



中国自动化学会通讯

COMMUNICATIONS OF CAA

主办：中国自动化学会

<http://www.caa.org.cn>

E-mail: caa@ia.ac.cn

多智能体系统

ISSN 2151-335X



6 915920 700067

2014年3月

第1期

第35卷 总第174期

Contents



第35卷 第1期 总第174期 2014年3月

www.caa.org.cn

主办单位：中国自动化学会



主编的话

多智能体系统 (Multi-Agent Systems) 通过智能体之间的相互通信和相应的分布式协议可以共同完成单个智能体所无法完成的高难度、复杂性的任务。多智能体系统理论和方法在机器人编队控制、无人机协调控制、分布式传感器网络等领域具有重要的应用价值。多智能体系统是当前控制领域中的研究热点和研究前沿,吸引了自动化领域研究人员越来越多的关注。

《中国自动化学会通讯》2014年第一期专刊的主题是多智能体系统。本期专刊在《通讯》副主编、澳门大学陈俊龙教授的组织下,共录用了7篇优秀文章,在此深表谢意,并向为本刊贡献稿件的各位专家学者表示衷心感谢。

澳门大学的陈俊龙教授等多智能体系统的一致性控制问题及其应用进行了全面的分析和总结,讨论了一致控制研究目前的困难和未来的发展。陈教授等接着综述了基于滑模变结构控制理论的多智能体系统的协同控制研究。北京大学的王龙教授等总结了多智能体系统事件驱动控制的研究成果,指出了事件驱动控制在多智能体系统协同领域的研究前景。中国科学院自动化研究所的程龙研究员等介绍了噪声环境中多智能体系统一致性研究的重要意义、发展历史、研究现状和未来的研究方向。重庆邮电大学的朱伟教授等介绍了基于事件驱动的多智能体系统一致性理论的研究进展。辽宁工业大学的刘艳军教授等针对一类带有建模不确定性和外部干扰的非线性多智能体系统提出了一种新的鲁棒自适应一致跟踪控制方法。广东工业大学的刘治教授等针对一类具有死区输入的严格状态反馈非线性多智能体系统提出了一种分散自适应神经网络控制方法。

与传统的基于单个控制对象的控制问题不同,多智能体系统涉及到多个智能体之间的相互协调和合作,分布式特点是控制协议只能是基于邻居之间局部信息的分布式控制。一个可以预见的趋势是,基于单个控制对象的线性控制、非线性控制、模型预测控制、鲁棒控制、智能控制等理论将不断地扩展到基于图的多智能体系统。

刘德荣 陈俊龙

专题

- 4 关于多智能体系统的一致控制问题的研究综述
- 10 基于滑模变结构控制的多智能体系统的协同控制研究综述
- 18 多智能体系统事件驱动控制
- 24 具有噪声约束的多个体系统一致性问题简述
- 29 基于事件驱动的多智能体系统一致性理论研究进展
- 34 一类非线性多智能体系统的自适应神经网络一致跟踪控制
- 44 具有死区输入的非线性多智能体系统的分散自适应控制

译文

- 54 分布式多智能体在协同控制研究中的近期进展概述

中国自动化学会第十届理事会专题

- 71 中国自动化学会第十届理事会理事长简介
- 75 中国自动化学会第十届理事会常务理事简介

本刊声明

为支持学术争鸣,本刊会登载学术观点彼此相左的不同文章。来稿是否采用并不反映本刊在学术分歧或争论中的立场。每篇文章只反映作者自身的观点,与本刊无涉。

录

Chinese Association of Automation

新 闻

- 81 中国自动化学会十届二次秘书长工作会议
在京召开
- 81 中国自动化学会十届二次理事长工作会议在京
召开

会 员 园 地

- 82 ABB入选《财富》2014“全球最受赞赏公司”
- 82 第一届台达杯两岸高校自动化设计大赛启动

党 建 强 会

- 83 中国自动化学会党支部召开民主生活会
- 84 习近平在省部级主要领导干部学习贯彻十八届
三中全会精神全面深化改革专题研讨班开班式
上发表重要讲话



刊名题字：宋 健

编辑：中国自动化学会办公室

地址：北京市海淀区中关村东路95号 邮编：100190

电话：(010)8254 4542 E-mail:caa@ia.ac.cn

传真：(010)6252 2248 http://www.caa.org.cn

中国自动化学会通讯

Communications of CAA

编辑委员会

荣誉主编

戴汝为 中国科学院院士、中国科学院自动化研究所研究员
孙优贤 中国工程院院士、浙江大学教授
郑南宁 CAA理事长、中国工程院院士、西安交通大学教授

主 编

刘德荣 CAA常务理事、中国科学院自动化研究所研究员、
复杂系统管理与控制国家重点实验室副主任

副主编

陈俊龙 CAA常务理事、澳门大学教授
张化光 CAA理事、控制理论专业委员会委员、东北大学教授

专题栏目

主 编

周东华 CAA副理事长、清华大学教授

编 委

蒋昌俊 CAA常务理事、同济大学教授
戴国忠 计算机图形学与人机交互专业委员会主任委员、
中国科学院软件研究所研究员
张丽清 CAA常务理事、生物控制论与生物医学工程专业委员
会主任委员、上海交通大学教授

观点栏目

主 编

孙彦广 CAA常务理事、副秘书长、冶金自动化研究设计
院教授级高工

编 委

范 铠 CAA理事、仪表与装置专业委员会主任委员、上
海工业自动化仪表研究院教授级高工
陈宗海 CAA理事、系统仿真专业委员会主任委员、中国
科技大学教授
张文生 CAA理事、计算机图形学与人机交互专业委员
会秘书长、中国科学院自动化研究所研究员

新闻栏目

主 编

陈 杰 CAA副理事长、北京理工大学教授

编 委

熊范纶 CAA理事、农业知识工程专业委员会主任委员、
中国科学院合肥物质科学研究院研究员
李艳华 CAA理事、遥测遥控专业委员会主任委员、
中国航天科技集团公司第704研究所研究员
郝 宏 系统复杂性专业委员会秘书长、中国科学院自
动化研究所高级工程师

译文栏目

主 编

刘 民 CAA理事、名词委员会主任委员、清华大学教授

编 委

王庆林 北京理工大学教授

会员栏目

主 编

张 楠 CAA常务理事、常务副秘书长、办公室主任

编 委

孙长银 CAA常务理事、副秘书长
王兆魁 CAA理事、平行控制与管理专业委员会秘书长、
清华大学副教授

关于多智能体系统的一致控制问题的研究综述

文国兴，陈俊龙

澳门大学

摘要：本文对多智能体系统（Multi-Agent systems，简写MAS）的一致性控制问题的发展现状进行了概括，以两种控制策略，有leader一致控制和无leader一致控制为主线，对部分现有的一致性控制协议、算法及他们的实现条件做了介绍和总结。对一致控制在编队、蜂拥、聚集等问题中的作用进行分析和阐述。最后讨论了一致控制研究目前的困难和未来的发展。

1 引言

20世纪80年代后期，MAS成为分布式人工智能研究中的主要研究对象。在20世纪90年代，随着计算机技术、网络技术、通信技术的飞速发展，Agent及MAS的相关研究成为控制领域的一个新兴的研究方向。MAS的每一个Agent是一个物理或抽象的实体，它是由多个可计算的智能体组成的集合体，并能通过感应器感知周围的环境，效应器作用于自身，并能与其他Agent进行通讯的实体。在MAS的研究中，主要目的是：希望实现所有Agent之间的协同合作来取代高昂的依靠单独的系统（卫星、机器人、无人驾驶飞行器、自治水下潜艇等）来完成的复杂任务。在一致控制中，Agent之间的信息共享是通过无线网络或者在初始时刻预输入实现的，这些共享信息包括相同的控制算法，共同的目标，和相对的状态信息。

由于MAS是人类的社会智能的一个体现，而且它拥有很强的自适应能力，所以，吸引了越来越多的研究人员从事到这个课题的理论及应用方面的研究。MAS的一致控制具有广阔的应用前

景，比如卫星编队控制，无人机协调控制，分布式传感器网络，生物群集运动，受到了生物，电力，航空等多个领域研究人员的极大关注^[1-11]。目前，MAS的相关技术已经应用到交通控制、电子商务、多机器人系统、军事等诸多领域。MAS的实际应用中，所谓的一致问题就是每个Agent经常要在某些量（位置，速度等）上与其余Agent趋于相同。由此可见，一致性问题主要是研究如何基于MAS中个体之间有限的信息交换，来设计算法，使得所有Agent的某一个状态量或是所有状态量趋于相等。一致问题是MAS协调控制中需要解决的重要问题之一。在实际上，MAS的一致问题主要模拟自然界群体一致性，它些生物群体在迁徙，觅食等活动中，它们的活动会有一定的规则，比如说大雁在迁徙时会列成“人”字型飞行（图1），它们往往会以一致的速度飞行；又如海洋中的鱼群，它们经常以一致的角速度结群活动（图2）。

在MAS协调控制研究中，模型分类的标准有很多，比如，按Agent的力学特性，可以分为线性模型和非线性模型；按Agent数学模型的微分阶数，可分为一阶模型、二阶模型和高阶模型。



图1 大雁南飞图



图2 海洋鱼群

在MAS的一致控制中,按学习的方法,即:是否是监督学习,一致控制可分为两种控制策略:一类是无leader一致控制,一类是有leader一致控制(leader-following一致控制)。对于前者,研究的重点是如何设计控制协议使得所有Agent达到一致,现已有很多研究者对此进行了研究,比如文献[1-6];对于后者,研究的重点是如何设计控制协议使跟踪Agent能够快速取得与目标Agent相同的状态,比如文献[7-10]。本文针对这两种控制策略进行分析。

2 图论知识基础

图论是一致性问题研究分析中非常重要的工具,通常采用图来表示多智能体相互间传递信息的关系。考虑由 n 个多智能体组成的系统,其网络拓扑图为 $G = (V, \mathcal{E}, A)$ 。其中: $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示网络拓扑图的节点集;

$\mathcal{E} \subseteq V \times V$ 表示网络拓扑图的边集; $A = [a_{ij}]$ 表示网络拓扑图的邻接矩阵。节点 v_i 表示第 i 个智能体,节点的索引属于有限集 $I = \{1, 2, \dots, n\}$ 。

$e_{ij} = (v_i, v_j)$ 表示拓扑图 G 的一条边, $e_{ij} = (v_j, v_i) \in \mathcal{E}$ 当且仅当有第 i 个智能体收到信息从第 j 个智能体。邻接矩阵 $A = [a_{ij}]$ 的元素是非负的,用于表示智能体之间的通信质量,我们规定 $a_{ii} = 0, i = 1, \dots, n$ 。

拓扑图 G 的Laplacian矩阵定义为 $L = [l_{ij}]$,其中,
$$l_{ii} = \sum_{j=1}^n a_{ij}, \quad l_{ij} = -a_{ij}, i \neq j。$$

3 MAS一致性控制

一致问题是MAS研究中的一个非常重要的问题。一致控制问题是说,在MAS的群集行为的研究中,在不考虑智能体之间的碰撞前提下,对位置聚合与速度匹配控制问题进行研究,它的最终目的是驱使所有的智能体最终抵达一致。在一致控制中,一个关键的问题—控制协议(算法)的设计。一致性协议是Agent之间相互作用的局部规则,是使个体状态最终趋于一致的Agent之间信息传递规则,它描述了每个Agent与它相邻Agent间的信息交换过程。近年来,国内外专家、学者在MAS一致问题的研究中取得丰硕的成果,通过用矩阵方法、Lyapunov方法,等进行一致性协议的收敛分析,使用图论来进行平衡状态分析^[11-12],对MAS的不同情况,提出不同的一致算法。现将已有的一致控制算法,简单总结。在本文中,我们假设系统中有 n 个智能体,用 $x_i(t)$, $v_i(t)$ 表示第 i 个智能体的状态信息,它们分别表示该智能体的位置、速度信息。

3.1 leaderless一致控制

在早期关于一致性问题的研究中,绝大多数研究工作集中一阶MAS,分析不同网络拓扑结构下实现一致性需要满足的条件和一致性实现时的收敛值。在一阶MAS中,所谓leaderless一致是指:在一个MAS中,设计一致控制协议,使得对

于任意的 $i \neq j$, 有 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_j(t)\| = 0$ 。连续的一阶线性一致性控制协议通常是如下形式^[14-19]:

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j \in J_i(t)} a_{ij}(x_i(t) - x_j(t)) \quad (1)$$

其中: $J_i(t)$ 表示在 t 时刻第 i 个Agent的邻居集, a_{ij} 是邻接矩阵 A 的第 i 行, 第 j 列元素。不难看出, 该协议只需通过Agent的邻域信息传递就可达到整个系统趋于一致。特别地, 如果每个Agent的邻居集及 a_{ij} 从初始时刻一直保持不变, 那么这个MAS就具有固定拓扑。该协议也可用矩阵的方式表示:

$$\dot{X}(t) = LX(t) \quad (2)$$

其中: L 为MAS网络图的拉普拉斯矩阵, $X(t) = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 。

一阶离散线性一致协议, 一般设计为^[20-21]。

$$x_i[k+1] = - \sum_{j \in J_i(t)} \beta_{ij}[k] x_i[k] \quad (3)$$

其中: $\sum_{j \in J_i(t)} \beta_{ij}[k] = 1$, $\beta_{ij}[k] > 0$ 。不难看出, 每个Agent的下一步状态是基于他根据它及与其邻居Agent的当前状态更新的。这个离散一致协议写成矩阵形式:

$$X[k+1] = -D[k]X[k] \quad (4)$$

其中: $D[k]$ 为所有行和为1的随机矩阵。

若系统拓扑结构为无向图, 则系统逐渐收敛到所有智能体初始值的平均值, 即 $m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(0)$ 。这种协议称为平均一致性协议, 在传感器网络信息融合等领域有广泛的应用。对于拓扑结构是强连通的有向图的MAS, Olfati-Saber等在文献[17, 22]中指出, 系统平均一致收敛的充分必要条件是信息交换图是平衡图。在时不变信息交换拓扑情况下, Ren等人在文献[19]中给出, MAS在连续或者离散时间情况下, 实现一致行为的充分必要条件是信息交换图含有生成树。这个条件比文献[17, 22]中提出的强连通条件更宽松, 有更广的适用范围。

但是在实际应用中, 变化的网络拓扑是更普遍的, 如蜂拥问题、编队控制问题, 这种动态拓扑结构通常称作切换拓扑结构。在文献[22], MAS

在切换拓扑结构下, 给出如下的一致性协议:

$$\dot{X}(t) = -L_k X(t), k = s(t) \quad (5)$$

其中: $L_k = L(G_k)$ 是图集 Γ 中权重图 G_k 的Laplacian矩阵, $s(t)$ 为定义切换拓扑结构的切换信号。在MAS中, 当Agent之间的信息交换存在时间延迟时, 一致控制协议能被设计在如下形式^[22]:

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j \in J_i(t)} a_{ij}(x_i(t - \sigma_{ij}) - x_j(t - \sigma_{ij})) \quad (6)$$

其中: σ_{ij} 表示第 i 个Agent与第 j 个Agent信息交换时的时间延迟。当 $\sigma_{ij} = \sigma$ 且信息交换拓扑结构是固定无向的连接图, 平均一致收敛的充要条件是 $0 \leq \sigma \leq \pi/2\lambda_{\max}(L)$ 。在文献[23]中, 作者还进一步讨论了时变时滞拓扑结构下MAS的平均一致性收敛条件。

然而, 大多数实际的物理系统需要建模在非线性的形式, 因此非线性多智能体的研究更有实际意义。在文献[24], 基于神经网络杰出的函数逼近能力, 根据Lyapunov稳定性理论, Chen等提出了一种非线性一致控制协议, 这个控制协议也同时解决了非线性MAS的状态时滞问题:

$$u_i(t) = -k_i(t)e_i - \hat{W}_i^T S_i(x_i) - \frac{1}{2}e_i^{-1}\rho_i^2(x_i) \quad (7)$$

其中: $\hat{W}_i^T S_i(x_i)$ 是用神经网络逼近未知的系统函数 $f_i(x_i(t))$, $\rho_i(x_i)$ 是Lyapunov-Krasovskii函数, 用于补偿状态延迟, $e_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}(x_i(t) - x_j(t))$ 。这个协议能在人工智能机器人等领域被广泛应用。

一阶积分一致性协议式也可以推广到二阶积分动态系统。Agent的二阶动态模型为:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = v_i(t) \\ \dot{v}_i(t) = u_i(t) \end{cases} \quad (8)$$

其中: $x_i(t)$, $v_i(t)$ 分别是位置和速度状态, $u_i(t)$ 是控制输入。与一阶控制协议不同, 二阶一致协议需要实现位置、速度二个状态信息的一致控制。在一个MAS中, 我们说二阶一致控制被实现, 如果对于任意的 $i \neq j$, 有 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_j(t)\| = 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} \|v_i(t) - v_j(t)\| = 0$ 。根据文献[25-26], 线性二

阶线性一致协议为:

$$\ddot{x}_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij}(x_i(t) - x_j(t)) + b_i(v_i(t) - v_j(t)) \quad (9)$$

式中: b_i 为一个正的增益。

近来, n 阶MAS的一致控制问题引起了许多研究人员兴趣, 并以线性矩阵不等式形式给出系统一致性需要满足的条件, 在一定假设下分析给出线性矩阵不等式的可解性, 并通过实例验证了算法的有效性。

3.2 leader-following 一致控制

在自然界, leader-following一致控制能被发现现在一些群居动物, 如: 鱼群运动, 雁群迁徙。leader-following一致控制意味着存在一个特殊的Agent作为一个leader, 其它所有Agent将渐近地同步追踪到leader的状态。对于一阶MAS, leader-following一致是指: 对每一个Agent, 存在一个局部的状态反馈控制器, 使得 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_l(t)\| = 0$ 在任初始条件下成立。

连续的一阶线性一致性控制协议通常是如下形式^[27-28]:

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij}(x_i(t) - x_j(t)) + b_i(x_i(t) - x_l(t)) \quad (10)$$

其中: $x_l(t)$ 表示leader的状态, b_i 是leader和第 i 个Agent之间的通信权重。也可以用矩阵的方式表示:

$$\dot{X}(t) = (L + B)X(t) \quad (11)$$

其中: $B = \text{diag}\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ 。

对于二阶MAS, leader-following一致是指: 设计一个控制协议, 对每一个agent有, $\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_l(t)\| = 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} \|v_i(t) - v_l(t)\| = 0$ 。连续的二阶线性一致性控制协议通常是如下形式^[29]:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n a_{ij}(x_i(t) - x_j(t)) + \sum_{i=1}^n a_{ij}(v_i(t) - v_j(t)) \\ + b_i((x_i(t) - x_l(t)) + (v_i(t) - v_l(t))) \end{aligned} \quad (12)$$

其中: $x_l(t)$, $v_l(t)$ 分别表示leader的位置状态和速度状态。

4 一致控制的应用领域

4.1 编队控制

一致控制策略的典型应用领域之一是多平台编队控制, 通过设计基于邻居信息的分布式一致控制协议, 无人机等构成的MAS能高度保持编队稳定等性能。以多个机器人的协调编队控制为例, 所谓的编队控制是指多个机器人在运动过程中, 既要保持某种队形, 同时又要适应环境约束的技术。近些年, 编队控制已经成为国内外热门的研究课题, 它也是其它协调合作问题的研究基础。由于编队中每个机器人是自主移动的, 所以碰撞就变成主要的冲突, 换言之, 多个机器人不能在同一时刻处于同一位置。协作是指机器人通过按照一个机制相互配合共同完成一项任务, 就编队问题而言, 保持队形就是一种自主移动机器人的合作, 在不同时刻不同机器人的位置要有按照相应的数学关系。从实际应用的角度来看, 机器人的编队控制具有很高的研究意义, 比如, 在空间结构特定队形的实现可以充分保证有效完成任务, 减少完成任务时间, 从而降低运行成本, 改善系统工作效率; 它也能充分收集当前的环境信息, 提高在对抗环境中抵御外界进攻的能力, 同时也能够改善鲁棒性等等。编队控制在娱乐、生产、军事等诸多领域都有应用, 尤其是在军事领域, 例如无人机的编队飞行、航天器、自主水下航行器的编队航行。因此, 实现一个合理、有效的编队控制方法将具有重要的理论及现实意义。

4.2 蜂拥问题

蜂拥的英文名称是Flocking。蜂拥现象在自然界非常普遍, 比如: 鸟群、鱼群、细菌群落、

蚁群和蜂群等等。在群体生物中，蜂拥行为能帮助生物躲避天敌、大大增加猎取到食物的可能性等等。从系统观点看，蜂拥行为还具有适应性、鲁棒性、分散性和自组织性。对于蜂拥行为，一个重要特点是它从无序的局部规则演变成有序的全局行为。近十几年来，来自物理、生物、计算机、社会学和控制等众多领域的学者加入到蜂拥问题的研究，他们努力地从事相应领域的视角去探寻蜂拥行为的根源。对蜂拥控制的运用的研究有着极其重要现实意义，如无人驾驶飞机编队和水下机器人地形探测等等。在MAS体蜂拥（Flocking）算法应用中，一致算法主要用于实现多智能体间的速度匹配，如：为避免相互碰撞，Agent间相同速度运动，以保持一定的距离。

4.3 聚集问题

聚集问题，简单地说就是一群移动的Agent最后能够在某一点聚集。聚集问题的起源于对机器人应用的不断扩展，如：多个机器人合作完成一项任务，到达同一片未知的地方进行搜救工作，或者无人驾驶飞机群要达到一个共同地点等。聚集属于一致问题，是一种特殊的一致行；聚集表示位置一致，属于无约束一致性问题，是为了设计一种局部控制策略，使得所有的Agent最终聚集在同一个点。在Agent移动过程中，网络拓扑结构由于取决于Agent每刻的状态，也为切换拓扑结构。

5 MAS一致控制的研究展望

随着计算机科学以及网络技术的发展，多Agent的应用已经扩展到更广阔的领域。目前，一致控制的研究已经取得丰硕成果，同时也存在一些不足，有待进一步研究。

1) 对MAS进行一致控制时，Agent之间的信息交换过程中，不可避免地存在时间延迟现象。至今，大部分关于时滞的MAS一致控制文献，是

在无向网络（有向网络的特殊情况）拓扑结构下考虑的。因此，在有向拓扑结构下，研究关于时滞一致性问题（尤其是时变时滞）是非常有意义的。另外，Agent之间的信息传递可能会出现错误，对出现信息传递错误的MAS协同控制问题的研究也具有深刻的实际意义。

2) 在实际应用中，MAS中每个Agent都要发送和接收信息，但信息传输过程中不可避免的存在干扰。目前，关于在有随机噪声的通信环境下研究MAS一致性问题文章还比较少，因此，MAS在随机干扰情况下的一致性算法及其稳定性是一个非常具有挑战性和有价值的研究。另外，基于以上分析，Agent之间碰撞问题应该进一步考虑，从而，对存在随机干扰的通信环境下MAS的群集运动做一些深刻的研究。

3) 近年来，预测控制作为一种新型控制方法，这种控制策略集成优化控制的思想。在实际上，它是将一成不变的全局优化变成滚动的有限时段优化，这种反复优化过程是以在实际反馈信息为基础的，因此鲁棒性被增强。在文献[30]，Zhang等已经研究了预测机制下MAS的协同控制的一些问题，但此类问题的研究仍还处于初步阶段；所以，对于预测机制下MAS群集行为及协同控制一致性问题的研究具有极大的理论及现实意义。

6 结束语

MAS一致控制已经成为当前控制领域一个新的研究热点，吸引了众多不同领域研究人员的极大关注。本文讨论了与MAS一致控制及相关问题，简要介绍了MAS一致控制方面的研究状况与应用，展望了几个有待进一步研究的方向。虽然MAS及其一致控制相关问题的研究会存在很多问题和困难，但有着广阔的研究和应用前景，相信在未来几十年里，定能取得长足的进展和重大突破。

参考文献

- [1] Fax J A, Murray R M. Information flow and cooperative control of vehicle formations[J]. Automatic Control, IEEE Transactions on, 2004, 49(9): 1465-1476.
- [2] Lafferriere G, Williams A, Caughman J, et al. Decentralized control of vehicle formations[J]. Systems & control letters, 2005, 54(9): 899-910.
- [3] Olfati-Saber R, Murray R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. Automatic Control, IEEE Transactions on, 2004, 49(9): 1520-1533.
- [4] Lin P, Jia Y. Average consensus in networks of multi-agents with both switching topology and coupling time-delay[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2008, 387(1): 303-313.
- [5] Olfati-Saber R. Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory[J]. Automatic Control, IEEE Transactions on, 2006, 51(3): 401-420.
- [6] Lin P, Jia Y, Li L. Distributed robust H^∞ consensus control in directed networks of agents with time-delay[J]. Systems & Control Letters, 2008, 57(8): 643-653.
- [7] Ren W, Beard R W. Consensus algorithms for double-integrator dynamics[J]. Distributed Consensus in Multi-vehicle Cooperative Control: Theory and Applications, 2008: 77-104.
- [8] Peng K, Yang Y. Leader-following consensus problem with a varying-velocity leader and time-varying delays[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2009, 388(2): 193-208.
- [9] Hong Y, Hu J, Gao L. Tracking control for multi-agent consensus with an active leader and variable topology[J]. Automatica, 2006, 42(7): 1177-1182.
- [10] Hu J, Hong Y. Leader-following coordination of multi-agent systems with coupling time delays[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2007, 374(2): 853-863.
- [11] Jadbabaie A, Lin J, Morse A S. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules[J]. Automatic Control, IEEE Transactions on, 2003, 48(6): 988-1001.
- [12] Spanos D P, Olfati-Saber R, Murray R M. Dynamic consensus on mobile networks[C]//IFAC world congress. Czech Republic: Prague, 2005.
- [13] Tian Y P, Liu C L. Consensus of multi-agent systems with diverse input and communication delays[J]. Automatic Control, IEEE Transactions on, 2008, 53(9): 2122-2128.
- [14] Jadbabaie A, Lin J, Morse A S. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules[J]. Automatic Control, IEEE Transactions on, 2003, 48(6): 988-1001.
- [15] Olfati-Saber R, Murray R M. Agreement problems in networks with directed graphs and switching topology[C]//Decision and Control, 2003. Proceedings. 42nd IEEE Conference on. IEEE, 2003, 4: 4126-4132.
- [16] Olfati-Saber R, Murray R M. Consensus protocols for networks of dynamic agents[C]//Proceedings of the 2003 American Controls Conference. 2003.
- [17] Olfati-Saber R, Murray R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. Automatic Control, IEEE Transactions on, 2004, 49(9): 1520-1533.
- [18] Moreau L. Stability of continuous-time distributed consensus algorithms[C]//Decision and Control, 2004. CDC. 43rd IEEE Conference on. IEEE, 2004, 4: 3998-4003.
- [19] Ren W, Beard R W, McLain T W. Coordination variables and consensus building in multiple vehicle systems[M]//Cooperative Control. Springer Berlin Heidelberg, 2005: 171-188.
- [20] Lin P, Jia Y. Consensus of second-order discrete-time multi-agent systems with nonuniform time-delays and dynamically changing topologies[J]. Automatica, 2009, 45(9): 2154-2158.
- [21] Moreau L. Stability of multiagent systems with time-dependent communication links[J]. Automatic Control, IEEE Transactions on, 2005, 50(2): 169-182.
- [22] Olfati-Saber R, Murray R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. Automatic Control, IEEE Transactions on, 2004, 49(9): 1520-1533.
- [23] Bliman P A, Ferrari-Trecate G. Average consensus problems in networks of agents with delayed communications[J]. Automatica, 2008, 44(8): 1985-1995.
- [24] C. L. Philip Chen, G. X. Wen, Y. J. Liu, and F. Y. Wang. Adaptive consensus control for a class of nonlinear multi-agent time-delay systems using neural networks. IEEE Transaction On Neural Networks and Learning Systems, 25(6):1217-1226, June 2014.
- [25] Ren W, Atkins E. Second-order consensus protocols in multiple vehicle systems with local interactions[C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. 2005: 1-13.
- [26] Ren W, Beard R W. Consensus algorithms for double-integrator dynamics[J]. Distributed Consensus in Multi-vehicle Cooperative Control: Theory and Applications, 2008: 77-104.
- [27] Ni W, Cheng D. Leader-following consensus of multi-agent systems under fixed and switching topologies[J]. Systems & Control Letters, 2010, 59(3): 209-217.
- [28] Hu J, Feng G. Distributed tracking control of leader-follower multi-agent systems under noisy measurement[J]. Automatica, 2010, 46(8): 1382-1387.
- [28] W. L. Guo, J. H. Lu, S. H. Chen and X. H. Yu, "Second-Order Tracking Control for Leader-follower Multi-Agent Flocking in Directed Graphs With Switching Topology", systems & control letters, vol.60, no.12, pp.1051-1058, Dec. 2011
- [30] Zhang H T, Chen M Z, Stan G B, et al. Collective behavior coordination with predictive mechanisms[J]. Circuits and Systems Magazine, IEEE, 2008, 8(3): 67-85.

作者简介

文国兴 澳门大学科技学院博士生。2011年取得理学硕士学位，毕业于辽宁工业大学数理学院。研究兴趣包括离散非线性系统的自适应控制，非线性多智能体的一致控制、编队控制。

陈俊龙 澳门大学讲座教授及科技学院院长。主要研究方向包括智慧系统理论、物理建模、诊断与预测、网路与通信。

基于滑模变结构控制的多智能体系统的协同控制研究综述

任长娥，陈俊龙

澳门大学

摘要：多智能体系统的协同控制研究已成为现在的研究热点，由于滑模变结构控制对系统的不确定性和外界扰动的鲁棒性，使得滑模变结构控制在多智能体系统的分布协同控制研究中得到广泛的应用。对近年来结合了滑模变结构控制理论的多智能体系统的协同控制的研究成果进行了简单的综述，并根据多智能体系统的控制性能指标加以分类，对每一类多智能体系统的控制器及其滑模面的优缺点进行了评述。

关键字：多智能体系统，编队控制，协同控制，一致控制，滑模变结构控制，有限时间，综述

1 引言

智能体或自主体的概念是由人工智能创始人之一M.Minsky提出的。在1995年，Wooldridge和Jennings 对智能体进行了严格的定义。他们指出智能体必须具有以下三个性质^[1]：

(1) 反应性：智能体对周围环境有感知能力，并且会做出一定的反应。

(2) 前摄性：智能体会根据目标任务主动引导自身的行为。

(3) 社会性：不同的智能体个体之间可以根据一定的信息通信法则进行信息交流，从而使不同智能体之间可以进行协调和合作。

具有以上性质的多个智能体就组成了多智能体系统（Multi-agent systems/MAS）。智能体之间的信息通信规则可以由拓扑图及其相应的拉普拉斯矩阵来表征。通过智能体之间的相互通信，所有智能体在相应的分布式协议下可以共同完成单

个智能体无法完成的高难度，复杂性的任务。所谓的分布式协议是指单个智能体只根据自身信息及其邻居信息（即局部信息 local informations）调节自身的行为已达到全局控制目标。当单个智能体只能和一小部分智能体进行通信时，在分布式协议的作用下，MAS仍然能完成全局性的控制目标，这降低了对智能体之间的通信要求，使MAS具有易实现，灵活性强，实时性强，成本低等优点，是MAS控制实现的基础。分布式协议亦是MAS的优势所在，随着通讯技术，计算机网络技术的发展，MAS在应用领域产生了深远的影响。比如，军事飞机的编队控制，将每个飞机视为一个智能体，具有相互信息交流的飞机群体就构成了一个MAS，如何实现飞机群体形成所期望的队形的关键就在于如何设计分布式协议。此类控制同样运用于多智能体小车，群集智能机器人，卫星编队侦查，分布式传感器网络等领域中。

MAS的分布式协同控制包括一致控制，编



图1 飞行器的编队飞行

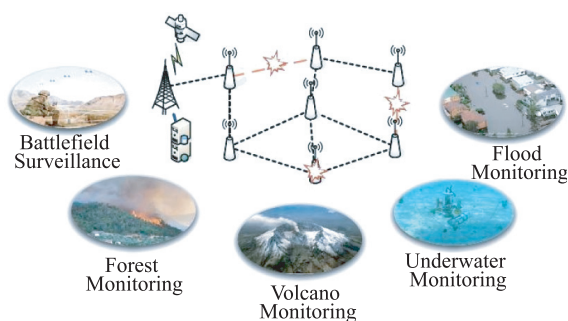


图2 分布式传感器网络

队控制以及群集，蜂拥等。要完成对系统的协同控制，首先要对系统进行建模。在建模时，由于系统本身的不确定性（如，参数的不确定性）和为了得到相对简单的系统模型人为的简化系统动态，从而造成了建模的不精确性。除了系统本身的不确定性外，系统的负载变化，运作环境的变化，外部扰动等不确定性因素都是在设计高品质的分布控制器时必须考虑到的。因此不确定性MAS的鲁棒性问题的研究具有十分重要的实际意义。

滑模变结构控制是一类十分典型的鲁棒控制策略。“滑模”即“滑动模态”表明系统具有一种特殊的模态；“变结构”控制器结构的变化，这种变化可以启动“滑动模态”运动。它的控制实现首先是人为设定一经过平衡点的滑模面，通过设计合适的切换控制律使系统状态从初始时刻开始趋近于并到达该滑模面，然后系统状态在滑模面上滑动并到达平衡位置。所以滑模变结构控制

中状态运动过程可以被概括为两个过程：（1）趋近过程；（2）滑动过程。由于滑模面可以人为设定且与系统的参数及外界扰动无关，这就使得滑模控制具有快速响应、对应参数变化及扰动不灵敏、无需系统在线辨识、物理实现简单等优点。

