) - v_0(t), \end{cases} \quad (4)$$

则智能体节点 i 可表示为

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_i(t) = \bar{v}_i(t), \\ \dot{\bar{v}}_i(t) = \\ -k_1 \sum_{j \in N_i(t)} a_{ij}(t)(\bar{x}_i(t-\tau) - \bar{x}_j(t-\tau)) - \\ k_2 \sum_{j \in N_i(t)} a_{ij}(t)(\bar{v}_i(t-\tau) - \bar{v}_j(t-\tau)) - \\ k_1 c_{i0}(t)\bar{x}_i(t-\tau) - k_2 c_{i0}(t)\bar{v}_i(t-\tau) + \\ k_1 e_{ix}(t-\tau) + k_2 e_{iv}(t-\tau). \end{cases} \quad (5)$$

记

$$\delta(t) = [\bar{x}^T(t), \bar{v}^T(t)]^T, \quad e(t) = [e_x^T(t), e_v^T(t)]^T.$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{x}(t) &= [\bar{x}_1^T(t), \dots, \bar{x}_N^T(t)]^T, \\ \bar{v}(t) &= [\bar{v}_1^T(t), \dots, \bar{v}_N^T(t)]^T, \\ e_x(t) &= [e_{1x}^T(t), \dots, e_{Nx}^T(t)]^T, \\ e_v(t) &= [e_{1v}^T(t), \dots, e_{Nv}^T(t)]^T. \end{aligned}$$

则可得闭环误差系统

$$\begin{aligned} \dot{\delta}(t) &= \\ E_1 \delta(t) + \sum_{p=1}^m \eta_p(t) F \delta(t-\tau) + E_2 e(t-\tau). \end{aligned} \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} t &\in [t_k, t_k + 1), \\ F &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -k_1 \hat{L}_p & -k_2 \hat{L}_p \end{bmatrix} \otimes I_n, \\ E_1 &= \begin{bmatrix} 0 & I_N \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \otimes I_n, \\ E_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ k_1 I_N & k_2 I_N \end{bmatrix} \otimes I_n. \end{aligned}$$

本文设计目标是针对无线网络下的多智能体系统(1),设计编队控制协议(2)和事件触发机制(3),使得闭环系统(6)渐近稳定.

2 事件触发机制与控制器联合设计

引理1^[11] 对于任意的适维矩阵 X, Y 和任意常数 $\varepsilon > 0$,下列矩阵不等式成立:

$$X^T Y + Y^T X \leq \varepsilon X^T X + \varepsilon^{-1} Y^T Y.$$

引理2^[12] 对于任意正定常数矩阵 R ,任意满足 $0 < a < b$ 的标量 a, b ,以及矢量函数 $w(t) : [a, b] \rightarrow R^n$ 使得积分具有相关定义,则下列不等式成立:

$$\begin{aligned} &\left(\int_{t-b}^{t-a} w(s) ds \right)^T R \left(\int_{t-b}^{t-a} w(s) ds \right) \leq \\ &(b-a) \int_{t-b}^{t-a} w^T(s) R w(s) ds. \end{aligned}$$

定理1 针对闭环系统(6),在分布式事件触发机制(3)和编队控制协议(2)的作用下,对于给定的正数 $\eta_{M1}, \eta_{M2}, \dots, \eta_{Mm}, \tau > 0$,若存在一系列适维正定矩阵 $X_p, Q, R, p = 1, 2, \dots, m$,使得下列不等式成立:

$$\Gamma + \Pi_1 + \tau \Xi - \frac{1}{\tau} \Pi_2 + \Omega_1 + \Omega_2 < 0, \quad (7)$$

