

# 事件触发机制下的多智能体领导跟随一致性

黄红伟<sup>1</sup>, 黄天民<sup>2</sup>

HUANG Hongwei<sup>1</sup>, HUANG Tianmin<sup>2</sup>

1. 西南交通大学 电气工程学院, 成都 610031

2. 西南交通大学 数学学院, 成都 610031

1. School of Electronic Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

2. School of Mathematics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

**HUANG Hongwei, HUANG Tianmin. Leader-following consensus of multi-agent systems via event-triggered control. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(6): 29-33.**

**Abstract:** This paper is concerned with the leader-following consensus problem of first-order multi-agent systems. Based on event-triggered control mechanism two kinds of agreement are established, that is, the centralized event-triggered control and the decentralized event-triggered control. Under the two schemes proposed, some sufficient conditions for the leader-following consensus of first-order multi-agent system are given by using Lyapunov stability theory and model transformation method. Similarly, the theoretical calculation shows that Zeno behavior does not exist in the systems. Numerical simulations are presented to validate the effectiveness of the theoretical results.

**Key words:** multi-agent system; leader-following consensus; centralized event-triggered control; decentralized event-triggered control

**摘 要:** 研究了一类具有动态领导者的一阶多智能体系统的一致性问题。基于事件触发机制给出两种一致性协议, 即集中式触发控制协议和分散式触发控制协议。利用李雅普诺夫稳定性理论和模型转化方法分别给出多智能体系统在两种协议作用下达到领导跟随一致的充分条件。同时, 理论计算表明, 系统在两种控制协议下均不存在 Zeno 行为。实例仿真结果验证了理论方案的有效性。

**关键词:** 多智能体系统; 领导跟随一致性; 集中式事件触发; 分散式事件触发

**文献标志码:** A **中图分类号:** TP273 **doi:** 10.3778/j.issn.1002-8331.1609-0335

## 1 引言

近年来, 多智能体系统在生物、工程、物理、社会等领域展现出巨大的应用潜力, 其分布式协作控制已经吸引了越来越多研究者的关注<sup>[1-2]</sup>。其中, 一致性问题作为多智能体协作控制的基础问题, 被广泛应用于机器人编队、集聚控制、传感器网络等<sup>[3-5]</sup>方面, 是如今控制学科的一个研究热点。

在实际应用中, 智能体之间的协作所需的信息是通过网络进行传递的, 网络带宽和智能体自身的能量都是有限的, 因此需要设计合理的控制器来保证系统的控制性能。众所周知, 周期采样控制可以节省资源, 但是当系统在一个理想的环境中运行或系统状态逐渐趋于一致

时, 若还是周期性地执行控制任务, 则会造成不必要的资源浪费<sup>[6]</sup>。为了减少这种不必要的资源浪费, 文献[7]提出了一种新的事件触发控制(event-triggered control)方法。简单来说, 事件触发控制即是指控制任务按需执行, 在保证闭环系统具有一定性能的前提下, 只有当一个特定事件发生(如状态误差超过规定的阈值)时才进行一次执行。事件触发控制的优点在于它既能保证系统的性能又能节约网络和计算资源<sup>[6, 8]</sup>。目前, 事件触发机制已被有效地应用到多智能体系统一致性问题研究当中<sup>[9-16]</sup>。如文献[9-10]研究了在固定无向拓扑下的一阶多智能体系统的一致性问题, 文献[11]研究了事件触发机制下的二阶多智能体系统的一致性问题, 文献[12]

**基金项目:** 国家自然科学基金(No.71371156); 中央高校基础研究基金资助项目(No.2682014ZT28)。

**作者简介:** 黄红伟(1987—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为多智能体系统协调控制, E-mail: hhw.8076@163.com; 黄天民(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能控制、优化与决策。

**收稿日期:** 2016-09-23 **修回日期:** 2016-11-21 **文章编号:** 1002-8331(2017)06-0029-05

则针对非线性多智能体系统给出了基于事件触发机制的一致性控制算法,文献[13-14]讨论了二阶多智能体系统的领导跟随一致性问题,文献[15-16]研究了一般线性多智能体系统的领导跟随一致性问题。

