DOI:10.13878/j.cnki.jnuist.2019.04.002

李刚[1]　苗国英[1,2]　张静怡[1]

基于观测器的多智能体系统的自适应一致性控制

摘要

针对带有非线性动态的高阶多智能系统,本文提出了基于观测器的一致性和自适应控制算法.在一致性算法中加入了历史信息,并且参数增益采用自适应律控制的策略.利用 Lyapunov 函数、稳定性理论、图论和线性矩阵不等式技巧,得到多智能体系统一致性的充分条件.最后通过数值仿真结果验证该算法的有效性.

关键词

多智能体系统;自适应控制;一致性

中图分类号 TP13;TP18

文献标志码 A

收稿日期 2019-06-26

资助项目 国家重点研发计划(2018YFC1405703)

作者简介

李刚,男,硕士生,研究方向为多智能体系统的一致性.13851506174@163.com

苗国英(通信作者),女,博士,副教授,研究方向为多智能体系统的协调控制.mgyss66@163.com

1 南京信息工程大学 自动化学院,南京,210044

2 南京信息工程大学 江苏大气环境与装备技术协同创新中心,南京,210044

0 引言

随着传感器技术和通信技术的发展,使得多智能体系统的协调控制在工业的应用中变得越来越普遍,比如微型电网系统[1]、无线传感器网络[2]、多机器人的合作[3]等领域[4].因此,研究智能体之间的协调控制机制进而达到期望的行为,成为该领域的重要问题.目前,多智能体系统协调控制研究的主要问题包括群集[5]、蜂拥[6]、聚集[7]、一致性[8-9]等,其中多智能体系统的一致性问题是基础和关键的问题.一致性的问题的研究主要是通过设计合适的控制器,使其通过邻居之间的信息交换如智能体的位置、速度等信息,随着时间的推移,趋于一致.

在建立多智能体系统动态模型的时候,一般不考虑智能体的形状、质量、内部结构等,把智能体看作一个理想的点处理.为了研究系统的方便,忽略次要因素,大多数的智能体系统模型是线性的.然而,在实际的物理系统,某些系统的非线性动态的特征不能忽略,例如医疗机器手臂[10]协调工作的过程,所以带有非线性动态的多智能体系统具有应用价值.由于系统内部变量的耦合,导致系统带有非线性动态,文献[11]考虑了在有向图条件下的智能体速度与位置一致性问题.利用无向图的特征根非负的性质,文献[12]给出了控制算法中的参数与特征值之间的关系,进一步研究了带有领导者的跟踪一致性问题.文献[13]对于带有非线性动态的二阶多智能体系统,设计了一致性协议与自适应律.文献[14]对于多智能体网络,在事件触发机制的框架下,总结一系列协调控制的算法,并给出了排除芝诺现象的方法.当智能体的非线性动态是未知的情况下,文献[15]研究了网络同步的问题.在输出调节的框架下,文献[16]研究了自适应触发控制.

在实际的系统中,智能体的位置和速度不能在线得到,需要设计观测器,在线估计位置和速度的数值,从而设计分布式控制器.当拓扑结构满足马尔可夫链的性质时,针对一类非线性网络,文献[17]提出一种基于滑膜观测器的故障估计方法.对于含有非线性动态的机械系统,当执行器存在饱和时,文献[18]设计了基于观测器的有限时间一致性协议.由于外界环境的不确定性和存在外界干扰,导致网络中的全局信息是不断变化的,因此文献[19-20]采用了分布式自适应增益的策略,减弱全局信息的变化对一致性的影响.

针对带有非线性动态的多智能体系统,本文设计了自适应一致性算法.假设每个智能体都带有一个芯片,用来储存智能体过去时刻

的位置和速度信息.当智能体之间的通信拓扑为有向图时,并且智能体的状态不能在线得到时,设计了基于观测器的一致性协议和自适应控制律.通过构造合适的 Lyapunov 函数、稳定性理论和图论的知识,证明该算法的有效性.

1 图论及相关引理

假设本文研究的网络中含有 N 个智能体,用数字 i 表示第 i 个智能体,因此拓扑结构对应的图表示为 $\mathcal{G}=(\mathcal{V},\mathcal{E})$,其中 $\mathcal{V}=\{1,\cdots,i,\cdots,N\}$,$\mathcal{E}$ 是所有边的集合.边 $(j,i)\in\varepsilon$ 表示智能体 i 可以获得智能体 j 的信息,即信息传递具有方向性,则图 $\mathcal{G}$ 是有向图.邻接矩阵表示了节点和邻居边之间的关系,具体表达式为 $\mathcal{A}\triangleq[a_{ij}]$,$a_{ij}\geqslant 0$ 为边 (j,i) 上的传递信息的加权值.为了系统分析的方便,引入了拉普拉斯矩阵 $\boldsymbol{L}\triangleq[l_{ij}]$,是另一种描述点与边之间关系的矩阵,当两个节点 $i\neq j$ 时,定义 $l_{ij}=-a_{ij}$,否则当 $i=j$,$l_{ii}=\sum_{j=1}^{N}a_{ij}$.