则闭环系统(6)渐近稳定. 其中

$$\begin{aligned} \Gamma &= \varepsilon_1^T \sum_{p=1}^m \eta_{Mp} X_p \varepsilon_1 + \varepsilon_1^T (E_1^T X_p + \\ &X_p E_1) \varepsilon_1 + \varepsilon_1^T Q \varepsilon_1 - \varepsilon_2^T Q \varepsilon_2 - \varepsilon_3^T \varepsilon_3, \\ \Pi_1 &= \varepsilon_2^T F^T F^T X_p \varepsilon_1 + \varepsilon_3^T E_2^T X_p \varepsilon_1 + \\ &\varepsilon_1^T X_p F \varepsilon_2 + \varepsilon_1^T X_p E_2 \varepsilon_3, \\ \Pi_2 &= \varepsilon_2^T R \varepsilon_1 + \varepsilon_2^T R \varepsilon_2 - \varepsilon_1^T R \varepsilon_2 - \varepsilon_2^T R \varepsilon_1, \\ \Xi &= \varepsilon_1^T E_1^T R E_1 \varepsilon_1 + \varepsilon_2^T F^T R E_1 \varepsilon_1 + \\ &\varepsilon_3^T E_2^T R E_1 \varepsilon_1 + \varepsilon_1^T E_1^T R F \varepsilon_2 + \\ &\varepsilon_2^T F^T R E \varepsilon_2 + \varepsilon_3^T E_2^T R F \varepsilon_2 + \\ &\varepsilon_1^T e_1^T R E_2 \varepsilon_3 + \varepsilon_2^T F^T R E_2 \varepsilon_3 + \varepsilon_3^T E_2^T R E_2 \varepsilon_3, \end{aligned}$$

$$\Omega_1 = \varepsilon_2^T D^T D_1^T (A_1 \otimes I_n) D_1 D \varepsilon_2,$$

$$\Omega_2 = \varepsilon_2^T D^T D_2^T (A_2 \otimes I_n) D_2 D \varepsilon_2.$$

$\varepsilon_l \in R^{2nN \times 6nN} (l = 1, 2, 3)$ 为单位块矩阵, $\varepsilon_1 = [I_{2nN}, 0, 0]$, $\varepsilon_2 = [0, I_{2nN}, 0]$, $\varepsilon_3 = [0, 0, I_{2nN}]$.

证明 令 $\phi(t) = [\delta^T(t), \delta^T(t-\tau), e^T(t-\tau)]^T$,引入如下Lyapunov-Krasovskii函数:

$$\begin{aligned} V(t) &= \\ &\sum_{p=1}^m \eta_p(t) [\delta^T(t) X_p \delta(t)] + \int_{t-\tau}^t \delta^T(s) Q \delta(s) ds + \\ &\int_{-\tau}^0 \int_{t+\theta}^t \delta^T(s) R \delta(s) ds d\theta, \quad \forall t \in [t_k, t_{k+1}), \end{aligned} \quad (8)$$

显然 $V(t) > 0$. 对 $V(t)$ 求导,有

$$\dot{V}(t) = V_1(t) + V_2(t) + V_3(t) + V_4(t). \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} V_1(t) &= \sum_{p=1}^m \dot{\eta}_p(t) [\delta^T(t) X_p \delta(t)], \\ V_2(t) &= \sum_{p=1}^m \eta_p(t) [\dot{\delta}^T(t) X_p \delta(t) + \delta^T(t) X_p \dot{\delta}(t)], \\ V_3(t) &= \delta^T(t) Q \delta(t) - \delta^T(t-\tau) Q \delta(t-\tau), \\ V_4(t) &= \tau \dot{\delta}^T(t) R \dot{\delta}(t) - \int_{t-\tau}^t \delta^T(s) R \dot{\delta}(s) ds. \end{aligned}$$

根据式(6),有

$$V_1(t) \leq \sum_{p=1}^m \eta_{Mp} [\delta^T(t) X_p \delta(t)] =$$

[illegible]

则多智能体系统(1)能达到稳定编队. 其中

$$\hat{\Psi}_{11} = \sum_{p=1}^m \eta_{Mp} X_p + E_1^T X_p + X_p E_1 + Q - \frac{1}{\tau} R,$$

$$\hat{\Psi}_{12} = -\frac{1}{\tau} R, \quad \hat{\Psi}_{22} = -Q - \frac{1}{\tau} R + A,$$

$$A = D^T D_1^T (A_1 \otimes I_n) D_1 D + D^T D_2^T (A_2 \otimes I_n) D_2 D.$$

由定理1、引理1和Schur补引理易证得式(21)与(7)等价,具体证明略.