本文在已有工作的基础上,研究了一类具有动态领导者的一阶多智能体系统的一致性问题。给出两种不同的事件触发控制方法,利用 Lyapunov 稳定性理论和模型转化方法,得到系统达到领导跟随一致的充分条件。

## 2 预备知识及问题描述

### 2.1 代数图论

代数图论是研究多智能体系统一致性问题的重要工具。考虑一个带有领导者的多智能体系统,其通讯拓扑结构图用  $\bar{\mathcal{G}} = (\bar{V}, \bar{\epsilon})$  来描述,其中  $\bar{V} = \{0, 1, \dots, N\}$  表示节点集合,  $\bar{\epsilon} \subseteq \bar{V} \times \bar{V}$  表示边集合。这里, 0 为领导者, 1, 2, ..., N 为跟随者。用  $\mathcal{G} = (V, \epsilon)$  描述跟随者们的通讯拓扑结构图。有向边  $e_{0i} \in \bar{\epsilon}$  表示跟随者  $i$  可以接收到领导者的状态信息; 有向边  $e_{ji} \in \epsilon$  表示节点  $i$  可以接收到节点  $j$  的状态信息, 同时称节点  $j$  为节点  $i$  的邻居。节点  $i$  的邻居集  $N_i = \{j \in V: (j, i) \in \epsilon\}$ 。令  $B = \text{diag}\{b_1, b_2, \dots, b_N\}$  表示领导、跟随节点之间的信息交互矩阵, 其中  $b_i = 1 \Leftrightarrow e_{0i} \in \bar{\epsilon}$ , 否则,  $b_i = 0$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ 。图  $G$  的邻接矩阵  $A = (a_{ij})_{N \times N}$ , 其元素定义为: 若  $(j, i) \in \epsilon$ , 则  $a_{ij} = 1$ , 否则  $a_{ij} = 0$ , 对角线元素  $a_{ii} = 0$ 。在图  $\mathcal{G}$  中, 节点  $i$  的入度和出度分别定义为  $d_{\text{in}}(i) = \sum_{j=1}^N a_{ij}$  和  $d_{\text{out}}(i) = \sum_{j=1}^N a_{ji}$ , 特别地, 若  $d_{\text{in}}(i) = d_{\text{out}}(i)$ , 则称图  $\mathcal{G}$  为平衡图。图  $\mathcal{G}$  的 Laplacian 矩阵  $L$  定义为  $L = D - A$ , 其中  $D = \text{diag}\{d_{\text{in}}(i)\}$  为图的度矩阵。图中的一条有向路径是指从节点  $i$  到节点  $k$  有序边序列  $(i, i+1), (i+1, i+2), \dots, (k-1, k) \in \bar{\epsilon}$ 。若图中至少存在一个根节点具有到其他所有节点的有向路径, 称该图包含一棵有向生成树。

### 2.2 领导跟随一致性

考虑一个带有领导者的一阶多智能体系统, 其中领导者的动态方程描述为:

$$\dot{x}_0(t) = u_0(t) \quad (1)$$

式中:  $x_0 \in R^m$ ,  $u_0 \in R^m$  分别表示领导者的状态和控制输入。

相应地, 跟随者  $i$  的动态方程为:

$$\dot{x}_i(t) = u_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中:  $x_i \in R^m$ ,  $u_i \in R^m$  分别表示跟随者  $i$  的状态和控制输入。不失一般性, 本文仅讨论  $m = 1$  时的情形,  $m > 1$  时可用 Kroncker 积进行推广。

**定义 1** (领导跟随一致性) 如果对于任意初始状态  $x_0(0)$  和  $x_i(0)$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), 存在控制输入  $u_i(t)$  使得:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_0(t)\| = 0$$