滑模变结构控制自然地引入到MAS中，并且它可以分别与模糊逻辑系统，神经网络，自适应控制，反演控制相结合用于不同的MAS中，以获得不同的控制性能指标。

2 MAS协同控制的图论背景^[2]

MAS协同控制的实现是以智能体之间的信息交流为前提的。有向图或者无向图来便被用来描述智能体之间的信息交流^[2]。整理了几乎所有的MAS控制中用到的图论的知识。为了便于下文描述，先简单介绍在协同控制中用到的、基本的、图论的概念。考虑由 n 个智能体 $1, 2, \dots, n$ 组成的智能体集合 v ，有向图 $G \triangleq (\varepsilon, v, A)$ 是一个三元数组。 $\varepsilon \in v \times v$ 是边的集合，集合的元素 $(i, j) \in \varepsilon$ 是一个有序数对，此时 (i, j) 被称为边，表示智能体 i 可以收到智能体 j 的信息，但是反向的信息传递不一定存在。对于边 $(i, j) \in \varepsilon$ ，根据信息的传递方向定义智能体 j 为父节点，智能体 i 为子节点，同时称智能体 j 是智能体 i 的邻居。在MAS协同控制中，总是假设边 (i, j) 是不存在的。 A 是邻接矩阵，矩阵元素 a_{ij} 是非负值即 $a_{ij} \geq 0$ 。当且仅当 $(i, j) \in \varepsilon$ 时， $a_{ij} > 0$ ；当 $(i, j) \notin \varepsilon$ 时， $a_{ij} = 0$ 。 L 为相应的拉普拉斯矩阵： $L = D - A$ ，其中 $D = \text{diag}(d_1, \dots, d_n)$ ， $d_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}$ 。与有向图不同，无向图中边 (i, j) 是无序的数对，也就是说，智能体 i 可以收到智能体 j 的信息当且仅当智能体 j 可以收到智能体 i 的信息。无向图可以看作是特殊的有向图。

有向路径是指有向图中这样一系列的边 $(i_1, i_1), (i_1, i_2), \dots, (i_l, j), \dots$ 所组成的一个

序列。相似地，无向路径是在无向图中由一系列边 $(i, i_1), (i_1, i_2), \dots, (i_l, j), \dots$ 构成。在有向图中，如果任意两个不同智能体之间都存在一条有向路径，则这个有向图被称为强连通图。在无向图中，如果任意两个不同智能体之间都存在一条无向路径，则这个无向图被称为连通图。如果有向图中，除了一个智能体（称为根节点或者根）之外，其余所有智能体都恰有一个父节点，称这样的有向图含有有向生成树。

3 滑模变结构控制背景知识

3.1 滑模可达条件

在滑模变结构控制中，可以根据所期望系统达到的状态来选择滑模面，如果用 $s(x)$ 来表示滑模，那么一个合适的切换控制律可以迫使状态逐渐趋向于滑模面 $s(x) = 0$ ，一旦达到滑模面状态 x 会一直保持在滑模面上。在滑模选定之后，如何选择合适的一个切换控制律？到达条件最终决定切换控制律^[3]。

滑模必须满足一下两个条件：

- (1) 可微；
- (2) 经过原点，即 $s(0) = 0$ 。

3.1.1 不等式形式的到达条件

滑模的不等式形式的可达条件有两种表现形式：

- (1) 一般形式的不等式条件：当 $s(x) < 0$ 时， $\dot{s}(x) > 0$ ；当 $s(x) > 0$ 时， $\dot{s}(x) < 0$ 或等价表示为 $s(x)\dot{s}(x) < 0$

- (2) 李亚普诺夫函数型不等式条件：

$$v(x) = \frac{1}{2}s^2, \dot{v}(x) < 0$$

在上面的条件下，随着时间 $t \rightarrow \infty$ ，状态 x 只能渐近趋向于滑模面 $s(x) = 0$ ，也就是说此充分条件无法保证状态 x 在有限时间内到达滑模面。根据

李亚普诺夫有限时间定理，我们提出有限时间可达条件：

$$v(x) = \frac{1}{2}s^2, \dot{v}(x) \leq -cv(x)^\alpha$$

其中 c, α 为正常数， $\alpha \in (0, 1)$ 。到达时间 T 的上界： $T \leq \frac{1}{c(1-\alpha)}v(s(x(0)))$ 。在这个条件下，状态 x 可在有限时间 T 内到达滑模面。

3.1.2 等式形式的到达条件

- (1) 等速趋近律： $\dot{s}(x) = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s)$ ；
- (2) 指数趋近律： $\dot{s}(x) = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks$ ；
- (3) 幂次趋近律： $\dot{s}(x) = -k|s|^\alpha \operatorname{sgn}(s)$ ；
- (4) 一般趋近律： $\dot{s}(x) = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - f(s)$ ， $f(0) = 0$ ；当 $s \neq 0$ 时， $sf(s) > 0$ ；

以上趋近律中涉及到的参数均为正常数，且有 $0 < \alpha < 1$ 。这四个趋近律在保证状态 x 在可以到达滑模面的同时，还刻画出趋近过程的运动品质，比如在等速趋近律中， ε 表示趋近速度，数值越大趋近速度也越快，但是当 ε 取值较大时，将引起较大的抖动。

3.2 各种滑模形式^[17]

随着滑模变结构理论的不断发展和滑模变结构控制方法中不断的柔和进其他方法，逐渐形成了各种具有特色的滑模变结构控制方法，比如终端滑模变结构控制，积分滑模变结构控制，全局滑模变结构控制，模糊滑模变结构控制，神经网络滑模变结构控制，动态滑模变结构控制等^[18]。本小节只简单介绍运用到MAS协同控制中的滑模变结构控制。

3.2.1 线性滑模

线性滑模是以系统状态及其导数为变量的线性函数一般形如： $s = \dot{x} + cx, c > 0$ 。通过李亚普诺夫稳定性定理， $s = \dot{x} + cx = 0$ 是渐近稳定的，也就是说在滑模面上系统状态是渐近收敛到原点的，

并且收敛速度是增益参数 c 来决定的, 增益参数取值越大收敛速度越快, 但是遗憾的是增益参数值的增大会加剧系统的抖动。

3.2.2 非线性滑模

3.2.2.1 终端滑模 (Terminal Sliding Mode 简记: TSM)

一般的线性滑模控制中, 为了提高状态 x 渐进收敛到原点的速度必须扩大增益参数 c , 并且在滑模面上状态只能渐近趋于原点但永远也到达不了原点。为了解决这个问题, 就出现了终端滑模, 终端滑模可被表示为一阶非线性动态: $s = \dot{x} + \beta x^{q/p}$, $p > q > 0, \beta > 0$ 的形式。终端滑模控制保持了对系统不确定性及外界扰动的鲁棒性的同时, 状态在终端滑模面可以在有限时间内收敛到原点, 但终端滑模控制中仍存在抖动现象。

3.2.2.2 快速终端滑模 (Fast Terminal Sliding Mode 简记: FTSM)

快速终端滑模: $s = \dot{x} + \alpha x + \beta x^{q/p}$ 。在形式上, 快速终端滑模比一般的终端滑模多了状态的线性项 αx , 时间上, 快速终端滑模提高了状态在滑模面上趋近于原点的速度。在滑模面上当状态远离原点时, 增加的线性项使状态能更快速滑向原点。

3.2.2.3 积分滑模 (Integral Sliding mode)

积分滑模: $s = x + c \int x dt, c > 0$, 在形式上, 积分滑模是在线性滑模中添加积分器, 其实质上仍然是线性滑模, 都是利用了线性滑模控制思想。因为利用等效控制器, 可以保证当状态状态到达滑模面 $s = 0$ 后, $\dot{s} = 0$, 所以在滑模面上系统状态满足: $\dot{x} + cx = 0$, 这就是一般的线性结构。

全局滑模: $s = x(t) - x(0) + c \int_0^t x(\tau) d\tau$, $c > 0$ 。全局滑模是指, 系统初始状态就在滑模面上, 不需要趋近过程直接进入滑动过程, 因为滑模控制, 只有在滑动阶段才有鲁棒性, 所以全局

滑模使系统在初始时刻开始就具有鲁棒性, 称滑模具有全局鲁棒性。

3.2.2.4 非奇异终端滑模

因为利用一般终端滑模控制方法设计控制器时, 不可避免的要计算滑模函数的导数, 而滑模函数中存在 $x^\alpha (0 < \alpha < 1)$, 这使控制器中包含了状态的负指数项 $x^{\alpha-1}$, 从而导致状态为零时, 控制器无界。解决这种奇异性有两种方法, 一种是如^[11]设计辅助滑模面利用分段的控制策略, 另一种就是利用非奇异的终端滑模。

在研究MAS的协同控制中, 滑模函数是以协同误差 (如, 一致误差, 姿态误差, 编队误差等) 以及导数为变量, 多采用李亚普诺夫函数型不等式的可达条件来设计控制器, 这就提供了基于滑模控制的MAS的协同控制中李亚普诺夫函数的选取方法, 使协同控制分析变得跟简单方便。

4 基于滑模变结构的多智能体系统的协同控制

本文通过不同的角度, 将利用了滑模变结构控制的MAS进行分类, 以便于进行分析和评述。根据不同的控制目标MAS协同控制主要包括一致控制, 编队控制, 包围控制。根据系统的数学模型还可以将MAS分为一阶MAS, 二阶MAS, 高阶MAS。根据最终协同状态可以将MAS一致控制问题分为两类: 一类是领航 (Leader-follower) 系统一致控制, 一类是非领航 (Leaderless) 系统 (不带领航者的MAS) 一致控制。领航系统的一致控制是指在设计的分布控制器或分布协议下, 所有智能体的最终状态和领航者的状态达到一致。

4.1 不带领航者的一阶多智能体系统的一致控制

考虑由 n 个智能体组成的多智能体系统, 每个智能体系统的动态方程可以表示为:

$$\dot{x}_i = f_i(x_i) + u_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其中, x_i, u_i 分别为系统的状态, 输入, $f_i(x_i)$ 是未知的非线性函数。

因为终端滑模控制方法只适用于二阶系统, 所以在研究一阶线性即 (1) 中非线性项 $f_i(x_i) = 0$ 的多智能体系统有限时间一致时, 不能使用终端滑模控制方法。文献[6]和文献[10] 分别使用了线性滑模 $s_i = d_i x_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j$ 和积分终端滑模 $s_i = e_i(t) - e_i(t_0) + \int_{t_0}^t \left(\frac{\alpha}{2} e_i(t) + \frac{\beta}{2^\gamma} e_i^\gamma(t) \right) dt^{[6]}$ 。

设计线性滑模不同于一般的线性滑模变结构控制的是, 在此线性滑模的设计下可以实现MAS的有限时间一致。因为MAS 的信息交流图为连通的无向图, 所以文中采用一般形式的不等式可达条件来判断滑模面的可达性。文中不但滑模形式简单, 控制协议 $u_i = -M \text{sgn}(s_i)$ 形式更是简单并且易于实现。最终一致的有限时间为 $T = \frac{x_{p0} - x_{q0}}{2M}$ 。遗憾的是从获得MAS 一致的时间长度的角度分析时则参数 M 值越大越好, 但是考虑到由不连续控制器所引起的抖动, 参数 M 值越小越好, 这就产生了一个矛盾, 如何选取合适的参数 M 变成了一个需要进一步研究的问题^[10]。基于全局滑模控制对一个由轮式移动机器人Amigobot组成的MAS, 提出了有限时间协同控制律, 全局滑模的提出, 很好的解决了^[6]中线性滑模的参数选择问题, 并且使MAS系统具有全局鲁棒性。

与滑模变结构控制思想相同的变结构控制也经常运用到MAS的协同控制中。文献[16]对MAS 公式(1)设计了一个变结构控制器, 并不属于滑模变结构控制, 它只属于变结构控制, 因为系统没有滑模也就不存在滑动阶段, 所以它不具备滑模变结构控制的鲁棒性, 但它具有终端滑模的有限时间特性, 所以, 文献[16] 中的变结构控制器使MAS在有限时间内获得平均一致, 即最终一致值是所有智能体状态的初始值的平均值, 与终

端滑模有限时间控制不同, 文献[16]中的有限时间不受状态初始值的影响, 只由控制器中的参数决定。

4.2 领航系统的一致控制

带有领航者的二阶多智能体的一致控制, 可以根据状态的一致情况将其分为两类: 当Follower的位置状态和速度状态与Leader的位置状态和速度状态分别达到一致时, 我们其成为一致控制; 当只有系统的输出或者位置状态达到一致, 我们称其为跟踪一致。

第 i 个智能体的系统方程为:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= v_i \\ \dot{v}_i &= u_i + f_i(x_i, v_i, t) + \delta_i(x_i, v_i, t) \end{aligned} \quad (2)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, n$$

其中, x_i, v_i, u_i 分别为系统的位置, 速度, 控制输入。 $f_i(x_i, v_i, t)$ 是系统未知的光滑函数, $\delta_i(x_i, v_i, t)$ 是未知有界的系统外部扰动。智能体0表示领航者。因为领航者的运动轨迹可人为的提前设定, 所以有些文献假设领航者的系统方程中没有控制输入, 并且一般领航者模型中不考虑外界干扰即 $\delta_0(x_0, v_0, t) = 0$ 。

对式(2)中 $\delta_0(x_0, v_0, t) = 0, f_i(x_i, v_i, t) = 0, i = 0, 1, 2, \dots, n$ 的MAS, 文献[7]和文献[14]提出了基于非奇异终端滑模的有限时间一致控制算法。利用速度一致误差和位置一致误差文献[7]和文献[14]分别设计非奇异终端滑模 $s_i = e_{i1} + \beta |e_{i2}|^\gamma \text{sign}(e_{i2})$ 和 $s_i = e_{i1} + e_{i2}^\alpha$ 其中 $\beta > 0, 1 < \gamma < 2, \alpha = \frac{p}{q}, p > q, p$ 和 q 是正整奇数。文献[14]与文献[7]解决的问题相同, 且它们的控制器可用的前提都需要假设外界扰动有界且已知, 但不同的是文献[14]设计的控制器适用与智能体之间的交流图为含有有向生成树的有向图, 而文献[7]只适用于强联通的有向图。从结果上分析, 文献[14]设计的控制器对于完全可以应用到文献[7]的系统上。通过这文献[14]与文献[7], 可以得出对于同

一个MAS系统,可以设计不同的滑模,及其不同的控制器,完成相同的控制性能。

基于快速终端滑模控制,文献[4]对带有齐次非线性函数的领航多智能体系统提出了有限时间一致控制。所谓齐次非线性函数,是指所有智能体的数学模型中的非线性函数相同即 $f_i(x_i, v_i, t) = f(x_i, v_i, t)$, $i = 0, 1, 2, \dots, n$ 。领航者模型中 $u_0 = 0$ 。与文献[7]相同,文献[4]的控制器中包含了未知非线性函数以及外界扰动的上界,所以未知的非线性函数和扰动必须有界且已知。因为在文献[4, 7, 14]中均存在一个的假设那就是未知非线性函数和扰动的界必须已知。因为非线性函数本身就是实变的、未知的,并且很多情况下工程师可能缺乏先验知识,或由于缺少测量设备,所以无法预知非线性函数的界,这就是假设未知非线性函数的界已知的假设不成立,导致设计的控制器无法使用。文献[15]结合自适应控制与滑模变结构控制提出了基于滑模控制的自适应一致控制算法,解决了当未知函数的界未知和Leader的控制输入 $u_0 = 0$ 完全未知使多智能体的一致问题。利用线性滑模 $S = KZ_1 + Z_2$, 给出一个带有自适应参数的控制器,通过自适应参数的在线学习,不断调节符号函数前的参数,因为抖动产生的主要原因就是符号函数,所以自适应参数的引入,可以减少抖动。

4.3 具有全驱动Euler-Lagrange模型的多智能体系统的协同控制

许多实际的控制系统的数学模型都是Euler-Lagrange方程,比如机械臂,全驱动自治车辆,以及无人机等。由多个Euler-Lagrange系统组成的多智能体系统中,第 i 个智能体被表示为:

$$M_i(q_i)\ddot{q}_i + f_i(q_i, \dot{q}_i) + g_i(q_i, \dot{q}_i) = \tau_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

其中, q_i 是系统的状态, $M_i(q_i)$ 为对称正定的惯性矩阵, $f_i(q_i, \dot{q}_i)$ 表示第 i 个智能体的科里奥利

力,向心力,保守力以及非保守力, $g_i(q_i, \dot{q}_i)$ 表示有界的不确定性和外界扰动, τ_i 是施加在系统上的广义力或者力矩。

当MAS系统公式(3)不存在不确定性和外界扰动即 $g_i(q_i, \dot{q}_i) = 0$ 时,文献[5]设计了独立性的线性滑模: $s_i = \dot{q}_i - \dot{q}_0 + \lambda(q_i - q_0)$, 提出基于滑模变量的一致控制协议:

$$u_i = -\alpha \left[\sum_{j=0}^n a_{ij}(s_i - s_j) \right] - \beta \left(\sum_{j=0}^n a_{ij} \left\{ \begin{aligned} &\text{sng} \left[\sum_{k=0}^n a_{ik}(s_i - s_k) \right] - \\ &\text{sng} \left[\sum_{k=0}^n a_{jk}(s_j - s_k) \right] \end{aligned} \right\} + a_{i0} \text{sng} \left[\sum_{j=0}^n a_{ij}(s_i - s_j) \right] \right)$$

每一个智能体 i 都对应一个独立的滑模 s_i , 第 i 个智能体的控制协议 u_i 与滑模 s_i 与它的邻居智能体 j 的滑模 s_j 的相对距离有关,并不由跟踪误差 $q_i - q_0$ 直接确定。因为每个滑模 s_i 都是相对独立的,所以每个智能体 i 与领航者0的跟踪误差 $q_i - q_0$ 不一定同时滑动到相对应的滑模面 $s_i = 0$, 但是当所有的跟踪误差都到达自身对应的滑模面之后,通过控制器的选择可以看出所有智能体的控制协议的取值均为0,也就是说此时智能体不受广义力驱动,所以智能体的状态只受系统惯性和重力影响,在系统惯性和重力作用下逐渐跟踪上领航者。文献[5]在控制器协议中包含符号函数,符号函数前的参数 β 是受重力影响,重力越大则参数取值越大,大的参数值会加剧由滑模产生的抖动。

文献[11]研究了具有Euler-Lagrange模型的MAS,设计滑模函数 $s_i(z_i, \dot{z}_i) = \dot{z}_i + c_i \text{sgn}(\text{diag}(z_i)) |z_i|^{\frac{1}{2}}$, 因为滑模函数的导数中含有误差项的负数次幂即 $z_i^{\frac{1}{2}}$, 这导致控制器在误差趋近于零时,控制器的取值变得无限大,导致控制器失效。为了解决这个问题。文献[11]在误差的零邻域内,设计辅助滑模 $s_{iaux}(z_i, \dot{z}_i) = \dot{z}_i$ 。当不在滑模面

上的误差远离原点时, 误差被迫使趋近于滑模面 $s_i(z_i, \dot{z}_i) = \dot{z}_i + c_i \operatorname{sgn}(\operatorname{diag}(z_i)) |z_i|^{\frac{1}{2}} = 0$, 一旦误差进入零点的某个邻域时, 误差被迫使趋近于滑模面 $s_{iaux}(z_i, \dot{z}_i) = \dot{z}_i = 0$ 。两个滑模面的转换使用带有领航者的MAS在有限时间内实现协同跟踪, 并且这些智能体的最终运动轨迹保持着指定的距离。

4.4 编队控制

在自然界中, 许多生物群体存在群集现象, 比如鱼群, 鸟类迁徙等, 这些动物群体在群集时, 为了躲避天敌, 成功觅食等会形成一定的队形。同样的, 在人类的实际生活中, 编队控制被运用以解决一些复杂的问题, 比如追捕入侵者, 侦查和营救以及大型货物搬运等。

模糊滑模控制技术是常规模糊控制技术和滑模控制技术的扩展。在利用模糊滑模控制技术时, 一般会按照等效控制思想设计控制器, 先设计等效控制器再加上模糊控制器, 形成模糊滑模控制器。文献[9]与文献[12]利用模糊滑模控制技术分别研究了一阶和二阶带有输入不确定性的多机器人系统的保持成对智能体之间距离的编队控制。在两文中, 采用的是积分型滑模 $s_i = k_i e_i + c_i \int e_i dt$, $c_i > 0$ 。因为模糊滑模控制器 $u = u_{ieq} + u_{ifs}$ 中的等效控制器 u_{ieq} 可以保证当 $s_x^i = 0$ 时, $\dot{s}_x^i = 0$, 由于 $\dot{s}_i = k_i \dot{e}_i + c_i e_i = 0$ 的Hurwitz稳定性, 队形误差 e_i 会收敛到零点。为了提高控制性能, 减轻抖动的现象, 他们利用模糊控制器 u_{ifs} 取代一般滑模中的切换函数。模糊规则的引入使设计出的一致控制器结构更加平滑, 柔滑控制信号, 同时提高了系统的鲁棒性能。在此控制器下, 在有输入不确定性的情况下, 系统状态不但达到稳定, 而且所有的机器人还能形成期望的队形。

4.5 包围控制 (多个领航者的MAS的一致控制)

包围控制是对带有多个Leader的MAS提出的一种控制算法, 与带有一个Leader的MAS, 包围控制的控制目标是将所有的follower 驱逐到由多个leader 构成的动态凸包中, 并使所有的follower继续保持在这个凸包中。

文献[8]研究了带有多个领航者的二阶MAS的有限时间包围控制 (Containment Control), 每个leader 和 follower 都是可以建模成数学模型见公式 (3), 在所有follower的模型中 $f_i(x_i, v_i, t) = 0$, $i = 1, 2, \dots, N$, 而在所有的leader模型中 $\delta_i(x_i, v_i, t) = 0$, $u_i = 0$, $i = N + 1, N + 2, \dots, N + M$ 。文献[8]中第 i 个follower智能体的终端滑模函数: $s_i = e_x^i + \beta \operatorname{sig}(e_v^i)^\alpha$ 是以智能体 i 状态和所有智能体 (包括所有的leader) 位置距离的权重均值 e_x^i 及其导数 e_v^i 为变量, $\beta > 0, 1 < \alpha < 2$ 。在Leader 的加速度 $f_i(x_i, v_i, t)$ 和follower 的外界扰动 $\delta_i(x_j, v_j, t)$ 都有界且界已知的假设下, 可以利用智能体相之间互交流的位置信息, 速度信息, 以及控制输入信息来设计控制器。在有向的交流拓扑中, 对于所有follower来说, 如果至少存在一条从leader到follower的路径, 那么设计的控制器允许所有的follower的位置和速度都在有限时间进入由leader所确定的凸包中。

5 总结

通过上文, 可以看出由于滑模变结构控制对干扰及其外界扰动有很好的鲁棒性, 并且利用滑模控制方法时, 李亚普诺夫函数形式固定且简单, 使 MAS 的协同控制变得简单易行。本文列举了部分MAS 基于滑模变结构的编队控制以及一致控制的相关问题。在现有的有限时间一致问题和有限时间编队问题研究中, 当使用滑模变结构控制时, 很少会考虑到有变结构引起的抖动, 所以

削弱抖动将是以后的一个研究热点。利用滑模变结构控制方法对MAS的协同问题进行的研究大都停留的理论阶段,如何将滑模变结构控制应用到实际的MAS中,已解决实际问题将是未来的研究方向。

参考文献

- [1] 杜涛.时滞领航系统的协同控制器设计及稳定性分析. MS thesis.曲阜师范大学,2011.
- [2] Ren, Wei, and Yongcan Cao. "Distributed coordination of multi-agent networks: emergent problems, models, and issues." Springer, 2010.
- [3] 高为炳.变结构控制的理论及设计方法. 科学出版社, 1996.
- [4] Li, Huaqing, Xiaofeng Liao, and Guo Chen. "Leader-following finite-time consensus in second-order multi-agent networks with nonlinear dynamics." International Journal of Control, Automation and Systems 11.2(2013): 422-426.
- [5] Mei, Jie, Wei Ren, and Guangfu Ma. "Distributed coordinated tracking with a dynamic leader for multiple Euler-Lagrange systems." Automatic Control, IEEE Transactions on 56.6 (2011): 1415-1421.
- [6] Rao, Sachit, and Debasish Ghose. "Sliding mode control-based algorithms for consensus in connected swarms." International Journal of Control 84.9 (2011): 1477-1490.
- [7] Zhao, Li-Wei, and Chang-Chun Hua. "Finite-time consensus tracking of second-order multi-agent systems via nonsingular TSM." Nonlinear Dynamics 75.1-2 (2014): 311-318.
- [8] He, Xiaoyan, Qingyun Wang, and Wenwu Yu. "Finite-time containment control for second-order multi-agent systems under directed topology." (2014): 1-1.
- [9] Chang, Yeong-Hwa, et al. "Fuzzy sliding-mode formation control for multirobot systems: design and implementation." Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on 42.2 (2012): 444-457.
- [10] Khoo, S., L. Xie, and Z. Man. "Integral terminal sliding mode cooperative control of multi-robot networks." Advanced Intelligent Mechatronics, 2009. AIM 2009. IEEE/ASME International Conference on. IEEE, 2009.
- [11] Ghasemi, Masood, and Sergey G. Nersisov. "Finite-time coordination in multiagent systems using sliding mode control approach." Automatica 50.4 (2014): 1209-1216.
- [12] Chang, Chia-Wen, et al. "Adaptive fuzzy sliding-mode formation control for second-order multi-agent systems." System Science and Engineering (ICSSE), 2010 International Conference on. IEEE, 2010.
- [13] Li, Junquan, and Krishna Dev Kumar. "Decentralized fault-tolerant control for satellite attitude synchronization." Fuzzy Systems, IEEE Transactions on 20.3 (2012): 572-586.
- [14] Khoo, Suiyang, Lihua Xie, and Zhihong Man. "Robust finite-time consensus tracking algorithm for multirobot systems." Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on 14.2 (2009): 219-228.
- [15] Zhao, D., et al. Adaptive backstepping sliding mode control for leader-follower multi-agent systems. IET control theory & applications 6.8 (2012): 1109-1117.
- [16] Zuo, Zongyu, and Lin Tie. "Distributed robust finite-time nonlinear consensus protocols for multi-agent systems." International Journal of Systems Science ahead-of-print (2014): 1-10.
- [17] 张晓宇, 苏宏业. 滑模变结构控制理论进展综述[J]. 化工自动化及仪表, 2006, 33(2): 1-8.
- [18] 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 407-418.

作者简介

任长娥 澳门大学科技学院博士生。2011年取得理学硕士学位, 毕业于辽宁工业大学数理学院。研究兴趣包括多智能体的一致控制和包围控制, 以及非线性系统的模糊自适应控制。

陈俊龙 澳门大学讲座教授及科技学院院长。主要研究方向包括智慧系统理论、物理建模、诊断与预测、网路与通信。

多智能体系统事件驱动控制

曹梦涛¹, 肖 峰², 王 龙¹

1. 北京大学 工学院, 北京 100871; 2. 哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150080;

摘要: 事件驱动协同控制是近些年来多智能体系统的一个新兴的研究方向, 它是周期性采样控制的一种补充, 能够在一定程度上减少智能体间的通信次数和智能体的控制器更新次数, 从而减少系统的运行功耗。本文总结了文献中事件驱动控制的一些研究成果, 指出了事件驱动控制在多智能体系统协同领域的研究前景。

关键词: 多智能体系统, 采样控制, 事件驱动控制, 一致性控制

1 引言

多智能体协同控制是近十年来迅速发展起来的一门新兴的复杂系统控制科学, 具有广泛工程应用背景, 并对一些自然、社会现象给出了合理的解释, 具有学科交叉、理论性和实用性强等特点, 其理论研究涉及生物、数学、物理、航空、控制、通讯和人工智能等众多领域。

在工程应用中, 人们深受群体优势的启发, 通过设计功能单一的智能体, 使得它们能够相互协调, 相互合作而共同完成一项复杂的任务。比如多机器人系统^[1]和多航天飞行器系统^[2]等。部分功能单一的智能体的功能失效不会影响到系统整体的功能和任务的达成, 这在一定程度上降低了系统的设计难度, 增加了系统的抗干扰能力、鲁棒性和可扩展性, 提高了系统的整体运行效率。经过十多年的发展, 多智能体系统研究在很多方向上取得了重要理论成果, 如多智能体系统的一

致性^[3,4], 连通性保持^[5], 事件驱动控制^[6,7]以及可控性^[8]等。

采样控制是数字技术发展的产物, 是多智能体系统的一个重要研究方法。在文献 [9] [10] 中, Xie 等人研究了无向拓扑下的一阶智能体网络的一致性, 利用周期性采样控制的方法分别针对固定拓扑和切换拓扑设计了分布式一致性协议, 解决了多智能体系统的一致性问题。在文献 [11] 中, Gao 等人研究了有向拓扑下的二阶智能体网络的一致性问题, 利用周期性采样控制的方法针对固定拓扑和切换拓扑设计了分布式一致性协议, 解决了多智能体系统的一致性问题。现有的大部分结果都是基于这种周期性采样方法得到, 但是在很多情况下, 系统不需要在每一个采样时刻都进行数据采样, 因而有可能在一定程度上进一步降低周期性采样系统的功耗。为解决这一问题, 科学工作者提出了事件驱动控制方法。相对于周期性采样控制, 事件驱动控制更多关注系统的状

态变化,在降低功耗、分布控制和多率采样等方面具有一定的优势^[12]。

2 多智能体系统的问题描述

对于具有 n 个智能体的多智能体系统,为了区分智能体,我们把这些智能体标号为1到 n 。多智能体系统的拓扑用图 $\mathcal{G}=(V, \mathcal{E})$ 表示,顶点集 $V=\{v^1, v^2, \dots, v^n\}$ 表示 n 个智能体,边 $(v^i, v^j) \in \mathcal{E}$ 表示智能体 j 可以接收到智能体 i 的状态信息,顶点 v^i 称之为父顶点,顶点 v^j 称之为子顶点。如果 $(v^i, v^j) \in \mathcal{E}$ 当且仅当 $(v^j, v^i) \in \mathcal{E}$, 我们称图 $\mathcal{G}$ 是无向的,否则称图 $\mathcal{G}$ 是有向的。从 v^{k1} 到 v^{km} 的一条路 (path) 是由一系列不同的顶点 $v^{k1}, v^{k2}, \dots, v^{km}$ 组成,并且这些顶点满足 $(v^{ki}, v^{k_{i+1}}) \in \mathcal{E}, i=1, 2, \dots, m-1$ 。对于无向图,如果从图的任何一个顶点到另外一个不同的顶点都有路存在,我们称无向图是连通的。对于有向图,如果从图的任何一个顶点到另外一个不同的顶点都有路存在,我们称有向图是强连通的。有向树是满足以下三条性质的有向图:(1) 存在一个没有父顶点的顶点,称为根顶点;(2) 除根顶点外,其它所有顶点有且只有一个父顶点;(3) 从根顶点到任何一个其它的顶点都有路存在。如果一个有向图 $\mathcal{G}_s=(v_s, \mathcal{E}_s)$ 满足 $v_s \subset v$ 且 $\mathcal{E}_s \subset \mathcal{E}$, 则称 $\mathcal{G}_s$ 为 $\mathcal{G}$ 的一个子图。如果 $\mathcal{G}_s$ 为 $\mathcal{G}$ 的一个子图,且 $v_s=v$, 那么称 $\mathcal{G}_s$ 为 $\mathcal{G}$ 的一个生成子图。如果一个有向树是有向图 $\mathcal{G}$ 的一个生成子图,则称该有向树为有向图 $\mathcal{G}$ 的一个生成树。

对于连续的多智能体系统,一阶积分器网络系统的动态方程为:

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

其中, $x_i(t) \in R^m$ 表示智能体 i 的状态, $u_i(t) \in R^m$ 是需要设计的系统反馈,称为协议。如果协议 $u_i(t)$ 只用到与智能体 i 相邻的智能体的状态信息,则我们称这样的控制协议为分布式控制协议。由于分布式控制协议更加符合实际情况,在实际中

应用更加广泛,因此分布式控制协议也是多智能体系统研究的重点。比较经典的分布式控制协议是Olfati-Saber等人提出的协议^[3]:

$$u_i(t)=-\sum_{j \in N_i} a_{ij}(x_i(t)-x_j(t))$$

二阶积分器系统的动态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = v_i(t) \\ \dot{v}_i(t) = u_i(t) \end{cases}, i=1, 2, \dots, n,$$

其中, $x_i(t), v_i(t) \in R^m$ 表示智能体 i 的状态,它们可以分别表示智能体的位置信息和速度信息, $u_i(t) \in R^m$ 是需要设计的协议。比较经典的分布式控制协议是Ren等人提出的协议^[13]:

$$u_i(t)=-\sum_{j \in N_i} (a_{ij}(x_i(t)-x_j(t))+ka_{ij}(v_i(t)-v_j(t)))$$

和Xie等人提出的协议^[14]:

$$u_i(t)=-\sum_{j \in N_i} a_{ij}(x_i(t)-x_j(t))+kv_i(t)$$

Ren等人提出的协议的控制目的是保证所有智能体的位置和速度逐渐趋于一致;Xie等人提出的协议的控制目的是保证所有智能体逐渐静止到同一位置。

周期性采样控制也是多智能体系统协同控制中一个重要的研究热点。针对二阶积分器网络系统中智能体的速度信息不能直接获得的情况,Gao等人在文献[11]中利用位置信息来估计速度信息,设计了如下协议:

$$u_i(t)=-\sum_{j \in N_i(t_r)} a_{ij}(t_r) \left(y_{ij}(t_r) + k \frac{y_{ij}(t_r) - y_{ij}(t_{r-1})}{h} \right),$$

$$t \in (t_r, t_{r+1}), r=0, 1, \dots,$$

其中, $y_{ij}(t_r)=x_i(t_r)-x_j(t_r)$, 并利用此协议针对固定拓扑和切换拓扑的一致性问题进行研究得到了使得系统状态达到一致的充分条件。

此外,多智能体系统还有很多问题需要解决,比如连通性保持,可控性,量化控制等,正在吸引着越来越多的科学工作者投身其中。

3 事件驱动控制

事件驱动控制是对周期性采样控制的一种补

充,它能够在一定程度上减少系统中智能体间的通信次数和智能体的控制器更新次数,从而减少系统的运行功耗。事件驱动控制的思想最早在2002由Åström在文献[15]中提出,但由于分析工具缺乏,事件驱动控制的发展一直比较缓慢。本文将对近些年多智能体系统中事件驱动控制的一些结果做一个总结。