3 仿真算例

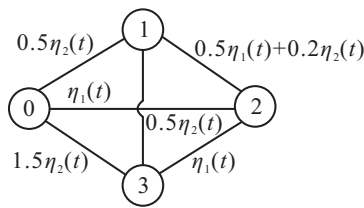
仿真采用的二阶多智能体系统的时变通信拓扑图如图2所示. 该时变通信拓扑图由两个时变函数组成,其中

$$\eta_1 t = \sin^2 t, \quad \eta_2(t) = 1 - \eta_1(t),$$

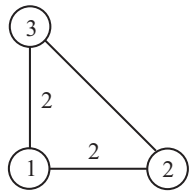
则有

$$\dot{\eta}_1(t) = 2 \sin t \cos t, \quad \dot{\eta}_2(t) = -\dot{\eta}_1(t),$$

满足假设2且 $\eta_{M1} = \eta_{M2} = 1$.



(a) 时变拓扑图



(b) 期望编队队形

图2 时变通信拓扑和期望的编队队形

由图2(a)可知

$$L(t) = [L_1(t) \quad L_2(t) \quad L_3(t)] = \begin{bmatrix} 0.5\eta_1(t) + 0.7\eta_2(t) & * & * \\ -0.5\eta_1(t) - 0.2\eta_2(t) & 1.5\eta_1(t) + 0.2\eta_2(t) & * \\ -0.5\eta_2(t) & -\eta_1(t) & * \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} * & * & * \\ * & * & * \\ \eta_1(t) + 0.5\eta_2(t) & * & * \end{bmatrix},$$

$$C(t) = \begin{bmatrix} 0.5\eta_2(t) & 0 & 0 \\ 0 & \eta_1(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1.5\eta_2(t) \end{bmatrix},$$

则 $L(t) + C(t) = \eta_1(t)\hat{L}_1 + \eta_2(t)\hat{L}_2$. 其中

$$\hat{L}_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & -0.5 & 0 \\ -0.5 & 2.5 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\hat{L}_2 = \begin{bmatrix} 1.2 & -0.2 & -0.5 \\ -0.2 & 0.2 & 0 \\ -0.5 & 0 & 2 \end{bmatrix}.$$

图2(b)给出了期望的编队队形. 设定各智能体节点的初始状态如下:

$$x_0(0) = [0.2 \quad 0.1]^T, \quad v_0(0) = [0.3 \quad 0.1]^T,$$

$$x_1(0) = [0.5 \quad 1]^T, \quad v_1(0) = [-0.8 \quad 0.3]^T,$$

$$x_2(0) = [-1.5 \quad 1.5]^T, \quad v_2(0) = [0.2 \quad -0.7]^T,$$

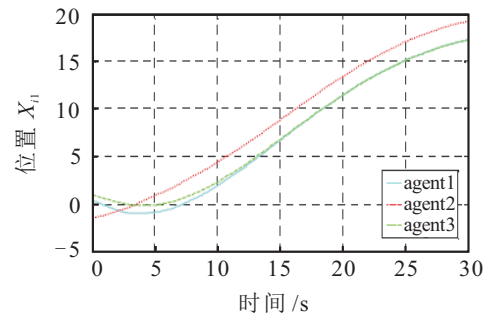
$$x_3(0) = [1 \quad -1]^T, \quad v_3(0) = [-0.5 \quad 0.8]^T.$$

给定 $h = 0.1 \text{ s}$, $\tau = 0.05 \text{ s}$. 根据矩阵不等式(21), 得

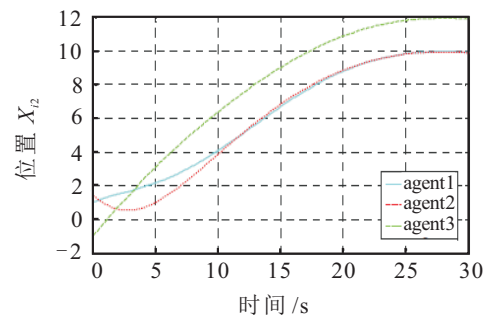
$$k_1 = 0.0660, \quad k_2 = 0.2936,$$

$$\alpha = 0.0958, \quad \beta = 0.0960.$$

上述多智能体系统的编队控制仿真结果如图3~图5所示. 3个智能体节点的位置响应轨迹如图3(a)、图3(b)所示,可以看出,两个位置分量分别达到期望的直角三角形队形且保持期望的相对位置.



(a) X_{1i} 轨迹



(b) X_{2i} 轨迹

图3 智能体节点的位置

图4给出了多智能体系统的位置响应,其中纵轴为时间轴. 显见,多智能体系统达到了期望的编队队形,并保持队形运动.