引理 1[21] 对于矩阵 $\boldsymbol{A},\boldsymbol{B},\boldsymbol{C},\boldsymbol{D}$,克罗内克积运算满足以下规则:

1) $(\boldsymbol{A}\otimes\boldsymbol{B})^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\otimes\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}$;

2) $(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B})\otimes\boldsymbol{C}=\boldsymbol{A}\otimes\boldsymbol{C}+\boldsymbol{B}\otimes\boldsymbol{C}$;

3) $(\boldsymbol{AB})\otimes(\boldsymbol{CD})=(\boldsymbol{A}\otimes\boldsymbol{C})(\boldsymbol{B}\otimes\boldsymbol{D})$.

引理 2[13,22] 如果函数 $V(x,t)$ 满足下面的条件:

1) $V(x,t)$ 有下界;

2) $\dot{V}(x,t)$ 是半负定的;

3) $\dot{V}(x,t)$ 关于 t 是一致连续的.

则当 $t\to\infty$ 时候,有 $\dot{V}(x,t)\to 0$.

引理 3[23] 假设 $\boldsymbol{L}\in\mathbf{R}^{N\times N}$ 为有向图 $\mathcal{G}$ 的 Laplacian 矩阵,则以下结论成立:

1) $\boldsymbol{L}$ 的所有特征根具有非负实部,0 是 $\boldsymbol{L}$ 的特征根,且对应的特征向量为 $\mathbf{1}_N$;

2) $\boldsymbol{L}$ 有且只有一个零特征根当且仅当 $\mathcal{G}$ 包含一颗生成树.

2 问题描述

假设智能体的系统的动态模型为

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}_i(t)=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_i(t)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_i(t)+f(\boldsymbol{x}_i(t)),\\ \boldsymbol{y}_i(t)=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}_i(t),\quad i=1,\cdots,N,\end{cases}\tag{1}$$

其中 $\boldsymbol{x}_i(t)\in\mathbf{R}^N$ 是智能体的状态,$\boldsymbol{y}_i(t)\in\mathbf{R}^s$ 是第 i 个智能体的输出,$\boldsymbol{u}_i(t)\in\mathbf{R}^r$ 是第 i 个智能体的控制输入,$f_i(\boldsymbol{x}_i(t))$ 是连续非线性微分函数,满足假设 1 和 $\|f_i(\boldsymbol{x}_i(t))\|\leqslant\beta\|\boldsymbol{x}_i(t)\|$,且 $\beta>0$ 是常数.$\boldsymbol{A}\in\mathbf{R}^{N\times N}$,$\boldsymbol{B}\in\mathbf{R}^{N\times r}$,$\boldsymbol{C}\in\mathbf{R}^{s\times N}$ 是常数矩阵,N 是智能体个数.

在一些实际系统中,当 $\boldsymbol{x}_i(t)$ 不能在线获得的时候,设计如下的观测器来估计 $\boldsymbol{x}_i(t)$:

$$\begin{cases}\dot{\hat{\boldsymbol{x}}}_i(t)=\boldsymbol{A}\hat{\boldsymbol{x}}_i(t)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_i(t)+\boldsymbol{G}(\boldsymbol{y}_i(t)-\\ \qquad\hat{\boldsymbol{y}}_i(t))+f(\hat{\boldsymbol{x}}_i(t)),\\ \hat{\boldsymbol{y}}_i(t)=\boldsymbol{C}\hat{\boldsymbol{x}}_i(t),\quad i=1,\cdots,N,\end{cases}\tag{2}$$

其中 $\hat{\boldsymbol{x}}_i(t)$ 是 $\boldsymbol{x}_i(t)$ 的估计,$\hat{\boldsymbol{y}}_i(t)$ 是对 $\boldsymbol{y}_i(t)$ 的估计,$\boldsymbol{G}\in\mathbf{R}^{N\times s}$ 是系统的反馈矩阵.

由于受到文献[20,23-26]中设计一致性协议方法的启发,本文设计的控制器不仅考虑智能体邻居间相互信息的传递,还考虑智能体过去时刻的信息,如下所示:

$$u_i(t)=K_i(t)\sum_{j=1}^{N}a_{ij}[\hat{\boldsymbol{x}}_j(t-\tau)-\hat{\boldsymbol{x}}_i(t-\tau)]+D_i(t)\sum_{j=1}^{N}a_{ij}[\hat{\boldsymbol{x}}_j(t)-\hat{\boldsymbol{x}}_i(t)],\tag{3}$$

$$\dot{D}_i(t)=\boldsymbol{\xi}_i^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_2\sum_{j=1}^{N}l_{ji}\boldsymbol{\xi}_j(t),\tag{4}$$

$$\boldsymbol{\xi}_i(t)=\sum_{j=1}^{N}a_{ij}(\hat{\boldsymbol{x}}_i(t)-\hat{\boldsymbol{x}}_j(t)),\tag{5}$$

$$\dot{K}_i(t)=\boldsymbol{\xi}_i^{\mathrm{T}}(t-\tau)\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_2\sum_{j=1}^{N}l_{ji}\boldsymbol{\xi}_j(t),\tag{6}$$

其中 $K_i(t)$ 和 $D_i(t)$ 是一个自适应参数增益,l_{ji} 是拉普拉斯矩阵 $\boldsymbol{L}$ 中的一个元素,$\hat{\boldsymbol{x}}_i(t-\tau)$ 是第 i 个智能体 τ 时刻之前存储的历史信息,$\boldsymbol{P}_2$ 是求解式(12)得到的矩阵.