3.1 一阶积分器网络系统

3.1.1 无向拓扑下的多智能体系统

在无向通信拓扑假设情况下,Dimarogonas等人在文献[16]中针对一阶积分器网络系统给出了一类分布式事件驱动一致性协议,并给出了事件触发的条件,解决了一致性问题。但是该协议需要智能体持续地监测其邻居的状态信息,并没有减少系统的通信代价。Dimarogonas等人在文献[12]中改进了事件触发的条件,给出了自触发条件,减少了系统的通信量,并解决了系统的一致性问题。在文献[17]中,Fan等人也给出了一个事件触发控制策略,能够避免持续监测邻居的状态信息。作者在算例中指出其方法优于文献[12]中的方法。

在事件驱动控制器的设计和分析中,一个常见的难点就是如何避免Zeno行为。Liu等人在文献[18]中针对通信拓扑连通的情况提出了分布式一致性协议,给出了事件触发的条件,并给出了事件触发间隔的下界。由于其给出的事件触发条件需要利用系统的全局信息,因此严格意义上来说这不是一个分布式协议。Xiao等人在文献[6]中首次利用边事件的思想对一阶积分器网络系统进行研究,给出分布式一致性协议,结合周期性采样控制和事件驱动控制的优点提出基于周期性检测的事件驱动控制策略,解决了系统的一致性问题。文献[6]的主要贡献有两点:第一、提出了边事

件驱动控制的思想,其能够在一定程度上减少系统中控制器的更新次数和智能体间的通信次数,从而减少了系统的功耗,是多智能体事件驱动控制研究的一个突破;第二、提出了基于周期性检测的事件驱动控制策略。该策略保证了最小的事件触发间隔,从根本上避免了Zeno行为的出现。Meng等人在文献[19]中也利用类似的思想研究了一阶积分器网络系统的一致性,提出了只在离散时刻点检测事件触发条件的事件驱动控制策略,解决了固定无向拓扑和切换无向拓扑情况下的一阶积分器网络系统的一致性问题。

此外,针对时滞的问题,Seyboth等人在文献[20]中针对一阶积分器网络系统无时滞和有时滞的情况分别设计了两个事件触发控制策略,使得系统中的个体状态最终收敛到一个球形区域内。值得一提的是该方法能够有效的避免Zeno行为的出现。针对离散时间系统,Chen等人在文献[21]中利用Lyapunov理论设计了两个事件触发控制策略:事件触发控制策略和自触发控制策略,并给出了能使系统达到状态一致的充分条件。

3.1.2 有向拓扑下的多智能体系统

在有向通信拓扑的情况下,由于分析比较复杂,目前理论结果比较少。Guo等人在文献[22]中利用类似文献[6]和[19]中的处理方法提出了基于周期性检测的事件驱动控制策略,并在系统拓扑包含生成树的情况下给出了解决系统一致性问题的一个充分条件。同前面的分析,由于检测周期的存在,该事件驱动控制策略可以避免Zeno行为的出现。Zhu等人在文献[23]中研究了更一般的线性系统,同样得到一个可以避免Zeno行为的事件驱动控制策略,并给出了两个能使系统达到状态一致的充分条件:一个能减少系统的控制器更新次数,但是需要持续检测邻居的状态;另一个可

以避免持续检测邻居的状态,但是它会带来控制器更新次数的增加。

3.2 二阶积分器网络系统

对于二阶积分器网络系统,由于分析工具少、问题相对复杂,目前结果还比较少。Seyboth等人在文献[20]中不仅研究了一阶积分器的情况,还研究了无向固定拓扑且无时滞情况下的二阶积分器网络系统的一致性,并设计了事件触发规则,使得系统中的智能体状态最终收敛到一个球形区域内。Cao等人在文献[7]中利用边事件的思想研究了无向拓扑情况下的二阶积分器网络系统的一致性,并提出了两个基于周期性检测的边事件触发规则,其能够有效地减少系统的通信代价以及控制器更新代价。

4 边事件驱动控制

在实际问题中,由于个体的差异性,当某一个智能体的状态发生改变时,其对于其它智能体影响的程度是不同的,必要的时候必须区别对待。而以往的研究重点都是基于单个智能体的,也就是当一个智能体的状态发生改变的时候,它所有邻居的控制器都需要更新,这样无疑对增加了某些智能体的负担和智能体间的通信压力。边事件驱动方法可以很好的解决这类问题。

在文献[7]中,Cao等人采用基于周期性条件检测的边事件驱动控制方法对二阶积分器网络系统进行研究。设计了如下控制协议:

$$u_i(t) = - \sum_{j \in N_i} (x_i(t_{k\ddot{y}(t)}) - x_j(t_{k\ddot{y}(t)})) + \gamma(v_i(t_{k\ddot{y}(t)}) - v_j(t_{k\ddot{y}(t)}))$$

其中, $t_{k\ddot{y}(t)}$ 表示在 t 时刻之前边 (v^i, v^j) 事件触发的时刻, γ 为待设计的参数。

在等间隔的时间序列的每一个时刻,每条边上的两个智能体对对方的状态信息进行检测来判

断是否更新控制器。例如,智能体 i 和智能体 j 相邻,它们在某个事件检测时刻对对方的状态信息进行检测。如果其达到预先设定的条件,即文献中的规则I,则智能体 i 更新其控制器中智能体 j 的状态信息,同时智能体 j 也更新其控制器中智能体 i 的状态信息;否则控制器继续保持上一检测时刻的状态不变。而此时智能体 i 的其它邻居是否更新控制器只与它们与智能体 i 之间的相对状态信息有关,与智能体 j 是否更新其控制器无关。利用此方法,作者在文献中给出了在规则I下系统解决一致性问题条件。

在上述方法中,在每一个事件检测时刻,每个智能体需要与其所有邻居进行通信来判断是否触发边事件。这样处理可以在一定程度上减少智能体的控制器更新次数,但是智能体之间的通信次数并没有减少。作者在文献[7]中对上述方法进行改进,提出规则II,可以大大减少智能体之间的通信次数。即假设每个智能体有一定的存储能力,智能体 i 可以记录在边 (v^i, v^j) 事件触发时刻时智能体 i 和 j 的状态信息。之后在每一个事件检测时刻,智能体 i 用当前的状态信息与存储的状态信息比较,判断是否达到事件触发条件,即文献中规则II。如果达到则更新控制器中智能体 j 的状态信息,并将当前时刻的智能体 i 和 j 的状态信息存储到存储器中;否则继续保持控制器和存储器的相关状态不变。利用此方法,不仅仅智能体的控制器更新次数会在一定程度上减少,智能体之间的通信次数也会大大减少。

文献[7]给出了仿真结果来说明边事件驱动控制方法的有效性。在该仿真中,有5个智能体,它们的拓扑结构如图1所示。图2和图3分别给出了在规则I和规则II下该系统中的每条边的触发时刻。从该仿真中可以看出,边事件驱动控制可以在很大程度上减少系统的控制器更新次数和智能体之间的通信次数,从而降低系统的功耗。

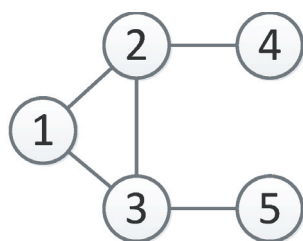


图1 多智能体系统的拓扑结构^[7]

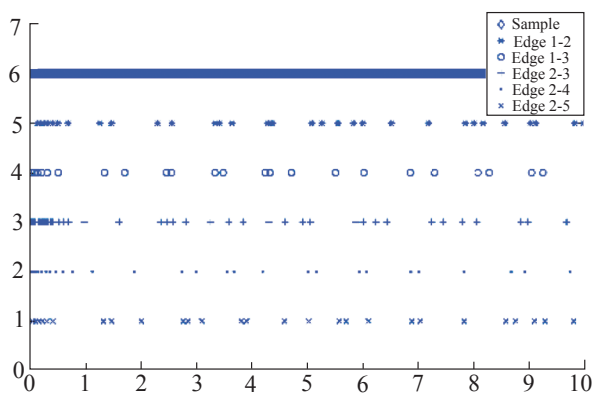


图2 规则I下事件触发时刻图^[7]

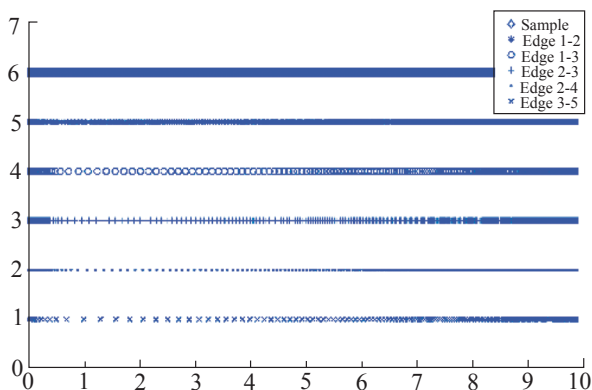


图3 规则II下事件触发时刻图^[7]

5 结论与展望

对多智能体系统的研究一方面能够揭示自然和社会中出现的复杂现象的规律，一方面能够给科技的开发与发展提供理论支撑。事件驱动协同控制能在系统通信受限或个体处理能力有限的情况下发挥重要的作用，是多智能体系统研究的一个重要方向。但是由于问题的数学描述复杂以及分析工具匮乏，现在的理论结果还比较少。对于

更一般的有向拓扑、含有时滞的系统、切换系统以及时变系统的结果更是少之又少。对这些系统的更深入研究需要发展新的理论工具和方法。

参 考 文 献

- [1] J. Shao, G. Xie and L. Wang, "Leader-following formation control of multiple mobile vehicles," IET Control Theory & Applications, vol. 1, no. 2, pp. 545-552, 2007.
- [2] D. V. Dimarogonas, P. Tsiotras and K. J. Kyriakopoulos, "Leader-follower cooperative attitude control of multiple rigid bodies," System & Control Letters, vol. 58, no. 6, pp. 429-435, 2009.
- [3] R. Olfati-Saber and R. M. Murray, "Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 49, no. 9, pp. 1520-1533, 2004.
- [4] L. Wang and F. Xiao, "Finite-time consensus problems for networks of dynamics agents," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 55, no. 4, pp. 950-955, 2010.
- [5] F. Xiao, L. Wang and T. Chen, "Connectivity preservation for multi-agent rendezvous with link failure," Automatica, vol. 48, no. 1, pp. 25-35, 2012.
- [6] F. Xiao, X. Meng and T. Chen, "Average Sampled-data consensus driven by edge events," Proceedings of the 31st Chinese Control Conference, pp. 6239-6244, 2012.
- [7] M. Cao, F. Xiao and L. Wang, "Consensus in Networks of multiple double-integrators based on edge-event driven sampled-data control," Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference, pp. 6970-6975, 2013.
- [8] Z. Ji, L. Wang and X. Guo, "On controllability of switched linear systems," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 53, no. 3, pp. 796-801, 2008.
- [9] G. Xie, H. Liu, L. Wang and Y. Jia, "Consensus in networked multi-agent systems via sampled control: fixed topology case," Proceeding of the 2009 American Control Conference, pp. 3902-3907, 2009.
- [10] G. Xie, H. Liu, L. Wang and Y. Jia, "Conensus in networked multi-agent systems via sampled control: switching topology case," Proceedings of the 2009 American Conference Conference, pp. 4525-4530, 2009.
- [11] Y. Gao, L. Wang, G. Xie and B. Wu, "Consensus of multi-agent systems based on sampled-data control," International Journal of Control, vol. 82, no. 12, pp. 2193-2205, 2009.

- [12] D. V. Dimarogonas, E. Frazzoli and K. H. Johansson, "Distributed event-triggered control for multi-agent systems," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 57, no. 2, pp. 1291-1297, 2012.
- [13] W. Ren and E. Atkins, "Second-order consensus protocols in multiple vehicle systems with local interactions," Proceedings of AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2005.
- [14] G. Xie and L. Wang, "Consensus control for a class of networks of dynamics agents," International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 17, no. 10-11, pp. 941-959, 2007.
- [15] K. J. Åström and B. M. Bernhardsson, "Comparison of Riemann and Lebesgue sampling for first order stochastic systems," Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, pp. 2011-2016, 2002.
- [16] D. V. Dimarogonas and F. Emilio, "Distributed event-triggered control strategies for multi-agent systems," Proceedings of 47th Annual Allerton Conference on Communications, Control and Computing, pp. 906-910, 2009.
- [17] Y. Fan, G. Feng, Y. Wang and C. Song, "Distributed event-triggered control of multi-agent systems with combinational measurements," Automatica, vol. 49, no. 2, pp. 671-675, 2013.
- [18] Z. Liu and Z. Chen, "Event-triggered average-consensus for multi-agent systems," Proceedings of the 29th Chinese Control Conference, pp. 4506-4511, 2010.
- [19] X. Meng and T. Chen, "Event based agreement protocols for multi-agent networks," Automatica, vol. 49, no. 7, pp. 2125-2132, 2013.
- [20] G. S. Seyboth, D. V. Dimarogonas and K. H. Johansson, "Event-based broadcasting for multi-agent average consensus," Automatica, vol. 49, no. 1, pp. 245-252, 2013.
- [21] X. Chen and F. Hao, "Event-triggered average consensus control for discrete-time multi-agent systems," IET Control Theory & Applications, vol. 6, no. 16, pp. 2493-2498, 2012.
- [22] G. Guo, L. Ding and Q. Han, "A distributed event-triggered transmission strategy for sampled-data consensus of multi-agent systems," Automatica, vol. 50, no. 5, pp. 1489-1496, 2014.
- [23] W. Zhu, Z. Jiang and G. Feng, "Event-based consensus of multi-agent systems with general linear models," Automatica, vol. 50, no. 2, pp. 552-558, 2014.

作者简介

曹梦涛 北京大学智能控制实验室博士研究生。主要研究方向为多智能体一致性研究、事件驱动控制，采样控制。

肖峰 哈尔滨工业大学教授，博士生导师。主要研究方向为复杂系统动力学、多智能体系统分布式协同、采样控制、事件驱动控制等。

王龙 北京大学教授，博士生导师，北京大学智能控制实验室主任，北京大学系统与控制研究中心主任，中国系统仿真学会智能物连系统委员会主任，长江学者。主要从事复杂系统智能控制、多机器人系统的协调与控制、网络化控制系统的分析与综合、集群行为与集群智能、演化博弈与群体决策等方面的研究工作。

具有噪声约束的多个体系统 一致性问题简述

王云鹏, 程 龙, 侯增广

中国科学院自动化研究所, 复杂系统管理与控制国家重点实验室

摘要: 本文首先从实际应用出发分析了噪声环境中多个体系统一致性研究的重要意义。然后回顾了噪声环境中多个体系统一致性研究的发展历史和其研究现状。最后根据其发展历史和研究现状展望了未来研究的一些可行方向。

关键词: 多个体系统, 通讯噪声, 均方一致性, 几乎必然一致性

1 引言

近十多年来, 多个体系统一致性理论得到了广泛的关注和快速的发展, 而这得益于其广泛的应用前景, 比如: 传感器的信息融合^[1]、多车辆的协同编队^[2]、分布式摄像机网络^[3], 动态信息图的融合^[4]等等。近些年多个体系统一致性研究的热潮起源于Jadbabaie和Olfati-Saber在2003、2004年的开创性工作^[5, 6]。他们给出多个体系统的数学模型、一致性的定义, 提出了解决一致性问题的算法, 并从数学上证明了这些算法的有效性。他们的工作奠定了整个多个体系统一致性研究的理论基础。

然而最初的研究工作和实际应用相比较, 往往过于简单化和理想化。比如其没有考虑噪声对整个系统在实现一致性时所带来的影响。但是由于电磁干扰、测量误差、量化误差等等一系列不确定性因素的存在, 在实际应用中噪声影响是不可避免的。从2007年开始很多研究人员认识到这个问题, 之后这方面的工作逐渐多了起来。本文

旨在回顾近些年来噪声环境中多个体系统一致性的研究历史和现状。在后面的论述中我们首先给出了问题的定义; 然后根据不同的个体动力学, 分别回顾了噪声环境中一致性研究的一些有意思的结果; 最后基于前期工作, 展望了未来的研究的可行方向。

2 问题描述

所谓多个体系统, 就是由多个个体以某种通讯网络结合在一起所作组成的一个系统。现实生活中, 任何一个由多个个体组成的团体, 只要团体之间存在互相影响, 都可以抽象为一个多个体系统, 比如集群飞行的鸟群、要实现协同编队的多车辆系统、传感器网络等。

一致性问题中, 我们关心的是群体中每个个体的某些特定状态, 比如多车辆系统中车辆的位置、速度、朝向等。我们将第*i*个个体的状态记为 x_i 或, 这些状态都有自己的更新律, 即其动力学。比如一阶积分动力学:

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

二阶积分动力学:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = v_i(t) \\ \dot{v}_i(t) = u_i(t) \end{cases};$$

或更一般的线性动力学:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = Ax_i(t) + Bu_i(t) \\ y_i(t) = Cx_i(t) \end{cases}.$$

一致性所要实现的任务就是对所有的个体设计控制输入,使所有个体的状态值趋于一个相同的量。在噪声环境中,由于噪声的存在,一致性并不能在确定性意义上实现,只能在随机意义下达到。下面给出了两种M. Huang等人提出的随机意义下一致性的定义^[7]。

定义1(均方一致性): 对于一个多个体系统,如果存在一个随机变量,满足

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E \|x_i(t) - x^*\|_2^2 = 0,$$

那么这个多个体系统可以实现均方一致性。

定义2(几乎必然一致性): 对于一个多个体系统,如果存在一个随机变量,满足

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_i(t) = x^*, a.s.,$$

那么这个多个体系统可以实现几乎必然一致性。

3 发展历史和研究现状

本节中我们将根据个体动力学的不同,分别回顾一阶积分多个体系统、二阶积分多个体系统和一般线性多个体系统在噪声环境中一致性研究的发展历史。

3.1 一阶积分多个体系统

为了削弱噪声对实现一致性所带来的影响,Pescosolido^[8]和Kar^[9]等人在一致性协议中引入了一个随时间递减的时变增益。但是,递减增益的引入,同时会削弱不同个体之间的状态趋于一致的能力。收敛过快的增益,甚至会导致所有个体

的状态无法趋于一致。为了解决这个矛盾,M. Huang等人提出了一种随机逼近型的一致性协议。所谓随机逼近型一致性协议,就是在协议中引入一项满足如下随机逼近型条件的增益,

$$\sum_{i=0}^{\infty} a[i] = \infty \text{ 并且 } \sum_{i=0}^{\infty} a^2[i] < \infty.$$

例如在最近邻居规则一致性协议中引入增益,得到如下的随机逼近型协议:

$$u_i[k] = a(t) \sum_{j \in N_i} \alpha_{ij} (y_{ij}[k] - x_i[k]),$$

其中, $y_{ij}[k]$ 是个体 i 得到的个体 j 的含有噪声的状态。M. Huang等人在^[7]中证明了: 随机逼近型一致性协议可以解决离散时间一阶积分多个体系统的均方一致性问题 and 几乎必然一致性问题。对于具有马尔科夫时变通讯拓扑和随机时变通讯拓扑的多个体系统, M. Huang等人也得到了类似的结果^[10, 11]。

对于连续时间域的一致性问题,同样可以得到随机逼近型一致性协议,只是随机逼近型条件要换成如下形式:

$$\int_0^{\infty} a(t) dt = \infty \text{ 并且 } \int_0^{\infty} a^2(t) dt < \infty.$$

T. Li等人在^[12]中证明了上述的随机逼近型条件是解决连续时间一阶积分多个体系统均方一致性问题充要条件。在^[13]中, T. Li等人又进一步得到了离散时间域一阶积分多个体系统实现平均一致性的充要条件: 时变增益满足随机逼近型条件; 通讯拓扑图是平衡图,并且有一颗生成树。

对于存在通讯时延的问题, J. Liu等人^[14]和S. Liu等人^[15]分别对连续时间和离散时间多个体系统进行了研究,证明了随机逼近型控制协议对于这种情况仍然适用。J. Xu等人在文章^[16]中分析了随机逼近型协议下,多个体系统实现一致性的收敛速度问题。

我们注意到以上文章中研究的噪声都是加性噪声,也就是说噪声的强度与个体的状态之间是

独立。而在一些实际应用中，噪声的强度会正比于个体状态。这种情况下，将噪声建模为乘性噪声更为合理。正是基于这些考虑，文献[17, 18]研究了乘性噪声下多个体系统的一致性问题，给出了一些一致性协议。这些研究表明，不同于加性噪声，即便一致性协议里面不包含随机逼近型增益，多个体系统在乘性噪声影响下仍然能够达到随机一致。

领航者-跟踪者问题（跟踪问题）一直都是控制领域内的研究重点，多个体系统领域也不例外。C. Ma^[19]等人证明随机逼近型一致性协议对于解决多个体系统的领航者-跟踪者问题仍然是有效的。Z. Wu等人又将相应的结果扩展到了采样时间的情况^[20]。最近的工作^[21]表明，对于存在领航者的多个体系统，随机逼近条件并不必要。实际上，只要时变增益满足如下的条件，“领航者-跟随者”多个体系统的一致性就可以实现。

$$\int_0^{\infty} a(t) dt = \infty \text{ 并且 } \lim_{t \rightarrow \infty} a(t) = 0. \text{ (条件1)}$$

3.2 二阶积分多个体系统

为解决连续时间二阶积分多个体系统在有通讯噪声环境中的一致性问题的，文章^[22]中提出了如下的随机逼近型控制协议：

$$u_i(t) = K_1 x_i(t) + a(t) K_2 \sum_{j \in N_i} \alpha_{ij} (y_{ij}(t) - x_i(t)).$$

其中， $x_i(t) \in R^2$, $y_{ij}(t) \in R^2$ 是个体 i 得到的个体 j 含有噪声的状态； $K_1 = (0, -1)$, $K_2 = (-1, -1)$ 。并针对这种控制协议，给出了实现均方一致性的充要条件。对于采样的系统，Zhang等人在文章^[23]中提出了如下的最近邻居规则型一致性协议：

$$u_i(kT) = a[k] K \sum_{j \in N_i} \alpha_{ij} (y_{ij}(kT) - x_i(kT)).$$

其中， $K = (\gamma_1, \gamma_2)$, $\gamma_1 > 0$, $\gamma_2 > 0$ 。之后Cheng等人又基于^[22]中结果也提出了一种基于采样的一致性协议，并证明了这个协议可以解决时变通讯拓扑的下的多个体系统的一致性问题。类似于一阶情

况，噪声环境中二阶积分多个体系统的领航者-跟随者问题同样可以解决^[24]。并且根据文献[21]中的结果，时变增益只要满足上一节中的（条件1）即可，无需满足随机逼近型条件。

3.3 一般多个体系统

为了使一致性控制协议具有更广泛的应用空间，近两年有学者开始考虑噪声环境中一般线性多个体系统的一致性问题。比如文章^[25]考虑了固定通讯拓扑下连续时间一般线性多个体系统的一致性问题，给出了如下的控制协议：

$$u_i(t) = K_1 x_i(t) + a(t) K_2 \sum_{j \in N_i} \alpha_{ij} (y_{ij}(t) - x_i(t)).$$

其中， $x_i(t) \in R^n$, $y_{ij}(t) \in R^n$ 是个体 i 得到的个体 j 含有噪声的状态； $K_1 = [-a_1, -a_2 - b_2, -a_3 - b_2, \dots, -a_n - b_{n-1}]$, $K_2 = [b_1, b_2, \dots, b_{n-1}, 1]$ 。这里 $\{b_1, b_2, \dots, b_{n-1}\}$ 是需要确定的参数。这些参数需要满足如下的条件：多项式 $s^{n-1} + b_{n-1}s^{n-2} + \dots + b_2s + b_1 = 0$ 的所有根都具有负实部。文献[26]和[27]分别将相应的结果拓展到了离散时间情况和马尔科夫时变通讯拓扑的情况。一般线性多个体系统的领航者-跟随者问题，在文章^[28]中得到了研究。

4 未来展望

虽然多个体系统在噪声环境中的一致性问题已经取得了大量的成果，但是仍然有很多棘手的问题亟待解决。比如二阶积分或一般线性多个体系统在时变通讯拓扑条件下的随机一致性问题。虽然在马尔科夫时变拓扑的情况下，得到了一些结果，但是对于一般的时变拓扑情况，相应的结果仍然欠缺。又比如噪声环境中多个体系统一致性收敛速度的定义和分析等等。再比如个体的状态未知，只能得到其输出信息时，如何基于输出信息设计一致性协议。

总之具有噪声约束的多个体系统一致性问题/协调控制问题仍然值得进一步研究, 期待近年内有更多新颖结果的出现。

参考文献

- [1] L. Xiao, S. Boyd, and S. Lall, A scheme for robust distributed sensor fusion based on average consensus. New York, 2005.
- [2] W. Ren, "Consensus strategies for cooperative control of vehicle formations," IET Control Theory and Applications, vol. 1, pp. 505-512, 2007.
- [3] A. T. Kamal, J. A. Farrell, and A. K. Roy-Chowdhury, "Information weighted consensus filters and their application in distributed camera networks," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 58, pp. 3112-3125, 2013.
- [4] R. Aragues, J. Cortes, and C. Sagues, "Distributed consensus on robot networks for dynamically merging feature-based maps," IEEE Transactions on Robotics, vol. 28, pp. 840-854, 2012.
- [5] A. Jadbabaie, J. Lin, and A. S. Morse, "Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 48, 2003.
- [6] R. Olfati-Saber and R. M. Murray, "Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 49, pp. 1520-1533, 2004.
- [7] M. Huang and J. H. Manton, "Coordination and consensus of networked agents with noisy measurements: stochastic algorithms and asymptotic behavior," Siam Journal on Control and Optimization, vol. 48, pp. 134-161, 2009.
- [8] L. Pescosolido, S. Barbarossa, and G. Scutari, "Average consensus algorithms robust against channel noise," in Proceedings of IEEE 9th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, 2008, pp. 261-265.
- [9] S. Kar and J. M. F. Moura, "Distributed consensus algorithms in sensor networks with imperfect communication: link failures and channel noise," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 57, pp. 355-369, 2009.
- [10] M. Huang, S. Dey, G. N. Nair, and J. H. Manton, "Stochastic consensus over noisy networks with Markovian and arbitrary switches," Automatica, vol. 46, pp. 1571-1583, 2010.
- [11] M. Huang and J. H. Manton, "Stochastic consensus seeking with noisy and directed inter-agent communication: fixed and randomly varying topologies," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 55, pp. 235-241, 2010.
- [12] T. Li and J.-F. Zhang, "Mean square average-consensus under measurement noises and fixed topologies: Necessary and sufficient conditions," Automatica, vol. 45, pp. 1929-1936, 2009.
- [13] T. Li and J.-F. Zhang, "Consensus conditions of multi-agent systems with time-varying topologies and stochastic communication noises," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 55, pp. 2043-2057, 2010.
- [14] J. Liu, X. Liu, W.-C. Xie, and H. Zhang, "Stochastic consensus seeking with communication delays," Automatica, vol. 47, pp. 2689-2696, 2011.
- [15] S. Liu, L. Xie, and H. Zhang, "Distributed consensus for multi-agent systems with delays and noises in transmission channels," Automatica, vol. 47, pp. 920-934, 2011.
- [16] J. Xu, H. Zhang, and L. Xie, "Stochastic approximation approach for consensus and convergence rate analysis of multiagent systems," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 57, pp. 3163-8, 2012.
- [17] Y.-H. Ni and X. Li, "Consensus seeking in multi-agent systems with multiplicative measurement noises," Systems & Control Letters, vol. 62, pp. 430-437, 2013.
- [18] T. Li, F. Wu, and J.-F. Zhang, "Multi-agent consensus with relative-state-dependent measurement noises," IEEE Transactions on Automatic Control, 2014.
- [19] C. Ma, T. Li, and J. Zhang, "Consensus control for leader-following multi-agent systems with measurement noises," Journal of Systems Science & Complexity, vol. 23, pp. 35-49, 2010.
- [20] Z. Wu, L. Peng, L. Xie, and J. Wen, "Stochastic bounded consensus tracking of leader-follower multi-agent systems with measurement noises based on sampled-data with small sampling delay," Physica a-Statistical Mechanics and Its Applications, vol. 392, pp. 918-928, 15 2013.
- [21] Y. Wang, L. Cheng, Z.-G. Hou, M. Tan, and M. Wang, "Containment control of multi-agent systems in a noisy communication environment," Automatica, vol. 50, pp. 1922-1928, 2014.
- [22] L. Cheng, Z.-G. Hou, M. Tan, and X. Wang, "Necessary and sufficient conditions for consensus of double-integrator multi-agent systems with measurement noises," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 56, pp. 1958-1963, 2011.

- [23] Y. Zhang and Y.-P. Tian, "Consensus of data-sampled multi-agent systems with random communication delay and packet loss," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 55, pp. 939-43, 2010.
- [24] Z. Wu, L. Peng, L. Xie, and J. Wen, "Stochastic bounded consensus tracking of second-order multi-agent systems with measurement noises and sampled-data," Journal of Intelligent & Robotic Systems, vol. 68, pp. 261-273, 2012.
- [25] L. Cheng, Z.-G. Hou, and M. Tan, "A mean square consensus protocol for linear multi-agent systems with communication noises and fixed topologies," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 59, pp. 261-267, 2014.
- [26] Y. Wang, L. Cheng, Z.-G. Hou, M. Tan, C. Zhou, and M. Wang, "Consensus seeking in a network of discrete-time linear agents with communication noises," International Journal of Systems Science, 2014.
- [27] L. Cheng, Y. Wang, Z.-G. Hou, and M. Tan, "Stochastic consensus of linear multi-agent systems: Communication noises and Markovian switching topologies," in Proceedings of the 26th Chinese Control and Decision Conference Changsha, China, 2014, pp. 274-9.
- [28] Y. Wang, L. Cheng, Z.-G. Hou, M. Tan, and M. Wang, "Leader-following output consensus in a network of linear agents with communication noises," in Proceedings of the 19th World Congress of the International Federation of Automatic Control, Cape Town, South Africa, 2014.

