

具有领航者的时延多智能体系统的一致性

杨洪勇¹, 田生文¹, 张嗣瀛²

(1. 鲁东大学信息科学与工程学院, 山东烟台 264025; 2. 青岛大学复杂性科学研究所, 山东青岛 266071)

摘要: 本文研究了具有不同通信时延和不同输入时延的移动多智能体算法的一致性. 假设多智能体系统有 n 个智能体和一个 Leader 组成, 网络连接拓扑是非对称有向加权图, 智能体 Leader 为拓扑图的全局可达节点. 应用频域控制理论和广义 Nyquist 判据研究了时延多智能体算法的一致性, 得到保证系统一致性的收敛条件. 该一致性条件是一个应用节点局部信息的分散式条件, 而且只与输入时延有关. 最后, 通过计算机仿真验证了本文结论的有效性.

关键词: 不同时延; 领航者; 多智能体; 非对称拓扑; 分散式; 一致性条件

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 04-0872-05

Consensus of Multi-Agent Systems with Heterogeneous Delays and Leader-Following

YANG Hong-yong¹, TIAN Sheng-wen¹, ZHANG Si-ying²

(1. School of Information Science and Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China;

2. Institute of Complexity Science, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract: Consensus of mobile multi-agents system with heterogeneous communication delays and heterogeneous input delays is studied. Suppose multi-agent systems consist of n agents and a leader, there is an asymmetric directed interconnected graph with leader as a globally reachable node. By Applying frequency domain theory and generalized Nyquist criterion, the consensus of delayed algorithm with leader-following is analyzed, and a decentralized convergence condition is obtained to ensure the consensus of multi-agent systems. This consensus condition is dependent on input delays but independent of communication delays. Finally, computer simulation is used to show the validity of the results.

Key words: heterogeneous delays; leader; multi-agent systems; asymmetric topology; decentralized; consensus condition

1 引言

随着计算机技术、网络技术和通信技术的飞速发展,多智能体机器人或多小车系统分布式协调的一致性问题近年来引起了研究人员的极大关注.这主要是由于多智能体系统在无人机协调控制、多机器人编队控制、智能群体群集运动、分布式传感器网络、多卫星姿态调整及通信网络拥塞控制等领域的广泛应用.

在一个多智能体系统中,所有智能体的状态最终能够趋于一致,我们称为一致性问题.例如多机器人通过相互协调使得运动速度趋于一致,或者到达某一集合点(位置趋于一致)就是典型的一致性问题.近年来,一致性问题的研究发展迅速,无论在理论还是应用上都取得了丰硕的成果.基于 Reynolds 提出的模仿动物集结的计算机模型^[1],Vicsek 等人^[2]从统计力学的角度首次提出了一个非平衡多智能体系统模型. Jadbabaie 等人^[3]对

Vicsek 模型线性化后从理论上研究了该模型的角度一致性问题, Moreau^[4]和 Ren 等^[5]将文献[3]的结果推广到有向网络,得到了类似的收敛性结果. Olfati 等^[6]考虑了具有切换拓扑的有向网络的平均一致性问题. Fax 和 Murray^[7]基于合作构架,应用图论和矩阵理论解决了基于位置协调控制的一致性问题.最近刘志新和郭雷研究了原始 Vicsek 模型^[8],给出了一个根据系统参数保证 Vicsek 模型同步的充分条件.现在一致性问题已经被广泛应用于传感器网络、飞行器高度调整、编队控制、个体汇聚等领域^[8~12].

由于通信线路和通信设备等其他原因,移动多智能体之间信息交换存在通信时延,因此讨论具有通信时延的一致算法更具有实际意义.具有时延的多智能体系统的编队控制问题,由于时延的存在,使得该类问题的研究遇到很大的困难.文献[6]考虑了固定无向网络拓扑的多智能体系统一阶算法具有相同时延时的一致性问题的

文献[13]考虑了固定无向网络中具有相同时延的多智能系统的加权平均一致性问题.文献[14,15]分别研究了对称网络拓扑中具有不同延离散时间多智能体系统的一致性问题.现在已有的研究主要是假设网络拓扑是无向连通图的情况:如果网络拓扑是无向连通图,也就是网络图的 Laplacian 矩阵是一个对称矩阵;这种假设把研究问题简单化和特殊化的同时,也失去了问题研究的一般性.本文假设网络拓扑是有向非对称加权图,而且系统中具有不同的通信时延和不同的输入时延的情况下,研究具有动态领航者的时延多智能体系统的一致性.