定义系统状态真实值和估计值之间的误差 $\boldsymbol{e}_i(t)$ 为

$$\boldsymbol{e}_i(t)=\boldsymbol{x}_i(t)-\hat{\boldsymbol{x}}_i(t).\tag{7}$$

给出以下的假设条件:

假设 1 存在 $k>0$,使得对于所有的智能体 $\boldsymbol{x}_i(t)$,$\boldsymbol{x}_j(t)\in\mathbf{R}^N$,则 $f_i(\boldsymbol{x}_i(t))$ 满足以下条件:

$$\|f(\boldsymbol{x}_i(t))-f(\boldsymbol{x}_j(t))\|\leqslant k\|\boldsymbol{x}_i(t)-\boldsymbol{x}_j(t)\|.$$

定义 1[23] 对于多智能体系统(1),在控制算法(2)—(6)的作用下,随着时间的推移,则 $\lim_{t\to\infty}\|\boldsymbol{x}_i(t)-\boldsymbol{x}_j(t)\|=0$,$\forall i,j\in\mathcal{V}$,称为多智能体系统(1)的状态达到一致性.

3 稳定性分析

对式(7)进行求导,将式(1)—(2)代入,可得:

$$\dot{\boldsymbol{e}}_i(t)=(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{GC})\boldsymbol{e}_i(t)+f(\boldsymbol{x}_i(t))-f(\hat{\boldsymbol{x}}_i(t)),$$

根据引理1,把上式写成矩阵的形式:

$$\dot{\boldsymbol{e}}(t)=[\boldsymbol{I}_N\otimes(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{GC})]\boldsymbol{e}(t)+F(\boldsymbol{x}(t)),\quad(8)$$

其中

$$\boldsymbol{e}(t)=[\boldsymbol{e}_1^{\mathrm{T}}(t),\cdots,\boldsymbol{e}_N^{\mathrm{T}}(t)]^{\mathrm{T}},$$
$$F(\boldsymbol{x}(t))=\boldsymbol{I}_N\otimes[f(\boldsymbol{x}(t))-f(\hat{\boldsymbol{x}}(t))],$$
$$\hat{\boldsymbol{x}}(t)=[\hat{\boldsymbol{x}}_1^{\mathrm{T}}(t),\cdots,\hat{\boldsymbol{x}}_N^{\mathrm{T}}(t)]^{\mathrm{T}},$$
$$\boldsymbol{x}(t)=[\boldsymbol{x}_1^{\mathrm{T}}(t),\cdots,\boldsymbol{x}_N^{\mathrm{T}}(t)]^{\mathrm{T}}.$$

由式(2)—(6),把它们写成矩阵的形式,可得:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\boldsymbol{x}}}(t)=&(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{A})\hat{\boldsymbol{x}}(t)-(\boldsymbol{K}(t)\boldsymbol{L}\otimes\boldsymbol{B})\hat{\boldsymbol{x}}(t-\tau)+\\&F_1(\hat{\boldsymbol{x}}(t))-(\boldsymbol{D}(t)\boldsymbol{L}\otimes\boldsymbol{B})\hat{\boldsymbol{x}}(t)+\\&(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{GC})\boldsymbol{e}(t),\end{aligned}$$

其中

$$F_1(\hat{\boldsymbol{x}}(t))=(\boldsymbol{I}_N\otimes f(\hat{\boldsymbol{x}}(t))),$$
$$\boldsymbol{D}(t)=\mathrm{diag}\{\boldsymbol{D}_1(t),\cdots,\boldsymbol{D}_N(t)\},$$
$$\boldsymbol{K}(t)=\mathrm{diag}\{\boldsymbol{K}_1(t),\cdots,\boldsymbol{K}_N(t)\}.$$

由式(5),可得:

$$\boldsymbol{\xi}(t)=(\boldsymbol{L}\otimes\boldsymbol{I}_N)\hat{\boldsymbol{x}}(t),$$

其中$\boldsymbol{\xi}(t)=[\boldsymbol{\xi}_1^{\mathrm{T}}(t),\cdots,\boldsymbol{\xi}_N^{\mathrm{T}}(t)]^{\mathrm{T}}$,并对它求导,可知:

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{\xi}}(t)=&(\boldsymbol{L}\otimes\boldsymbol{I}_N)(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{A})\hat{\boldsymbol{x}}(t)-\\&(\boldsymbol{L}\otimes\boldsymbol{I}_N)(\boldsymbol{K}(t)\boldsymbol{L}\otimes\boldsymbol{B})\hat{\boldsymbol{x}}(t-\tau)-\\&(\boldsymbol{L}\otimes\boldsymbol{I}_N)(\boldsymbol{D}(t)\boldsymbol{L}\otimes\boldsymbol{B})\hat{\boldsymbol{x}}(t)+\\&(\boldsymbol{L}\otimes\boldsymbol{I}_N)\boldsymbol{F}_1(\hat{\boldsymbol{x}}(t))+(\boldsymbol{L}\otimes\boldsymbol{I}_N)(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{GC})\boldsymbol{e}(t)=\\&(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{A})\boldsymbol{\xi}(t)-(\boldsymbol{LK}(t)\otimes\boldsymbol{B})\boldsymbol{\xi}(t-\tau)-\\&(\boldsymbol{LD}(t)\otimes\boldsymbol{B})\boldsymbol{\xi}(t)+(\boldsymbol{L}\otimes\boldsymbol{I}_N)(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{GC})\boldsymbol{e}(t)+\\&(\boldsymbol{L}\otimes\boldsymbol{I}_N)F_1(\hat{\boldsymbol{x}}(t)).\end{aligned}\quad(9)$$

整理以上公式,可得:

$$\dot{\boldsymbol{e}}(t)=[(\boldsymbol{I}_N\otimes(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{GC})]\boldsymbol{e}(t)+F(\boldsymbol{x}(t)),\quad(10)$$

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{\xi}}(t)=&(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{A})\boldsymbol{\xi}(t)-(\boldsymbol{LK}(t)\otimes\boldsymbol{B})\boldsymbol{\xi}(t-\tau)-\\&(\boldsymbol{LD}(t)\otimes\boldsymbol{B})\boldsymbol{\xi}(t)+(\boldsymbol{L}\otimes\boldsymbol{I}_N)(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{GC})\boldsymbol{e}(t)+\\&(\boldsymbol{L}\otimes\boldsymbol{I}_N)F_1(\hat{\boldsymbol{x}}(t)).\end{aligned}\quad(11)$$

定理1 假设通信拓扑对应的图$\mathcal{G}$包含一颗有向生成树.如果存在常数d_i,k_i,$\boldsymbol{P}_1>0,\boldsymbol{P}_2>0,\boldsymbol{Q}>0,\boldsymbol{D}=\mathrm{diag}\{d_1,\cdots,d_N\}$,$\boldsymbol{K}=\mathrm{diag}\{k_1,\cdots,k_N\}$,$k>0$,$\beta>0$,满足如下的线性矩阵不等式:

$$\boldsymbol{\Sigma}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\Sigma}_{11}&\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}\otimes\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_2&0*&\boldsymbol{\Sigma}_{22}&-\boldsymbol{LK}\otimes\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{B}*&*&-\boldsymbol{Q}\end{bmatrix}<0,\quad(12)$$

其中

$$\boldsymbol{\Sigma}_{11}=\boldsymbol{I}_N\otimes[\boldsymbol{P}_1(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{GC})+(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{GC})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_1]+k[(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{P}_1)+(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{P}_1)],$$

$$\boldsymbol{\Sigma}_{22}=\boldsymbol{I}_N\otimes(\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{A}+\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_2)-\boldsymbol{L}\hat{\boldsymbol{D}}\otimes\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{B}-\boldsymbol{D}\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}\otimes\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_2+2\beta(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{P}_2)+\boldsymbol{Q}.$$

可知在控制算法(2)—(6)下,随着时间的推移,多智能体系统(1)的状态达到一致.

证明 构造如下的Lyapunov函数

$$V(t)=V_1(t)+V_2(t)+V_3(t)+V_4(t)+V_5(t),$$

其中

$$V_1(t)=\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(t)(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{P}_1)\boldsymbol{e}(t),\quad(13)$$

$$V_2(t)=\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(t)(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{\xi}(t),\quad(14)$$

$$V_3(t)=\int_{t-\tau}^{t}\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(s)\boldsymbol{Q}\boldsymbol{\xi}(s)\mathrm{d}s,\quad(15)$$

$$V_4(t)=\sum_{i=1}^{N}(D_i(t)-d_i)^2,\quad(16)$$

$$V_5(t)=\sum_{i=1}^{N}(K_i(t)-k_i)^2.\quad(17)$$

从式(13)—(17)可以看出,$V(t)\geqslant0$.当$\boldsymbol{e}(t)=0,\boldsymbol{\xi}(t)=0,D_i(t)=d_i$且$K_i(t)=k_i$时,$V(t)=0$.则$V(t)$满足引理2中的第一个条件.