对于所有的  $i$  都成立, 则称系统(1)~(2)达到领导跟随一致。

## 3 主要结果

针对领导跟随多智能体系统(1)~(2), 给出如下控制协议:

$$u_i(t) = u_0 - \gamma \left( \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_i(t) - x_j(t)) + \alpha b_i (x_i(t) - x_0(t)) \right) \quad (3)$$

式中:  $\gamma$ ,  $\alpha$  为反馈增益。

下面, 将分别采用集中式和分散式事件触发机制对系统(1)~(2)的领导跟随一致性进行研究。

### 3.1 集中式事件触发机制下的一致性

针对系统(1)中的所有智能体  $i \in V$ , 设计事件触发函数  $f(t)$ , 由  $f(t) = 0$  可得到一系列事件触发时刻  $t_k$  ( $k = 0, 1, \dots$ ), 令  $x_0(t_k)$ ,  $x_i(t_k)$  分别表示领导者和跟随者  $i$  在  $t_k$  时刻的采样状态, 代入式(3)得:

$$u_i(t) = u_0 - \gamma \left( \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_i(t_k) - x_j(t_k)) + \alpha b_i (x_i(t_k) - x_0(t_k)) \right) \quad (4)$$

令  $\hat{x}_i(t) = x_i(t) - x_0(t)$ , 则式(4)转化为:

$$u_i(t) = u_0(t) - \gamma \left( \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\hat{x}_i(t_k) - \hat{x}_j(t_k)) + \alpha b_i \hat{x}_i(t_k) \right) \quad (5)$$

定义状态误差  $e_i(t) = \hat{x}_i(t_k) - \hat{x}_i(t)$ , 则式(5)可进一步表示为:

$$u_i(t) = u_0(t) - \gamma \left( \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\hat{x}_i(t) - \hat{x}_j(t) + e_i(t) - e_j(t)) + \alpha b_i (\hat{x}_i(t) + e_i(t)) \right) \quad (6)$$

从而得到闭环系统:

$$\dot{\hat{x}}(t) = -\gamma(L + \alpha B)(\hat{x}(t) + e(t)) \quad (7)$$

**引理 1**<sup>[13]</sup> 若图  $\mathcal{G}$  是平衡图, 且图  $\bar{\mathcal{G}}$  包含一棵有向生成树, 则存在  $\alpha > 0$ , 使得矩阵  $L + \alpha B$  为正定阵。

接下来, 给出本节主要定理。

**定理 1** 针对领导跟随多智能体系统(1)~(2), 假设图  $\mathcal{G}$  是平衡图, 图  $\bar{\mathcal{G}}$  包含一棵有向生成树, 且领导者是根节点, 若限定事件触发条件:

$$\|e(t)\| \leq \sigma \frac{\lambda_{\min}(L + \alpha B)}{\|L + \alpha B\|} \|\hat{x}(t)\|, \quad 0 < \sigma < 1 \quad (8)$$

则在控制协议(4)作用下, 系统(1)~(2)可以达到领导跟随一致。

**证明** 构造如下 Lyapunov 函数:

$$V(t) = \frac{1}{2} \|\hat{x}(t)\|^2$$

沿系统(7)的轨线对  $V(t)$  求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \hat{x}^T(t) \dot{\hat{x}}(t) = \\ &= -\gamma \left( \hat{x}^T(t) (L + \alpha B) \hat{x}(t) + \hat{x}^T(t) (L + \alpha B) e(t) \right) \leq \\ &= -\gamma \lambda_{\min}(L + \alpha B) \left( \|\hat{x}(t)\|^2 - \frac{\|L + \alpha B\|}{\lambda_{\min}(L + \alpha B)} \|\hat{x}(t)\| \|e(t)\| \right) \end{aligned}$$

根据式(8), 若

$$\|e(t)\| \leq \sigma \frac{\lambda_{\min}(L + \alpha B)}{\|L + \alpha B\|} \|\hat{x}(t)\|$$

则有

$$\dot{V}(t) \leq -(1 - \sigma)\gamma\lambda_{\min}(L + \alpha B)\|\hat{x}(t)\|^2 \leq 0$$