2 问题描述

令 $G = \{V, E, A\}$ 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 $D = \text{diag}\{d_i, i = 1, \dots, n\}$, $d_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}$ 为矩阵 A 的第 i 行元素的和,则矩阵 $L = D - A$ 为图 G 的 Laplace 矩阵. 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 之间存在一条有向连接路径,也称节点 j 可到达节点 i . 如果对于节点 i , 图中其他节点都存在一条路径到达 i , 则称节点 i 是全局可达的. 如果对于图中任意两个节点 i, j , 都存在至少一条有向连接路径,则称图 G 是强连通的. 强连通图中,如果 G 的各个节点的入度等于出度,则称图 G 是平衡的.

假设移动多智能体系统满足下面的动态方程:

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

其中 $\mathbf{x}_i(t) \in R^m$ 为智能体的状态, $\mathbf{u}_i(t) \in R^m$ 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[6]提出下面的一致性算法:

$$\mathbf{u}_i(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} [\mathbf{x}_j(t) - \mathbf{x}_i(t)] \quad (2)$$

如果图 G 是强连通平衡的,该算法可以取得平均渐近一致,也就是,对于所有的 $i, \mathbf{x}_i(t) \rightarrow \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\alpha} = \sum_{i=1}^n \mathbf{x}_i(0)/n$.

在实际通信系统中,由于通信线路和通信设备等其他原因,移动多智能体之间信息交换存在各种时延,因此讨论具有通信时延的一致算法更具有实际意义. 文献[6]讨论了时延算法

$$\dot{\mathbf{x}}_i(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} [\mathbf{x}_j(t - \tau_{ij}) - \mathbf{x}_i(t - \tau_{ij})]$$

其中 τ_{ij} 为信息从节点 j 传到节点 i 所需的传输时延. 当所有传输信道的时延相同时,也就是 $\tau_{ij} = \tau$, 网络拓扑是固定的无向的连通图,研究了时延多智能体系统的一致性.

基于前面的算法,我们考虑当系统中有领航者 (Leader) 智能体的情况. 假设 Leader 的信息状态满足

$$\dot{\mathbf{x}}_{n+1}(t) = \mathbf{f}(t, \mathbf{x}_{n+1}) \quad (3)$$

其中 $\mathbf{x}_{n+1}(t)$ 为智能体 Leader 的状态, $\mathbf{f}(\cdot, \cdot)$ 为智能体 Leader 的速度,关于 $\mathbf{x}_{n+1}(t)$ 满足 Lipschitz 条件. 那么具有 Leader 的多智能体一致性算法可以描述为,对于 $i = 1, \dots, n$,

$$\mathbf{u}_i(t) = k_i \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} (\mathbf{x}_j(t) - \mathbf{x}_i(t)) + b_i (\mathbf{x}_{n+1}(t) - \mathbf{x}_i(t)) \right) \quad (4)$$

其中 $k_i > 0$ 为智能体 i 的控制增益,在算法(4)中,如果 Leader 与智能体 i 相连,则 $b_i > 0$, 否则, $b_i = 0$. 假设对于所有的 $i \in I, \lim_{t \rightarrow +\infty} \mathbf{x}_i(t) = \mathbf{x}_{n+1}$, 则系统(4)的状态渐近达到一致.

在通信网络中,由于通信链路、通信设备等影响,网络中存在时延. 一般系统时延有两部分组成^[15]: 一部分是数据在链路上传输时的时延,称通信时延;另一部分发生在节点处,由于处理器处理、分组排队等原因引起的时延,称输入时延. 假设多智能体之间存在通信时延,则一致性算法(4)为:

$$\mathbf{u}_i(t) = k_i \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} (\mathbf{x}_j(t - T_{ij}) - \mathbf{x}_i(t)) + b_i (\mathbf{x}_{n+1}(t - T_{i(n+1)}) - \mathbf{x}_i(t)) \right) \quad (5)$$

其中 T_{ij} 为信息从节点 j 传到节点 i 所需的通信时延. 假设信息到达每个智能体后,智能体自身存在输入时延 T_i , 则系统(1)为

$$\dot{\mathbf{x}}_i(t) = \mathbf{u}_i(t - T_i), i = 1, \dots, n \quad (6)$$

这样系统多智能体之间存在通信时延,每个智能体自身存在输入时延时,具有时延的多智能体一致性算法为,对于所有的 $i \in I$,

$$\dot{\mathbf{x}}_i(t) = k_i \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} (\mathbf{x}_j(t - T_{ij} - T_i) - \mathbf{x}_i(t - T_i)) + b_i (\mathbf{x}_{n+1}(t - T_{i(n+1)} - T_i) - \mathbf{x}_i(t - T_i)) \right) \quad (7)$$

3 具有不同延的多智能体运动的一致性

引理 1^[17] 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 不全为 0.