作者简介

王云鹏 2010年于山东大学获理学学士学位。现就读于中国科学院自动化研究所，复杂系统管理与控制国家重点实验室，攻读控制理论与控制工程博士学位。目前的研究兴趣包括：多智能体的协同控制、分布式滤波、反馈神经网络等。

程 龙 2004年于南开大学获得工学学士学位，2009年于中国科学院自动化研究所获得控制理论与控制工程博士学位。现任中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室研究员，硕士生导师。当前的研究兴趣包括多智能体系统的协同控制、神经网络、最优化理论、以及这些理论在机器人上的应用等。

侯增广 1997年毕业于北京理工大学获博士学位，之后到中科院系统所做博士后研究，1999年到中科院自动化所工作，现为复杂系统管理与控制国家重点实验室研究员、副主任。当前的研究兴趣包括机器人、智能控制等。

基于事件驱动的多智能体系统 一致性理论研究进展

朱 伟, 孙春涛

重庆邮电大学系统理论及应用研究中心, 重庆 400065

摘要: 当今数字时代, 每个智能体常被嵌入高集成的数字微处理器, 用以数据获取、与其它智能体通信、执行控制等任务。由于受在线资源、计算能力、通信带宽等限制, 控制协议应建立在数字平台上。基于事件驱动的控制方法, 由于其在非周期采样控制方面的优越性, 近年了在多智能体系统统一性理论研究中获得了极大的关注。本文将对基于事件驱动的多智能体系统一致性理论的研究进展加以综述与展望。

关键词: 多智能体系统; 一致性; 基于事件

1 引言

网络和分布式计算的迅猛发展造就了从大型集成电路计算机到分布式网络工作站的一个跃变。在工业应用中, 人们期望能够应用许多价格低廉的小型设备之间的相互协调合作来替代原来造价昂贵, 设计复杂的大型集成电路设备。由此促进了多智能体系统分布式协调合作控制问题的理论研究且引起了越来越多学者的关注, 这主要归因于多智能体系统在各行各业的广泛应用, 如无人驾驶飞行器的合作控制, 编队控制, 分布式传感器网络, 卫星的姿态控制, 以及通信网络拥塞控制等。不同于传统的控制问题, 多智能体系统分布式协调合作控制的一个显著特点是控制协议只能是基于邻居之间局部信息的分布式控制, 它通过信息通讯等方式相互作用, 以达到期望的整体目标, 是一门综合性交叉学科, 涉及到控制、数学、物理、生物、计算机、通讯、机器人等, 是当前国际控制领域的前沿研究方向。多智能体系统分布式协调合作控制包含一致性、编队

控制、分布式滤波等问题, 其中一致性是基本问题, 也是广大学者关注的核心问题之一。

一致性问题的研究, 在管理科学领域起始于DeGroot的工作^[1], 在统计物理领域起始于Vicsek等人的研究工作^[2]。在系统控制领域, Borkar和Varaiya^[3], Tsitsiklis^[4], Tsitsiklis, Bertsekas和M. Athans^[5]较早研究了一致性问题及其在分布式决策系统中的应用。随后Jadbabaie, Lin和Morse^[6], Fax和Murray^[7], Olfati-Saber和Murray^[8]的工作为多智能体系统一致性问题的研究提出了系统的理论框架, 引起了来自数学、控制、系统科学等领域的学者的广泛关注, 多智能体系统一致性问题的研究得到了飞速发展。2006年以来, 针对这一研究有不少专刊^[9-11], 综述报告^[12-15], 以及专著^[16-20]对其进行跟踪报道, 当然在这些文献的参考文献中也能看到有关多智能体系统一致性研究的大量研究论文, 这里不再一一引述。从目前的文献中可以看出, 虽然不同学者研究的侧重点有所差异, 但都可以归纳为围绕以下三个“复杂性”(如图1^[21])的不同组合开展相应的研究工作。

项目资助: 第四批重庆市高等学校优秀人才支持计划项目

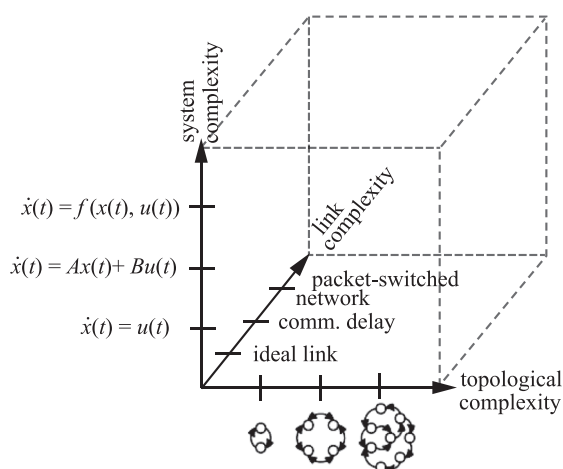


图1 多智能体系统一致性研究三维示意图

(1) 系统复杂性: 研究的系统从一阶积分器模型到一般线性模型、非线性模型、混合模型、奇异模型等, 智能体模型一般通过常微分方程、奇异微分方程或差分方程来描述。

(2) 拓扑复杂性: 体现出个体之间的连接关系及其信息交换(有向或无向), 从固定拓扑到切换拓扑, 包括时变拓扑、随机切换拓扑等。主要利用联合连通、联合生成树等建立多智能体达到一致的充分、必要条件。

(3) 连接复杂性: 体现在信息传输过程中受到影响或干扰的程度, 如理想连接(个体之间信息的接收不受干扰且即时接收), 信息的接收具有时滞以及数据丢包、随机干扰等。

当今数字时代, 每个智能体常被嵌入高集成的数字微处理器, 用以数据获取、与其它智能体通信、执行控制等任务。由于受在线资源、计算能力、通信带宽等限制, 控制协议应建立在数字平台上。传统处理方法是对邻居的信息进行周期采样, 该方法的好处在于系统分析与设计较为简单。目前, 关于周期性地施加控制输入的研究已相当成熟。然而, 这种与系统进程无关的采样方法同时也带来了通信带宽、计算时间等资源的浪费, 从通信角度看并不是最有效的。基于事件驱动控制(Event-Based Control)只在当某一控制量超过了某一给定的阈值(依赖于系统状态或时

间)时才更新控制量, 从而减少系统内传感器、控制器、执行器之间的频繁通信, 因而基于事件驱动的控制方法一方面能有效克服传统处理方法的保守性, 另一方面又能提高资源的利用率。由于其在非周期采样控制方面的优越性, 引起了理论与工程学界的重视^[22-28]。同时, 基于事件驱动的控制方法在多智能体系统一致性分析领域的应用也吸引了广大研究者的关注。本文将对现有文献基于事件驱动的多智能体系统一致性理论研究进展加以综述。关于事件驱动控制方法在网络控制系统以及别的系统方面的应用, 读者可以进一步参考文献[29], 本文综述的部分内容也要感谢文献[29]。

2 基于事件驱动的多智能体系统一致性研究

基于事件驱动的多智能体系统一致性研究需要解决的核心问题是如何设计事件发生器和系统控制协议, 既能使多智能体系统在利用有限资源下达到一致, 又能保证采样时间序列或整个闭环系统不存在Zeno现象(Zeno现象指在有限时间区间内发生无穷多次采样, 即采样时间间隔趋于零)。围绕这一问题, 现有文献在控制协议设计上主要分为基于全局信息或者局部(邻居)信息, 采用的主要是扰动分析法[30], 该方法把由事件产生的控制误差视为系统的扰动, 从而采用扰动分析法研究系统达到一致的条件。

采用集中式的基于事件驱动的控制方法, 文献[31]研究了一阶积分器模型的编队控制问题。文献[32]研究了一阶离散多智能体系统的问题, 利用Lyapunov函数法, 获得了由LMI(Linear Matrix Inequality)表示的一致性充分条件, 在一定的条件给出了闭环系统不存在Zeno现象的事件驱动条件。同时也给出了自驱动(self-triggered)控制算法以计算下一个驱动时刻。文献[33]研究了二阶积分器模型的一致性问题。采用集中式的基于事

件驱动的控制方法虽然相对容易执行,每个智能体却需要知道全局信息以确定下一个事件驱动时刻,在某种程度上并不能避免有限资源的浪费。因此,需要建立起非集中式的基于事件驱动的控制方法。文献[34, 35]利用观测器方法研究了事件驱动的具有领导者的一致性问。基于文献[23]的思想,针对一阶积分器多智能体模型,文献[36]利用状态依赖的驱动函数,给出了非集中式的事件驱动控制策略,获得了系统一致性的充分条件,而且也证明了事件驱动时间序列不存在Zeno现象。但该文实际上只论证了至少有一个个体不存在Zeno现象 (there exists at least one agent for which the next inter-event interval is strictly positive),对整个闭环系统并未给出严格证明。另外,文献[36]也提出了一种基于邻居的邻居的信息的自驱动控制算法以计算下一个驱动时刻。文献[37]研究了有向和加权通信拓扑下的基于事件驱动的平均一致性问题。然而,应该指出的是,对许多分布式基于事件驱动的控制方法来说,事件的驱动需要智能体知道其邻居的实时(连续)信息,这就使得每个智能体在每一个采样周期内都需广播其信息,从而导致了过多的能源消耗,在一定程度上与事件驱动方法的初衷有所违背。为避免智能体之间的连续通信,文献[38]对一阶积分器模型提出了分布式控制与通信策略,避免了连续通信问题,并论证了整个闭环系统不存在Zeno现象。文献[39]采用组合测量的方法,给出了基于事件驱动控制算法,研究了一阶积分器模型的集中问题,并提出了一种新的迭代算法,避免了对邻居状态的连续测量。文献[40]研究了基于事件驱动的一阶和二阶积分器模型的平均一致性问题,其事件驱动时刻由与状态独立的驱动函数来确定,避免了个体之间的连续通信。文献[41]研究了一般线性系统的基于事件驱动的一致性问题,避免了个体之间的连续通信。该文是建立在实践稳定性理论基础上,即一致性误差可以收敛到任意给定的邻域

范围之内。文献[42]采用变量替换方法,针对一般的线性系统,给出了事件驱动时间序列的确定,获得了固定和切换拓扑下系统一致的条件,并论证了闭环系统不存在Zeno现象。并将所得结果应用到编队控制中。文献[43]在完全耦合的条件下,对具有线性时不变内连子系统的网络动力系统研究了其一致性问题。另外,对于离散多智能体系统一致性问题也得到了研究^[44, 45]。

不同的智能体间的数据连接总是不完美的,总是存在时滞(包括输入时滞和通信时滞),它通常是由有限带宽,随机的传输延迟或者数据的丢失以及拓扑连接的不确定性所引起。基于事件驱动的控制只利用邻居内其它智能体在驱动时刻处的信息来使整个系统达到一致,对时滞显得更加敏感。如何在控制协议和驱动函数中考虑时滞是非常有必要的,已有一些学者对这一问题进行了一些研究。文献[46]利用事件驱动技巧,研究了具有时滞的混合阶(跟随者一阶模型,领导者二阶模型)的一致性问题。文献[47]研究了基于事件驱动的具有时滞的非线性多智能体模型的一致性问题。但文献[46]与文献[47]都未对整个闭环系统的Zeno现象进行讨论。文献[48]研究了基于事件驱动的具有时滞的一阶积分器模型。文献[49]研究了基于事件驱动的Markov通信时滞的离散多智能体模型。

3 结束语

本文主要对现有文献的基于事件驱动的多智能体系统一致性研究结果进行了综述。从对信息的使用角度有集中式和非集中式两种策略;从个体之间的通信要求来看,有连续通信和非连续通信、信息的采集是否有时滞情形;从来讨论模型角度来看,现有文献集中在一阶或二阶积分器模型。总之,对基于事件驱动的多智能体系统一致性的研究,问题集中在针对相应的模型,如何设计合理的事件驱动函数、驱动条件以及控制协

议,使得整个多智能体系统既能达到一致又能避免Zeno现象。基于以上分析,对今后的研究方向展望如下:

(1) 现有文献在闭环系统一致性方面主要采用的扰动分析法,该方法具有其优势但同时也在一定程度上也带来了结构上的保守性。基于事件驱动的多智能体系统在某种意义上就是脉冲控制系统,脉冲控制方法在基于事件驱动的网络控制系统中已有一些较好的研究成果,能否合理地将脉冲控制方法运用到多智能体系统的一致性理论研究中是一个值得研究的问题。

(2) 针对具体的模型,很显然事件不可能随意产生,即事件的生成应避免Zeno现象。也就是说,在有限时间内,事件发生的次数是有限的。另一方面若采样次数越少,则意味着控制器得到的反馈信息就越少,就易造成系统不能达到一致或收敛速度非常慢。当定义事件时,以上两个相互矛盾的因素应综合考虑。因此,如何定义事件,使得整个闭环系统既不产生Zeno现象,又能保证多智能体系统以较快的收敛速度达到一致是值得深入研究问题。在这一问题中,如何建立相应的数学模型,从而考虑系统的最优(尽量少的采样,尽快的收敛速度),是解决这一问题的关键。

(3) 现实中,多智能体系统很难被线性模型所描述,然而目前对多智能体系统的研究主要建立在其线性化模型的基础上。线性化技巧只能处理小的偏差或智能体的局部动态行为,因而研究非线性多智能体模型的一致性问题的现实意义。

(4) 另外,随机扰动、连接拓扑结构的变化、时滞等等也都是值得关注问题。

参 考 文 献

- [1] DeGroot M, Reaching a consensus, J. Amer. Statist. Assoc., 69(345), 1974: 118-121.
- [2] Vicsek, T., Czirók A., Jacob E., Cohen I. and Schochet O., Novel type of phase transitions in a system of self-driven particles, Phys. Rev. Lett., 75(6), 1995: 1226-1229.
- [3] Borkar V., Varaiya P., Asymptotic agreement in distributed estimation, IEEE Trans. Automat. Control, 27(3), 1982: 650-655.
- [4] Tsitsiklis J., Problems in decentralized decision making and computation, Ph.D. dissertation, Dept. Electr. Eng. Comput. Sci., Mass. Inst. Technol., Cambridge, 1984.
- [5] Tsitsiklis J., Bertsekas D. and Athans M., Distributed asynchronous deterministic and stochastic gradient optimization algorithms, IEEE Trans. Automat. Control, 31(9), 1986: 803-812.
- [6] Jadbabaie A., Lin J. and Morse A., Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules, IEEE Trans. Automat. Control, 48(6), 2003: 988-1001.
- [7] Fax J., Murray R., Information flow and cooperative control of vehicle formations, IEEE Trans. Automat. Control, 49(9), 2004:1465-1476.
- [8] Olfati-Saber R., Murray R., Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays, IEEE Trans. Automat. Control, 49(9), 2004: 1520-1533.
- [9] IEEE Trans. Control Syst. Technol., 15(4), 2007.
- [10] SIAM J. Control Optimiz., 48(1), 2009.
- [11] Int. J. Robust Nonlinear Control, 21(12), 2011.
- [12] Cao Y., Yu W., Ren W. and Chen G., An overview of recent progress in the study of distributed multi-agent coordination, IEEE Trans. Industrial Informatics, 9(1), 2013:427-438.
- [13] Ren W., Beard R. and Atkins E, Information consensus in multivehicle cooperative control, IEEE Control Syst. Mag., 27(2), 2007: 71-82.
- [14] Murray R., Recent research in cooperative control of multivehicle systems, J. Dynam. Syst., Meas., Control, 129(5), 2007: 571-583.
- [15] You K. and Xie L., Survey of Recent Progress in Networked Control Systems, Acta Automatica Sinica, 39(2), 2013: 101-117.
- [16] Cooperative Control of Distributed Multi-Agent Systems, Shamma J.(Ed.), Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2008.
- [17] Qu Z., Cooperative Control of Dynamical Systems: Applications to Autonomous Vehicles. London, U.K.: Springer-Verlag, 2009.
- [18] Mesbahi M., Egerstedt M., Graph Theoretic Methods for Multi-agent Networks. Princeton, NJ: Princeton Univ., 2010.
- [19] Ren W., Cao Y., Distributed Coordination of Multi-Agent Networks. London, U.K.: Springer-Verlag, 2011.
- [20] Bai H., Arcak M. and Wen J., Cooperative Control Design: A Systematic, Passivity-Based Approach. New York: Springer-Verlag, 2011.
- [21] Wieland P., From static to dynamic couplings in consensus and synchronization among identical and non-identical systems, Ph.D Thesis, University of Stuttgart, 2010.
- [22] Arzen, K. E. , A simple event-based PID controller. Proceedings of the 14th IFAC World Congress, Beijing, China, Vol. 18, pp. 423-428, 1999.
- [23] Tabuada P., Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control

- tasks, IEEE Trans. Automat. Control, 52(9), 2007: 1680-1685.
- [24] Åström K., Event based control, in Analysis and Design of Nonlinear Control Systems, A. Astolfi and L. Marconi, Eds. Springer Verlag, 2008: 127-147.
- [25] Anta A., Tabuada P., To sample or not to sample: self-triggered control for nonlinear systems, IEEE Trans. Automat. Control, 55(9), 2010: 2030-2042.
- [26] Lunze J., Lehmann D., A state-feedback approach to event-based control, Automatica, 46(1), 2010: 211-215.
- [27] Wang X., Lemmon M., Event-triggering distributed networked control systems, IEEE Trans. Automat. Control, 56(3), 2011: 586-601.
- [28] Lehmann D., Lunze J., Event-based control with communication delays and packet losses, International Journal of Control, 85(5), 2012: 563-577.
- [29] Q. Liu, Z. Wang, X. He, and D. Zhou, A survey of event-based strategies on control and estimation, Systems Science & Control Engineering: An Open Access Journal, Vol. 2, 90-97, 2014.
- [30] Khalil H.K., Nonlinear Systems (Third Edition), Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.
- [31] T. Tang, Z. Liu, and Z. Chen, Event-triggered formation control of multi-agent systems. Proceedings of the 30th Chinese control conference, Yantai, China, pp. 4783-4786, 2011.
- [32] X. Chen and F. Hao, Event-triggered average consensus control for discrete-time multi-agent systems. IET Control Theory & Applications, 16(6), 2012: 2493-2498.
- [33] J. Hu, Second-order event-triggered multi-agent consensus control. Proceedings of the 31st Chinese control conference, Hefei, China, pp. 6339-6344, 2012.
- [34] J. Hu, G. Chen, and H. X. Li, Distributed event-triggered tracking control of second-order leader-follower multi-agent systems. Proceedings of the 30th Chinese control conference, Yantai, China, pp. 4819-4824, 2011.
- [35] J. Hu, G. Chen, and H. X. Li, Distributed event-triggered tracking control of leader-follower multi-agent systems with communication delays. Kybernetika, 47(4), 2011: 630-643.
- [36] D. Dimarogonas, E. Frazzoli, and K. Johansson, Distributed event-triggered control for multi-agent systems, IEEE Trans. Automat. Control, 57(5), 2012: 1291-1297.
- [37] Z. Liu, Z. Chen, and Z. Yuan, Event-triggered average consensus of multi-agent systems with weighted and direct topology. Journal of Systems Science and Complexity, 25(5), 2012: 845-855.
- [38] Garcia E., Cao Y., Yu H., Antsaklis P. and Casbeer D., Decentralised event-triggered cooperative control with limited communication, International Journal of Control, 86(9), 2013: 1479-1488.
- [39] Y. Fan, G. Feng, Y. Wang and C. Song, Distributed event-triggered control of multi-agent systems with combinational measurements, Automatica, 49(2), 2013: 671-675.
- [40] G. Seyboth, D. Dimarogonas, and K. Johansson, Event-based broadcasting for multi-agent average consensus, Automatica, 49(1), 2013: 245-252.
- [41] W. Zhu, Z.P. Jiang, and G. Feng, Event-Based Consensus of Multi-agent Systems with General Linear Models, Automatica, 50(2), 2014: 552-558.
- [42] Zhang Z., Hao F., Zhang L. and Wang L., Consensus of linear multi-agent systems via event-triggered control, International Journal of Control, 87(6), 2014: 1243-1251.
- [43] M. Guinaldo, D. Dimarogonas, K. Johansson, J. Sanchez, and S. Dormido, Distributed event-based control for interconnected linear systems, In: 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Orlando, FL, USA, pp. 2553-2558, 2011.
- [44] X. Yin, D. Yue, and S. Hu, Distributed event triggered control of discrete-time heterogeneous multi-agent systems. Journal of the Franklin Institute, 350(3), 2013: 651-669.
- [45] X. Meng and T. Chen, Event based agreement protocols for multi-agent networks, Automatica, 49(7), 2013: 2125-2132.
- [46] J. Hu, G. Chen, and H. Li, Distributed event-triggered tracking control of leader-follower multi-agent systems with communication delays, Kybernetika, 47(4), 2011: 630-643.
- [47] H. Li, C. Ming, S. Shen, and W.K. Wong, Event-triggered control for multi-agent systems with randomly occurring nonlinear dynamics and time-varying delay, Journal of the Franklin Institute, 351(5), 2014: 2582-2599.
- [48] H. Wang, X. Chen, and F. Hao, Event-triggered control strategy for multi-agent systems with time-varying delays, In: 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Guiyang, China, pp. 772-777, May 2013.
- [49] X. Yin and D. Yue, Event-triggered tracking control for heterogeneous multi-agent systems with Markov communication delays. Journal of the Franklin Institute, 350(5), 2013: 1312-1334.

作者简介

朱伟 男, 教授, 硕士生导师。2004年硕士毕业于重庆邮电大学控制理论与控制工程专业, 2007年于四川大学应用数学专业获博士学位, 2008年-2010年在中科院数学与系统科学院从事博士后研究工作, 2012-2013纽约大学工学院访问学者, 2014年2月香港城市大学访问学者。目前主要从事多智能体系统集体行为的研究。

孙春涛 男, 讲师, 硕士研究生。目前主要从事基于事件驱动的多智能体系统一致性理论研究。

一类非线性多智能体系统的自适应神经网络一致跟踪控制

高 颖¹, 李 静¹, 文国兴², 刘艳军¹

1. 辽宁工业大学 理学院, 锦州 121001; 2. 澳门大学 科技学院, 澳门

摘要: 本文针对一类带有建模不确定性和外部干扰的非线性多智能体系统提出了一种新的鲁棒自适应一致跟踪控制方法。径向基函数神经网络(RBFNNs)用于逼近智能体动态的未知非线性函数。与现有的非线性多智能体系统的神经网络一致算法相比, 本文所提出的一致控制方法只需要少量的可调参数, 因此, 在线计算量大大减轻。此外, 通过在线更新神经网络逼近误差的估计, 所提出的控制方法可以针对模型的不确定性增强系统的鲁棒性。事实证明, 多智能体系统的所有信号是一致有界, 一致跟踪误差收敛到零的一个小邻域内。仿真用于验证所提出控制方法的有效性。

关键词: 鲁棒自适应控制; 一致跟踪控制; 神经网络; 非线性多智能体系统

1 引言

近几十年来, 由于在不同领域的广泛应用, 多智能体系统的协调控制已经引起相当大的关注, 例如多机器人^[1], 无人机^[2], 自主水下航行器^[3], 宇宙飞船^[4], 等等。协调控制的一个基本的问题是一致控制, 这意味着要设计一个合适的网络协议以便所有智能体渐近地实现一致。多智能体系统的一致控制问题作为一个新的研究课题, 由于其广泛的应用已成为控制理论的一个重要研究方向^[5-6]。

一致控制的一个有效的实现策略是leader-following一致。Leader是一个独立的智能体, 其它智能体作为follower, 通过跟踪leader的运动实现一致。事实上, leader-following策略最初的启发是在一些生物系统中, 是一种节能机制^[7], 并且能够便于个体间的沟通和定位^[8]。

最近, 基于矩阵理论, 代数图论和控制理论, 针对线性多智能体系统的leader-following一致问题, 已呈现出许多有意义的研究成果^[9-15]。众所周知, 非线性在大多数实际控制系统中是一个固有的特性, 它比线性特性更复杂, 更有挑战性。对于非线性多智能体系统, 一些有价值的结果已经出现, 并受到了广泛的关注^[16-20]。在文献[16]中, 陆等人针对一类具有脉冲耦合的定向动态网络提出了一种信号脉冲控制方法。通过几个简单的标准, 可以得出结论, 单脉冲控制可以稳定类脉冲动力网络。针对一类具有非一致未知非线性动态的多智能体系统, 在文献[17]中, 通过使用相邻智能体的相对位置反馈和局部一致误差反馈, 提出了一种分散式自适应leader-following一致算法。文献[18]针对一类具有虚拟leader的多个非线性动态移动智能体, 提出了一种二阶一致算法。

研究工作的主要贡献是发展了具有定向拓扑结构的非线性多智能体。在文献[19, 20]中, 针对非线性多智能体系统提出了一种一致控制方法。由于每个智能体的动态中包含了耦合项, 因此仅通过控制小部分的智能体即可实现一致控制。一致控制策略的主要优势是大大降低了控制成本。然而, 所有这些著名的一致控制方法都没有考虑多智能体系统鲁棒性的提高。尽管自适应鲁棒控制在跟踪控制领域已经相当成熟, 例如^[23-25], 也呈现了一些关于自适应鲁棒一致控制的研究成果。

神经网络(NNs)具有万能逼近特性^[21], 因此神经网络已经成为非线性动态系统一个强有力的工具。除此之外, 模糊逻辑系统(FLS)也有逼近性能^[22]。利用神经网络或模糊逻辑系统杰出的函数逼近能力, 非线性系统的自适应跟踪控制得到了深入的研究^[23-28]。最近, 文献[29]针对一类具有模型不确定性的非线性多智能体系统, 提出了一种基于神经网络的leader-follower一致控制, 并得到广泛的关注。

然而, 对于大多数现有的非线性多智能体系统的自适应神经网络一致控制, 例如^[29-32], 可调节参数的数量依赖于神经网络输入神经元的数目(或模糊系统隐藏层的节点数目)。一般来说, 为了提高逼近精度, 输入神经元或隐藏层节点的数目必须足够大。因此, 如果文献[29-32]中所提出的方法被用于稳定相应的非线性多智能体系统, 将会增加在线计算量。而从实际应用的角度考虑, 运行成本也随之增加。

本文, 针对一类具有建模不确定性及外部干扰的非线性多智能体系统, 研究了一种鲁棒自适应一致跟踪控制。在设计过程中, RBFNN用于自适应逼近未知函数, 以抵消系统动态的未知非线性函数所产生的不确定性。研究工作的主要贡献如下: (1) 与现有的一致算法相比, 自适应参数的数目大大减少, 因为每个智能体只需要自适应地更新一个标量可调参数, 而这个参数是最优神

经权重向量范数的估计; (2) 通过对神经逼近误差估计的自适应调节, 易知, 这个自适应一致控制方法可以增强系统的鲁棒性。最后, 事实证明, 多智能体系统的所有信号是一致有界, 且一致跟踪误差收敛到零的一个小邻域内。

本文的结构安排如下。第2节, 给出了非线性多智能体系统的描述, 及相关的符号, 假设, 引理和初期准备。第3节, 设计鲁棒自适应一致控制, 并证明结果的稳定性。第4节, 数值仿真例子用于验证所提出的一致控制方法的有效性。第5节, 陈述本文结论。

2 问题陈述和初期准备

考虑一类非线性多智能体系统, 它由 n 个智能体和一个leader组成。每个智能体的动态描述如下:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= f_i(x_i(t)) + g_i(x_i(t))u_i(t) + \\ &\Delta_i(t, x_i(t)) \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (1)$$

这里 $x_i(t) \in R$ 是状态变量, $f_i(x_i(t)), g_i(x(t)): R \rightarrow R$ 是未知光滑非线性函数, $u_i(t) \in R$ 是控制输入, $\Delta_i(t, x_i(t)): R \rightarrow R$ 是未知外部干扰。

非线性多智能体系统的leader是一个独立的智能体, 它描述为以下的非线性动态:

$$\dot{x}_r(t) = f_r(t) \quad (2)$$

这里 $x_r(t) \in R$ 是状态变量, $f_r(t) \in R$ 是一个未知光滑非线性函数。

定义1^[14]: 对于每个智能体, 如果存在一个状态反馈控制器 u_i 使得在任何初始条件下, 闭环系统满足: $\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_r(t)\| = 0, i = 1, \dots, n$, 我们说多智能体系统实现了leader-following一致, 其中 $\|\cdot\|$ 代表2-范数, 被用于整篇文章。

备注1: 大多数现有的关于非线性多智能体系统的文献, 仅假设其控制增益 $g_i(\cdot)$ 等于1或常数, 例如^[16-20, 29-33]。而本文中, 则考虑了更一般的

情况, 即把 $g_i(\cdot)$ 看作是一个未知非线性函数。

备注2: 杨氏不等式: $ab \leq \frac{a^2}{2} + \frac{b^2}{2}$ 。本文将多次应用这个不等式。

假设1: 对于 $1 \leq i \leq n$, 非线性函数 $g_i(x_i(t))$ 是未知的, 但是其符号是已知的, 即存在常数 $\underline{g}_i$ 和 $\bar{g}_i$ 使得 $\underline{g}_i \leq g_i(x_i) \leq \bar{g}_i$, $i = 1, \dots, n$ 。不失一般性, 更进一步地假定 $g_i(x_i) \geq \bar{g}_i > 0, i = 1, \dots, n$ 。

假设2: 对于 $1 \leq i \leq n$, 存在正的未知连续函数 $\rho_i(x_i(t))$, $1 \leq i \leq n$, 使得

$$|\Delta_i(t, x)| \leq \rho_i(x_i(t)), i = 1, \dots, n \quad (3)$$

假设3: Leader 的非线性向量函数 $f_r(t) \in R$ 是有界的, 存在一个正常数 $\alpha > 0$, 即 $|f_r(t)| \leq \alpha$, $\forall t \in R^+$ 。

本文中, 控制目标是对于每个智能体, 设计自适应控制器 $u_i(t) \in R, i = 1, \dots, n$, 最终实现多智能体系统的leader-following一致控制。

备注3: 假设1是合理的, 因为 $g_i(x_i(t))$ 非零是多智能体系统的可控条件。在假设1中, 为了便于分析, 需要给出常数 $\underline{g}_i, \bar{g}_i$, 而对于一致控制的设计, 它们的真实值是无需已知的。同样地, 假设3中给出的常数 α 也是未知的。

备注4: 通过非线性微分方程可以描述一些实际的多智能体系统, 例如无人机, 传感器网络, 卫星集群, 机器人团队, 复杂网络等的编队控制。

2.1 图论

$G = (V, \mathcal{E}, A)$ 是一个无向图, 这里 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 是节点的集合, $\mathcal{E} \subseteq V \times V$ 是边的集合, $A = [a_{ij}]$ 是加权邻接矩阵, 其元素是非负的。节点 v_i 代表第 i 个智能体, 节点的指标属于一个有限指标集 $I = \{1, 2, \dots, n\}$ 。 G 的一个边定义为 $e_{ij} = (v_j, v_i)$, 这里边 e_{ij} 的节点 v_j 看作是边的结束, 而边 e_{ij} 的节点 v_i 看作是边的开始。 $e_{ij} = (v_j, v_i) \in \mathcal{E}$ 当且仅当智能体 i 和 j 之间有信息交换时, 邻接

元素 a_{ij} 描述了通信质量。规定 $a_{ii} = 0$ 和 $a_{ij} = a_{ji} \geq 0$ 当且仅当 $e_{ij} \in \mathcal{E}$; 如果 $e_{ij} \notin \mathcal{E}$, 则 $a_{ij} = 0$ 。如果边 $e_{ji} = (v_i, v_j) \in \mathcal{E}$, 那么节点 v_j 的邻节点是 v_i 。 b_i 代表了智能体 i 和leader之间的通信质量, 如果两者之间存在信息交换, 那么 $b_i > 0$; 否则 $b_i = 0$, 其中至少存在一个智能体与leader互通, 即 $b_1 + b_2 + \dots + b_n > 0$ 。边序列 $(v_{i_1}, v_{i_2}), (v_{i_2}, v_{i_3}), \dots, (v_{i_{k-1}}, v_{i_k})$ 称为节点 v_{i_1} 和节点 v_{i_k} 之间的路径。如果任意两个节点 $v_i, v_j \in V$, 那么在它们之间存在一个路径, 此时无向图 G 被称为是连通图。

图 G 的拉普拉斯矩阵 L 定义为:

$$L = D - A \quad (4)$$

这里 $D = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_n)$, $d_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}$ 。

引理1^[34]: $L = (l_{ij}) \in R^{n \times n}$ 是一个不可约矩阵,

$i \neq j$ 时 $l_{ij} = l_{ji} < 0$, 并且 $l_{ii} = -\sum_{j=1}^n l_{ij}$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

矩阵 $\tilde{L} = \begin{pmatrix} l_{11} + b_1 & \dots & l_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{n1} & \dots & l_{nn} + b_n \end{pmatrix}$ 的所有特征值都是正

的, 这里 $b_1, b_2, \dots, b_n$ 均是非负常数, 并且 $b_1 + b_2 + \dots + b_n > 0$ 。

引理2^[35,36]: 对于 $\forall t \geq 0$, 函数 $E(t) > 0$ 是一个连续函数, 且 $\dot{E}(t) \leq -\alpha E(t) + \beta$, 这里 α 和 β 是正常数, 则 $E(t) \leq E(0)e^{-\alpha t} + \frac{\beta}{\alpha}(1 - e^{-\alpha t})$ 。

2.2 径向基函数神经网络 (RBFNNs) 和函数逼近

逼近

在一致控制设计中, 由于RBFNN具有万能逼近性能, 将它用于函数逼近。RBFNN逼近连续函数 $\phi(z): R^q \rightarrow R$, 则有: $\phi(z) = W^T S(z)$

这里 $W \in R^l$ 是一个可调加权向量, l 代表神经元的数目, $S(z) = [s_1(z), \dots, s_l(z)]^T$ 是一个基函数向量, 同时有 $s_i(z) = \exp\left[\frac{-(z - \mu_i)^T(z - \mu_i)}{\phi_i^2}\right]$,

$i = 1, 2, \dots, l$, 其中 $\mu_i = [\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{il}]^T$ 是可行域的中心, ϕ_i 是 Gaussian 函数的宽度, $z \in \Omega_z \subset R^q$ 是输入向量。

众所周知, 在紧集 Ω 内, RBFNN 可以精确地逼近任意连续函数。基于这个特性, 给定一个光滑向量函数 $\varphi(z) \in R$, 存在理想的权重 W^* , 则 RBFNN 逼近光滑向量函数 $\varphi(z)$, 如下:

$$\varphi(z) = W^{*T} S(z) + \varepsilon(z) \quad (5)$$

这里 $W^* \in R^l$ 是最优神经网络权重向量, l 是神经元的数目, $\varepsilon(z) \in R$ 是逼近误差, 且有界, 即存在一个正常数 ε_N , 使得 $|\varepsilon(z)| \leq \varepsilon_N$ 。神经网络的逼近误差等同于未知光滑函数 $\varphi(z)$ 与理想逼近 $W^{*T} S(z)$ 的最小可能误差。

理想权重向量 W^* , 仅是为了便于分析而虚拟的一个量。 W^* 是 W 的一个理想值, 确保对所有的 $z \in \Omega_z \subset R^l$, 使 $|\varepsilon(z)|$ 达到最小, 即:

$$W^* \triangleq \arg \min_{W \in R^{p \times m}} \left\{ \sup_{z \in \Omega_z} \|\varphi(z) - W^T S(z)\| \right\} \quad (6)$$

通过增加输入神经元的数量, 可以减少神经网络逼近误差。逼近结果表明, 在一个紧集内, 若使 $|\varepsilon(z)|$ 可以任意小, 那么神经网络的节点数量 l 必须足够大。

3 一致性协议

$\bar{x}_i(t) = x_i(t) - x_r(t)$ 表示第 i 个智能体和 leader (2) 之间的跟踪误差, 那么一致跟踪误差定义如下:

$$e_i(t) = \sum_{j=1}^n (a_{ij}(x_i(t) - x_j(t)) + b_i(x_i(t) - x_r(t))) \in R \quad i = 1, \dots, n \quad (7)$$

其中, a_{ij} 是图的邻接矩阵 A 的第 i 行, 第 j 列的元素, 等式可以写作:

$$e_i(t) = \sum_{j=1}^n (a_{ij}(\bar{x}_i(t) - \bar{x}_j(t)) + b_i \bar{x}_i(t)) \in R \quad (8)$$

$$i = 1, \dots, n$$

引理3^[39]: 设定无向图 G 是连通图, 且 $B \neq 0$, 这里 $B = \text{diag}(b_1, b_2, \dots, b_n)$ 。则 $\|E(t)\| = 0$ 当

且仅当 $x_i(t) - x_r(t) = 0, i = 1, \dots, n$ 时, 其中 $E(t) = (e_1(t), \dots, e_n(t))^T \in R^n$ 。

我们定义一个光滑的标量函数:

$$V_x(t) = \frac{1}{2} X^T (L + B) X \quad (9)$$

其中, $X = (\bar{x}_1(t), \bar{x}_2(t), \dots, \bar{x}_n(t))^T \in R^n$, $B = \text{diag}(b_1, \dots, b_n)$, b_i 是智能体 i 和 leader 之间的通信量。根据引理1和矩阵理论, $L + B$ 是一个正定矩阵, 即 $V_x(t)$ 是一个正定函数。

因为 $L + B$ 是正定对称矩阵, 根据矩阵理论, 它有 n 个正特征值, 并可以升序排列 (即 $0 < \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_n$), 而 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 是矩阵 L 对应正特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 的特征向量, 它可看作是属于 R^n 的一组正交基。 $Q = (q_1, \dots, q_n) \in R^{n \times n}$, 那么我们有 $Q^T Q = Q Q^T = I_n$, 且 $Q^T = Q^{-1}$ 。

根据以上分析, 光滑标量函数 $V_x(t)$ 变成:

$$\begin{aligned} V_x(t) &= \frac{1}{2} X^T (L + B) X = \frac{1}{2} X^T Q^T P Q X \\ &= \frac{1}{2} X^T Q^T P Q Q^T P^{-1} Q Q^T P Q X \\ &= \frac{1}{2} X^T (L + B)^T Q^T P^{-1} Q (L + B) X \\ &= \frac{1}{2} E^T(t) M E(t) \end{aligned} \quad (10)$$

这里 $P = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$, 且 $M = Q^T P^{-1} Q$ 是正定矩阵。根据公式 (10), 得到:

$$\frac{\lambda_{\min}(M)}{2} \sum_{i=1}^n e_i^2 \leq V_x \leq \frac{\lambda_{\max}(M)}{2} \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (11)$$