等号成立当且仅当  $\hat{x}(t) = 0$ 。因此, 根据 LaSalle 不变原理, 有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_0(t)\| = 0$$

定理得证。

根据以上分析, 可将事件触发函数定义为:

$$f(t) = \|e(t)\| - \sigma \frac{\lambda_{\min}(L + \alpha B)}{\|L + \alpha B\|} \|\hat{x}(t)\|$$

$t_k (k=0, 1, \dots)$  是  $f(t)=0$  的一系列解。在每个事件触发时刻, 智能体更新控制输入, 在两个相邻事件触发时刻之间, 控制输入保持不变。

**定理 2** 针对领导跟随多智能体系统(1)~(2), 假设图  $\mathcal{G}$  是平衡图, 图  $\bar{\mathcal{G}}$  包含一棵有向生成树, 且领导者是根节点, 若限定事件触发条件(8)成立, 则在控制协议(4)作用下, 系统任意两个连续事件触发时刻之间的间隔  $t_{k+1} - t_k$  不小于:

$$\tau = \frac{\sigma\lambda_{\min}(L + \alpha B)}{\gamma\|L + \alpha B\|(\gamma\|L + \alpha B\| + \sigma\lambda_{\min}(L + \alpha B))}$$

**证明** 由事件触发控制原理知, 系统任意两个连续事件触发时刻之间的间隔时间为  $\frac{\|e(t)\|}{\|\hat{x}(t)\|}$  从 0 增长到

$\sigma \frac{\lambda_{\min}(L + \alpha B)}{\|L + \alpha B\|}$  所需的时间, 记为  $\tau$ 。

对  $\frac{\|e(t)\|}{\|\hat{x}(t)\|}$  求导得:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\|e(t)\|}{\|\hat{x}(t)\|} &= \frac{d}{dt} \frac{(e^T(t)e(t))^{1/2}}{(\hat{x}(t)^T \hat{x}(t))^{1/2}} = \\ &= \frac{-e^T(t)\dot{\hat{x}}(t)}{\|e(t)\|\|\hat{x}(t)\|} - \frac{\hat{x}(t)^T \dot{\hat{x}}(t)\|e(t)\|}{\|\hat{x}(t)\|^2\|\hat{x}(t)\|} \leq \\ &= \frac{\|\dot{\hat{x}}(t)\|}{\|\hat{x}(t)\|} + \frac{\|\dot{\hat{x}}(t)\|\|e(t)\|}{\|\hat{x}(t)\|^2} = \\ &= \left(1 + \frac{\|e(t)\|}{\|\hat{x}(t)\|}\right) \frac{\|\dot{\hat{x}}(t)\|}{\|\hat{x}(t)\|} \leq \\ &= \gamma \left(1 + \frac{\|e(t)\|}{\|\hat{x}(t)\|}\right) \frac{\|L + \alpha B\|(\|\hat{x}(t)\| + \|e(t)\|)}{\|\hat{x}(t)\|} = \\ &= \gamma\|L + \alpha B\| \left(1 + \frac{\|e(t)\|}{\|\hat{x}(t)\|}\right)^2 \end{aligned}$$

令  $y = \frac{\|e(t)\|}{\|\hat{x}(t)\|}$ , 则有:

$$\dot{y} \leq \gamma\|L + \alpha B\|(1 + y)^2$$

且  $y$  满足  $y \leq \phi(t, \phi_0)$ , 这里  $\phi(t, \phi_0)$  是方程  $\dot{\phi} = \gamma\|L + \alpha B\|(1 + \phi)^2$ ,  $\phi(0, \phi_0) = \phi_0$  的解。

由式(8)知方程的解满足:

$$\phi(\tau, 0) = \sigma \frac{\lambda_{\min}(L + \alpha B)}{\|L + \alpha B\|}$$

求解方程可得:

$$\tau = \frac{\sigma\lambda_{\min}(L + \alpha B)}{\gamma\|L + \alpha B\|(\gamma\|L + \alpha B\| + \sigma\lambda_{\min}(L + \alpha B))}$$