定理 假设多智能体系统有 n 个智能体和一个 Leader 智能体, 网络连接拓扑为有向加权网络, Leader 作为全局可达节点. 则时延多智能体系统(7)的状态能够渐近达到一致, 如果, 对于所有的 $i \in I$,

$$\kappa_i T_i (2d_i + b_i) < \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

这里 $d_i = \sum_{k=1}^n a_{ik}$.

证明 令 $\hat{\mathbf{x}}_i(t) = \mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_{n+1}(t)$, 代入系统(7)得,

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\mathbf{x}}}_i(t) &= \kappa_i \sum_{j=1}^n a_{ij} [(\hat{\mathbf{x}}_j(t - T_{ij} - T_i) - \hat{\mathbf{x}}_i(t - T_i))] \\ &\quad - \kappa_i b_i \hat{\mathbf{x}}_i(t - T_i) - \dot{\mathbf{x}}_{n+1}(t) \\ &\quad - \kappa_i \sum_{j=1}^n a_{ij} [(\mathbf{x}_{n+1}(t - T_{ij} - T_i) - \mathbf{x}_{n+1}(t - T_i))] \\ &\quad + \kappa_i b_i (\mathbf{x}_{n+1}(t - T_{i(n+1)} - T_i) - \mathbf{x}_{n+1}(t - T_i)) \end{aligned}$$

对上式和式(3)作 Laplace 变换, 令 $\mathbf{X}_i(s) = \mathbf{L}(\hat{\mathbf{x}}_i(t))$, 得

$$\begin{aligned} s\mathbf{X}_i(s) - \mathbf{X}_i(0) &= \kappa_i \sum_{j=1}^n a_{ij} [e^{-s(T_i + T_j)} \mathbf{X}_j(s) - e^{-sT_i} \mathbf{X}_i(s)] \\ &\quad - \kappa_i b_i e^{-sT_i} \mathbf{X}_i(s) - s\mathbf{X}_{n+1}(s) + \mathbf{X}_{n+1}(0) \\ &\quad - \kappa_i \sum_{j=1}^n a_{ij} [e^{-s(T_i + T_j)} \mathbf{X}_{n+1}(s) - e^{-sT_i} \mathbf{X}_{n+1}(s)] \\ &\quad + \kappa_i b_i (e^{-s(T_{i(n+1)} + T_i)} - e^{-sT_i}) \mathbf{X}_{n+1}(s) \\ s\mathbf{X}_{n+1}(s) - \mathbf{X}_{n+1}(0) &= \mathbf{F}(s) \end{aligned}$$

其中 $i = 1, \dots, n$, $\mathbf{F}(s) = \mathbf{L}(\mathbf{f}(t))$. 令 $\mathbf{X}(s) = [X_1(s), \dots, X_n(s)]^T$, 上式整理可得

$$\begin{aligned} s\mathbf{X}(s) - \mathbf{X}(0) &= -\mathbf{K}[\mathbf{L}(s) + \mathbf{B}(s)]\mathbf{X}(s) + \mathbf{1}_n \cdot \mathbf{X}_{n+1}(0) \\ &\quad - \{[s\mathbf{I}_n + \mathbf{K}(\mathbf{L}(s) + \mathbf{B}(s))] \cdot \mathbf{1}_n - \mathbf{b}(s)\} \mathbf{X}_{n+1}(s) \\ s\mathbf{X}_{n+1}(s) - \mathbf{X}_{n+1}(0) &= \mathbf{F}(s) \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $\mathbf{K} = \text{diag}(\kappa_i, i \in I)$, $\mathbf{1}_n = [1, 1, \dots, 1]^T$, $\mathbf{B}(s) = \text{diag}(b_i e^{-sT_i}, i \in I)$, \mathbf{I}_n 为 n 阶单位矩阵, $\mathbf{b}(s) = [b_1 e^{-s(T_{i(n+1)} + T_i)}, \dots, b_n e^{-s(T_{n(n+1)} + T_n)}]^T$, 矩阵 $\mathbf{L}(s) = [l_{ij}(s)]$ 满足

$$l_{ij}(s) = \begin{cases} -a_{ij} e^{-s(T_i + T_j)}, & j \in N_i \\ \sum_{j \in N_i} a_{ij} e^{-sT_i}, & j = i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