对$V_1(t)$式子进行求导,将式(10)代入可得:

$$\begin{aligned}\dot{V}_1(t)=&2\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(t)(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{P}_1)\dot{\boldsymbol{e}}(t)=\\&2\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(t)[\boldsymbol{I}_N\otimes(\boldsymbol{P}_1(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{GC}))]\boldsymbol{e}(t)+\\&2\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(t)(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{P}_1)F(\boldsymbol{x}(t)).\end{aligned}$$

由假设1,可得:

$$2\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(t)(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{P}_1)F(\boldsymbol{x}(t))\leqslant2k\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(t)(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{P}_1)\boldsymbol{e}(t),$$

整理后得到如下形式:

$$\begin{aligned}\dot{V}_1(t)=&2\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(t)[\boldsymbol{I}_N\otimes(\boldsymbol{P}_1(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{GC}))]\boldsymbol{e}(t)+\\&2k\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(t)(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{P}_1)\boldsymbol{e}(t).\end{aligned}$$

对$V_2(t)$进行求导,将式(11)代入可知:

$$\begin{aligned}\dot{V}_2(t)=&2\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(t)(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{P}_2)\dot{\boldsymbol{\xi}}(t)=\\&2\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(t)(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{P}_2)[(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{A})\boldsymbol{\xi}(t)-\\&(\boldsymbol{LK}(t)\otimes\boldsymbol{B})\boldsymbol{\xi}(t-\tau)-\\&(\boldsymbol{LD}(t)\otimes\boldsymbol{B})\boldsymbol{\xi}(t)+(\boldsymbol{L}\otimes\boldsymbol{GC})\boldsymbol{e}(t)+\\&(\boldsymbol{L}\otimes\boldsymbol{I}_N)F_1(\hat{\boldsymbol{x}}(t))]=\\&2\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(t)(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{P}_2)(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{A})\boldsymbol{\xi}(t)-\\&2\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(t)(\boldsymbol{LK}(t)\otimes\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{B})\boldsymbol{\xi}(t-\tau)-\\&2\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(t)(\boldsymbol{LD}(t)\otimes\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{B})\boldsymbol{\xi}(t)+\\&2\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(t)(\boldsymbol{L}\otimes\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{GC})\boldsymbol{e}(t)+\\&2\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(t)(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{P}_2)(\boldsymbol{L}\otimes\boldsymbol{I}_N)F_1(\hat{\boldsymbol{x}}(t)).\end{aligned}$$

考虑到条件$\|f(\boldsymbol{x}_i(t))\|\leqslant\beta\|\boldsymbol{x}_i(t)\|$,可得:

$$\begin{aligned}&2\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(t)(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{P}_2)(\boldsymbol{L}\otimes\boldsymbol{I}_N)F_1(\hat{\boldsymbol{x}}(t))\leqslant\\&2\|\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(t)(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{P}_2)(\boldsymbol{L}\otimes\boldsymbol{I}_N)F_1(\hat{\boldsymbol{x}}(t))\|\leqslant\\&2\beta\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(t)(\boldsymbol{I}_N\otimes\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{\xi}(t).\end{aligned}$$

对式(15)进行求导,可得:

$$\dot{V}_3(t)=\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{Q}\boldsymbol{\xi}(t)-\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(t-\tau)\boldsymbol{Q}\boldsymbol{\xi}(t-\tau).$$

对式(16)和(17)求导,将式(4)—(6)代入可知:

$$\dot{V}_4(t)+\dot{V}_5(t)=$$

$$\sum_{i=1}^{N}2(D_i(t)-d_i)\dot{D}_i(t)+\sum_{i=1}^{N}2(K_i(t)-k_i)\dot{K}_i(t)=$$

$$2\xi^{\mathrm{T}}(t)(\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}\otimes\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{\xi}(t)-$$

$$2\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(t)(\hat{\boldsymbol{D}}\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}\otimes\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{\xi}(t)+$$

$$2\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(t-\tau)(\boldsymbol{K}(t)\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}\otimes\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{\xi}(t)-$$

$$2\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(t-\tau)(\boldsymbol{K}\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}\otimes\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{\xi}(t).$$

由于$2\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(t)(\boldsymbol{L}\boldsymbol{D}(t)\otimes\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{B})\boldsymbol{\xi}(t)$是常数,对它做转置变换,可知:

$$2\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(t)(\boldsymbol{L}\boldsymbol{D}(t)\otimes\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{B})\boldsymbol{\xi}(t)=$$

$$2\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(t)(\boldsymbol{L}\boldsymbol{D}(t)\otimes\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{B})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\xi}(t)=$$

$$2\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(t)(\boldsymbol{D}(t)L^{\mathrm{T}}\otimes\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{\xi}(t).$$

整理以上公式,可得:

$$\dot{V}(t)=\boldsymbol{\eta}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{\eta}(t),\tag{18}$$

其中$\boldsymbol{\eta}(t)=[\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(t),\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(t),\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(t-\tau)]^{\mathrm{T}}$.