图5为事件触发机制作用下的各个智能体节点的接入网络时序. 在30s的仿真时间内, 智能体节点1~3的触发次数分别为137、147、128. 显然, 在事件触发机制的作用下信息传输次数明显减少, 在保证系统编队稳定性的前提下降低了带宽以及通信资源的占用.

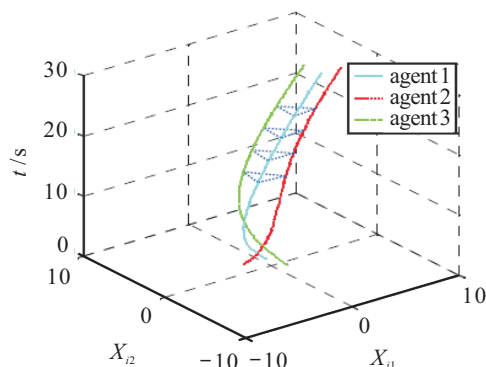


图4 多智能体系统的位置响应

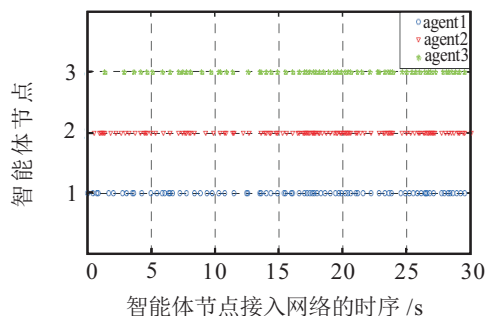


图5 各智能体接入网络时序

4 结论

本文针对具有通信延时的二阶多智能体系统设计编队控制协议及事件触发策略, 保证多智能体系统达到编队稳定性的前提下减少不必要的信息传输. 通过定义编队状态误差, 将二阶多智能体系统的编队控制问题转化为闭环延时系统的稳定性问题. 利用Lyapunov-Krasovskii函数及LMI技术给出了编队控制协议及事件触发机制的设计. 仿真结果验证了本文方法的有效性.

参考文献(References)

[1] Xue D, Yao J, Wang J, et al. Formation control of multi-agent systems with stochastic switching topology

and time-varying communication delays[J]. IET Control Theory and Applications, 2013, 7(13): 1689-1698.

[2] Ghommam J, Mehrjerdi H, Saad M. Robust formation control without velocity measurement of the leader robot[J]. Control Engineering Practice, 2013, 21(8): 1143-1156.

[3] Cao J F, Ling Z H, Yuan Y F, et al. Distributed formation control for a multi-agent system with dynamic and static obstacle avoidances[J]. Chinese Physics B, 2014, 23(7): 337-342.

[4] Reihane Rahimi, Farzaneh Abdollahi, Karo Naqshi. Time-varying formation control of a collaborative heterogeneous multi-agent system[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2014, 62(12): 1799-1805.

[5] Seyboth G S, Dimarogonas D V, Johansson K H. Event-based broadcasting for multi-agent average consensus[J]. Automatica, 2013, 49(1): 245-252.

[6] Yin X, Yue D. Event triggered tracking control for heterogeneous multi-agent systems with Markov communication delays[J]. J of the Franklin Institute, 2013, 350(5): 1312-1334.

[7] Hu J, Lin Y S. Consensus control for multi-agent systems with double-integrator dynamics and time delays[J]. IET Control Theory and Applications, 2010, 4(1): 109-118.

[8] Jiang F, Wang L, Xie G. Consensus of high-order dynamic multi-agent systems with switching topology and time-varying delays[J]. J of Control Theory and Applications, 2010, 8(1): 52-60.

[9] Shang Y. Continuous-time average consensus under dynamically changing topologies and multiple time-varying delays[J]. Applied Mathematics and Computation, 2014, 244(1): 457-466.

[10] Han Y, Lu W, Chen T. Consensus analysis of networks with time-varying topology and event-triggered diffusions[J]. Neural Networks, 2015, 71(1): 196-203.

[11] Barmish B R. Necessary and sufficient conditions for quadratic stabilizability of an uncertain system [J]. J of Optimization Theory and Applications and Applications, 1985, 46(4): 399-408.

[12] Gu K. An integral inequality in the stability problem of time-delay systems[C]. The 39th IEEE Conf on Decision and Control. Sydney, 2000: 2805-2810.

(责任编辑: 李君玲)