易知 $\mathbf{L}(0) = \mathbf{L}$. 根据式(9)可得系统的特征方程为

$$\det \left(s\mathbf{I}_{n+1} + \begin{pmatrix} \mathbf{K}(\mathbf{L}(s) + \mathbf{B}(s)) & \mathbf{Q}(s) \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \right) = 0.$$

其中 $\mathbf{Q}(s) = [s\mathbf{I}_n + \mathbf{K}(\mathbf{L}(s) + \mathbf{B}(s))] \cdot \mathbf{1}_n - \mathbf{b}(s)$, 上式等价于

$$s = 0 \quad (10a)$$

$$\det(s\mathbf{I}_n + \mathbf{K}(\mathbf{L}(s) + \mathbf{B}(s))) = 0 \quad (10b)$$

当特征根 $s = 0$ 时, 可解得对应的特征向量为 $\mathbf{X}_0 = [0, 0, \dots, 0, c]^T$, 这里 c 为一个非零数. 由于 $\hat{\mathbf{x}}_i(t) =$

$\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_{n+1}(t)$, $i = 1, \dots, n$, 因此, 特征向量 \mathbf{X}_0 在原系统方程中等价于 $[\underbrace{c, c, \dots, c}_{n+1}]^T$, 该点正好对应于系统的平衡点.

当 $s = 0$ 时, 矩阵 $\mathbf{L}(0) + \mathbf{B}(0) = \mathbf{L} + \mathbf{B}$. 根据引理 1 可知 $\mathbf{L} + \mathbf{B}$ 是满秩矩阵, 矩阵 \mathbf{K} 非奇异, 这样得到方程(10b)在 $s = 0$ 处没有根, 因此 $s = 0$ 为系统特征方程的单根. 令

$$\mathbf{D}(s) = \det \left(\mathbf{I} + \frac{\mathbf{K}(\mathbf{L}(s) + \mathbf{B}(s))}{s} \right) \quad (11)$$

如果方程(10b)的零点都具有负实部, 等价于方程(11)的零点都具有负实部. 如果方程(11)所有的零点都具有负实部, 则时延多智能体系统(7)的状态渐近达到一致. 记

$$\mathbf{G}(s) = \frac{\mathbf{K}}{s} (\mathbf{L}(s) + \mathbf{B}(s)) \quad (12)$$

令 $s = j\omega$, 上式变为

$$\mathbf{G}(j\omega) = \frac{\mathbf{K}}{j\omega} (\mathbf{L}(j\omega) + \mathbf{B}(j\omega)) \quad (13)$$

易知: 式(11)所有的零点都具有负实部, 等价于函数 $\mathbf{G}(j\omega)$ 的 Nyquist 曲线不包含复平面的 $-1 + j0$ 点. 根据广义 Nyquist 判据, 如果对于所有的 $\omega \in R$, 函数 $\mathbf{G}(j\omega)$ 的特征值 $\lambda(\mathbf{G}(j\omega))$ 的 Nyquist 曲线不包围 $-1 + j0$ 点, 则式(11)所有的零点都具有负实部.

下面应用 Greshgorin 圆盘定理, 估计矩阵 $\mathbf{G}(j\omega)$ 的特征值 $\lambda(\mathbf{G}(j\omega))$ 的范围. $\mathbf{G}(j\omega)$ 的特征值满足

$$\lambda(\mathbf{G}(j\omega)) \in \bigcup_{i \in I} G_i \quad (14)$$

其中,

$$\begin{aligned} G_i &= \left\{ \xi : \xi \in \mathbf{C}, \left| \xi - \kappa_i \left(\sum_{k=1}^n a_{ik} + b_i \right) \frac{e^{-j\omega T_i}}{j\omega} \right| \right. \\ &\leq \left. \sum_{k=1}^n \left| \kappa_i a_{ik} \frac{e^{-j\omega(T_i + T_k)}}{j\omega} \right| \right\}, \end{aligned}$$