由式(12)可得,$\dot{V}(t)\leqslant 0$.从式(18)可以看出,$\dot{V}(t)$满足引理2中的第二和第三条件.根据引理2可得,由于$\lim\limits_{t\to\infty}\dot{V}(t)=0$,可得$\lim\limits_{t\to\infty}\boldsymbol{e}(t)=0$,$\lim\limits_{t\to\infty}\boldsymbol{\xi}(t)=0$.因为图包含一颗有向生成树,由引理3,可知拉普拉斯矩阵$\boldsymbol{L}$只有一个零特征根且对应的特征向量是$\boldsymbol{1}$.由$\boldsymbol{\xi}(t)=(\boldsymbol{L}\otimes\boldsymbol{I}_N)\boldsymbol{x}(t)$,可知$\lim\limits_{t\to\infty}\boldsymbol{x}_i(t)=\lim\limits_{t\to\infty}\boldsymbol{x}_j(t)$.由$\lim\limits_{t\to\infty}\boldsymbol{e}(t)=0$,可得$\lim\limits_{t\to\infty}\boldsymbol{x}_i(t)=\lim\limits_{t\to\infty}\boldsymbol{x}_j(t)=\lim\limits_{t\to\infty}\boldsymbol{x}_i(t)=\lim\limits_{t\to\infty}\boldsymbol{x}_j(t)$,$i=1,\cdots,N$.根据定义1,在控制算法(2)—(6)下,多智能体系统(1)的状态达到一致.

注1 文献[26]研究了基于观测器的多智能体系统的一致性问题.本文在文献[26]的基础上,考虑了智能体内部的非线性动态特性,设计一致性算法(3),采用了自适应参数的策略,减少对全局信息的依赖.

注2 文献[26]中,通信拓扑是无向的,而本文研究是有向拓扑结构.

4 数值仿真

假设有4个智能体组成的网络,图1为网络的拓扑结构.图1对应的拉普拉斯矩阵是

$$\boldsymbol{L}=\begin{bmatrix}1&0&-1&0\\-1&1&0&0\\0&0&1&-1\\0&-1&0&1\end{bmatrix}.$$

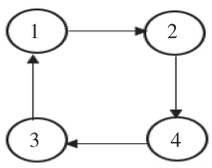


图1 由4个智能体组成的通信拓扑图

Fig. 1 The communication topology that is made up of four agents

假设每个智能体的参数矩阵如下:

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}-6.8&-5.2\\-5.1&8.7\end{bmatrix},\quad \boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}1.01&1.16\\1&0.5\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}3.1&3.2\\2.1&3.4\end{bmatrix},\quad \boldsymbol{G}=\begin{bmatrix}1.02&1.01\\1.21&1.31\end{bmatrix}.$$

令$k=1.1$,$\beta=1$,假设系统非线性动态$f(\boldsymbol{x}_i(t))=0.95\sin(\boldsymbol{x}_i(t))$.通过MATLAB工具箱求解线性矩阵不等式(12),得到一组可行解

$$\boldsymbol{P}_2=\begin{bmatrix}3.534\,3&-2.315\,2\\-2.315\,2&2.609\,1\end{bmatrix}.$$

在设计的控制算法(2)—(6)作用下,系统(1)中的智能体的状态运动轨迹分别用图2和图3表示.图4和图5表示系统(1)—(2)状态的真实值与估计值之间的误差曲线.图6和图7表示自适应参数曲线.

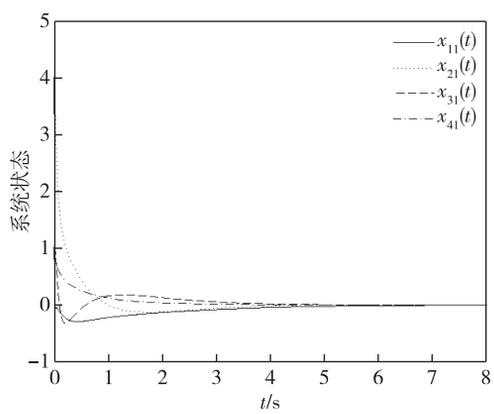


图2 在算法(2)—(6)作用下,
系统(1)状态的第一个分量运动轨迹

Fig. 2 Trajectories for the first row of state vectors in system (1) with algorithms (2)-(6)

5 结束语

本文研究了带有非线性动态的高阶多智能体的自适应一致性问题.受文献[24,26]的模型及构造控制器思想的启发,利用智能体历史时刻的信息,设计一致性算法和自适应控制律.利用模型的转换,把一

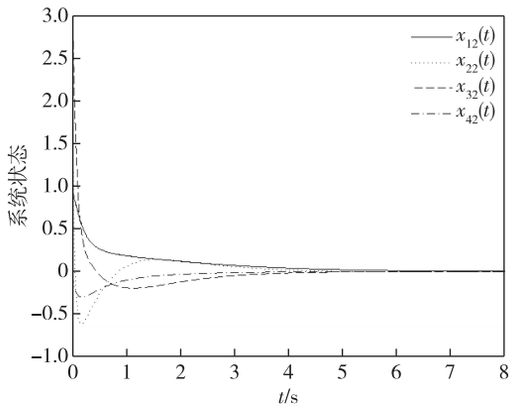


图 3　在算法(2)—(6)作用下,
系统(1)状态的第二个分量运动轨迹

Fig. 3　Trajectories for the second row of state vectors in system (1) with algorithms (2)-(6)