定理得证。

### 3.2 分散式事件触发机制下的一致性

上节给出的集中式事件触发机制对所有的智能体设置一个统一的状态误差阈值, 一旦系统误差达到该阈值时, 系统中所有智能体同时执行控制任务。本节给出的分散式事件触发机制将对每个智能体设置一个状态误差阈值, 使得单个智能体可以独立地完成控制任务。

类似于上节中, 针对智能体  $i$  设计事件触发函数  $f_i(t)$ , 由  $f_i(t)=0$  得到一系列事件触发时刻  $t_k^i (k=0, 1, \dots)$ , 令  $x_0(t_k^i)$ ,  $x_i(t_k^i)$  分别表示领导者和跟随者  $i$  在  $t_k^i$  时刻的采样状态, 代入式(3)得:

$$\begin{aligned} u_i(t) &= u_0(t) - \gamma \left( \sum_{j \in N_i} a_{ij}(x_i(t_k^i) - x_0(t_k^i) - x_j(t_k^i) + x_0(t_k^i)) + \right. \\ &\quad \left. \alpha b_i(x_i(t_k^i) - x_0(t_k^i)) \right) \end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $t_k^j = \arg \min_{l \in N_i, t \geq t_l^j} \{t - t_l^j\}$ 。

令  $\hat{x}_i(t) = x_i(t) - x_0(t)$ , 则式(9)可写为:

$$u_i(t) = u_0(t) - \gamma \left( \sum_{j \in N_i} a_{ij}(\hat{x}_i(t_k^i) - \hat{x}_j(t_k^j)) + \alpha b_i \hat{x}_i(t_k^i) \right) \quad (10)$$

定义状态误差  $e_i(t) = \hat{x}_i(t_k^i) - \hat{x}_i(t)$ , 可得:

$$\begin{aligned} u_i(t) &= u_0(t) - \gamma \left( \sum_{j \in N_i} a_{ij}(\hat{x}_i(t) - \hat{x}_j(t) + e_i(t) - e_j(t)) + \right. \\ &\quad \left. \alpha b_i(\hat{x}_i(t) + e_i(t)) \right) \end{aligned} \quad (11)$$

从而得到闭环系统:

$$\dot{\hat{x}}(t) = -\gamma(L + \alpha B)(\hat{x}(t) + e(t)) \quad (12)$$

接下来, 给出本节主要定理。

**定理 3** 考虑领导跟随多智能体系统(1)~(2), 假设图  $\mathcal{G}$  是平衡图, 图  $\bar{\mathcal{G}}$  包含一棵有向生成树, 且领导者是根节点, 若限定事件触发条件:

$$\begin{aligned} &\sum_{j \in N_i} (a_{ij}|N_i| + \alpha b_i) (\|e_i(t)\| + \|e_j(t)\|) \leq \\ &\sigma_i \lambda_{\min}(L + \alpha B) |N_i| \|\hat{x}_i(t)\|, 0 < \sigma_i < 1 \end{aligned} \quad (13)$$

则在控制协议(9)作用下, 系统(1)~(2)可以达到领导跟随一致。

**证明** 选取 Lyapunov 函数

$$V(t) = \frac{1}{2} \|\hat{x}(t)\|^2$$

沿系统(12)的轨线对  $V(t)$  求导得:

$$\begin{aligned}
\dot{V}(t) &= \dot{\hat{x}}^T(t) \dot{\hat{x}}(t) = \\
& -\gamma \left( \hat{x}^T(t) (L + \alpha B) \hat{x}(t) + \hat{x}^T(t) (L + \alpha B) e(t) \right) \leq \\
& -\gamma \left( \lambda_{\min}(L + \alpha B) \|\hat{x}(t)\|^2 + \hat{x}^T(t) (L + \alpha B) e(t) \right) = \\
& -\gamma \lambda_{\min}(L + \alpha B) \sum_{i=1}^N \hat{x}_i^2(t) - \gamma \sum_{i=1}^N \hat{x}_i^T(t) \times \\
& \left( \sum_{j \in N_i} a_{ij} (e_i(t) - e_j(t)) + \alpha b_i e_i(t) \right) \leq \\
& -\gamma \lambda_{\min}(L + \alpha B) \sum_{i=1}^N \hat{x}_i^2(t) + \\
& \gamma \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} \left( a_{ij} + \frac{\alpha b_i}{|N_i|} \right) |\hat{x}_i(t)| (|e_i(t)| + |e_j(t)|) = \\
& -\gamma \sum_{i=1}^N \left[ \lambda_{\min}(L + \alpha B) \hat{x}_i^2(t) - \sum_{j \in N_i} \left( a_{ij} + \frac{\alpha b_i}{|N_i|} \right) - \right. \\
& \left. |\hat{x}_i(t)| (|e_i(t)| + |e_j(t)|) \right]
\end{aligned}$$

结合式(13),若

$$\begin{aligned}
& \sum_{j \in N_i} \left( a_{ij} |N_i| + \alpha b_i \right) (|e_i(t)| + |e_j(t)|) \leq \\
& \sigma_i \lambda_{\min}(L + \alpha B) |N_i| \|\hat{x}_i(t)\|
\end{aligned}$$

则有

$$\dot{V}(t) \leq -\gamma \lambda_{\min}(L + \alpha B) \sum_{i=1}^N (1 - \sigma_i) \hat{x}_i^2(t)$$

等号成立当且仅当  $\hat{x}_i(t) = 0$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ 。根据LaSalle不变原理,有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_0(t)\| = 0$$

定理得证。

由上述分析,可将智能体  $i(i = 1, 2, \dots, N)$  的事件触发函数定义为:

$$\begin{aligned}
f_i(t) &= \sum_{j \in N_i} \left( a_{ij} |N_i| + \alpha b_i \right) (|e_i(t)| + |e_j(t)|) - \\
& \sigma_i \lambda_{\min}(L + \alpha B) |N_i| \|\hat{x}_i(t)\|
\end{aligned}$$

智能体触发事件当且仅当  $f_i(t) = 0$ 。在两个连续事件触发时刻之间,控制输入保持不变。

**定理4** 考虑领导跟随多智能体系统(1)~(2),假设图  $\mathcal{G}$  是平衡图,图  $\bar{\mathcal{G}}$  包含一棵有向生成树,且领导者是根节点,若限定事件触发条件(13)成立,则在控制协议(9)作用下,至少存在一个智能体  $q$ ,其任意两个连续事件触发时刻之间的间隔  $t_{k+1}^q - t_k^q$  不小于:

$$\tau_q = \Delta \left[ \gamma \|L + \alpha B\| \left( \sqrt{N} \|D + A\| + \Delta \right) \right]^{-1}$$

$$\text{式中: } \Delta = \frac{\sigma_q \lambda_{\min}(L + \alpha B) |N_q|}{a_{qj} |N_q| + b_q}。$$

**证明** 不难看出,  $\sum_{j \in N_i} a_{ij} (|e_i(t)| + |e_j(t)|)$  是  $|D + A|e$  的第  $i$  个分量,令  $q = \arg \max_{i \in V} |\hat{x}_i(t)|$ ,则有

$$\frac{\sum_{j \in N_q} a_{qj} (|e_q(t)| + |e_j(t)|)}{N |\hat{x}_q(t)|} \leq \frac{\|D + A\| \|e\|}{\|\hat{x}\|}$$

由定理2的证明可得:

$$N \|D + A\| \frac{\gamma \|L + \alpha B\| \tau_q}{1 - \gamma \|L + \alpha B\| \tau_q} = \frac{\sigma_q \lambda_{\min}(L + \alpha B) |N_q|}{a_{qj} |N_q| + b_q}$$

解得:

$$\tau_q = \Delta \left[ \gamma \|L + \alpha B\| (N \|D + A\| + \Delta) \right]^{-1}$$

定理得证。

#### 4 数值仿真

考虑1个领导者和6个跟随者组成的多智能体系统,其相应的Laplacian矩阵:

$$L = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 3 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 3 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 2 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