\mathbf{C} 为复数域. 简单变换得到圆盘:

$$\begin{aligned} G_i &= \left\{ \xi : \xi \in \mathbf{C}, \left| \xi - \kappa_i (d_i + b_i) \frac{e^{-j\omega T_i}}{j\omega} \right| \right. \\ &\leq \left. \left| \kappa_i d_i \frac{e^{-j\omega T_i}}{j\omega} \right| \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

其中 $d_i = \sum_{k=1}^n a_{ik}$, 圆盘的中心为

$$G_{i0}(j\omega) = \kappa_i (d_i + b_i) \frac{e^{-j\omega T_i}}{j\omega} \quad (16)$$

当圆盘的中心 $G_{i0}(j\omega)$ 的 Nyquist 曲线随着 $\omega \in R$ 变换时, 圆盘 G_i 也跟着相应变化. 假设复平面的原点为 O , 复平面原点 O 与圆心 G_{i0} 连线的延长线交于圆盘的边界圆周于 W_i 点. 易知随着圆盘 G_i 的变化, 端点 W_i 的轨迹为

$$W_i(j\omega) = \kappa_i (2d_i + b_i) \frac{e^{-j\omega T_i}}{j\omega} \quad (17)$$

在继续证明之前,我们需要用到下面的引理.

引理 2 对于 $\omega \in R$, 凸包 $Co(0 \cup \{W_i(j\omega), i \in I\})$ 包含圆盘的集合 $\bigcup_{i \in I} G_i$. (引理 2 的证明略)

引理 3^[16] 假设

$$E_i(j\omega) = c_i \frac{e^{-j\omega T_i}}{j\omega} \quad (18)$$

$$c_i = \frac{\pi}{2T_i}$$

其中时延 T_i 为非负数. 则对于任意 $\gamma \in [0, 1)$, 当 $\omega \in R$ 时, 凸包 $\gamma Co(0 \cup \{E_i(j\omega), i \in I\})$ 不包含 $-1 + j0$.

下面继续证明定理 1. 根据 (17), 令

$$W_i(j\omega) = \gamma_i E_i(j\omega) \quad (19)$$

其中, $\gamma_i = 2\kappa_i T_i (2d_i + b_i) / \pi$. 根据定理的条件 (8), 有 $\gamma_i < 1$. 令

$$\gamma = \max \{ \gamma_i, i \in I \}, \quad (20)$$

显然有 $\gamma < 1$, 对于任意的 $i \in I$, 下式成立

$$\gamma Co(0 \cup \{E_i(j\omega)\}) \supseteq Co(0 \cup \{W_i(j\omega)\})$$

从而, 可以得到

$$\gamma Co(0 \cup \{E_i(j\omega), i \in I\}) \supseteq Co(0 \cup \{W_i(j\omega), i \in I\}).$$

根据引理 3, $(-1, j0) \notin \gamma Co(0 \cup \{E_i(j\omega), i \in I\})$, 所以 $(-1, j0) \notin Co(0 \cup \{W_i(j\omega), i \in I\})$.

根据引理 2, $Co(0 \cup \{W_i(j\omega), i \in I\}) \supseteq \bigcup_{i \in I} G_i$, 所以 $(-1, j0) \notin \bigcup_{i \in I} G_i$.

由 Greshgorin 圆盘定理可得, 矩阵 $G(j\omega)$ 的特征值满足 $\lambda(G(j\omega)) \in \bigcup_{i \in I} G_i$, 所以特征值 $\lambda(G(j\omega))$ 的轨迹不包含 $-1 + j0$ 点. 根据广义 Nyquist 判据, 特征方程 (11) 的所有特征根都有负实部. 也就是系统的状态渐近达到平衡点, 定理得证.

注 1 本文的一致性条件是一个分散式的条件, 该条件只用到了每个智能体的局部信息, 而与其它节点信息无关.

注 2 本文的一致性条件只与输入时延有关而与通信时延无关. 假设输入时延 $T_i = 0$, 具有通信时延的多智能体系统 (7) 的一致性不受时延的影响.

推论 1 假设系统拓扑为时不变的有向加权图, 存在一个全局可达点. 则时延多智能体系统 (7) 的状态能够渐近达到一致, 如果 $2\kappa_i d_i T_i < \frac{\pi}{2}$.