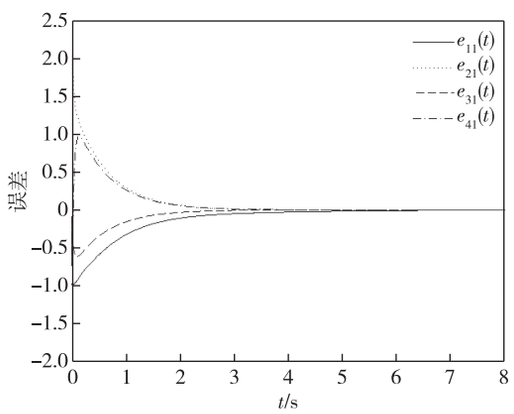


图 4　系统(1)—(2)状态误差的第一个分量曲线

Fig. 4　Curves for the first row of state error vectors in systems (1)-(2)

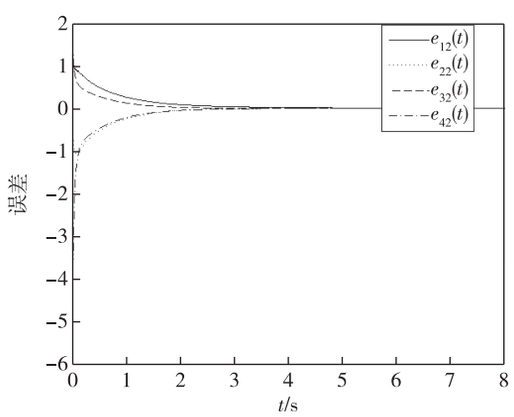


图 5　系统(1)—(2)状态误差的第二个分量曲线

Fig. 5　Curves for the second row of state error vectors in systems (1)-(2)

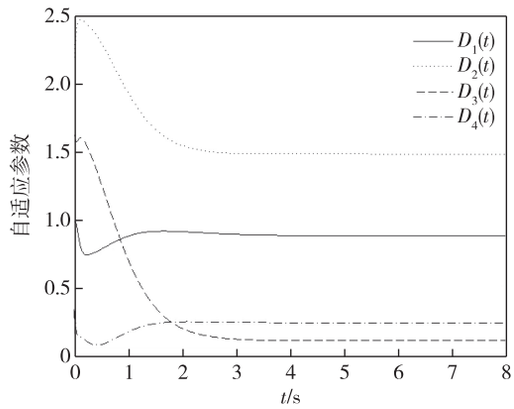


图 6　自适应参数 $D_i(t)$ 曲线

Fig. 6　Pictures of adaptive gains $D_i(t)$

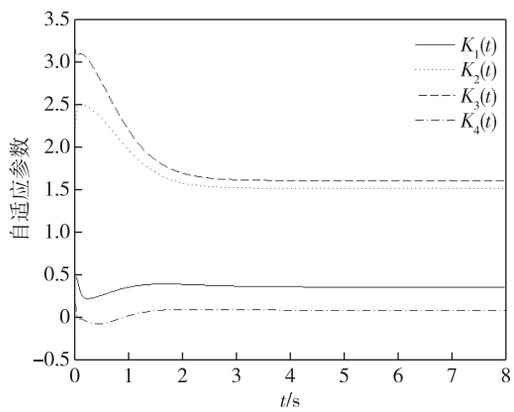


图 7　自适应参数 $K_i(t)$ 曲线

Fig. 7　Pictures of adaptive gains $K_i(t)$

致性问题转化为闭环系统的稳定性问题.本文运用了图论的知识、李亚普诺夫稳定性理论和线性矩阵不等式的技巧,得到系统达到一致性的充分条件.由于外界环境的不确定影响,使得智能体之间的通信拓扑结构变得更为复杂,如何设计智能体之间协调控制的算法,将是我们下一步研究工作.

参考文献

References

[1] Li Z,Zang C,Zeng P,et al.MAS based distributed automatic generation control for cyber-physical microgird system[J].IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica,2016,3(1):78-89

[2] Olfati-Saber R,Shamma J S.Consensus filters for sensor networks and distributed sensor fusion[C]//Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control,15-15 Dec.2005,Seville,Spain,2005:6698-6703

[3] Alami R,Fleury S,Herrb M,et al.Multi-robot cooperation in the MARTHA project [J]. IEEE Robotics &

Automation Magazine,1998,5(1):36-47

[4] 卢剑权,李海涛,刘洋,等.矩阵半张量积方法在逻辑网络和相关系统中的应用综述[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2017,9(4):341-364
LU Jianquan,LI Haitao,LIU Yang,et al.A survey on the applications of semi-tensor product of matrices on logical networks and other related systems[J].Journal of Nanjing University of Information Science & Technology(Natural Science Edition),2017,9(4):341-364

[5] 胡鸿翔,梁锦,温光辉,等.多智能体系统的群集行为研究综述[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2018,10(4):415-421
HU Hongxiang, LIANG Jin, WEN Guanghui, et al. A survey of development on swarming behavior for multi-agent systems [J].Journal of Nanjing University of Information Science & Technology(Natural Science Edition),2018,10(4):415-421

[6] 苏厚胜.多智能体蜂拥控制问题研究[D].上海:上海交通大学,2008
SU Housheng. Flocking problem in multi-agent systems [D].Shanghai:Shanghai Jiaotong University,2008