其中, $\lambda_{\min}(M)$ 和 $\lambda_{\max}(M)$ 分别是矩阵 M 的最小和最大的特征值。

基于拉普拉斯矩阵 L 和对角矩阵 B 的定义, 标量函数 $V_x(t)$ 可以转化为以下的等式:

$$\begin{aligned} V_x(t) &= \frac{1}{2} X^T(t) (L + B) X(t) \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n e_i(t) \bar{x}_i(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \bar{x}_i(t) e_i(t) \end{aligned} \quad (12)$$

根据 (1) 和 (2), 可以获得误差动态如下:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}_i(t) &= f_i(x_i(t)) - f_r(t) + g(x_i(t)) \\ u_i(t) + \Delta_i(t, x) & \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (13)$$

根据等式, $V_x(t)$ 的导数是:

$$\dot{V}_x(t) = \sum_{i=1}^n e_i(t) (f_i(x_i(t)) - f_i(t) + g_i(x_i(t))u_i(t) + \Delta_i(t, x_i(t))) \quad (14)$$

基于假设2, 假设3和杨氏不等式, 有下列不等式:

$$-e_i(t)f_i(t) \leq e_i^2(t) + \frac{\alpha^2}{4} \quad (15)$$

$$e_i(t)\Delta_i(t, x_i(t)) \leq e_i^2(t)\rho_i^2(x_i(t)) + \frac{1}{4} \quad (16)$$

将式(14)和式(15)代入式(13)有:

$$\dot{V}_x(t) \leq \sum_{i=1}^n e_i(t) (F_i(z_i(t)) + g_i(x_i(t))u_i(t)) + \frac{n(\alpha^2 + 1)}{4} \quad (17)$$

其中, $F_i(z_i(t)) = f_i(x_i(t)) + e_i(t) + e_i(t)\rho_i^2(x_i(t))$, $z_i(t) = [e_i(t), x_i(t)]^T \in \Omega_{z_i}$, Ω_{z_i} 是紧集。

在假设下, 系统函数 $f_i(x_i)$, $g_i(x_i)$, $\rho_i(x_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$ 是已知的, 光滑标量函数 $V_x(t)$ 选作为李雅普诺夫函数, 设计稳定的一致控制器 $u_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, n$ 如下:

$$u_i(t) = -k_i e_i(t) - g_i^{-1}(x_i(t))F_i(z_i(t)) \quad (18)$$

其中, $k_i \geq k_i^* g_i^{-1}$, $i = 1, \dots, n$, k_i^* 是正常数。

把式(17)代入式(16), 有

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq -\sum_{i=1}^n k_i g_i(x_i(t))e_i^2(t) + \frac{n(\alpha^2 + 1)}{4} \\ &\leq -\sum_{i=1}^n k_i^* e_i^2(t) + \beta \end{aligned} \quad (19)$$

这里 $\beta = \frac{n(\alpha^2 + 1)}{4}$ 。

根据不等式(11), 得到

$$\dot{V}_x(t) \leq -rV_x(t) + \beta \quad (20)$$

其中, $r = \frac{2k}{\lambda_{\max}(M)}$, $k = \min\{k_1^*, k_2^*, \dots, k_n^*\}$ 。

根据引理2和式(19), 可以得到

$$V_x(t) \leq V_x(0)e^{-rt} + \frac{\beta}{r}(1 - e^{-rt}) \quad (21)$$

由于 r 依赖于设计参数 k_i^* , 给定任一 $\xi > 0$, 如若使 r 足够大, 存在 $T > 0$ 使得当 $\forall t > T$ 时, 有 $\{V_x(t) \mid |V_x(t)| \leq \xi\}$ 。依据等式和引理3, 我们可以得出结论, 多智能体系统的所有智能体可以

跟踪leader到零的一个小邻域内, 即实现了多智能体系统的leader-following一致控制。

尽管所提出的控制器(17)可以保证获得控制目标, 但是控制器不能直接用于非线性多智能体系统的leader-following一致控制, 因为 $f_i(x_i)$, $g_i(x_i)$, $\rho_i(x_i)$ 是完全未知的。显然, 在紧集 Ω_{z_i} 上, $F_i(z_i(t))$ 是连续的, 利用RBFNN逼近如下:

$$F_i(z_i(t)) = W_i^{*T} S_i(z_i(t)) + \varepsilon_i^*(z_i) \quad (22)$$

其中, $W_i^* \in R^{l_i}$ 是未知的理想神经网络权重向量, l_i 是输入神经元的数目, $S_i(z_i(t)) \in R^{l_i}$ 是基函数向量, $\varepsilon_i^*(z_i) \in R$ 是逼近误差, 且存在正常数 ε_i , 满足 $|\varepsilon_i^*(z_i)| \leq \varepsilon_i$ 。

鲁棒自适应一致控制器如下:

$$\begin{aligned} u_i(t) &= -k_i e_i(t) - \frac{1}{2\eta_i} \hat{\theta}_i(t) \|S_i(z_i(t))\|^2 \\ &\quad e_i(t) - \frac{1}{2\zeta_i^2} \hat{\delta}_i(t) e_i(t) \end{aligned} \quad (23)$$

这里 $e_i(t)$ 定义于等式中, $\hat{\theta}_i(t) \in R$ 是未知自适应常数 θ_i 的估计, 且 $\theta_i = \bar{g}_i^{-1} \|W_i^*\|^2$, $\hat{\delta}_i \in R$ 是未知自适应常数 δ_i 的估计, 且 $\delta_i = \bar{g}_i^{-1} \varepsilon_i^2$, $\eta_i > 0$, $\zeta_i > 0$ 是设计常数。

选择以下自适应律:

$$\dot{\hat{\theta}}_i(t) = \frac{\gamma_i}{2\eta_i} \|S_i(z_i(t))\|^2 e_i^2(t) - \sigma_{\theta_i} \hat{\theta}_i(t) \quad (24)$$

$$\dot{\hat{\delta}}_i(t) = \frac{\kappa_i}{2\zeta_i^2} e_i^2(t) - \sigma_{\delta_i} \hat{\delta}_i(t) \quad (25)$$

其中, γ_i , η_i , σ_{θ_i} , κ_i , ζ_i , σ_{δ_i} , $i = 1, \dots, n$ 是正的设计常数。

备注5: 在一致控制器中, 可调参数 $\hat{\theta}_i(t) \in R$ 源于最优神经网络权重向量 W_i^* 的范数, 可调参数 $\hat{\delta}_i(t) \in R$ 源于 ε_i , 而 ε_i 是 $\varepsilon_i^*(z_i)$ 的界。因为在这个一致控制中, 对每一个智能体, 不管神经元的数量多少, 只有标量参数被自适应在线更新。因此其计算量远小于大多数现有的自适应一致控制方法。从实际应用的角度来看, 在实际的多智能体工程中, 该算法也便于实现。

备注6: 在自适应一致控制器的设计过程中, 由于逼近误差的估计也可以通过进行自适应地调

节^[37-39], 因此多智能体控制系统的鲁棒性可以得到改善。

下面的定理描述了神经网络一致控制器 (22) 的控制性能。

定理1: 考虑带有leader的非线性多智能体系统 (1), 满足假设1-3, 多智能体系统 (1) 的通信图是一个无向连通图, 选择 (22) 作为一致控制器, 选择 (23), (24) 作为自适应律, $x_i(0)$, $\hat{\theta}_i(0)$ 和 $\hat{\delta}_i(0)$ 有界的初始条件, 则多智能体系统的所有信号半全局一致最终有界, 且最终实现多智能体系统的leader-following一致控制。

证明: 选择李雅普诺夫函数如下:

$$V(t) = V_x(t) + \sum_{i=1}^n \frac{\bar{g}_i}{2\gamma_i} \tilde{\theta}_i^2(t) + \sum_{i=1}^n \frac{\bar{g}_i}{2\kappa_i} \tilde{\delta}_i^2(t) \quad (26)$$

其中, $\tilde{\theta}_i(t) = \hat{\theta}_i(t) - \theta_i$, $\tilde{\delta}_i(t) = \hat{\delta}_i(t) - \delta_i$, $i = 1, \dots, n$ 。简单起见, 在下面的公式中省略时间变量 t 。

根据式 (16), $V(t)$ 的时间导数是

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & \sum_{i=1}^n e_i (F_i(z_i) + g_i(x_i) u_i) + \\ & \frac{n(\alpha^2 + 1)}{4} + \sum_{i=1}^n \frac{\bar{g}_i}{\gamma_i} \tilde{\theta}_i \dot{\theta}_i + \sum_{i=1}^n \frac{\bar{g}_i}{\kappa_i} \tilde{\delta}_i \dot{\delta}_i \end{aligned} \quad (27)$$

将式 (21), 式 (23), 式 (24) 代入式 (26), 有

$$\begin{aligned} V(t) \leq & \sum_{i=1}^n (e_i W_i^{*T} S_i(z_i) + e_i \varepsilon_i^* + e_i g_i(x_i) u_i) + \\ & \sum_{i=1}^n \frac{\bar{g}_i}{\gamma_i} \tilde{\theta}_i \dot{\theta}_i + \sum_{i=1}^n \frac{\bar{g}_i}{\kappa_i} \tilde{\delta}_i \dot{\delta}_i + \frac{n(\alpha^2 + 1)}{4} \leq \\ & \sum_{i=1}^n (e_i W_i^{*T} S_i(z_i) + \varepsilon_i |e_i| + e_i g_i(x_i) u_i) + \\ & \sum_{i=1}^n \tilde{\theta}_i \left[\frac{\bar{g}_i}{2\eta_i^2} \|S_i(z_i)\|^2 e_i^2 - \frac{\bar{g}_i}{\gamma_i} \sigma_{\theta_i} \hat{\theta}_i \right] + \\ & \sum_{i=1}^n \tilde{\delta}_i \left[\frac{\bar{g}_i}{2\zeta_i^2} e_i^2 - \frac{\bar{g}_i}{\kappa_i} \sigma_{\delta_i} \hat{\delta}_i \right] + \frac{n(\alpha^2 + 1)}{4} \end{aligned} \quad (28)$$

利用以下事实

$$e_i W_i^{*T} S_i(x_i) \leq \frac{\bar{g}_i}{2\eta_i^2} \bar{g}_i^{-1} (e_i W_i^{*T} S_i(x_i))^2 + \frac{\eta_i^2}{2}$$

$$\begin{aligned} & \leq \frac{\bar{g}_i}{2\eta_i^2} \bar{g}_i^{-1} \|W_i^*\|^2 \|S_i(z_i)\|^2 e_i^2 + \frac{\eta_i^2}{2} \\ & = \frac{\bar{g}_i}{2\eta_i^2} \theta_i \|S_i(z_i)\|^2 e_i^2 + \frac{\eta_i^2}{2}, \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} |e_i| \varepsilon_i & \leq \frac{\bar{g}_i}{2\zeta_i^2} \bar{g}_i^{-1} (|e_i| \varepsilon_i)^2 + \frac{\zeta_i^2}{2} \leq \\ & \frac{\bar{g}_i}{2\zeta_i^2} \bar{g}_i^{-1} \varepsilon_i^2 e_i^2 + \frac{\zeta_i^2}{2} = \frac{\bar{g}_i}{2\zeta_i^2} \delta_i e_i^2 + \frac{\zeta_i^2}{2}, \end{aligned} \quad (30)$$

不等式 (27) 可以改写为

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & \sum_{i=1}^n \left(\frac{\bar{g}_i}{2\eta_i^2} \theta_i \|S_i(z_i)\|^2 e_i^2 + \frac{\eta_i^2}{2} + \frac{\bar{g}_i}{2\zeta_i^2} \delta_i e_i^2 + \frac{\zeta_i^2}{2} + \right. \\ & \left. e_i g_i(x_i) u_i \right) + \sum_{i=1}^n \tilde{\theta}_i \left[\frac{\bar{g}_i}{2\eta_i^2} \|S_i(z_i)\|^2 e_i^2 - \frac{\bar{g}_i}{\gamma_i} \sigma_{\theta_i} \hat{\theta}_i \right] \\ & + \sum_{i=1}^n \tilde{\delta}_i \left[\frac{\bar{g}_i}{2\zeta_i^2} e_i^2 - \frac{\bar{g}_i}{\kappa_i} \sigma_{\delta_i} \hat{\delta}_i \right] + \frac{n(\alpha^2 + 1)}{4} \end{aligned} \quad (31)$$

将鲁棒自适应控制器式 (22) 代入式 (28), 得到

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & \sum_{i=1}^n \left(\frac{\bar{g}_i}{2\eta_i^2} \theta_i \|S_i(z_i)\|^2 e_i^2 + \frac{\eta_i^2}{2} + \frac{\bar{g}_i}{2\zeta_i^2} \delta_i e_i^2 + \frac{\zeta_i^2}{2} \right. \\ & \left. - k_i g_i(x_i) e_i^2 - \frac{g_i(x_i)}{2\eta_i^2} \hat{\theta}_i \|S_i(z_i)\|^2 e_i^2 - \frac{g_i(x_i)}{2\zeta_i^2} \hat{\delta}_i e_i^2 \right) \\ & + \sum_{i=1}^n \tilde{\theta}_i \left[\frac{\bar{g}_i}{2\eta_i^2} \|S_i(z_i)\|^2 e_i^2 - \frac{\bar{g}_i}{\gamma_i} \sigma_{\theta_i} \hat{\theta}_i \right] \\ & + \sum_{i=1}^n \tilde{\delta}_i \left[\frac{\bar{g}_i}{2\zeta_i^2} e_i^2 - \frac{\bar{g}_i}{\kappa_i} \sigma_{\delta_i} \hat{\delta}_i \right] + \frac{n(\alpha^2 + 1)}{4} \end{aligned} \quad (32)$$

依据假设1, 不等式 (29) 可以进一步地改写为

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & \sum_{i=1}^n \left(-k_i \bar{g}_i e_i^2 + \frac{\bar{g}_i}{2\eta_i^2} \theta_i \|S_i(z_i)\|^2 e_i^2 - \right. \\ & \left. \frac{\bar{g}_i}{2\eta_i^2} \hat{\theta}_i \|S_i(z_i)\|^2 e_i^2 + \frac{\bar{g}_i}{2\zeta_i^2} \delta_i e_i^2 - \frac{\bar{g}_i}{2\zeta_i^2} \hat{\delta}_i e_i^2 + \frac{\eta_i^2}{2} + \frac{\zeta_i^2}{2} \right) \\ & + \sum_{i=1}^n \tilde{\theta}_i \left[\frac{\bar{g}_i}{2\eta_i^2} \|S_i(z_i)\|^2 e_i^2 - \frac{\bar{g}_i}{\gamma_i} \sigma_{\theta_i} \hat{\theta}_i \right] \\ & + \sum_{i=1}^n \tilde{\delta}_i \left[\frac{\bar{g}_i}{2\zeta_i^2} e_i^2 - \frac{\bar{g}_i}{\kappa_i} \sigma_{\delta_i} \hat{\delta}_i \right] + \frac{n(\alpha^2 + 1)}{4} \\ & = \sum_{i=1}^n \left(-k_i \bar{g}_i e_i^2 - \frac{\bar{g}_i}{2\eta_i^2} \tilde{\theta}_i \|S_i(z_i)\|^2 e_i^2 - \frac{\bar{g}_i}{2\zeta_i^2} \tilde{\delta}_i e_i^2 \right) \\ & + \sum_{i=1}^n \tilde{\theta}_i \left[\frac{\bar{g}_i}{2\eta_i^2} \|S_i(z_i)\|^2 e_i^2 - \frac{\bar{g}_i}{\gamma_i} \sigma_{\theta_i} \hat{\theta}_i \right] + \sum_{i=1}^n \tilde{\delta}_i \left[\frac{\bar{g}_i}{2\zeta_i^2} e_i^2 \right. \\ & \left. - \frac{\bar{g}_i}{\kappa_i} \sigma_{\delta_i} \hat{\delta}_i \right] + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\eta_i^2}{2} + \frac{\zeta_i^2}{2} \right) + \frac{n(\alpha^2 + 1)}{4} \end{aligned} \quad (33)$$

依据,可以得到以下结果

$$\dot{V}(t) \leq - \sum_{i=1}^n k_i g_i e_i^2 - \sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\gamma_i} \sigma_{\theta i} \tilde{\theta}_i \hat{\theta}_i - \sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\kappa_i} \sigma_{\delta i} \tilde{\delta}_i \hat{\delta}_i + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\eta_i^2}{2} + \frac{\zeta_i^2}{2} \right) + \frac{n(\alpha^2 + 1)}{4} \quad (34)$$

利用 $\tilde{\theta}_i \hat{\theta}_i = \frac{1}{2}(\tilde{\theta}_i^2 + \hat{\theta}_i^2 - \theta_i^2)$ 和 $\tilde{\delta}_i \hat{\delta}_i = \frac{1}{2}(\tilde{\delta}_i^2 + \hat{\delta}_i^2 - \delta_i^2)$, $i = 1, \dots, n$, 可以得到以下不等式

$$-\frac{g_i \sigma_{\theta i}}{\gamma_i} \tilde{\theta}_i \hat{\theta}_i \leq -\frac{g_i \sigma_{\theta i}}{2\gamma_i} \tilde{\theta}_i^2 + \frac{g_i \sigma_{\theta i}}{2\gamma_i} \theta_i^2 \quad (35)$$

$i = 1, \dots, n$

$$-\frac{g_i \sigma_{\delta i}}{\kappa_i} \tilde{\delta}_i \hat{\delta}_i \leq -\frac{g_i \sigma_{\delta i}}{2\kappa_i} \tilde{\delta}_i^2 + \frac{g_i \sigma_{\delta i}}{2\kappa_i} \delta_i^2 \quad (36)$$

$i = 1, \dots, n$

把式 (31), 式 (32) 代入式 (30), 可得

$$\dot{V}(t) \leq - \sum_{i=1}^n k_i^* e_i^2 - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{g_i \sigma_{\theta i}}{\gamma_i} \tilde{\theta}_i^2 - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{g_i \sigma_{\delta i}}{\kappa_i} \tilde{\delta}_i^2 + \Sigma \quad (37)$$

其中, $\Sigma = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\eta_i^2}{2} + \frac{\zeta_i^2}{2} + \frac{g_i \sigma_{\theta i}}{2\gamma_i} \theta_i^2 + \frac{g_i \sigma_{\delta i}}{2\kappa_i} \delta_i^2 \right) + \frac{n(\alpha^2 + 1)}{4}$, $k_i^* = k_i g_i$.

根据式 (11) 和式 (33), 我们有

$$\dot{V}(t) \leq -\xi V_x(t) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{g_i \sigma_{\theta i}}{\gamma_i} \tilde{\theta}_i^2 - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{g_i \sigma_{\delta i}}{\kappa_i} \tilde{\delta}_i^2 + \Sigma \leq -KV(t) + \Sigma \quad (38)$$

其中, $K = \min\{\xi, \sigma_\theta, \sigma_\delta\}$, $\xi = \frac{2k}{\lambda_{\max}(M)}$,

$$k = \min\{k_1^*, k_2^*, \dots, k_n^*\}, \sigma_\theta = \min_{1 \leq i \leq n} \left\{ \frac{g_i \sigma_{\theta i}}{\gamma_i} \right\}, \sigma_\delta = \min_{1 \leq i \leq n} \left\{ \frac{g_i \sigma_{\delta i}}{\kappa_i} \right\}.$$

根据引理2和, 可得到以下事实

$$0 < V(t) \leq \rho + (V(0) - \rho)e^{-Kt} \quad (39)$$

其中, $\rho = \frac{\Sigma}{K}$.

根据K和 ρ 的定义, 易知K和 ρ 是依赖于设计参数的正常数。因此, 基于式 (35), 我们知道 $\tilde{\theta}_i(t)$, $\tilde{\delta}_i(t)$ 和 $\tilde{x}_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, n$ 是有界的。因

为 $x_i(t)$, θ_i , δ_i 是有界的, 易证明 $x_i(t)$, $\hat{\theta}_i(t)$, $\hat{\delta}_i(t)$, $u_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, n$ 也是有界的。因此, 多智能体系统的所有信号都是有界的。

根据, 式 (25) 和式 (35), 可得

$$\frac{\lambda_{\min}(M)}{2} \sum_{i=1}^n e_i^2 \leq V_x \leq \rho + (V(0) - \rho)e^{-Kt} \leq \rho + V(0)e^{-Kt} \quad (40)$$

由于M是正定矩阵, 因此有

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 \leq \frac{2}{\lambda_{\min}(M)} \rho + \frac{2}{\lambda_{\min}(M)} V(0)e^{-Kt} \quad (41)$$

意味着给定 $v > \sqrt{\frac{2\rho}{\lambda_{\min}(M)}}$, 存在 $T > 0$ 对所有的 $t > T$, 有

$$|e_i(t)|^2 < v, i = 1, \dots, n \quad (42)$$

这里 v 是一个依赖于控制参数 k_i 的小余集。根据引理3, 易知, 增加控制增益 k_i 将得到一个更好的共识跟踪性能。

4 仿真

为了证明所提出控制方法的有效性, 考虑具有六个智能体的非线性多智能体系统, 每个智能体的动态描述如下:

$$\frac{d(x_i)}{dt} = \alpha_i x_i \sin(\alpha_i x_i) + (1 + (\beta_i x_i)^2) u_i + \gamma_i x_i^2 \cos(\beta_i t) \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (43)$$

其中微分方程的系统函数 $f_i(x_i(t))$ 是 $\alpha_i x_i \sin(\alpha_i x_i)$, 控制增益函数 $g_i(x_i(t))$ 是 $(1 + (\beta_i x_i)^2)$, 外部干扰 $\Delta_i(t, x_i(t))$ 是 $\gamma_i x_i^2 \cos(\beta_i t)$, $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 列于表1。显然, 通过选择 $g_i = 1$ 和 $\rho_i(x_i(t)) = \gamma_i x_i^2$, 假设1和2得到满足。六个智能体的初始值分别是 $x_1(0) = 3$, $x_2(0) = 2$, $x_3(0) = 1$, $x_4(0) = -1$, $x_5(0) = -2$ 和 $x_6(0) = -3$ 。

表1 第 i 个智能体中 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 的值

i	1	2	3	4	5	6
α_i	0.5	1.7	-0.8	1.2	-2.5	0.4
β_i	0.7	2.4	2.1	1.1	0.3	0.5
γ_i	1.2	2.1	-3.2	0.3	0.9	1.8

Leader的动态描述如下:

$$\dot{x}_r = 3\cos(2t) \quad (44)$$

显然, 通过选择 $\alpha=3$, 假设3得到满足。

智能体和leader之间的通信质量描述于矩阵 $B = \text{diag}\{0, 0.9, 0, 0.9, 0, 0.8\}$ 。多智能体系统的邻接矩阵 A 和拉普拉斯矩阵 L 如下:

$$A = \begin{pmatrix} 0.0 & 0.1 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.6 \\ 0.1 & 0.0 & 0.2 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.2 & 0.0 & 0.3 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.3 & 0.0 & 0.4 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.4 & 0.0 & 0.5 \\ 0.4 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.5 & 0.0 \end{pmatrix}$$

$$L = \begin{pmatrix} 0.7 & -0.1 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & -0.6 \\ -0.1 & 0.3 & -0.2 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & -0.2 & 0.5 & -0.3 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & -0.3 & 0.7 & -0.4 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & -0.4 & 0.7 & -0.5 \\ -0.4 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & -0.5 & 0.9 \end{pmatrix}$$

RBF神经网络包含72个节点, 中心 μ_i 均匀分布在 $[-3, 3]$ 内, 宽度 $\phi_i = 2$ 。未知函数 $F_i(z_i(t)) = f_i(x_i(t)) + e_i(t) + e_i(t) \times \rho_i^2(x_i(t))$, $i = 1, 2, \dots, 6$ 由中所示的RBFNN来逼近。根据等式(22), 给出自适应控制器 u_i , $i = 1, \dots, n$ 如下:

$$u_i(t) = -13e_i(t) - \frac{1}{2 * 0.1^2} \hat{\theta}_i(t) \|S_i(z_i(t))\|^2$$

$$e_i(t) - \frac{1}{2 * 0.2^2} \hat{\delta}_i(t) e_i(t) \quad (45)$$

根据式(23)和式(24), 构造自适应律 $\hat{\theta}_i$, $\hat{\delta}_i$, $i = 1, \dots, n$ 如下:

$$\dot{\hat{\theta}}_i(t) = \frac{6}{2 * 0.1^2} \|S_i(z_i(t))\|^2 e_i^2(t) - 3\hat{\theta}_i(t) \quad (46)$$

$$\dot{\hat{\delta}}_i(t) = \frac{4}{2 * 0.2^2} e_i^2(t) - 2\hat{\delta}_i(t) \quad (47)$$

初始值 $\hat{\theta}_i(0) = 0$, $\hat{\delta}_i(0) = 0$, $i = 1, \dots, 6$ 。

将所提出的控制器和自适应律, 应用于非线性多智能体系统, 所期望的仿真结果示于图1-4, 图1展示了leader的运行轨迹, 图2表明了leader-

following一致控制的实现。图3-4给出了自适应 leader-following一致控制器 u_i 的轨迹。

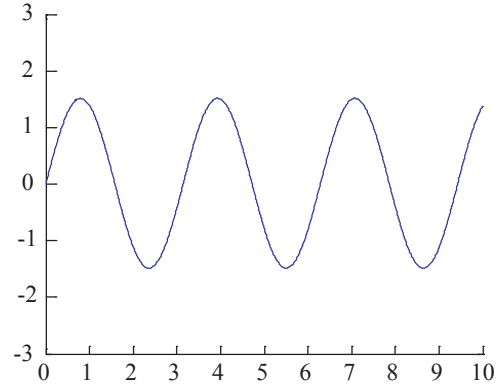


图1 leader的轨迹

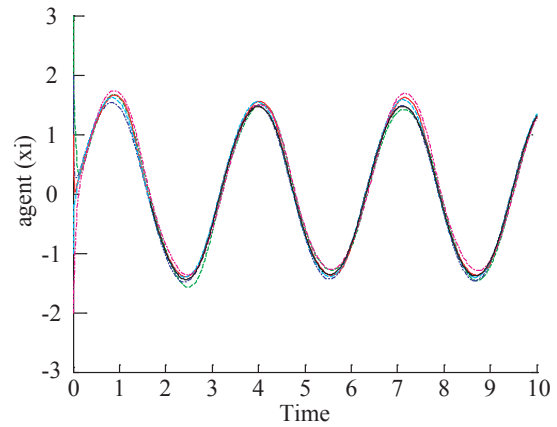


图2 六个智能体的一致跟踪性能

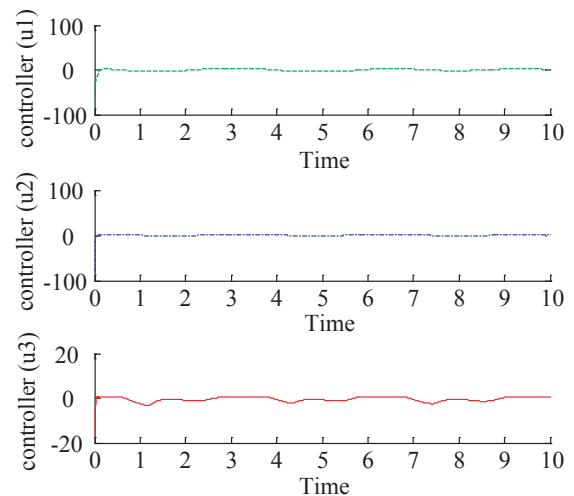


图3 控制输入 u_i , $i = 1, 2, 3$

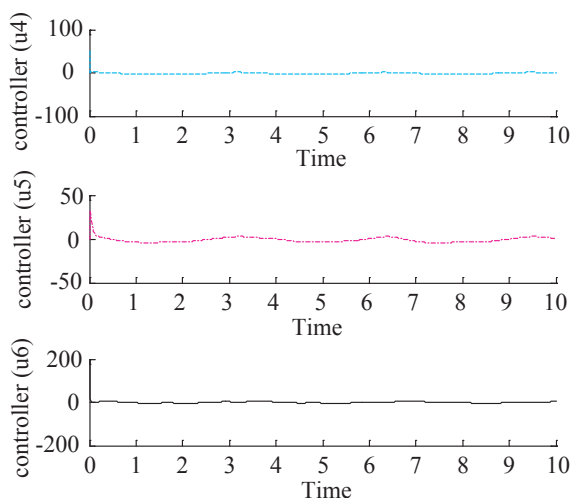


图4 控制输入 $u_i, i = 4, 5, 6$

备注7: 在这个例子中, 虽然神经网络的神经元的数目是72, 即意味着该神经网络的权重向量是72维的, 但是仅通过在线更新标量调节参数 $\hat{\theta}_i$ 和 $\hat{\delta}_i$, 一致控制即可实现。然而, 如果先前的任何基于神经网络的一致控制方法应用于多智能体系统中, 例如, 文献[29], 文献[30]和文献[32]中提出的方法, 可调参数将成为一个72维的向量。因此, 将大大增加在线计算量, 从实际应用的角度考虑, 其运行成本也将提高。

5 结论

在本文中, 针对一类带扰动的非线性多智能体系统, 提出了一种鲁棒自适应一致跟踪控制方法。神经网络用于逼近非线性函数。通过转化神经网络的权重向量到一个标量参数, 智能体系统动力中只有少量的可调参数可以在线更新。因此, 与现有的一致控制方法相比, 该方法可以减少在线计算量。从实际应用的角度考虑, 这个一致策略可以降低运行成本。神经网络逼近误差界的估计的调节用于抵消近似误差的影响, 因此, 系统的鲁棒性得以改善。事实证明, 所提出的一致控制方法可以保证多智能体系统的所有信号半全局一致最终有界, 且所有智能体可以同步跟踪leader于所需的精度。

参考文献

- [1] S. Y. Khoo, L. H. Xie, Z. H. Man, Robust finite-time consensus tracking algorithm for multirobot systems, *IEEE Transactions on Mechatronics* 14, (2); (2009):219–228.
- [2] F. Giuliatti, L. Pollini, M. Innocenti, Autonomous formation flight, *IEEE Control Systems* 20, (6); (2000): 34–44.
- [3] D. J. Stilwell, B. E. Bishop, Platoons of underwater vehicles, *IEEE Control Systems* 20, (6); (2000): 45–52.
- [4] W. Ren, Distributed cooperative attitude synchronization and tracking for multiple rigid bodies, *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 18, (2); (2010): 383–392.
- [5] W. Yang, H. B. Shi, Sensor selection schemes for consensus based distributed estimation over energy constrained wireless sensor networks, *Neurocomputing* 87, (2012): 132–137.
- [6] H. L. Dong, Z. D. Wang, H. J. Gao, Distributed filtering for a class of time-varying systems over sensor networks with quantization errors and successive packet dropouts, *IEEE Transactions on Signal Processing* 60, (6); (2012): 3164–3173.
- [7] D. Hammel, Formation flight as an energy saving mechanism, *Israel Journal of Zoology* 41, (3); (1995): 261–278.
- [8] M. Andersson, J. Wallander, Kin selection and reciprocity in flight formation, *Behavioral Ecology* 15, (1); (2004): 158–162.
- [9] L. Consolinia, F. Morbidib, D. Prattichizzob, M. Tosques, Leader–follower formation control of nonholonomic mobile robots with input constraints, *Automatica* 44, (5); (2008): 1343–1349.
- [10] T. Gustavi, X. M. Hu, Observer-based leader-following formation control using onboard sensor information, *IEEE Transactions on Robotics* 24, (6); (2008): 1457–1462.
- [11] P. Lin, Y. M. Jia, Consensus of a class of second-order multi-agent systems with time-delay and jointly-connected topologies, *IEEE Transactions on Automatic Control* 55, (3); (2010): 778–784.
- [12] Y. G. Hong, J. P. Hu, L. X. Gao, Tracking control for multi-agent consensus with an active leader and variable topology, *Automatica* 42, (7); (2006): 1177–1182.
- [13] W. Ren, Multivehicle consensus with a time-varying reference state, *Systems & Control Letters* 56, (7–8); (2007): 474–483.
- [14] W. Ni, D. Z. Cheng, Leader-following consensus of multi-agent systems under fixed and switching topologies, *Systems & Control Letters* 59, (3–4); (2010): 209–217.
- [15] L. Li, D. W. C. Ho, J. Lu, A unified approach to practical consensus with quantized data and time delay, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers* 60, (10); (2013): 2668–2678.
- [16] J. Lu, D. W. C. Ho, J. Cao, J. Kurths, Single impulsive controller for globally exponential synchronization of dynamical networks, *Nonlinear Analysis:*

- Real World Applications, 14(1); (2013):581-593.
- [17] H. Yu, X. H. Xia, Adaptive consensus of multi-agents in networks with jointly connected topologies, Automatica, 48 (8); (2012): 1783–1790.
- [18] H. S. Su, G. R. Chen, X. F. Wang, Z. L. Lin, Adaptive second-order consensus of networked mobile agents with nonlinear dynamics, Automatica 47, (2); (2011): 368–375.
- [19] J. Lu, D. W. C. Ho, Stabilization of complex dynamical networks with noise disturbance under performance constraint, Nonlinear Analysis: Real World Applications, 12(4); (2011): 1974-1984.
- [20] J. Lu, Z. Wang, J. Cao, D. W. C. Ho, J. Kurths, Pinning impulsive stabilization of nonlinear dynamical networks with time-varying delay, International Journal of Bifurcation and Chaos, 22(07); (2012).
- [21] J. Park, I. W. Sandberg, Universal approximation using radial-basis-function networks, Neural Computation, 3 (2); (1991): 246–257.
- [22] L. X. Wang, Fuzzy systems are universal approximators, IEEE International Conference on Fuzzy Systems, (1992): 1163–1170.
- [23] Y. S. Yang, J. S. Ren, Adaptive fuzzy robust tracking controller design via small gain approach and its application, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 11 (6); (2003): 783-795.
- [24] D. Velez-Diaz, Y. Tang, Adaptive robust fuzzy control of nonlinear systems, IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics–PART B: Cybernetics, 34 (3); (2004): 1596-1601.
- [25] S. S. Ge, J. Wang, Robust adaptive neural control for a class of perturbed strict feedback nonlinear systems, IEEE Transactions on Neural Networks, 13 (6); (2002): 1409-1419.
- [26] S. S. Ge, C. Wang, Direct adaptive NN control of a class of nonlinear systems, IEEE Transactions on Neural Networks, 13(1); (2002): 214-221.
- [27] Y. J. Liu, S. C. Tong, Adaptive NN Tracking Control of Uncertain Nonlinear Discrete-Time Systems With Nonaffine Dead-Zone Input, IEEE Transactions on Cybernetics, DOI: 10.1109/TCYB.2014.2329495, in press.
- [28] Y. J. Liu, S. C. Tong, W. Wang, Adaptive fuzzy output tracking control for a class of uncertain nonlinear systems, Fuzzy Sets Systems, 160 (19); (2009): 2727–2754.
- [29] Z. G. Hou, L. Chen, M. Tan, Decentralized robust adaptive control for the multi-agent system consensus problem using neural networks, IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics–PART B: Cybernetics, 39 (3); (2009): 636–647.
- [30] L. Cheng, Z. G. Hou, M. Tan, Y. Z. Lin, W. J. Zhang, Neural-network-based adaptive leader-following control for multi-agent systems with uncertainties, IEEE Transactions on Neural Networks, 21 (8); (2010): 1351–1358.
- [31] G. Q. Hu, Robust consensus tracking of a class of second-order multi-agent dynamic systems, Systems & Control Letters, 61 (1); (2012): 134–142.
- [32] Y. Liu, Y. M. Jia, Leader-following consensus protocol for second-order multi-agent systems using neural networks, 27th Chinese Control Conference, (2008): 535–539.
- [33] M. Z. An, Krishna Dev Kumar Neural network-based adaptive output feedback formation control for multi-agent systems Nonlinear Dynamics, 70 (2); (2012): 1283–1296.
- [34] W. L. Guo, J. H. Lu, S. H. Chen and X. H. Yu, “Second-order tracking control for leader-follower multi-agent flocking in directed graphs with switching topology”, systems & control letters, 60 (12); (2011): 1051-1058.
- [35] U. Munz, A. Papachristodoulou, F. Allgwer, Robust consensus controller design for nonlinear relative degree two multi-agent systems with communication constraints, IEEE Transactions on Automatic Control, 56 (1); (2011): 145–151.
- [36] W. W. Yu, G. R. Chen, M. Cao, Consensus in directed networks of agents with nonlinear dynamics, IEEE Transactions on Automatic Control, 56 (6); (2011): 1436–1441.
- [37] D. V. Diaz, Y. Tang, Adaptive robust fuzzy control of nonlinear systems, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B Cybernetics, 34 (3); (2004): 1596–1601.
- [38] S. S. Ge, J. Wang, Robust adaptive neural control for a class of perturbed strict feedback nonlinear systems, IEEE Transactions on Neural Network, 13 (6); (2002): 1409–1419.
- [39] Y. J. Liu, W. Wang, S. C. Tong, Y. S. Liu, Robust adaptive tracking control for nonlinear systems based on bounds of fuzzy approximation parameters, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, 40 (1); (2010): 170–184.