注 3 假设系统拓扑为静态有向加权网络, 存在一个全局可达点, 控制增益 $\kappa_i = 1$. 文献 [15] 得到渐近一致性条件为 $2d_i T_i < 1$, 该条件比本文的推论 1 要保守.

推论 2 假设系统拓扑为静态有向连通网络, 存在一个全局可达点. 则时延多智能体系统 (7) 的状态能够渐近达到一致, 如果 $\kappa_i T_i < \frac{\pi}{2\rho}$, 其中 ρ 为 Laplace 矩阵 L 的谱半径.

注 4 在推论 2 中, 如果令控制增益 $\kappa_i = 1$, 该结论与文献 [6] 中的关于无向连通网络的结论 (44) 一致, 因此文献 [6] 的结论 (44) 比推论 2 的结论要保守.

4 计算机仿真

本节应用计算机仿真分析上一节结论的正确性.

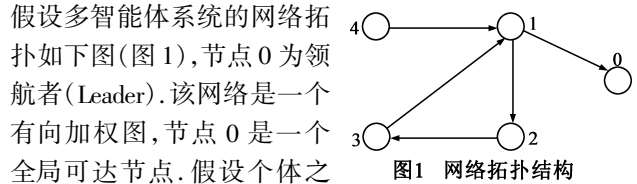


图1 网络拓扑结构

假设多智能体系统的网络拓扑如下图 (图 1), 节点 0 为领航者 (Leader). 该网络是一个有向加权图, 节点 0 是一个全局可达节点. 假设个体之间连接权值为 $a_{12} = 0.4, a_{23} = 0.5, a_{31} = 0.6, a_{41} = 0.7, b_1 = 0.8$. 根据网络参数, 下面分析控制增益 κ_i 与输入时延 T_i 的关系.

根据定理 1 的一致性条件, 可以得到多智能体系统中控制增益 κ_i 与输入时延 T_i 最大临界值满足的关系 (如图 2 所示). 由图 2 可以得到, 当控制增益 $\kappa_i = 1$ 时, 各智能体的输入时延的取值为:

$$T_1 \in [0, 0.9817), T_2 \in [0, 1.5708), \\ T_3 \in [0, 1.3090), T_4 \in [0, 1.1220).$$

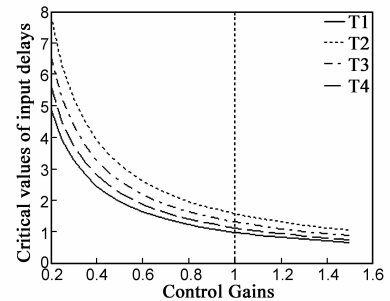


图2 控制增益 κ_i 与输入时延 T_i 的关系图

下面验证本文一致性条件的有效性. 假设控制增益 $\kappa_i = 1$, 输入时延分别为: $T_1 = 0.8s, T_2 = 1.3s, T_3 = 1.2s, T_4 = 1.0s$; 通信时延 $T_{12} = 1.5s, T_{23} = 1.2s, T_{31} = 1.1s, T_{41} = 1.0s$; 智能体 Leader 的运动方程为 $f(t) = 0.03$. 假设各智能体的初始状态随机生成, Leader 的初始状态为 5, 系统仿真结果如图 3, 各智能体最终与 Leader 的状态一致. 系统仿真结果与定理 1 的结论一致.

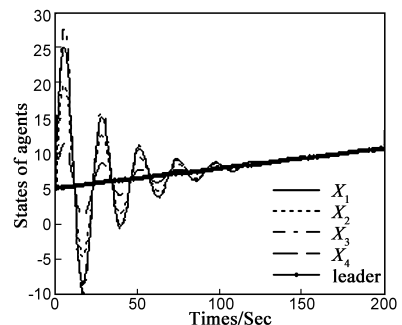


图3 多智能体系统的状态达到渐近一致

5 结论

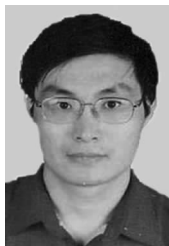
本文研究了具有领航者的多智能体系统的运动一致性.假设多智能体系统有 n 个自主个体和一个 Leader 组成,智能体 Leader 作为多智能体网络拓扑图的全局可达节点;通信拓扑是有向加权图;系统个体之间信息传输具有不同的通信时延和不同的输入时延.本文应用频域控制理论和广义 Nyquist 判据,研究了时延多智能体运动系统的一致性;得到了一个分散式的一致性条件.一致收敛条件只应用每个节点的局部信息,而与其它节点信息无关;系统一致性只与输入时延有关而与通信时延无关.