领导-跟随矩阵  $B = \text{diag}\{0, 1, 0, 0, 0, 1\}$ 。

在集中式事件触发机制下,参数设置为:  $\gamma = 5$ ,  $\alpha = 4.5$ ,  $\sigma = 0.99$ 。图1给出了系统(1)~(2)在该控制机制下的状态轨迹,从图中可以看出,系统逐渐趋于领导跟随一致。图2给出了系统的状态误差变化趋势,可以看出,所有智能体只有在系统误差达到特定值时才触发事件。

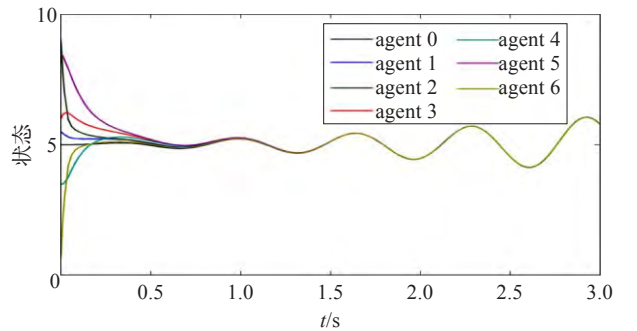


图1 集中式事件触发机制下系统的状态轨迹

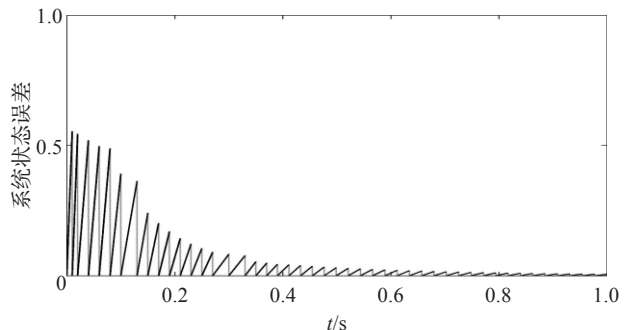


图2 集中式事件触发机制下系统状态误差变化趋势

在分散式事件触发机制下,参数设置为:  $\gamma = 5$ ,  $\alpha = 4.5$ ,  $\sigma_1 = 0.99$ ,  $\sigma_2 = 0.4$ ,  $\sigma_3 = 0.52$ ,  $\sigma_4 = \sigma_6 = 0.35$ ,  $\sigma_5 = 0.16$ 。图3给出了系统(1)~(2)在分散式触发机制下的状态轨迹,从图中可以看出,在该控制机制下,系统同样可以达到领导跟随一致。为了描述状态误差,选取智能体1进行说明,图4给出了智能体1的状态误差变化趋势。