作者简介

高 颖 辽宁工业大学，理学院，硕士研究生，主要研究方向为智能控制理论及其应用。

李 静 辽宁工业大学，理学院，硕士研究生，主要研究方向为智能控制理论及其应用。

文国兴 2011年在辽宁工业大学应用数学专业取得硕士学位，他现在是澳门大学科技学院的博士生，研究兴趣：多智能体的自适应控制，一致控制等。

刘艳军 辽宁工业大学 理学院副教授。2007年7月毕业于大连理工大学，获控制理论与控制工程专业博士学位。研究方向为：自适应模糊控制，自适应神经网络控制以及非线性系统控制。辽宁省高等学校优秀人才，辽宁省百千万人才千人层次。在国际期刊和国内核心期刊以及一些重要的国际会议上发表论文50余篇，主持国家自然科学基金项目2项。

具有死区输入的非线性多智能体系统的分散自适应控制

王芳^{1, 2}, 刘治¹

1. 广东工业大学自动化学院, 广州 510006;

2. 山东科技大学数学与系统科学学院, 青岛 266590

摘要: 在有向拓扑结构下, 基于backstepping技术, 针对一类具有死区输入的严格状态反馈非线性多智能体系统, 提出了一种分散自适应神经网络控制方案。所研究的跟随者智能体动力学模型为具有外部干扰的非线性不确定系统, 领航者动力学模型为时变非自治系统。本文设计的分散自适应控制律能够保证闭环系统的所有信号是有界的, 实现了所有智能体对领航者的跟踪。与已有研究结果相比, 所考虑的多智能体具有执行器输入死区和外部干扰, 结合神经网络的逼近作用和自适应控制, 死区非线性和外部干扰被动态补偿。通过将神经网络权向量范数的上界作为估计参数, 使得在线调节参数数目大大减少, 从而减小了计算量。最后, 数值算例的仿真结果验证了所设计控制算法的有效性。

关键词: 非线性多智能体; 严格反馈; 死区输入; 分散自适应神经网络控制; 一致性

1 引言

近年来, 多智能体系统的协调控制在无人飞机编队、传感器网络、移动机器人编队任务和交通车辆控制等领域有着广泛的应用, 引起了国内外学者的广泛关注。作为协调控制中最基本的问题之一的一致性, 成为当前控制研究领域的一个热点问题。在已有研究中, 大部分智能体系统的动力学为一阶或二阶积分方程^[1-12]。但实际的物理系统常常都是高阶非线性的, 因此对高阶非线性多智能体系统的研究有重要意义。最近文献[13-14], 在有向拓扑结构下, 研究了一类高阶非线性多智能体系统的一致性, 说明了有向拓扑具有生成树是多智能体系统与领航者取得同步的必要条件。然而, 文献[13-14]中的多智能体系统的

动力学模型需要满足匹配条件, 其方法不适合一般的高阶非线性多智能体系统, 比如严格状态反馈系统等。

众所周知, 严格状态反馈系统能描述许多实际系统, 比如飞行系统、喷气发动机系统、生化过程及机器人系统等^[15]。利用自适应backstepping方法与模糊逻辑系统(或神经网络)方法相结合, 许多学者研究了这种系统的稳定性和追踪性能问题^[16-22]。然而对于严格反馈的非线性多智能体系统来说, 由于受到通讯拓扑结构的影响, 其控制器设计和性能分析比无通讯环境下的严格状态反馈系统的控制要困难得多。目前, 只有文献[23-24]利用动态表面控制(DSC)和神经网络方法相结合, 分别研究了具有一个和多个领航者的严格反馈的非线性多智能体系统的分散协调控制。

文献 [23-24]将半全局一致最终有界的定义^[25]推广到了有向通讯环境下的多智能体的一致性问题上,所提出的分散控制方案保证了跟踪误差是半全局一致最终有界的且收敛到原点的一个小邻域内。尽管文献[23-24]对于高阶复杂的非线性多智能体的一致性研究已经取得了一些进展,但是仍存在问题需要探讨,例如文献 [23-24]利用神经网络来辨识系统中的不确定非线性函数时,所得出的在线调解参数的数目依赖所采用的神经网络权向量的维数和每一个子系统的阶数。当子系统的阶数或者权向量的维数变大时,在线调解方程的数目随之变大而导致在线学习时间非常大,与此同时能量消耗也是不可避免的;而且文献 [23-24]也忽略了外部干扰的影响。另外,已有的多智能体研究的文献均忽略了执行器中的死区现象。

死区,作为最常见的非平滑输入非线性之一,广泛存在于生物系统、机械系统等实际系统中。输入死区非线性的存在会大大降低控制系统的性能,甚至会导致受控系统不稳定,影响到系统的正常运行。因此,为了消除或减少死区非线性对控制系统的不利影响,许多学者提出了许多技术和方法来设计控制器,达到了预期的效果。这些处理方法大致可以归结为两类:一类是构造死区逆算子来消除死区的影响,参看文献[26-27]。第二类是把死区表示成输入的线性部分与有界非线性扰动部分之和的形式^[28-30],进而研究具有死区的系统的自适应控制问题。然而,这些研究成果均没有考虑通讯环境的影响,因而不能直接应用在有向拓扑结构下的具有死区输入的多智能体的一致性问题上。

事实上,许多实际多智能体系统经常会受到死区输入非线性和外部干扰的影响,同时每个智能体的动力学行为又要受到网络拓扑结构的影响,因而对于这类多智能体的同步控制问题的研究既有实际意义又富有挑战性。基于以上的讨论,本文研究在有向拓扑结构下的具有输入死区

的严格反馈非线性多智能体系统的协调跟踪问题。所考虑的智能体的动力学模型均具有未知的死区输入,不确定的非线性动态和外部干扰。据我们所知,目前还没有这方面的研究被报道。与文献[1-14]及^[23-24]相比,本文首次将死区输入非线性性的影响考虑到多智能体的同步控制中,所考虑的非线性多智能体系统更具一般性;与^[16-22]相比,本文研究了有向拓扑结构下具有死区输入的非线性多智能体的协调跟踪问题。

2 预备知识及问题描述

2.1 代数图论

本文利用有向加权图 $G=(V,E,A)$ 来描述智能体间的拓扑结构,其中 $V=\{v_1,\cdots,v_N\}$ 表示非空节点集, v_i 表示第 i 个智能体; $E\subseteq V\times V$ 为所有边组成的集合, $(v_j,v_i)\in E$ 表示智能体 i 能够获取智能体 j 的信息,且称 v_j 为 v_i 的父节点, v_i 的所有父节点的集合记为 N_i 。记 $d_i=\sum_{j=1}^N a_{ji}$ 和 $D=\text{diag}(d_1,\cdots,d_N)\in R^{N\times N}$ 分别为第 i 个节点的入度和入度矩阵。邻接矩阵 $A=[a_{ij}]\in R^{N\times N}$ 用来描述跟随智能体间的通讯拓扑关系, $a_{ij}\geq 0$ 表示跟踪智能体 i 和 j 之间的通讯权值,一般假定智能体不存在自环,即 $a_{ii}=0$ 。图 G 的拉普拉斯矩阵为 $L=D-A$ 。在有向图中,边集序列 $\{(v_i,v_k),(v_k,v_l),\cdots,(v_m,v_j)\}$ 称为从 i 节点到节点 j 的路径,如果至少存在一个节点 i_r (称为根节点)到其余任意节点的有向路径,则称有向图具有有向生成树。

定义扩展图为 $\bar{G}=(\bar{V},\bar{E})$,其中 $\bar{V}=\{v_0,v_1,\cdots,v_N\}$, $\bar{E}\subseteq \bar{V}\times \bar{V}$ 。

2.2 问题描述

本文研究在有向拓扑图下, $N(N\geq 2)$ 个跟随

智能体, 编号为 $1-N$, 和一个领航者编号为 0 的多智能体系统的一致性问题。第 $i(i=1, \dots, N)$ 个跟随智能体的动力学模型为:

$$\begin{aligned}\dot{x}_{i,m} &= x_{i,m+1} + f_{i,m}(\bar{x}_{i,m}) + w_{i,m}(t), 1 \leq m \leq n_i - 1 \\ \dot{x}_{i,n_i} &= D(u_i) + f_{i,n_i}(\bar{x}_{i,n_i}) + w_{i,n_i}(t) \\ y_i &= x_{i,1}\end{aligned}\quad (1)$$

其中, $\bar{x}_{i,m} = [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,m}] \in R^m$, $\bar{x}_{i,n_i} = [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n_i}] \in R^{n_i}$ 表示第 i 个节点的状态向量; $f_{i,m}(\bar{x}_{i,m}) (m=1, 2, \dots, n_i)$ 是未知的光滑的非线性函数; $w_{i,m} (m=1, 2, \dots, n_i)$ 表示未知的有界外部干扰; $u_i \in R$, $y_i \in R$ 分别表示需要设计的控制输入信号和第 i 个节点的输出。执行器死区输出 $D(u_i) \in R$ 可以表示为

$$D(u_i) = \begin{cases} k_{i,r}(u_i - b_{i,r}), & u_i \geq b_{i,r} \\ 0, & -b_{i,l} \leq u_i \leq b_{i,r} \\ k_{i,l}(u_i + b_{i,l}), & u_i \leq -b_{i,l} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $k_{i,r}$ 和 $k_{i,l}$ 表示死区左、右斜率, $b_{i,r}$ 和 $-b_{i,l}$ 代表死区的断点。进一步, 执行器死区输出可以表示为下列形式, 参见文献[28-30]:

$$D(u_i) = k_i(t)u_i + w_i(t) \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned}k_i(t) &= \begin{cases} k_{i,r}, & u_i > 0 \\ k_{i,l}, & u_i \leq 0 \end{cases}, \\ w_i(t) &= \begin{cases} -k_{i,r}b_{i,r}, & u_i \geq b_{i,r} \\ -k_i(t)u_i, & -b_{i,l} \leq u_i \leq b_{i,r} \\ -k_{i,l}b_{i,l}, & u_i \leq -b_{i,l} \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

显然, $w_i(t)$ 是有界函数。

为方便控制器设计, 死区(2)需要满足以下假设。

假设1 参数 $k_{i,r}$, $k_{i,l}$, $b_{i,r}$ 及 $b_{i,l}$ 均为未知的正数, 且存在 $\eta_i > 0$ 使得 $\eta_i \leq \min\{k_{i,r}, k_{i,l}\} (i=1, 2, \dots, N)$ 。

领航者的动力学行为可以表示为

$$\begin{aligned}\dot{x}_0 &= f_0(x_0, t) \\ y_0 &= x_0\end{aligned} \quad (5)$$

其中, $f_0(x_0, t)$ 是分段连续函数, 关于 x_0 满足局部Lipschitz 条件, $y_0 \in R$ 为领航者的输出。

定义1^[23] 如果存在常数 $c_1 > 0$, $c_2 > 0$, $b_1 > 0$, $b_2 > 0$, 对于 $a_1 \in (0, c_1)$ 及 $a_2 \in (0, c_2)$ 存在 $T \geq 0$ (与 t_0 无关)使得对于 $\forall t \geq t_0 + T$, 所有节点都满足下列两式

$$\begin{aligned}|y_i(t_0) - y_0(t_0)| \leq a_1 &\Rightarrow |y_i(t) - y_0(t)| \leq b_1 \\ |y_i(t_0) - y_j(t_0)| \leq a_2 &\Rightarrow |y_i(t) - y_j(t)| \leq b_2\end{aligned}$$

那么就称多智能体系统(1)的一致性跟踪误差是半全局最终一致有界的。

本文的研究目标是在有向拓扑图下, 设计分散控制器 u_i 使得所有闭环系统里的信号是有界的并且所有智能体的输出与领航者输出同步。

注1: 与文献[1-14]及文献[23-24]相比, 本文研究的多智能体具有输入死区非线性由于物理器件的固有特性, 使得实际的多智能体系统和设备中经常出现死区输入非线性。在有向拓扑结构下,

(1)能表许多实际的多智能体系统, 因而研究具有死区输入的多智能体系统具有实际意义。

注2: 受到交通网络拓扑结构的影响, 研究有向拓扑图下的严格状态反馈非线性多智能体系统是一项具有挑战性的课题, 目前只有两篇相关文献[23-24]被报道。与文献[23-24]对比, 本文考虑了未知的外部干扰 $w_{i,m} (m=1, 2, \dots, n_i)$ 对系统的影响, 这使得系统的稳定性分析更加困难。另外所有跟随者都不需要获得领航者的信息, 而在文献[23-24]中, 部分跟随智能体需要知道领航者预设的轨迹。

假设2 (a) 扩展图 G 包含一个根节点为领航者的生成树。

(b) 第 i 个跟随智能体可以获得它的邻接点的状态信息。

注3: 文献[12]已经证明了假设2 (a) 是多智能体取得一致的必要条件。文献[12]已经证明, 由假设2 (a) 可推得对于 $\forall i, b_i + d_i > 0$ 成立。

对于第 $i(i=1, 2, \dots, N)$ 个跟随智能体, 定义

局部同步误差为

$$s_{i,1} = \sum_{j=1}^N a_{ij}(y_i - y_j) + b_i(y_i - y_0) \quad (6)$$

其中称 $b_i \geq 0$ 为牵制增益, 当且仅当从领航者到第 $i(i=1, 2, \dots, N)$ 个跟随者之间有一条边时 $b_i > 0$, 否则 $b_i = 0$ 。

注4: 与传统的严格状态反馈系统的backstepping追踪设计不同, 本文中的表面误差 $s_{i,1}$ 要受到扩展图 $\bar{G}$ 的影响。

在假设2下, 下列两个引理成立, 这将在后来的稳定性分析中起到重要作用。

引理1^[12] 定义 $B = \text{diag}\{b_i\} \in R^{N \times N}$, 如果至少存在一个 $b_i > 0$, 那么 $L + B$ 是非奇异的。

引理2^[12] 定义 $s_{:,1} = (s_{1,1}, s_{2,1}, \dots, s_{N,1})^T$, $y = (y_1, y_2, \dots, y_N)^T$, $y_0 = (y_0, y_0, \dots, y_0)^T$, 那么下列不等式成立:

$$\|y - y_0\| \leq \|s_{:,1}\| / \sigma(L + B) \quad (7)$$

其中, $\sigma(L + B)$ 表示矩阵 $L + B$ 的最小奇异值。

证明: 由 $s_{:,1}$ 的定义可以得到

$s_{:,1} = (L + B)(y - y_0)$, 由引理1可知 $L + B$ 是非奇异的, 因而有以下等式成立:

$$\|y - y_0\| = \|(L + B)^{-1} s_{:,1}\| \leq \|s_{:,1}\| / \sigma(L + B)$$

注5: 由引理2可知只要表面误差向量 $s_{:,1}$ 足够小, 则所有跟随者输出 $y_i(i=1, 2, \dots, N)$ 与领航者 y_0 同步。

假设3 (a) 未知外部干扰 $w_{i,m}(t)$ 有界, $m=1, 2, \dots, n_i, i=1, 2, \dots, N$ 从而向量 $w_i = (w_{i,1}, \dots, w_{i,n_i} + w_i(t))^T$ 有界, 即存在一个正常数 w_M , 使得 $\|w_i\| \leq w_M$ 成立。

(b) 存在一个正常数 f_M , 使得对于 $\forall t \geq t_0$, 都有 $|f_0(x_0, t)| \leq f_M$ 。

注6: 假设3中的 w_M 与 f_M 仅仅用于稳定性分析, 在控制器的设计中它们的真值不要求知道。

引理3^[31]对于 $\forall \varepsilon > 0$ 及 $\xi \in R$, 下列不等式成立:

$$0 \leq |\xi| - \xi \tanh\left(\frac{\xi}{\varepsilon}\right) \leq \delta \varepsilon \quad (8)$$

其中 $\delta = 0.2785$ 。

2.3 RBF神经网络

本文中, RBF神经网络将被用来逼近定义在紧集 Ω 上的连续函数 $f(Z)$ 。文献[32]已经证明RBF神经网络 $W^* T \Phi(Z)$ 能够在有界闭集 $\Omega \subset R^q$ 上以任意精度逼近任意连续函数 $f(Z)$, 即

$$f(Z) = W^* T \Phi(Z) + \delta(Z), \forall z \in \Omega \subset R^q$$

其中, $\delta(Z)$ 是逼近误差且满足 $|\delta(Z)| \leq \varepsilon$, W^* 是人为给定的理想的常数权向量, 是 $\delta(Z)$ 取得最小值时对应的 W , 即

$$W^* := \operatorname{argmin}_{W \in R^l} \left\{ \sup_{Z \in \Omega} |f(Z) - W^T \Phi(Z)| \right\}$$

其中, $\Phi(Z) = [\phi_1(Z), \phi_2(Z), \dots, \phi_l(Z)]^T$ 是径向基函数向量, l 表示神经网络节点数。在本文中选取常用的高斯型函数作为径向基函数

$$\phi_i(Z) = \exp \left[- \frac{(Z - \mu_i)^T (Z - \mu_i)}{\gamma_i^2} \right], \quad (9)$$

$$i = 1, 2, \dots, l,$$

其中, $\mu_i = [\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{iq}]^T$ 表示基函数的中心, γ_i 是高斯函数的宽度。

3 自适应分散控制律设计

在这一节, 我们将使用backstepping技术和神经网络方法设计分散控制器, 第 i 个子系统的控制器设计包括 n_i 步。在设计之前, 首先定义一个常数:

$$\theta_i = \max \{ \|W_{i,m}^*\|^2, m = 1, 2, \dots, n_i \}$$

由于 $\|W_{i,m}^*\|$ 是不知道的, 所以 θ_i 是不知道的常数, $\hat{\theta}_i$ 表示未知常数 θ_i 的估计值, 估计误差为 $\tilde{\theta}_i = \theta_i - \hat{\theta}_i$ 。采用如下坐标变换:

$$s_{i,m} = x_{i,m} - \alpha_{i,m-1}, m = 2, \dots, n_i \quad (10)$$

其中, $\alpha_{i,m-1}(m=2, \dots, n_i)$ 是在第 m 步需要设计的虚拟控制律。

第1步: 基于系统(1)和(5), 结合 $s_{i,1}$ 的定义(6)可得 $s_{i,1}$ 的导数为

$$\dot{s}_{i,1} = (d_i + b_i)(s_{i,2} + \alpha_{i,1} + f_{i,1}(\bar{x}_{i,1}) + w_{i,1}(t)) - \sum_{j=1}^N a_{ij}x_{j2} - \sum_{j=1}^N a_{ij}f_{j,1}(\bar{x}_{j,1}) - \sum_{j=1}^N a_{ij}w_{j,1} - b_i f_0(x_0, t) \quad (11)$$

考虑如下Lyapunov 函数

$$V_{i,1} = \frac{s_{i,1}^2}{2} + \frac{\tilde{\theta}_i^2}{2r_i} \quad (12)$$

利用式(6), 式(10)和式(11), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i,1} = & s_{i,1} [(d_i + b_i)(s_{i,2} + \alpha_{i,1} + f_{i,1}(\bar{x}_{i,1}) + w_{i,1}(t)) \\ & - \sum_{j=1}^N a_{ij}x_{j2} - \sum_{j=1}^N a_{ij}f_{j,1}(\bar{x}_{j,1} - \sum_{j=1}^N a_{ij}w_{j,1} \\ & - b_i f_0(x_0, t))] - \frac{1}{r_i} \tilde{\theta}_i \dot{\theta}_i \end{aligned} \quad (13)$$

由Young不等式、假设3及引理3, 可得

$$(d_i + b_i)s_{i,1}w_{i,1}(t) \leq (d_i + b_i)w_M s_{i,1} \tanh\left(\frac{(d_i + b_i)w_M s_{i,1}}{\varepsilon_{i,1}}\right) + \delta \varepsilon_{i,1} \quad (14)$$

$$s_{i,1} \sum_{j=1}^N a_{ij}w_{j,1}(t) \leq |s_{i,1}| w_M d_i \leq (d_i + b_i)w_M s_{i,1} \tanh\left(\frac{(d_i + b_i)w_M s_{i,1}}{\varepsilon_{i,1}}\right) + \delta \varepsilon_{i,1} \quad (15)$$

$$-b_i s_{i,1} f_0(x_0, t) \leq b_i f_M s_{i,1} \tanh\left(\frac{b_i f_M s_{i,1}}{\varepsilon_{i,1}}\right) + \delta \varepsilon_{i,1}$$

其中, $\delta = 0.2785$, $\varepsilon_{i,1}$ 是任意给定的小正数。

将式(14)~式(16)代入式(13)得

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i,1} \leq & s_{i,1} [(d_i + b_i)\alpha_{i,1} + \bar{f}_{i,1} - \sum_{j=1}^N a_{ij}x_{j2}] + \\ & (d_i + b_i)s_{i,1}s_{i,2} + 3\delta \varepsilon_{i,1} - \frac{1}{r_i} \tilde{\theta}_i \dot{\theta}_i \end{aligned} \quad (17)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{f}_{i,1} = & (d_i + b_i)[f_{i,1}(\bar{x}_{i,1}) - \frac{1}{d_i + b_i} \sum_{j=1}^N a_{ij}f_{j,1}(\bar{x}_{j,1}) + \\ & 2w_M \tanh\left(\frac{(d_i + b_i)w_M s_{i,1}}{\varepsilon_{i,1}}\right) + \frac{b_i f_M}{d_i + b_i} \tanh\left(\frac{b_i f_M s_{i,1}}{\varepsilon_{i,1}}\right)] \end{aligned}$$

由于 $\bar{f}_{i,1}$ 包含未知函数 $f_{i,1}(\bar{x}_{i,1})$, $f_{j,1}$, 所以它不能直接用于构造虚拟控制信号 $\alpha_{i,1}$ 。利用RBF神经网络 $W_{i,1}^* \Phi_{i,1}(Z_{i,1})$ 来逼近 $\bar{f}_{i,1}$, 于是 $\bar{f}_{i,1}$ 可以表示为

$$\begin{aligned} \bar{f}_{i,1} = & W_{i,1}^* \Phi_{i,1}(Z_{i,1}) + \delta_{i,1}(Z_{i,1}), \quad (18) \\ |\delta_{i,1}(Z_{i,1})| \leq & \varepsilon_{i,1}, \end{aligned}$$

其中, $\delta_{i,1}(Z_{i,1})$ 代表逼近误差, $Z_{i,1} = [x_{i,1}, x_{j,1}]^T$, $\varepsilon_{i,1}$ 表示任意给定的小正数。利用Young不等式及 θ_i 的定义可得

$$s_{i,1} \bar{f}_{i,1} \leq \frac{\theta_i}{2a_{i,1}^2} s_{i,1}^2 \Phi_{i,1}^T \Phi_{i,1} + \frac{a_{i,1}^2}{2} + \frac{s_{i,1}^2}{2} + \frac{\varepsilon_{i,1}^2}{2} \quad (19)$$

其中, $a_{i,1} > 0$ 表示设计参数。构造虚拟控制信号 $\alpha_{i,1}$ 为

$$\begin{aligned} \alpha_{i,1}(Z_{i,1}) = & \frac{1}{d_i + b_i} \left[-c_{i,1}s_{i,1} - \frac{s_{i,1}}{2} + \right. \\ & \left. \sum_{j=1}^N a_{ij}x_{j2} - \frac{\hat{\theta}_i}{2a_{i,1}^2} s_{i,1} \Phi_{i,1}^T \Phi_{i,1} \right] \end{aligned} \quad (20)$$

其中, $c_{i,1}$ 表示正的设计常数。进而将式(18)~(20)代入式(17)得

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i,1} \leq & -c_{i,1}s_{i,1}^2 - \frac{1}{r_i} \tilde{\theta}_i (\dot{\theta}_i - \frac{r_i}{2a_{i,1}^2} s_{i,1}^2 \Phi_{i,1}^T \Phi_{i,1}) + \\ & (d_i + b_i)s_{i,1}s_{i,2} + \sigma_{i,1} \end{aligned} \quad (21)$$

其中, $\sigma_{i,1} = \frac{a_{i,1}^2}{2} + \frac{\varepsilon_{i,1}^2}{2} + 3\delta \varepsilon_{i,1}$ 。

第 m 步($2 \leq m \leq n_i - 1$): 考虑以下Lyapunov 函数

$$V_{i,m} = V_{i,m-1} + \frac{s_{i,m}^2}{2} \quad (22)$$

则 $V_{i,m}$ 的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i,m} = & \dot{V}_{i,m-1} + s_{i,m} [x_{i,m+1} + f_{i,m}(\bar{x}_{i,m}) + w_{i,m}(t) \\ & - \sum_{k=1}^{m-1} \frac{\partial \alpha_{i,m-1}}{\partial x_{i,k}} (x_{i,k+1} + f_{i,k}(\bar{x}_{i,k}) + w_{i,k}(t)) \\ & - \sum_{k=1}^m \sum_{j \in N_i} \frac{\partial \alpha_{i,m-1}}{\partial x_{j,k}} (x_{j,k+1} + f_{j,k}(\bar{x}_{j,k}) + w_{j,k}(t)) \\ & - \frac{\partial \alpha_{i,m-1}}{\partial x_0} f_0(x_0, t) - \frac{\partial \alpha_{i,m-1}}{\partial \hat{\theta}_i} \dot{\theta}_i] \end{aligned} \quad (23)$$

重复第一步中的方法, 可得

$$s_{i,m} w_{i,m} \leq w_M s_{i,m} \tanh\left(\frac{w_M s_{i,m}}{\varepsilon_{i,m}}\right) + \delta \varepsilon_{i,m} \quad (24)$$

$$-s_{i,m} \frac{\partial \alpha_{i,m-1}}{\partial x_{i,k}} w_{i,k} \leq w_M s_{i,m}$$

$$\frac{\partial \alpha_{i,m-1}}{\partial x_{i,k}} \tanh\left(\frac{w_M s_{i,m}}{\varepsilon_{i,m}} \frac{\partial \alpha_{i,m-1}}{\partial x_{i,k}}\right) + \delta \varepsilon_{i,m} \quad (25)$$

$$-s_{i,m} \frac{\partial \alpha_{i,m-1}}{\partial x_0} f_0(x_0, t) \leq f_M s_{i,m}$$

$$\frac{\partial \alpha_{i,m-1}}{\partial x_0} \tanh\left(\frac{s_{i,m}}{f_M} \frac{\partial \alpha_{i,m-1}}{\partial x_0}\right) + \delta \varepsilon_{i,m} \quad (26)$$

$$-s_{i,m} \sum_{j \in N_i} \frac{\partial \alpha_{i,m-1}}{\partial x_{j,k}} w_{j,k} \leq w_{i,m} s_{i,m} \sum_{j \in N_i} \frac{\partial \alpha_{i,m-1}}{\partial x_{j,k}} \tanh \left(\frac{s_{i,m} \sum_{j \in N_i} \frac{\partial \alpha_{i,m-1}}{\partial x_{j,k}}}{\varepsilon_{i,m}} \right) + \delta \varepsilon_{i,m} \quad (27)$$

将式(10), 式(24) - (27) 代入式(23) 得

$$\dot{V}_{i,m} \leq \dot{V}_{i,m-1} + s_{i,m} (s_{i,m+1} + \alpha_{i,m} + \bar{f}_{i,m}) + (2m+1) \delta \varepsilon_{i,m} + s_{i,m} \left[\phi_{i,m}(Z_{i,m}) - \frac{\partial \alpha_{i,m-1}}{\partial \hat{\theta}_i} \dot{\hat{\theta}}_i \right] \quad (28)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{f}_m &= f_{i,m}(\bar{x}_{i,m}) + w_M \tanh \left(\frac{w_M s_{i,m}}{\varepsilon_{i,m}} \right) + f_M \frac{\partial \alpha_{i,m-1}}{\partial x_0} \\ &\tanh \left(f_M \frac{s_{i,m} \frac{\partial \alpha_{i,m-1}}{\partial x_0}}{\varepsilon_{i,m}} \right) - \sum_{k=1}^{m-1} \frac{\partial \alpha_{i,k}}{\partial x_{i,k}} (x_{i,k+1} + f_{i,k}(\bar{x}_{i,k})) \\ &w_M \tanh \left(\frac{w_M s_{i,m} \frac{\partial \alpha_{i,m-1}}{\partial x_{i,k}}}{\varepsilon_{i,m}} \right) - \phi_{i,m}(Z_{i,m}) - \sum_{k=1}^m \sum_{j \in N_i} \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial \alpha_{i,m-1}}{\partial x_{j,k}} (x_{j,k+1} + f_{j,k}(\bar{x}_{j,k}) + w_M \tanh \left(\frac{s_{i,m} \sum_{j \in N_i} \frac{\partial \alpha_{i,m-1}}{\partial x_{j,k}}}{\varepsilon_{i,m}} \right)) \\ &\phi_{i,m}(Z_{i,m}) = -k_{i,0} \hat{\theta}_i \frac{\partial \alpha_{i,m-1}}{\partial \hat{\theta}_i} - \sum_{k=2}^m \frac{s_{i,m} r_i}{2a_{i,m}^2} \\ &|s_{i,k} \frac{\partial \alpha_{i,k-1}}{\partial \hat{\theta}_i}| + \sum_{k=1}^{m-1} \frac{\partial \alpha_{i,m-1}}{\partial \hat{\theta}_i} \frac{r_i}{2a_{i,k}^2} s_{i,k}^2 \Phi_{i,k}^T \Phi_{i,k} \end{aligned} \quad (30)$$

同样的应用神经网络 $W_{i,m}^{*T} \Phi_{i,m}(Z_{i,m})$ 来逼近 $\bar{f}_{i,m}$ 使得下列式子成立。

$$\begin{aligned} \bar{f}_{i,m} &= W_{i,m}^{*T} \Phi_{i,m}(Z_{i,m}) + \delta_{i,m}(Z_{i,m}), \\ |\delta_{i,m}(Z_{i,m})| &\leq \varepsilon_{i,m} \end{aligned} \quad (31)$$

其中, $\delta_{i,m}(Z_{i,m})$ 代表逼近误差, $\varepsilon_{i,m}$ 表示任意给定的小正数。应用与式(19) 相同的估计方法, 下面不等式成立

$$s_{i,m} \bar{f}_{i,m} \leq \frac{\theta}{2a_{i,m}^2} s_{i,m}^2 \Phi_{i,m}^T \Phi_{i,m} + \frac{a_{i,m}^2}{2} + \frac{s_{i,m}^2}{2} + \frac{\varepsilon_{i,m}^2}{2} \quad (32)$$

当 $m=2$ 时, 我们构造虚拟控制信号为

$$\begin{aligned} \alpha_{i,m}(Z_{i,m}) &= -c_{i,m} s_{i,m} - \frac{s_{i,m}}{2} - \\ &(d_i + b_i) s_{i,m-1} - \frac{\hat{\theta}_i}{2a_{i,m}^2} s_{i,m} \Phi_{i,m}^T \Phi_{i,m} \end{aligned} \quad (33)$$

当 $3 \leq m \leq n_i - 1$ 时, 构造虚拟控制信号为

$$\begin{aligned} \alpha_{i,m}(Z_{i,m}) &= -c_{i,m} s_{i,m} - \frac{s_{i,m}}{2} - \\ &s_{i,m-1} - \frac{\hat{\theta}_i}{2a_{i,m}^2} s_{i,m} \Phi_{i,m}^T \Phi_{i,m} \end{aligned} \quad (34)$$