参考文献

- [1] Reynolds C W. Flocks, herds, and schools: a distributed behavioral model[J]. Computer Graphics, 1987, 21(4): 25 – 34.
- [2] Vicsek T, Czirok A, Ben-Jacob E, et al. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles[J]. Physical Review Letters, 1995, 75(6): 1226 – 1229.
- [3] Jadbabaie A, Lin J, Morse A S. Coordination of groups of mobile agents using nearest neighbor rules[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(6): 988 – 1001.
- [4] Moreau L. Stability of multiagent systems with time-dependent communication links[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(2): 169 – 182.
- [5] Ren W, Beard R W. Consensus seeking in multiagent systems under dynamically changing interaction topologies[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(5): 655 – 661.
- [6] Olfati Saber R, Murray R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(9): 1520 – 1533.
- [7] Fax J A, Murray R M. Information flow and cooperative control of vehicle formation[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(9): 1465 – 1476.
- [8] 刘志新, 郭雷. Vicsek 模型的连通与同步[J]. 中国科学(E 辑), 2007, 37(8): 979 – 988.
Liu Zhixin, Guo Lei. Connection and synchronization of Vicsek's model[J]. Science in China (Series E), 2007, 37(8): 979-988. (in Chinese)
- [9] 金玲, 黄智刚, 李锐, 马颖莉. 多卫导组合系统的快速选星算法研究[J]. 电子学报, 2009, 37(9): 1931 – 1936.
Jing Ling, Huang Zhigang, Li Rui, et. al. Study on fast satellite selection algorithm for integrated navigation[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(9): 1931 – 1936. (in Chinese)
- [10] Hao Jinghua, Liu Min, Wu Cheng. Particle swarm optimization for parallel machine scheduling problem with machine eligibility constraints[J]. Chinese Journal of Electronics, 2010, 19(1): 103 – 106.

- [11] Wei Ren, Randal W Beard, Ella Atkins. Information consensus in multivehicle cooperative control: collective group behavior through local interaction[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2007, 27(2): 71 – 82.
- [12] Olfati-Saber R, Fax J A, Murray R M. Consensus and cooperation in networked Multi-agent systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 215 – 233.
- [13] 俞辉, 蹇继贵, 王永骥. 多智能体时滞网络的加权平均一致性[J]. 控制与决策, 2007, 22(5): 558 – 562.
Yu Hui, Jian Jigui, Wang Yongji. Weighted average consensus for networks of multi-agent with time delays[J]. Control and Decision, 2007, 22(5): 558 – 562. (in Chinese)
- [14] 杨洪勇, 张嗣瀛. 离散时间系统的多智能体的一致性[J]. 控制与决策, 2009, 24(3): 413 – 416.
Yang Hongyong, Zhang Siying. Consensus of multi-agent system with discrete-time[J]. Control and Decision, 2009, 24(3): 413 – 416. (in Chinese)
- [15] Tian Y, Liu C. Consensus of multi-agent systems with diverse input and communication delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(9): 2122 – 2128.
- [16] Tian Y, Yang H. Stability of distributed congestion control with diverse communication delays[A]. Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation [C]. Hangzhou: IEEE, 2004. 15 – 19.
- [17] Ren W, Beard R W. Distributed Consensus In Multi-Vehicle Cooperative Control: Theory And Applications[M]. Springer-verlag London Limited, 2008.

作者简介



杨洪勇 男, 1967 年生于山东庆云. 2005 年毕业于东南大学自动控制系. 博士, 教授, 主要从事复杂网络与复杂性科学、网络拥塞控制、网络通信技术、多智能体编队控制等领域的研究.
E-mail: hyyang@yeah.net



田生文 男, 1974 年生于内蒙古乌盟. 2005 年毕业于青岛大学信息工程学院. 硕士, 讲师, 主要从事复杂网络与复杂性科学、网络通信系统等领域的研究.

张嗣瀛 男, 1925 年生于山东章丘. 1948 年毕业于武汉大学机械系. 教授, 中科院院士, 主要从事非线性控制、微分对策、复杂网络和复杂性科学等领域的研究.