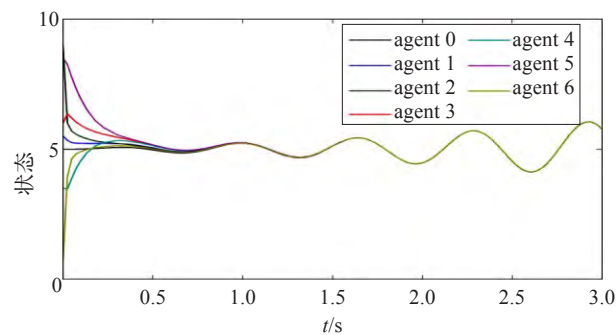


图3 分散式事件触发机制下系统的状态轨迹

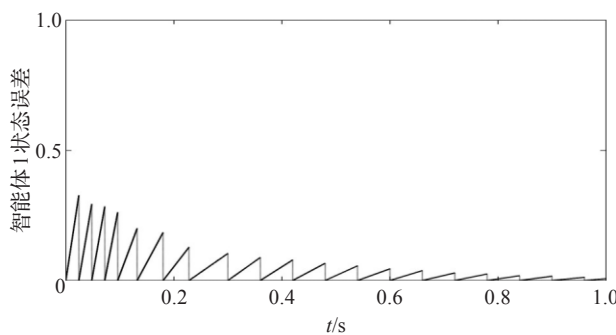


图4 分散式事件触发机制下智能体1的状态误差变化趋势

表1和表2分别给出了多智能体系统在仿真时间[0,3] s内基于两种不同事件触发机制的采样数据通信量。

表1 集中式事件触发机制下各智能体的采样通信量

智能体	1	2	3	4	5	6
采样次数	91	91	91	91	91	91

表2 分散式事件触发机制下各智能体的采样通信量

智能体	1	2	3	4	5	6
采样次数	76	52	69	63	63	46

由表1、表2中的数据可以得到,在集中式事件触发机制下,整个系统的数据通信量是546,而在分散式事件触发机制下,整个系统的数据通信量是369。这即说明采用分散式事件触发控制方法只需大约67.58%的采样和传递次数就可使得多智能体系统(1)~(2)在[0,3] s内趋于领导跟随一致。同时也表明了分散式事件触发机制更有利于降低系统控制更新频率,节省通信和计算资源。

5 结束语

本文研究了一阶多智能体系统在事件触发机制下的领导跟随一致性问题。设计了集中式事件触发和分散式事件触发两种不同的一致性控制协议,通过理论分析分别给出系统在两种控制协议作用下达到领导跟随一致的充分条件,仿真结果验证了理论分析的有效性。今后,将进一步研究具有干扰、时延等因素的多智能体系统的一致性问题的。

参考文献:

[1] Lagorse J, Paire D, Miraoui A. A multi-agent system for energy management of distributed power sources[J]. Renewable Energy, 2010, 35(1): 174-182.

[2] 廖诗来,姜顺,潘丰.一类多时延异质多智能体系统的一致性[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(10): 9-14.

[3] Hu J, Saleem A, You S, et al. A multi-agent system for distribution grid congestion management with electric vehicles[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2015, 38: 45-58.

[4] Liu Y, Jia Y. An iterative learning approach to formation control of multi-agent systems[J]. Systems & Control Letters, 2012, 61(1): 148-154.

[5] Chen Y, Lu J, Yu X, et al. Multi-agent systems with dynamical topologies: consensus and applications[J]. IEEE Circuits & Systems Magazine, 2013, 13(3): 21-34.

[6] 丁磊.不同数据触发机制下的多智能体系统一致性及滤波[D]. 大连:大连海事大学, 2014.

[7] Tabuada P. Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2007, 52(9): 1680-1685.

[8] 黄红伟,黄天民,吴胜,等.基于事件触发的二阶多智能体领导跟随一致性[J]. 控制与决策, 2016, 31(5): 835-841.

[9] Dimarogonas D V, Frazzoli E. Distributed event-triggered control strategies for multi-agent systems[C]//Proc of the 47th Allerton Conference on Communications, 2009: 906-910.

[10] Dimarogonas D V, Frazzoli E, Johansson K H. Distributed event-triggered control for multi-agent systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2012, 57(5): 1291-1297.

[11] Yan H C, Shen Y C, Zhang H, et al. Decentralized event-triggered consensus control for second-order multi-agent systems[J]. Neurocomputing, 2014, 133(8): 18-24.

[12] Xie D, Xu S, Chu Y, et al. Event-triggered average consensus for multi-agent systems with nonlinear dynamics and switching topology[J]. Journal of the Franklin Institute, 2015, 352(3): 1080-1098.

[13] Hu J P, Chen G R, Li H X. Distributed event-triggered tracking control of second-order leader-follower multi-agent systems[C]//Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, Yantai, 2011: 4819-4824.

[14] Li H, Liao X, Huang T, et al. Event-triggering sampling based leader-following consensus in second-order multi-agent systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60(7): 1998-2003.

[15] Hu W, Liu L, Feng G. Leader-following consensus of linear multi-agent systems by distributed event-triggered control[C]//Control Conference, 2015.

[16] Zhu W, Jiang Z P. Event-based leader-following consensus of multi-agent systems with input time delay[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60(5): 1362-1367.