其中, $c_{i,m}$ 为正的设计常数。进一步将式(31) - (34) 代入式(28) 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i,m} &\leq -\sum_{k=1}^m c_{i,k} s_{i,k}^2 - \frac{1}{r_i} \tilde{\theta}_i (\dot{\hat{\theta}}_i - \sum_{k=1}^m \frac{r_i}{2a_{i,k}^2} s_{i,k}^2 \Phi_{i,k}^T \Phi_{i,k}) + \\ &\sum_{k=2}^m s_{i,k} [\phi_{i,k}(Z_{i,k}) - \frac{\partial \alpha_{i,k-1}}{\partial \hat{\theta}_i} \dot{\hat{\theta}}_i] + s_{i,m} s_{i,m+1} + \sigma_{i,m} \end{aligned} \quad (35)$$

其中, $\sigma_{i,m} = \sigma_{i,m-1} + \frac{a_{i,m}^2}{2} + \frac{\varepsilon_{i,m}^2}{2} + (2m+1) \delta \varepsilon_{i,m}$ 。

第 n_i 步: 选取 Lyapunov 函数为

$$V_{i,n_i} = V_{i,n_i-1} + \frac{s_{i,n_i}^2}{2} \quad (36)$$

则有

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i,n_i} &= \dot{V}_{i,n_i-1} + s_{i,n_i} [F(u_i) + f_{i,n_i}(\bar{x}_{i,n_i}) + w_{i,n_i}(t) - \\ &\sum_{k=1}^{n_i-1} \frac{\partial \alpha_{i,n_i-1}}{\partial x_{i,k}} (x_{i,k+1} + f_{i,k}(\bar{x}_{i,k}) + w_{i,k}(t)) - \\ &\sum_{k=1}^{n_i} \sum_{j \in N_i} \frac{\partial \alpha_{i,n_i-1}}{\partial x_{j,k}} (x_{j,k+1} + f_{j,k}(\bar{x}_{j,k}) + w_{j,k}(t)) - \\ &\frac{\partial \alpha_{i,n_i-1}}{\partial x_0} f_0(x_0, t) - \frac{\partial \alpha_{i,n_i-1}}{\partial \hat{\theta}_i} \dot{\hat{\theta}}_i] \end{aligned} \quad (37)$$

与前面的步骤类似, 可得下列不等式

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i,n_i} &\leq \dot{V}_{i,n_i-1} + s_{i,n_i} (k_i u_i + \bar{f}_{i,n_i}) + (2n_i + 1) \\ &\delta \varepsilon_{i,n_i} - \frac{s_{i,n_i}^2}{2} + s_{i,n_i} [\phi_{i,n_i}(Z_{i,n_i}) - \\ &\frac{\partial \alpha_{i,n_i-1}}{\partial \hat{\theta}_i} \dot{\hat{\theta}}_i] - s_{i,n_i-1} s_{i,n_i} \end{aligned} \quad (38)$$

其中, $\bar{f}_{i,n_i}, \phi_{i,n_i}(Z_{i,n_i})$ 的定义为式(29), 式(30) 中 $m = n_i$ 的情况。

与前面的类似, 应用神经网络 $W_{i,n_i}^{*T} \Phi_{i,n_i}(Z_{i,n_i})$ 来逼近 $\bar{f}_{i,n_i}$, 与式(31) - (33) 采用类似的方法可得

$$s_{i,n_i} \bar{f}_{i,n_i} \leq \frac{\theta}{2a_{i,n_i}^2} s_{i,n_i}^2 \Phi_{i,n_i}^T \Phi_{i,n_i} + \frac{a_{i,n_i}^2}{2} + \frac{s_{i,n_i}^2}{2} + \frac{\varepsilon_{i,n_i}^2}{2} \quad (39)$$

构造实际控制输入 u_i 和参数 θ_i 的自适应律为

$$u_i = \frac{1}{\eta_i} \left(-c_{i,n_i} s_{i,n_i} - \frac{\hat{\theta}_i}{2a_{i,n_i}^2} s_{i,n_i} \Phi_{i,n_i}^T \Phi_{i,n_i} \right) \quad (40)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_i = \sum_{k=1}^{n_i} \frac{r_i}{2a_{i,k}^2} s_{i,k}^2 \Phi_{i,k}^T \Phi_{i,k} - k_{i,0} \hat{\theta}_i \quad (41)$$

其中, $c_{i,n_i} > 0$ 表示设计参数。

注7: 式(41)意味着只要 $\hat{\theta}_i(0) \geq 0$, 则对于 $\forall t > 0$ 都有 $\hat{\theta}_i \geq 0$ 。由于 $0 < \eta_i \leq \min\{k_{i,r}, k_{i,l}\}$, 即 $0 < \eta_i \leq k_i$, 进而

$$s_{i,n_i} k_i u_i \leq -c_{i,n_i} s_{i,n_i}^2 - \frac{\hat{\theta}_i}{2a_{i,n_i}^2} s_{i,n_i}^2 \Phi_{i,n_i}^T \Phi_{i,n_i} \quad (42)$$

将式(3), 式(39) - (42)代入式(38)得

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i,n_i} \leq & -\sum_{k=1}^{n_i} c_{i,k} s_{i,k}^2 + \sum_{k=2}^{n_i} s_{i,k} [\phi_{i,k}(Z_{i,k}) - \\ & \frac{\partial \alpha_{i,k-1}}{\partial \hat{\theta}_i} \hat{\theta}_i] + \frac{k_{i,0} \tilde{\theta}_i \hat{\theta}_i}{r_i} + \sigma_{i,n_i} \end{aligned} \quad (43)$$

其中, $\sigma_{i,n_i} = \sigma_{i,n_i-1} + \frac{a_{i,n_i}^2}{2} + \frac{\varepsilon_{i,n_i}^2}{2} + (2n_i + 1) \delta \varepsilon_{i,n_i}$ 。

由文献[21]中的工作可知

$$\sum_{k=2}^{n_i} s_{i,k} [\phi_{i,k}(Z_{i,k}) - \frac{\partial \alpha_{i,k-1}}{\partial \hat{\theta}_i} \hat{\theta}_i] \leq 0 \quad (44)$$

考虑到式(44), 又注意到 $\tilde{\theta}_i \hat{\theta}_i = \tilde{\theta}_i (\theta_i - \tilde{\theta}_i)$
 $\leq -\frac{\tilde{\theta}_i^2}{2} + \frac{\theta_i^2}{2}$, 式(43)可以进一步写为

$$\dot{V}_{i,n_i} \leq -\sum_{k=1}^{n_i} c_{i,k} s_{i,k}^2 - \frac{k_{i,0} \tilde{\theta}_i^2}{2r_i} + \lambda_i \quad (45)$$

其中, $\lambda_i = \sum_{k=1}^{n_i} \left(\frac{a_{i,k}^2}{2} + \frac{\varepsilon_{i,k}^2}{2} + (2k+1) \delta \varepsilon_{i,k} \right) + \frac{k_{i,0} \theta_i^2}{2r_i}$ 。

定义 $\mu_i = \min\{2c_{i,k}, k_{i,0}\} > 0, k = 1, 2, \dots, n_i$, 可得

$$\dot{V}_{i,n_i} \leq -\mu_i V_{i,n_i} + \lambda_i \quad (46)$$

基于以上讨论, 我们将主要结果整理为以下的定理。

定理1: 在假设1-假设3的条件下, 考察多智能体系统(1)、(5), 如果采用分布控制信号(40)和参数自适应律(41), 那么所有跟随智能体与领航者的一致性跟踪误差是有界的且收敛到原点的一个充分小的邻域里。

证明: 选取整个多智能体系统(1)的Lyapunov

函数为 $V = \sum_{i=1}^N V_{i,n_i}(t)$, 由式(46)可以得到

$$\dot{V} \leq -\mu V + \lambda \quad (47)$$

其中, $\mu = \min\{\mu_i, i = 1, 2, \dots, N\}$, $\lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_i$ 。在式(47)的两端同时乘以 $e^{\mu t}$ 并同时从0到 t 积分, 可得

$$V(t) e^{\mu t} - V(0) \leq \int_0^t \lambda e^{\mu t} dt \quad (48)$$

进一步化简可以得到

$$0 \leq V(t) \leq e^{-\mu t} V(0) + \frac{\lambda}{\mu} (1 - e^{-\mu t}) \quad (49)$$

由 V 的定义和式(49), 以下不等式成立

$$\|s_{i,1}\|^2 \leq 2e^{-\mu t} V(0) + \frac{2\lambda}{\mu} (1 - e^{-\mu t}) \quad (50)$$

在式(50)两边取极限, 上式进而化为 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|s_{i,1}\| \leq \sqrt{2\lambda/\mu}$ 。由 λ 及 μ 的定义可推得 $\|s_{i,1}\|$ 收敛到原点的一个充分小的邻域里。进一步, 再由引理2可知所有跟随智能体与领航者的一致性跟踪误差也是有界的, 且通过选择合适的参数可使其收敛到原点的一个充分小的邻域里。

4 仿真算例

本节列举一个数值例子来验证所提出的分散控制方案的有效性。

考虑由5个跟随智能体和一个领航者组成的多智能体系统, 其通讯拓扑图见图1, 牵制增益矩阵为 $B = \text{diag}(0, 1, 0, 0, 0)$ 。跟随智能体的动力学方程为

$$\begin{aligned} \dot{x}_{i,1} &= x_{i,2} + 0.1 e^{-0.5x_{i,1}^2} \cos(x_{i,1}) + \\ & \frac{x_{i,1}^3}{1 + x_{i,1}^2} + 0.01 \sin(t) \\ \dot{x}_{i,2} &= D(u_i) + x_{i,2} \sin\left(\frac{0.2}{1 + x_{i,1}^2}\right) + \\ & \frac{x_{i,1}^4 \sin(x_{i,2})}{1 + x_{i,1}^2} + 0.01 \cos(t) \\ y_i &= x_{i,1} \end{aligned}$$

其中, u_i 是死区输入, $D(u_i)$ 是满足定义 (2) 的死区输出, 死区参数为 $b_{i,r}=0.2$, $b_{i,l}=0.25$, $k_{i,r}=2$, $k_{i,l}=1$ 。

很明显跟随智能体包含有界干扰项 $0.01\sin(t)$ 和 $0.01\cos(t)$ 及死区输入 $D(u_i)$ 。因而在文献[23-24]中所提出的分散控制方案不能用于控制该多智能体系统。

领航智能体的动力学方程为

$$\dot{x}_0 = 0.5(\cos(0.5t) + \cos(t))$$

$$y_0 = x_0$$

选择中间虚拟控制器 $\alpha_{i,1}(20)$, $\alpha_{i,2}(33)$, 参数自适应律 $\hat{\theta}_i(41)$, 实际控制器为 (40)。在仿真中选择控制设计参数 $c_{i,1}=c_{i,2}=10$ ($i=1,3,4$), $c_{2,1}=c_{2,2}=30$, $c_{5,1}=10$, $c_{5,2}=20$, $r_i=250$, $a_{i,1}=2$, $a_{i,2}=3$, $k_{i,0}=10$, $i=1,2,3,4,5$ 。这些参数仅仅用于仿真, 作为控制器设计来可以不用知道。初始条件选为 $x_1(0)=[0.1,0]^T$, $x_2(0)=[0.2,0]^T$, $x_3(0)=[0.3,0]^T$, $x_4(0)=[0.25,0]^T$, $x_5(0)=[0.35,0]^T$, $x_0(0)=0$, $\hat{\theta}_1(0)=0.1$, $\hat{\theta}_2(0)=0.2$, $\hat{\theta}_3(0)=0.2$, $\hat{\theta}_4(0)=0.2$, $\hat{\theta}_5(0)=0.2$ 。选择形式为 (9) 的RBF神经网络, 每个神经网络节点包含3个神经元, 且平均分配在区间 $[-0.5,0.5]$ 上, 宽度 β_i 为2。定义5个跟随智能体与领航者的跟踪误差为 $\delta_{i,0}=|y_i(t)-y_0(t)|$, $i=1,2,3,4,5$ 。仿真结果参见图2-图6。图2为5个跟随智能体和领航者的输出, 图3展示了跟踪误差 $\delta_{i,0}=|y_i(t)-y_0(t)|$, $i=1,2,3,4,5$, 从图2-3可

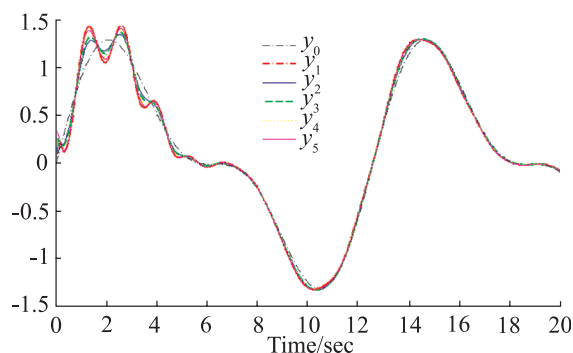


图2 多智能体输出

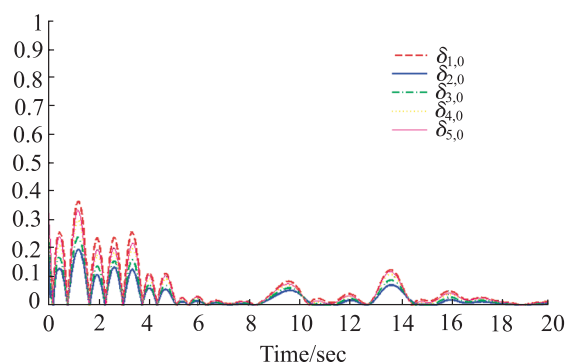


图3 同步误差 $\delta_{i,1}$

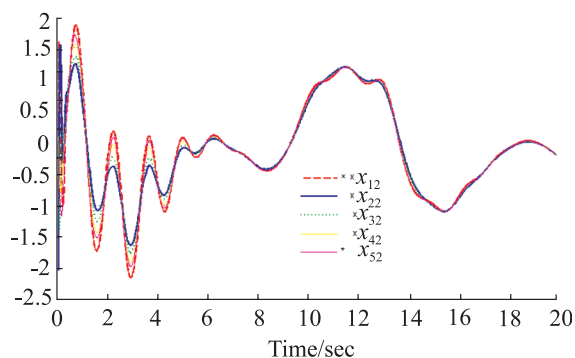


图4 跟随智能体的状态变量 $x_{i,1}$

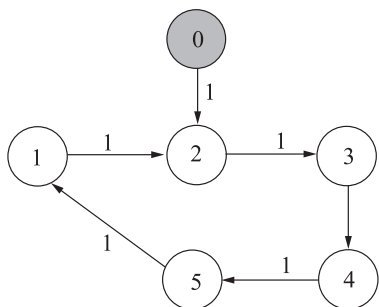


图1 跟随智能体与领航智能体之间的拓扑关系

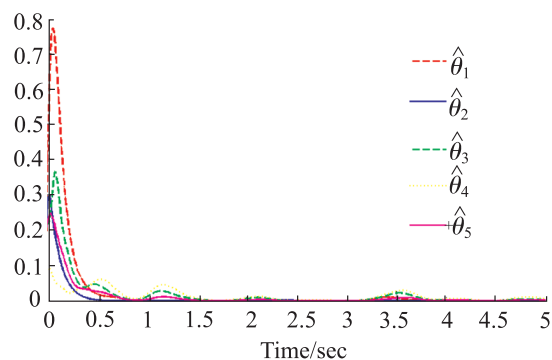
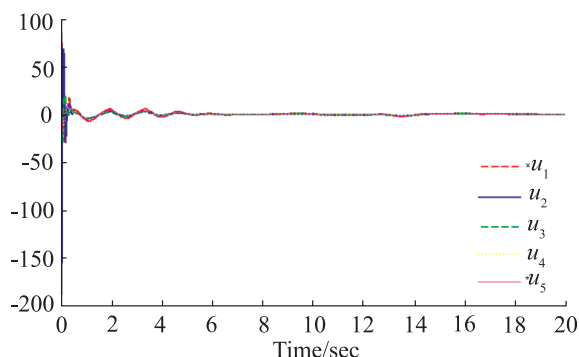


图5 自适应参数 $\hat{\theta}_i$

图6 分散控制信号 u_i

可以看出在有向拓扑结构下，尽管多智能体系统具有输入死区非线性，仍能得到好的追踪效益。

图4-5分别说明了自适应参数 $\hat{\theta}_i$ 和状态变量 $x_{i,2}$ 的有界性，图6展示了每个子系统的控制输入信号。而且与文献[23-24]相比，通过使用向量的范数估计，本文只包含5个自适应参数，明显减轻了计算负担。

5 结论

本文在有向拓扑结构下，研究了具有死区输入的严格状态反馈非线性多智能体系统的协调跟踪控制问题。利用神经网络和Young不等式，未知死区和未知的外部干扰被补偿。应用自适应backstepping技术，提出了一个自适应神经网络分散控制方案，该控制方案能实现跟随智能体对领航智能体的跟踪。

参考文献

- [1] Ren. W. On consensus algorithms for double-integrator dynamics. IEEE Transactions on Automatic Control 2008; 53(6):1053–1059.
- [2] Su H, Chen G, Wang X, et al. Adaptive second-order consensus of networked mobile agents with nonlinear dynamics. Automatica 2011; 47(2):368–375.
- [3] Xie G, Wang L. Consensus control for a class of networks of dynamic agents. International Journal of Robust and Nonlinear control 2007; 17(10): 941–959.
- [4] Olfati-Saber R, Murray R M. Consensus problems in networks of

agents with switching topology and time-delays. IEEE Transactions on Automatic Control 2004; 49(9): 1520–1533.

- [5] Su H, Wang X, and Chen G. Rendezvous of multiple mobile agents with preserved network connectivity. Systems Control Letter 2010;59(5): 313–322.
- [6] Yu W, Chen G, Cao M. et al. Second-Order Consensus For Multi-Agent Systems With Directed Topologies And Nonlinear Dynamics. IEEE Transactions System, Man and Cybernetics- Part B: Cybernetics 2010; 40(3): 881–891.
- [7] Tian Y, Liu C. Robust consensus of multi-agent systems with diverse input delays and asymmetric interconnection perturbations. Automatica 2009; 45(5): 1347–1353.
- [8] Chen G, F. L. Lewis. Distributed adaptive tracking control for synchronization of unknown networked Lagrangian systems. IEEE Transactions System, Man and Cybernetics- Part B: Cybernetics 2011; 41(3): 805–816.
- [9] Chen WS, Li XB, Jiao LC. Quantized consensus of second-order continuous-time multi-agent systems with a directed topology via sampled data. Automatica 2013; 49(1):2236–2242.
- [10] Hou ZG, Cheng L, Tan M. Decentralized robust adaptive control for multiagent system consensus problem using neural networks. IEEE Transactions System, Man and Cybernetics- Part B: Cybernetics 2009; 39(3):636–647.
- [11] Mei J, Ren W, Ma G. Distributed containment control for Lagrangian networks with parameter uncertainties under a directed graph. Automatica 2012; 48(4):653–659.
- [12] Zhang HW, F. L. Lewis, Qu Z. Lyapunov, adaptive, and optimal design techniques for cooperative systems on directed communication graphs. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2012; 59(7):3026–3041.
- [13] Zhang HW, F. L. Lewis. Adaptive cooperative tracking control of higher-order nonlinear systems with unknown dynamics. Automatica 2012;48(1): 1432–1439.
- [14] Chen GR, F. L. Lewis. Distributed adaptive tracking control for synchronization of unknown networked Lagrangian systems. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2011; 41(3):805–816.
- [15] Krstic M, Kanellakopoulos I, Kokotovic P. Nonlinear and Adaptive Control Design. New York: Wiley Interscience, 1995.
- [16] Tong SC, Li YM. Adaptive Fuzzy Output Feedback Tracking Backstepping Control of Strict- Feedback Nonlinear Systems With

- Unknown Dead Zones. IEEE Transation on Fuzzy System 2012; 20(1):168–179.
- [17] Zhou Q, Shi P, Lu JJ, et al. Adaptive output-feedback fuzzy tracking control for a class of nonlinear systems. IEEE Transation on Fuzzy System 2011; 19(5): 972–982.
- [18] Liu YJ, Chen CLP, Wen GX, et al. Adaptive Neural Output Feedback Tracking Control for a Class of Uncertain Discrete-Time Nonlinear Systems. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems 2011; 22(7): 1162–1167.
- [19] Liu Y J, Tong SC, Wang D, et al. Adaptive Neural Output Feedback Controller Design with Reduced-Order Observer for a Class of Uncertain Nonlinear SISO Systems. IEEE Transactionson Neural Networks and Learning Systems 2011; 22(8):1328–1334.
- [20] Tong SC, He XL, Zhang HG. A combined backstepping and small-gain approach to robust adaptive fuzzy output feedback control. IEEE Transation on Fuzzy System 2009; 17(5):1059–1069.
- [21] Chen B, Liu XP, Liu KF, et al. Direct adaptive fuzzy control of nonlinear strict-feedback systems. Automatica 2009; 45(6): 1530–1535.
- [22] Tong SC, Li YM, Feng G., et al. Observer-based adaptive fuzzy backstepping dynamic surface control for a class of non-linear systems with unknown time delays. IET Control Theory Applation 2011; 5(12): 1426–1438.
- [23] S. J. Yoo. Distributed consensus tracking for multiple uncertain nonlinear strict-feedback systems under a directed graph. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems 2013; 24(4):666–672.
- [24] S. J. Yoo. Distributed adaptive containment control of uncertain nonlinear multi-agent systems in strict-feedback form. Automatica 2013; 49(1): 2145–2153.
- [25] H. K. Khalil. Nonlinear Systems. Englewood Cli?s, NJ: Prentice-Hall, 1996.
- [26] Tao G, P. V. Kokotovic. Adaptive control of plants with unknown dead-zones. IEEE Transation on Automatic Control, 1994; 39(1): 59–68.
- [27] Tong SC, Li YM. Adaptive Fuzzy Output Feedback Tracking Backstepping Control of Strict- Feedback Nonlinear Systems With Unknown Dead Zones. IEEE Transation on Fuzzy System 2012; 20(1):168–179.
- [28] Zhou J, MJ Er, J M Zurada. Adaptive neural network control of uncertain nonlinear systems with nonsmooth actuator nonlinearities. Neurocomputing 2007;70(4):1062–1070.
- [29] Luo X, Wu X, Guan X. Adaptive backstepping fault-tolerant control for unmatched non- linear systems against actuator dead-zone. IET Control Theory and Applications 2010;4(5):879–888.
- [30] Liu YJ, Zhou N. Observer-based adaptive fuzzy-neural control for a class of uncertain non- linear systems with unknown dead-zone input. ISA Transactions 2010;49: 462–469,2010.
- [31] Ploycarpou MM, Ioannou PA. A robust adaptive nonlinear control design. Automatica 1996; 32(3): 423–427.
- [32] Sanner R, Slotine J. Gaussian networks for direct adaptive control. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems 1992;3(6): 837–863.

作者简介

刘 治 2004年获清华大学控制科学与工程博士学位，现为广东工业大学教授。主要研究方向为机器人控制，模糊控制，神经网络控制，自适应控制，鲁棒控制。

王 芳 广东工业大学自动化学院博士生，山东科技大学数学与系统科学学院讲师。主要研究方向为模糊控制，神经网络控制，自适应控制。

原文取自: IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol.9, no.1, pp. 427-438, Feb. 2013.

分布式多智能体在协同控制研究中的 近期进展概述

马宏文 译

中国科学院自动化研究所 复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京 100190

摘要: 本文回顾了分布式多智能体系统在协同控制问题中的一些主要结果和进展, 其所涉及的参考文章从2006年开始, 集中于主流的控制系统杂志和机器人杂志。多机器的分布式协同控制包含了无人飞行器、无人地面车辆和无人水下航行器, 这个领域的研究非常活跃, 因而在系统和控制界受到了广泛的关注。近期这方面的研究可以被划分成几个方向, 例如一致性问题、编队控制问题、最优化问题和估值问题。在整个回顾之后我们用一个简短的讨论段来总结现存的研究并提出了几个具有潜在价值的研究方向, 一些被认为对未来更深入的研究具有重要意义的开放性问题也在此段提出。

关键词: 分布式协同控制, 编队控制, 多智能体系统, 传感器网络

1 引言

控制理论及其实践可追溯到上个世纪初, 当时莱特兄弟于1903年进行了首次试飞实验。从那时起控制理论逐渐流行起来并获得了越来越广泛的关注, 特别是在第二次世界大战期间, 其发展并应用到了火控系统、导弹制导系统和多种电子自动化器件中。在过去的数十年间, 基于大规模工程系统的航天技术的出现使得现代控制理论得到了进一步发展。

在现代控制理论快速可持续的发展过程中, 无论单个车辆的维数有多高、结构有多复杂, 其控制技术已经变得相对成熟。与此相对应也产生了许多有效的控制工具, 例如PID控制、自适应控制、非线性控制、智能控制和鲁棒控制等方法。特别是在过去的二十几年里当单个复杂的车辆可以被多个简单的车辆所取代的时候会带来许多好处, 在这种情况的刺激下对多车辆的控制需求日

益增多。在这一努力中, 有两种方法通常用来控制多部车辆: 一种是集中式的方法, 另一种是分布式的方法。集中式的方法是基于中心站足够强大以至于能控制整组车辆的假设。从本质上讲, 集中式的方法是传统的以单车为基础的控制理念和策略的直接扩展。相反, 分布式的方法不需要一个中心站来控制, 但所付出的代价是结构和组织变得更加复杂。虽然根据具体情况和真实的应用背景这两种方法都被认为是有效的, 但由于很多不可避免的物理因素的存在, 例如有限的资源和能量、无线通信范围的不足、狭窄的带宽和巨量的车辆管控, 分布式的方法被认为更有前途。因此, 本综述关注的焦点在于分布式方法。

在对一组自主车的分布式控制中, 主要目的通常是使整组车辆在一个分布式的控制协议下以合作的方式工作。在这里, 合作指的是在所有车辆中存在的一种密切的关系, 且信息共享在组内起到核心作用。分布式的方法在实现合作式的组

群性能方面有许多优势,尤其是在低运营成本、更少的系统要求、高鲁棒性、强自适应性及灵活的可扩展性方面优势更明显,因此分布式方法得到了广泛的认可和赞赏。

多车辆分布式控制的研究或许首先是由分布式计算^[1]、管理学^[2]和统计物理^[3]方面的工作所激发的。在控制系统领域,一些开创性的工作一般可以参考^[4]和^[5],其中一个异步协议问题研究了用于分布式的决策问题。此后,一些一致性问题在各种信息流受到约束^[6-10]的情况下得到了研究。在2006年以后,有几种刊物的特刊出版了相关议题,这其中就包括^[11-15]。此外,也有一些最近的概述和进展报告在综述^[16-20]和书籍^[21-28]中给出。

本文回顾了分布式多智能体在协同控制问题中的一些主要结果和进展,其所涉及的参考文章从2006年开始,集中于主流的控制系统杂志和机器人杂志。由于篇幅受限,我们建议读者参考^[29]作为同一概述的更完整的版本。对于早于2006年的结果,请读者参考^[16-19]。

具体来说,本文回顾了如下方向近期的研究成果,但它们并不是独立的且实际上可能存在一定程度的相互重叠。

(1) 一致性之类的问题(也即同步和汇合):一致性指的是一种群体行为,其中所有的智能体在有或没有预先给定的公共速度和方向的情况下,通过一种局部分布式控制协议渐近地达到某一公共的值。

(2) 分布式编队之类的问题(也即群集):分布式编队指的是一种群体行为,其中所有的智能体在有或者没有一个公共参考量的情况下,通过局部的相互作用形成一个预先给定的几何构型。

(3) 分布式最优化问题:这指的是算法层面的发展对于大规模分布式系统的分析和优化。

(4) 分布式估值与控制问题:这指的是基于局部估值的分布式控制器的设计,且这种局部估

值是针对所需的全局信息的估值。

本文的其余部分安排如下:第二部分介绍了图论与随机矩阵的基本符号;第三部分到第六部分描述了在一致性、编队控制、最优化和估值方面的最新研究成果和进展。最后我们以一个简短的对未来前景的讨论来结束全文。

2 预备知识

2.1 图论

对于由 n 个相连的智能体组成的系统,其网络的拓扑结构可以被建模成一个有向图,用符号 $G=(V,W)$ 表示,其中 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 和 $W \subseteq V \times V$ 分别表示的是智能体的集合和能把智能体通过有向边连接起来的边的集合。具体而言,由一对有序边 (v_i, v_j) 表示的有向边指的是智能体 j 可以获得智能体 i 的状态信息。因此,智能体 i 是智能体 j 的一个邻居。一条有向路径是由一组有向边的序列组成,形如 $(v_1, v_2), (v_2, v_3), \dots$,其中所有的 $v_i \in V$ 。如果在有向图中至少存在一个智能体,其到每一个其他的智能体都存在一条有向路径,那么这个有向图就包含一个有向生成树。在智能体的集合 V 相同的情况下,一组有向图的集合 $\{G_{i_1}, \dots, G_{i_m}\}$ 指的是一种有向图,其所包含的智能体是相同的,其所包含的边是所有有向图 $G_{i_j}, j=1, \dots, m$ 的边的集合。完全有向图指的是图中每对不同的智能体由一条边双向连接,因此在拓扑网络中从任意一个智能体到其他智能体之间都存在一条有向路径。

有两种矩阵用来表示网络的拓扑结构:一种是邻接矩阵 $A=[a_{ij}] \in R^{n \times n}$,其中如果 $(v_j, v_i) \in W$,那么 $a_{ij} > 0$;否则 $a_{ij} = 0$ 。另一种是拉式矩阵 $L=[l_{ij}] \in R$,其中 $l_{ii} = \sum_{j=1}^n a_{ij}$ 且 $l_{ij} = -a_{ij}, i \neq j$ 。一般情况下有向图是不对称的。

2.2 随机矩阵

如果一个非负方阵的每一行的行和都为1, 则称之为(行)随机矩阵。两个随机矩阵的乘积仍然是随机矩阵。一个行随机矩阵 $P \in R^{n \times n}$, 如果对某些 $y \in R^{n[30]}$, $\lim_{k \rightarrow \infty} P^k = 1y^T$ 成立, 其中1是一个元素全为1的向量, 则称这个随机矩阵是不可分解和非周期性的。

3 一致性问题

考虑含 n 个智能体的集合, 每个智能体都可以视为单积分动力学方程, 其描述如下:

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

其中, $x_i(t)$ 和 $u_i(t)$ 分别是第 i 个智能体的状态量和控制输入量。一个典型的一致性控制算法设计如下:

$$u_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij}(t) [x_j(t) - x_i(t)] \quad (2)$$

其中, $a_{ij}(t)$ 是对应的邻接矩阵在 t 时刻的第 (i, j) 项。公式(2)背后的主要思想是每一个智能体都朝着其邻居的状态的加权平均值的方向演化。由于动态智能体的连续运动, 我们给出切换网络拓扑结构的模式, 其中 $a_{ij}(t)$ 在公式(2)中是耦合系数, 此时图的拓扑结构具有一般意义下的时变性。从文献[9]和文献[10]可以看出, 在某些联合模式下一也即此模式是时变拓扑结构的集合时, 如果所给出的有向图包含一个有向生成树, 则一致性能够达到。

一致性背后的思想是指导分布式多智能体合作问题的算法设计的一个基本原则。因此研究一致性问题已经成为分布式多智能体合作问题的主要研究方向。为了缩小一致性算法研究和实际系统中内生的许多物理特性之间的差距, 在研究一致性问题时考虑许多实际的因素是很有必要且意义重大的, 例如执行机构、控制、通信、计算和车辆的动态特性, 这些都刻画了实际系统的一些

重要特性, 上述这些是研究一致性的主要动机。在第三部分的第一小节我们给出一致性研究进展的综述, 其主要是关于从2006年以后的在随机网络拓扑结构及网络动态、复杂动态系统、时延效应和量化方面的研究。在2006年之前的一些具有里程碑意义的结果可以从文献[2], [4]-[6], [8]-[10]和[31]中获得。

3.1 随机网络拓扑结构及其动态特性

在多智能体中, 所有车辆的网络拓扑结构在决定一致性方面起到了至关重要的作用。这里的目的是显示地阐明关于网络拓扑结构的充分和(或)必要条件, 使得一致性在合适的设计算法下能够达到。

通常在理想的通信信道情况下考虑网络拓扑结构是确定的情形是合理的, 因此关于一致性问题的主要研究都是在确定性的固定/切换网络拓扑结构下进行的, 也即邻接矩阵 $A(t)$ 是确定性的。其他时候, 当考虑到物理通信信道中存在的随机通信故障、随机丢包和通信信道不稳定的情形时, 研究网络拓扑结构依据某种随机分布而演化的研究是必要且重要的, 这时邻接矩阵 $A(t)$ 是随机演化的。

在确定性情况下, 如果所有的智能体最终都能达到一个共同的状态, 我们就说一致性已经达到了。在随机的情况下, 如果所有的智能体在(几乎必然/均方/依概率一)意义下最终都能达到一个共同的状态, 我们就说一致性在(几乎必然/均方/概率)意义下已经达到了。值得注意的是由于在网络拓扑结构方面的假设不同, 随机情况下所研究的问题和确定情况下所研究的问题有些许不同^[32]。可能是第一个在随机网络拓扑结构下对一致性进行研究的文献, 其中系统方程(1)是单积分动力学方程, 此文献给出了一些关于网络拓扑结构的充分条件用以保证系统在依概率一意义下能达到一致性, 同时该文献研究了系统的收敛

速度。针对一致性问题在随机网络拓扑结构下的更深入的研究在^[33-35]中有报道,所涉及的研究工作按系统结构分为单积分动力学方程^[33-34]和双积分动力学方程^[35]。在随机网络拓扑结构下对单积分动力学方程的一致性已经得到了广泛地研究,其中^[34]得到了一些在几乎必然意义下能达到一致性的一般条件。不严格地说,当且仅当与期望值 $E[A(t)]$ 相关的网络拓扑结构含有一个有向生成树时,在几乎必然意义下的单积分动力学方程形式的一致性可以达到,也即 $x_i(t) - x_j(t) \rightarrow 0$ 在几乎必然意义下成立。值得注意的是这些条件与文献[9]和文献[10]中的条件类似,但前提是在随机意义下进行讨论。考虑到与单积分动力学的一致性有关的闭环系统其特殊的结构,随机矩阵的基本性质在相关的控制算法收敛性分析中起到了至关重要的作用^[35]。研究了双积分动力学的一致性,其中假设切换网络拓扑结构是由一个伯努利过程驱动的^[35],指出如果所有的图的集合中包含一个有向生成树则一致性能够达到。显然对双积分动力学的网络拓扑结构的要求是对应的单积分动力学情况下的一个特例,这是因为存在由大量的动态差异所引起的终态的差异性(单积分动力学的常量终态和可能存在的双积分动力学的动态终态)。是否能找到双积分动力学下一致性的一般性条件(与之对应的是某些特定的算法)仍是一个开放性问题。

除了分析网络拓扑结构在什么情况下一致性能够达到之外,一种被称之为“八卦”算法^[36-37]的特殊一致性算法已经用于随机情况下来获得一致性。如果可用的成对通信信道满足给定的条件(比如包含一个连通图),“八卦”算法总是能保证在几乎必然意义下取得一致性。网络拓扑结构的切换方式在一致性问题的考虑中并不起作用。

当前在随机网络拓扑结构下对一致性问题的研究已经给出了一些有趣的结果,这些结果包

括:①针对不同的多智能体系统的一致性算法的设计;②③为达到一致性网络拓扑结构所需的条件;③随机拓扑网络结构对收敛速度的影响。未来的研究方向包含如下两个(但不局限于此):①当网络拓扑结构本身是随机的时,怎样测定在几乎必然意义下能达到一致性的概率?②与确定性网络拓扑结构相比,在考虑例如鲁棒性和收敛速度的时候随机网络拓扑结构的优劣在哪?