[7] 李杨,田家赫,谢光强,等.多智能体聚集问题研究综述[J].计算机应用研究,2019,36(6):1609-1613.DOI:10.19734/j.issn.1001-3695.2018.03.012
LI Yang, TIAN Jiahe, XIE Guangqiang, et al. Survey of developments on multi-agent system rendezvous problem [J].Application Research of Computers,2019,36(6):1609-1613. DOI: 10. 19734/j. issn. 1001-3695. 2018. 03.012

[8] 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

[9] Ma Q,Xu S Y,Lewis F L.Second-order consensus for directed multi-agent systems with sampled data[J].International Journal of Robust and Nonlinear Control,2014,24(16):2560-2573

[10] 李瑞峰.中国工业机器人产业化发展战略[J].航空制造技术,2010(9):32-37
LI Ruifeng. Development strategy for China industrial robot[J].Aeronautical Manufacturing Gechnology,2010(9):32-37

[11] Yu W W, Chen G R, Cao M, et al. Second-order consensus for multiagent systems with directed topologies and nonlinear dynamics[J].IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics),2010,40(3):881-891

[12] Mei J, Ren W, Ma G F. Distributed coordination for second-order multi-agent systems with nonlinear dynamics using only relative position measurements[J].Automatica,2013,49(5):1419-1427

[13] Yu W W,Ren W,Zheng W X,et al.Distributed control gains design for consensus in multi-agent systems with second-order nonlinear dynamics[J].Automatica,2013,49(7):2107-2115

[14] 许文盈,曹进德.基于事件驱动机制的多智能体系统协调控制研究综述[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2018,10(4):395-400
XU Wenying,CAO Jinde.An overview of recent progress in the study of event-triggered coordinated schemes of multi-agent systems[J].Journal of Nanjing University of Information Science & Technology(Natural Science Edition),2018,10(4):395-400

[15] Zhang H W, Lewis F L. Synchronization of networked higher-order nonlinear systems with unknown dynamics [C]// 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 15-17 Dec. 2010, Atlanta, GA, USA, 2010: 7129-7134

[16] Yang R H,Zhang H,Feng G,et al.Robust cooperative output regulation of multi-agent systems via adaptive event-triggered control [J]. Automatica, 2019, 102: 129-136

[17] Jiang B,Shi P,Mao Z H.Sliding mode observer-based fault estimation for nonlinear networked control systems [J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2011, 30(1):1-16

[18] Zhou Y, Huang J S, Gao T T. Finite-time consensus control of nonlinear mechanical systems with input saturation [C] // 2015 34th Chinese Control Conference (CCC), 28-30 July 2015, Hangzhou, China, 2015: 1240-1245

[19] Bai H,Arcak M,Wen J T.Adaptive motion coordination: using relative velocity feedback to track a reference velocity[J].Automatica,2009,45(4):1020-1025

[20] Gao J F,Zheng M N.Distributed adaptive event-triggered protocol for tracking control of leader-following multi-agent systems[J].Journal of the Franklin Institute,2018.DOI:10.1016/j.jfranklin.2018.07.019

[21] Horn R A, Johnson C R. Matrix analysis [M]. Cambridge,U.K.:Cambridge University Press,1985

[22] Slotin J,Li W.Applied nonlinear control [M].Englewood Cliffs:Prentice Hall,1991

[23] Ren W, Beard R W. Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control [M]. London: Springer London,2008.DOI:10.1007/978-1-84800-015-5

[24] Cao Y C,Ren W,Chen Y Q.Multi-agent consensus using both current and outdated states[J].IFAC Proceedings Volumes,2008,41(2):2874-2879

[25] Zhang X X,Liu X P.Containment of linear multi-agent systems with disturbances generated by heterogeneous nonlinear exosystems [J]. Neurocomputing, 2018, 315: 283-291

[26] 刘忠信,刘慧,李杨博,等.基于观测器的线性时变时滞多智能体系统一致性[J].控制与决策,DOI:10.13195/j.kzyjc.2018.0103
LIU Zhongxin,LIU Hui,LI Yangbo,et al.Observer-based consensus of linear multi-agent systems with time-varying delays[J].Control and Decision,DOI:10.13195/j.kzyjc.2018.0103

南京信息工程大学学报(自然科学版),2019,11(4):373-379
Journal of Nanjing University of Information Science and Technology(Natural Science Edition),2019,11(4):373-379

Observer-based adaptive consensus control for multi-agent systems

LI Gang[1] MIAO Guoying[1,2] ZHANG Jingyi[1]

1 School of Automation, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Jiangsu Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract For high-order multi-agent systems with nonlinear dynamics, consensus algorithms and adaptive laws based on observer mechanism are proposed in the paper. Additionally, history information of agent's states are added in consensus algorithms. Furthermore, parameter gains are decided by adaptive control laws. By applying the Lyapunov function, stability theory, graph theory and linear matrix inequalities techniques, sufficient consensus conditions for multi-agent systems are obtained. Finally, results of numerical examples are used to verify the effectiveness of the proposed algorithms.

Key words multi-agent systems; adaptive control; consensus