众所周知,扰动和不确定性通常存在于网络化系统中,比如信道噪声、通信噪声和网络参数的不确定性。除了上述所讨论的随机网络拓扑结构之外,随机扰动^[38-39]和不确定性^[40]对一致性问题的影响也需到研究。当前研究主要集中于分析受扰时一致性算法的性能,并且给出在不确定性存在的情况下一致性能够达到的条件。此外,另一个吸引人的且考虑扰动和不确定性的方向是设计分布式的局部滤波器算法用以节约能量和提升计算效率。分布式的局部滤波器算法在多智能体系统中起到了非常重要的作用,其比传统的集中式滤波器算法要更有效。比如在^[41-43]中所设计的一些分布式的卡尔曼滤波器是用来实现数据融合的^[44]。通过分析复杂网络同步性中的一致性和牵引控制,作者解决了传感器网络中的分布式一致性滤波器设计问题。近来,文献[45]在含丢包网络中通过概率方法设计了卡尔曼滤波器。如今,如何既考虑到一致性的动态特性又考虑到概率(卡尔曼)滤波器来讨论一致性的问题仍是一个具有挑战性的议题。

3.2 复杂的动态系统

由于一致性考虑的是一组车辆的群体性行为,所以在一致性问题的研究中自然会考虑到实际车辆系统的动态行为。虽然在不同的系统动态特性下研究一致性的问题是由于实际系统中存在复杂的动态特性,但是另一个有趣的现象是系统的动态特性在决定最终一致性的状态时也起到了

至关重要的作用。例如，多智能体系统中研究的很透彻的单积分动力学一致性系统通常会收敛到一个常值终态。然而双积分动力学多智能体系统的一致性可能会得到一个动态的终值（也即一个关于时间的函数）。如上这些重要的议题激励着在不同系统动态特性下一致性问题的研究。

作为简单动态系统中一致性问题研究的一种直接扩展—这类简单系统可以是单积分动力学系统或双积分动力学系统—最近一般的线性动态系统的一致性也得到了研究^[46-48]，其中研究主要集中于寻找反馈控制律使得如下的一般线性系统能够达到一致性（这种一致性是就输出状态而言的）：

$$\dot{x}_i = Ax_i + Bu_i, \quad y_i = Cx_i \quad (3)$$

其中， A 、 B 和 C 是维数大小适合的常值矩阵。显然只要合理地选择 A 、 B 和 C ，则单积分动态系统和双积分动态系统就变成了式（3）的特例。

进一步扩展可知复杂系统的一致性也得到了广泛的研究。这里所指的术语“复杂系统的一致性”是用于当系统的动态特性是非线性的^[49-53]或一致性算法是非线性的^[54-55]时候所研究的一致性问题的。非线性动态系统的例子包括如下这些：

（1）非线性振荡器^[50]：通常假设系统的动态由Kuramoto方程控制：

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + (K/N) \sum_{j=1}^N \sin(\theta_j - \theta_i), \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

其中， θ_i 和 ω_i 分别是第 i 个振荡器的相位和固有频率， N 是振荡器的个数， K 是控制增益。一般来说，控制增益 K 在确定网络的可同步性中起到至关重要的作用。

（2）复杂网络^[53]：动态特性通常表示成如下形式：

$$\dot{x}_i(t) = f(x_i(t)) + c \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij}(t) \Gamma(x_j(t) - x_i(t)), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

其中， $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})^T \in R^n$ 是第 i 个节点的状态向量， $f: R^n \mapsto R^n$ 是一个非线性向量函数， c 是

全局耦合强度， $A(t) = [a_{ij}(t)]$ 是外部耦合矩阵且如果节点 i 和节点 j 在 t 时刻连通则 $a_{ij}(t) = 1$ ，否则 $a_{ij}(t) = 0$ 且 $a_{ii}(t) = k_i$ （节点 i 的度）； Γ 是一般的内部耦合矩阵，其表征了智能体的不同状态部分的内部相互作用。容易看出模型（1）和控制输入（2）是式（4）当 $f = 0$ 时的特例。

（3）非完整移动机器人^[56]：动态特性表述如下：

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= u_i \cos \theta_i, \quad \dot{y}_i = u_i \sin \theta_i, \quad \dot{\theta}_i = \omega_i, \\ i &= 1, 2, \dots, N, \end{aligned} \quad (5)$$

其中， $[x_i, y_i]$ 代表第 i 个智能体的位置， u_i 和 ω_i 分别代表第 i 个智能体的平移速度和旋转速度。值得指出的是这个系统中有三个状态量和两个控制输入，因此非完整移动机器人的动态特性是欠驱动的，这给如何设计合适的一致性算法以及相应的稳定性分析带来了巨大的困难。

（4）刚体之类的系统^[51, 52]：一个典型的（但非独一无二的）动态特性可描述为：

$$\begin{aligned} M_i(q_i) \ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i) \dot{q}_i + g_i(q_i) &= \tau_i, \\ i &= 1, 2, \dots, N, \end{aligned} \quad (6)$$

其中， $q_i \in R^p$ 是广义坐标向量， $M_i(q_i) \in R^{p \times p}$ 是对称正定惯性矩阵， $C_i(q_i, \dot{q}_i) \dot{q}_i \in R^p$ 是科里奥利向量和离心力矩， $g_i(q_i)$ 是重力力矩向量， $\tau_i \in R^p$ 是由与第 i 个智能体相关的执行器产生的力矩向量。实际中许多机械系统的动力学特性都与式（6）相似。与刚体的动态特性相关的一个显著的性质是 $M_i(q_i) - 2C_i(q_i, \dot{q}_i)$ 是反对称的（也即 $z^T [M_i(q_i) - 2C_i(q_i, \dot{q}_i)] z = 0$ 对所有的 $z \in R^p$ 都成立），这一性质在寻找李雅普诺夫函数及后续的稳定性分析中起着至关重要的作用。

虽然先前提到的系统的动态特性与已深入研究过的单积分动态系统和双积分动态系统不同，但是研究的主要问题是相同的，也即通过智能体间的局部相互作用使得所有的智能体达到某一公共状态。与简单动态系统所提出的一致性算法相似，这些复杂模型的一致性算法也是基于状态差

异的权重平均值而得,如有必要还会有附加项。上述问题的主要研究工作已经进行,这些工作是设计合适的控制算法并获得充分和/或必要条件使得一致性最终能够达到。

虽然目标是相同的,也即为了保证多智能体能达到某种终态的目标相同,但是由于闭环系统的非线性性质,问题会变得更加复杂。此外,随机矩阵的多数性质不能直接用到多智能体的收敛性分析中,所以用于稳定性分析的主要技术包括耗散理论^[49],非平滑分析^[55-56],尤其是李雅普诺夫函数^[50-52,56]。

虽然非完整移动机器人的一致性典型的欠驱动系统,但是目前复杂系统的一致性研究集中于全驱动系统。值得注意的是许多机械器件都被描述为欠驱动系统,因此开发合适的欠驱动系统的一致性算法很重要。

3.3 时延的影响

由于下面几个原因,时延存在于几乎所有的实际系统中:①当信息传递存在时有限的通信速度;②传感器获得测量信息所需的额外时间;③产生控制输入所需的计算时间;④输入信号产生作用所需的执行时间。一般来说时延反映了源于执行、控制、通信和计算所产生的继承于实际系统的一种重要的性质。

因为已知时延可能会降低系统的性能甚至毁掉系统的稳定性,所以对时延的研究已经进行从而探讨其对系统性能和稳定性的影响。针对式(1)所做的充分研究在式(2)中给出,但现在假设其中存在时延。在文献中考虑两类时延—通信时延和输入时延。通信时延导致从起点到终点的信息传递需要时间,说得更精确些就是如果智能体 i 从智能体 j 接收信息需要花费的时间是 T_{ij} ,闭环系统(1)在固定的网络拓扑结构下且使用控制算法(2)时所对应的系统方程是:

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij}(t) [x_j(t - T_{ij}) - x_i(t)] \quad (7)$$

对式(7)的理解是在时刻 t 智能体 i 收到从智能体 j 发来的信息并且由于存在时延,故使用数据 $x_j(t - T_{ij})$ 来代替 $x_j(t)$ 。值得注意的是智能体 i 能持续获得它自身的信息,因此输入时延可以考虑成计算时间和执行时间两者之和。更精确地说,如果智能体 i 的输入时延是 T_i^p ,则闭环系统(1)在控制算法(2)下变成:

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij}(t) [x_j(t - T_i^p) - x_i(t - T_i^p)] \quad (8)$$

显然式(7)只考虑了含通信时延的情况而式(8)只考虑了含输入时延的情况。应该强调的是通信时延和输入时延两者都可能是时变的且可能同时存在。

除了时延之外,在状态信息进行交换时也要考虑丢包问题。值得庆幸的是因为在丢包后重新发送数据包容易实现—这仅是数据传输信道中发生了时延,所以含丢包的一致性可以看成时延一致性的一个特例。因而时延一致性中所包含的主要问题是研究时延对收敛性和一致性性能的影响,亦可称之为可一致性^[57]。

因为时延可能会影响系统的稳定性,所以研究在何种情况下,即使存在时延仍能保证一致性是很重要的。换句话说,我们能否找到时延存在时一致性仍可达到的条件?基于此目的,人们研究了(1)和(2)中时延对可一致性的影响。当只存在(常量)输入时延时,在固定的无向拓扑图中文献[8]提出了一种基于时延的能保证一致性的充分条件。具体而言,在一致性能达到的情况下我们能获得时延的一个上界。这正是预期的结果,因为除非时延超出了给定的范围,否则时延通常会逐渐降低系统的性能却不会毁坏系统的稳定性。更深的研究可在^[58-59]中找到,其中证明了在(1)和(2)中通信时延不会影响可一致性但输入时延会影响可一致性。与之前所研究的方式类

似, 我们会研究在不同的动态系统下带时延的一致性, 其中动态方程 (1) 可以被替换为其他更加复杂的动态方程, 比如双积分动态方程^[60-61], 复杂网络^[62-63], 刚体^[64-65]和一般的非线性动态系统^[66]。

总之现存的带时延的一致性的研究主要集中在不同类型的动态系统下 (线性和非线性系统), 去分析带时延的一致性算法的稳定性。一般来说非线性系统的带时延的一致性更具挑战性。对多数带时延的一致性算法而言, 主要研究的问题是确定一个时延上界使得其不影响可一致性。对通信实验来说在相对宽泛的时延阈值内达到一致性是可能的, 这种情况有一个明显的现象是最终的一致性状态是常量。在一致性问题中既考虑到线性系统的情况又考虑到非线性系统的情况时, 闭环系统的稳定性分析所需的工具包括矩阵论^[58], 李雅普诺夫函数^[62], 频域的方法^[59], 耗散理论^[63]和压缩原理^[67]。

虽然带时延的一致性已经受到了充分的研究, 但是通常假设时延要么是常值要么是随机值。然而时延本身可能遵循它自己的动态特性, 其可能依赖于通信距离、总的计算负荷和计算能力, 因此在考虑一致性问题的研究中将时延看成是另一个系统变量会更为合适。此外, 在一致性问题的研究中同时考虑时延和其它的物理限制也很重要。

3.4 量化一致性

近来量化一致性的研究是受到数字信号处理的激励, 此处量化一致性指的是当测量值是数字量而非模拟量时的一致性, 因此每个智能体收到的信息是不连续的, 并且可能因为有限的数字精度而发生信息截断。粗略地讲, 对一个模拟信号 s , 一个具有 δ 参数精度的典型的量化器写作 $Q(s)=q(s,\delta)$, 其中 $Q(s)$ 是量化信号, $q(\cdot,\cdot)$ 是对应的量化函数。例如^[68], 如果 $s \in [(n-1/2)\delta, (n+1/2)\delta]$, $n \in \mathbb{Z}$ 且 $\mathbb{Z}$ 代表整数集合, 则量化器

对信号就近取整可以表示为 $Q(s)=n$ 。需要注意的是对不同系统而言其量化器的类型也不同, 因此 $Q(s)$ 对不同的系统可能不同。由于所接收到的信号存在截断, 因而如果最大状态差异不大于整个系统的精度等级一致性就认为已达到。量化一致性的显著特征是达到一致性的时间通常是有限的, 也即所有智能体的状态收敛到一个精度区间内所需一段有限的时间, 因此研究主要在于所提出的一致性算法的收敛时间。

量化一致性很可能是在^[68]中首先研究的, 其中提出了量化“八卦”算法和相应的收敛性分析。特别需要指出的是, 完全图的收敛时间的界被证明是关于网络大小的多项式时间。文献[69]中量化一致性算法引入了编码解码策略, 其中收敛速度依赖于量化精度而非编码解码算法本身。文献[70]中通过“八卦”算法来研究量化一致性, 且从拉式矩阵的主子矩阵能得到最坏情况下预期收敛时间的上下界。更进一步的关于量化一致性的研究可见^[71-73], 其主要的内容仍是不同量化一致性算法的收敛时间及其量化效果。直观上来看收敛时间依赖于量化等级和网络拓扑结构是合理的, 那么我们很自然地会问量化方法是否会影响收敛时间, 又是怎么影响的? 这是对量化一致性算法 (关于量化方法) 的鲁棒性的一种重要的考核。

研究一般化线性/非线性系统的量化一致性有趣但更具有挑战性。因为截断信号和原始信号之间的差异是有界的, 所以量化一致性可以看成含有界扰动的连续一致性的特例。因此如果一组车辆在不含量化时能达到一致性, 则直观上说当量化精度足够高时所有智能体状态差异是有界的也可能是对的。然而, 严格描述一般线性/非线性系统的一致性的量化效果仍是一个开放的话题。

3.5 评论

总之现存的一致性问题的研究已经涵盖了对许多实际系统的物理性质和控制性能的分析, 然

而涵盖对多种物理性质和/或控制性能分析的一致性问题研究仍被极大地忽视, 换句话说在研究一致性问题时上述讨论的两个或多个问题需要同时考虑。此外, 一致性算法通常保证一组智能体达到某个共同的状态但却忽视了编队情形, 为了反映许多实际应用情况——一组智能体需要组成某种期望的几何结构, 我们需要考虑一种面向任务的多智能体编队控制问题, 这激励了第四部分编队控制的产生。

4 编队控制

与一致性问题中所有智能体的终态都达到单个点的情况相比, 编队控制情况中所有智能体的终态可以更加多样化。编队控制在许多实际应用中的确更适合, 比如编队飞行、合作运输、传感器网络、作战情报、监控和巡航。此外, 一组智能体协同合作的性能通常会优于所有单独智能体性能的简单叠加。由于编队控制的广泛应用和优势, 它已经成为控制领域很活跃的一个研究主题, 其目标是在有或没有组参考的情况下构成给定的几何模式。更精确地说编队控制的主要目的是协同一组智能体使得它们能达到某些期望的队形, 从而这组协同的智能体能完成给定的任务。一般来说, 编队控制可根据组参考进行分类。无组参考的编队控制称为编队产生, 指的是在无组参考时设计一组智能体的控制算法用以达到期望的几何模式; 含组参考的编队控制称为编队跟踪, 指的是在相同的任务中跟上期望的组参考。由于组参考的存在, 编队跟踪通常比编队产生更具挑战性且更实用。时至今日, 如何解决编队跟踪问题仍有许多开放性的问题值得探讨。

接下来的部分回顾并讨论编队控制中最近的研究结果及进展, 其中主要包括2006年后的编队产生和编队跟踪问题。一些2006年前的具有里程碑意义的结果可以参考文献[74]-[76]。

4.1 编队的产生

现存的编队控制的目标是分析在给定控制律时编队控制的行为及其稳定性。

(1) 矩阵论的方法: 出于多智能体系统的本质, 矩阵论在其分布式合作的稳定性分析中经常用到。

值得注意的是每个智能体的输入[请参见本文方程(2)]本质上是智能体邻居的状态及其本身状态之间差异的一组加权平均值。作为一致性算法的延展, 文献[77]和[78]引入了一些耦合矩阵用以对相应的控制输入进行某些角度的偏置。例如, 给定式(1), 控制输入(2)修改为 $u_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij}(t)C[x_j(t) - x_i(t)]$, 其中 C 是维数大小合适的耦合矩阵。所修改的算法背后的主要思想是原始的控制输入(为到达一致性)现在已经旋转了一定的角度。闭环系统可以表示为向量形式, 其稳定性由给定的传递矩阵的特征值的分布决定。这方面主要的研究工作体现在文献[77]和[78]中, 文献分析了单积分动态系统和双积分动态系统的群体运动, 其表明网络的拓扑结构、阻尼增益和 C 都会影响多智能体的群体运动。与之类似, 一组非线性自举智能体的群体运动会受到智能体间耦合增益强度、时延、噪声和初始状态的影响^[79]。

需要指出的是近期群体运动在非完整移动机器人中也有研究文献[80], [81]。虽然文献[77]和[78]中的研究不同于文献[80]和[81]中的研究, 但是在智能体将趋向的终态结果层面上存在相似性, 也即所有的智能体不会趋向于智能体本身及其邻居状态的加权平均值, 而是趋向于某一偏置状态。值得注意的是文献[77]和[78]中偏置状态的设计是合适的, 而文献[80]和[81]中的偏置状态是由某些特殊非线性系统的动态得到的。

线性闭环系统的编队产生的研究中相关系统矩阵有两个有趣的性质: ①至少存在一个零特征值; ②至少存在一对在虚轴上的特征值。这两个

性质在固定的网络拓扑结构的编队产生问题中起到至关重要的作用,然而当网络拓扑结构是切换时这两个性质可能无法解决编队产生问题,这是因为切换系统的分析复杂从而使切换情况下的编队产生问题变得极具挑战性。

李雅普诺夫函数的方法:虽然矩阵论对编队产生问题的稳定性分析而言是一种相对简单的方法,但是在许多编队产生情况下一特别是非线性系统—矩阵论的方法并不适用,因而很自然地会考虑李雅普诺夫函数的方法。

通过使用李雅普诺夫函数的方法一些典型的编队产生情况已经得到研究,其中包括逆一致性问题^[82],无领导者的群集行为及其稳定化^[83-86]和圆周编队类问题^[80-81, 87-89]。在逆一致性问题中^[82],目标是驱使一组智能体分散到空间中。粗略地讲,对单积分动态系统(1)而言,相应的控制输入采取如下形式:

$$u_i(t) = \sum_{j=1}^n b_{ij}(x_i - x_j) [x_i(t) - x_j(t)]$$

其中, $b_{ij}(\cdot)$ 是非负函数。假设每个智能体能与所有的其它智能体在半径为 R 的范围内通信,则此多智能体系统将会在空间中散开且任意两个智能体间的相对距离将会大于半径 R 。

对于无领导者群集的情况,研究的是稳定一组智能体并驱使之达到某种期望的几何编队,其中智能体间的相互影响在忽视群体的最终速度情况下直接地或间接地表示为非负势函数 $V_{ij}(\|x_i - x_j\|)$ 。一些 $V_{ij}(\|x_i - x_j\|)$ 的显著的性质包括:①当 $\|x_i - x_j\|$ 等于智能体 i 和 j 之间的期望距离时, $V_{ij}(\|x_i - x_j\|)$ 达到最小值;②从期望距离到零时, $V_{ij}(\|x_i - x_j\|)$ 随着 $\|x_i - x_j\|$ 的减少而增加;③从期望距离到最大通信半径 R 时, $V_{ij}(\|x_i - x_j\|)$ 随着 $\|x_i - x_j\|$ 的增加而增加。势函数 $V_{ij}(\|x_i - x_j\|)$ 背后的基本思想是在尽可能避免智能体间相互冲突的同时驱使智能体间的距离达到期望值,每个智能体所对应的控制律通常选成与一致性算法相似,但这里唯一的不同的是 $x_i - x_j$ 项由 $\nabla_{x_i} V$

($\|x_i - x_j\|$) 取代。一个根本的限制是所有的智能体通常会收敛到某些智能体间的局部稳定态,也即非负势函数达到局部极小值,因此组间距离可能不会收敛到全局期望值,那么研究如何设计一个合适的控制算法从而保证组间距离达到全局期望值会成为将来研究的一个有趣的话题。此外,这里所假设的智能体系统的网络拓扑结构是无向图,而许多实际系统中的拓扑结构是有向图,因而无法应用。

对于圆周编队之类的情况,主要研究的是非完整移动机器人的群体运动,其动力学方程如式(5)所示。定义 $r_i = x_i + \iota y_i$, 其中 $\iota = \sqrt{-1}$, 则式(5)变成

$$\dot{r}_i = u_i e^{\iota \theta_i}, \dot{\theta}_i = \omega_i, i = 1, 2, \dots, N.$$

由于非线性动态系统的本质,一个类一致性算法通常提供一个类圆周的最终编队形式,其中所有智能体的轨迹都是圆形的且相对相位差(也即 $\theta_i - \theta_j$) 是常量。当前工作主要集中于所有智能体共享一个公共单位速度的情况。相似的类圆周编队在文献[88]和[89]中有分析且系统的动态特性不同于式(5),但共享一个相似的非线性。由于系统的动态特性是非线性的,因而将时延、扰动和量化引入到当下的研究中会极具挑战性。

4.2 编队跟踪问题

虽然无组参考的编队控制在理论上很有趣,但是在组参考存在的情况下来研究编队控制更具现实意义,这样可以代表整组的一个共同的控制目标或一个公共的兴趣点。这一小节我们就来回顾此种情况。

(1) 矩阵论的方法:类似于编队产生的情况,矩阵论通常用于编队跟踪问题的研究。

编队跟踪中一个有趣的问题是设计一个分布式控制算法来驱使一组智能体跟上某一期望状态。例如,给定单积分动态系统,文献[91]和[92]中所设计的控制算法类似于一致性算法,但由于

存在组参考得引入一项附加项。如果设计地合适所有智能体可以精确地跟踪组参考文献[91],且文献[92]给出了有界的跟踪误差的分析(文献[91]考虑的是离散化的情形)。值得一提的是只要组参考的导数有界则组参考可以任意选取。在文献[93]和[94]中研究了一组线性系统同步到另一个外部线性系统的输出的情况,分别考虑了含参数不确定性和不含参数不确定性的情况。在文献[91]和[92]中讨论了一般的组参考情况,而在文献[93]和[94]中考虑的是一般的系统模型。如何能解决含一般组参考的一般线性系统的编队跟踪问题仍有待探讨。在把每个智能体的状态和组参考之间的误差定义为新的变量之后,编队跟踪问题可以转换成传统的稳定性问题。如果对应的误差可以被缩减到零,则编队跟踪问题就解决了,然而一般来说编队产生问题却不能如此解决。因此在切换网络拓扑结构下,编队跟踪问题通常比编队产生问题更易于处理。

(2) 李雅普诺夫函数的方法:由于李雅普诺夫函数的方法在稳定性分析中的广泛应用,其在编队跟踪问题中也成为一种重要的分析工具。

动态的组参考的群集问题近来在文献[95]-[97]中得到了研究,其中控制目标是设计分布式的控制算法使得一组智能体紧贴着组参考方向移动。无领导者的群集行为不需要特定的最终群组速度,与之相比,由于动态组参考的存在且需紧贴着动态组参考运动,所以动态组参考的群集行为在理论上和技术上的挑战性都远远高于无领导者的情况。换句话说,智能体系统不仅要维持某种期望的几何编队,还需要整体上跟上组参考。无领导者的群集行为问题只考虑包含前者的情况,而含组参考的群集行为把两个目标都考虑了进来,因而变得更加困难。如果知道组参考的信息足够多,比如组参考的加速度和/或速度信息,则动态组参考的群集行为能够利用梯度控制律^[95-96]来解决。另一种方法在^[97]中提出,这是一种基于变量

结构控制律的方法,用以解决只需更少的信息的情况。与无领导者的群集行为问题的研究相似,因为势函数一般未指定但满足第四部分第一小节所述的条件,故现存的关于动态组参考群集的方法仅仅能达到一个给定势函数的局部最小值。因此,智能体间的距离与期望值是不相同的,然而基于势函数的控制容易设计,且可以保证避障和维持初始的组间通信模式。虽说如此,完成全局组间距离的稳定化、避障和保持初始通信模式的任务仍旧任重而道远。

组参考的编队控制的研究既有线性系统^[98-99],又有非线性系统^[100-103],此时势函数 $V(\|x_i - x_j\|)$ 由已知的函数替代,一般来说具有如下形式 $\|x_i - x_j - d_{ij}\|^2$,其中 d_{ij} 代表智能体 i 和 j 之间的期望距离。简而言之,非线性系统的研究包括非完整移动机器人[请参见式(5)]^[101,102],刚体[请参见式(6)]^[103]和线性系统含其他非线性项^[100]。与群集问题相比,这里研究的问题由于已知 $V(\|x_i - x_j\|)$ 而变得相对简单。一般而言,智能体间的距离可以达到期望值,作为交换,避障问题和初始通信模式的保持问题需要分开来考虑。

4.3 评论

当前编队控制的研究主要集中于智能体间的距离是固定的固定编队问题,然而考虑到实际应用,可能需要智能体组的编队行为具有自适应能力。此外,在编队控制问题中考虑诸如输入饱和、量化和能量有限的限制是很重要的,同时实际应用中当噪声和扰动存在时,鲁棒性是另一个需到考虑到的重要因素。

5 最优化问题

最优化在控制系统的研究中是一个重要的主题。最优化的主要目标是找到一个最优策略满足某些给定约束,例如损失函数。近来最优化在分

布式多智能体合作的研究中都是关于收敛速度和某些特定的损失函数的, 这些在下面分别进行回顾。

5.1 收敛速度

如上讨论所示, 一致性中收敛速度是一个重要的问题, 它可以刻画达到一致性的快慢程度, 所以需要进行优化。在这方面, 收敛速度就是需要被最大化的损失函数。

考虑一组 n 个智能体系统, 其动态方程为单积分方程(1)。使用算法(2)后动态系统(1)可以写成如下的矩阵形式:

$$\dot{X}(t) = -LX(t) \quad (9)$$

其中, $X(t) = [x_1(t), \dots, x_n(t)]^T$ 且 L 是拉式矩阵。对于固定的网络拓扑结构, L 是常值矩阵。

可以看得出拉式矩阵的最小非零特征值 $\lambda_2(L)$ 决定了最坏情况下的收敛速度, 所以文献[104]和[105]都是研究如何选择最优的图的权值使得收敛速度最大。与文献[104]和[105]中假设的单积分动态系统相反, 文献[106]优化的是双积分动态系统的收敛速度, 其对收敛速度的定义与单积分中的 $\lambda_2(L)$ 如出一辙。值得一提的是, 线性系统和非线性系统的最优收敛速度仍悬而未决。

除了 $\lambda_2(L)$, 另一个通常对收敛速度使用的测量方法是

$$\rho = \lim_{t \rightarrow \infty, X(t) \neq X^*} \left(\frac{X(t) - X^*}{X(0) - X^*} \right)^{\frac{1}{t}} \quad (10)$$

其中, X^* 代表最终的平衡点, X^* 给定为 $\sigma \mathbf{1}$ 且 σ 为常数。所对应的优化问题是

$$\max_{u_i \in U} \rho \quad (11)$$

其中, U 是容许控制集合。现有的研究集中于所有的智能体收敛到初始状态的平均值^[107, 108], 也即 $X^* = [(1/n) \sum_{i=1}^n x_i(0)] \mathbf{1}$ 。对于任意的固定或切换网络拓扑结构, 如果 X^* 未知则最优化问题(11)变得极具挑战性。但是如果 X^* 选定为 $[(1/n) \sum_{i=1}^n x_i(t)] \mathbf{1}$, 则问题会变得非常简单。

5.2 具体的成本函数

除了最快的收敛速度的要求外, 不同的损失函数也需最小化。

这种情况中一个有趣的问题是分布式多智能体的最优化, 其源于解决无线传感器网络的一个挑战—估计环境参数或某些利益函数, 例如温度和资源位置^[109]。作为一个简单的策略, 每个传感器网络能发送自身的数据到一个中心位置, 只要有足够的能量此处能处理这些数据。然而由于电力资源和通信能力有限, 这种集中式的策略通常不可实现。另一种方法同样能达到相似的目标且所需的通信带宽和电力更少。在无线传感器网络中^[109], 估值问题通常建模为分布式多智能体的优化问题。简略地说, 分布式多智能体的优化目标是通过协同的方式最小化损失函数 $\sum_{i=1}^n f_i(x)$, 其中函数 $f_i: R^n \mapsto R$ 代表智能体 i 的损耗且仅有其本身知道, $x \in R^m$ 是决策向量。在文献[109]中使用了一种增量子梯度的方法来解决环网结构的最优化问题, 值得一提的是文献[109]没有提供在其他网络拓扑结构类型下对最优化问题的讨论。

参考文献[110]可能是第一篇研究分布式多智能体的最优化问题在一致性框架下的文章, 其中所考虑的最优化问题经公式化后变为最小化 $\sum_{i=1}^n f_i(x)$, 其中 $x \in R^n$ 且假设每个 $f_i: R^n \mapsto R$ 都是凸函数。受平均一致性算法和标准子梯度方法的启发, 有人提出一种类一致性算法:

$$x_i(k+1) = \sum_{j=1}^n a_{ij}(k) x_j(k) - \alpha g_i(x_i(k)) \quad (12)$$

其中, α 是步长, $g_i(x_i(k))$ 是 $f_i(x)$ 在 $x = x_i(k)$ 时的子梯度。在文献[109]中 $\sum_{j=1}^n a_{ij}(k) x_j(k)$ 被替换为 $x_{i-1}(k)$ 且 $x_0(k) = x_n(k-1)$ 。值得注意的是算法(12)只能找到由 α 决定的次优解。关于这个话题的进一步的结果可以在文献[111]-[113]中找到, 其中研究了一种类似的分布式多智能体的最优化问题。文献[111]讨论的是受限情况, 文献[112]是随

机网络情况,文献[113]是基于广播通信的异步情况。在现存的文献中,时延和扰动并没有得到考虑。因此,由于在无线传感器网络中时延和扰动大量存在,故在分布式多智能体的最优化问题中考虑这些情形很重要。

分布式多智能体的最优化问题中,除了损失函数是一系列的凸函数的加和形式外,无限时域损失函数 $J_i = \int_0^{\infty} [X^T(t)QX(t) + U^T(t)RU(t)] dt$ 在文献[114]和[115]中给出,有限时域损失函数 $J_f = \int_0^{t_f} [X^T(t)QX(t) + U^T(t)RU(t)] dt$ 在文献[116]和[117]中给出,其中 $X \in R^n$ 是状态向量, $U \in R^n$ 是控制输入, t_f 是正常数。滚动时域控制也即模型预测控制通常有有限时域的损失函数。与文献[110]-[113]所研究的寻找最优估计状态的情形不同的是,这里的目标是寻找最优控制律满足给定损失函数能最小化。由于设计控制律时需要最优化损失函数,计算复杂度就变成了一个重要的研究议题。同时,因为网络拓扑结构在给定损失函数的最优化问题中起到至关重要的作用,所以寻找最优控制律满足给定损失函数能最小化的要求也很重要。

6 估值问题

由于在许多情况下缺乏全局信息来达到群组合作,因此通常需要一个分布式的估值算法。

首要问题是设计局部估值器使得全局信息能够渐进地或在有限时间内通过估计得到。第二个问题是基于局部估值器设计局部控制器使得闭环系统是稳定的。基于估值的分布式控制本质上是集中控制和分布式控制的组合,其使得分布式控制用于全局信息的估计而集中控制用于局部控制器的设计。基于估值的分布式控制通常既继承了集中控制的特性又继承了分布式控制的特性。然而值得强调的是设计一个带分布式估值器的闭环

系统远比设计一个不带分布式估值器的系统要复杂。

关于此类话题的主要研究可见文献[118]-[121],其中联合估值且受扰动影响的控制问题见诸文献[118]和[119],无扰动的情形见诸^[120-121]。在文献[118]-[121]中,如果分布式估值器用于设计合适的控制算法使系统能达到给定的控制目标,则联合估值和控制问题就认为得到了解决。在没有分布式估值器的情况下,控制的设计会非常难甚至是不可能的。从文献[122]-[124]可知,特定的控制问题的分布式估值问题讨论得还不够多。一般来说,联合估值和控制的思想在分布式多智能体的协作中已经提供了一条重要的途径,这里所讨论的情况是仅靠邻居信息来设计控制器是不够的。另一方面,在实际应用中合理地设计分布式估值器可能会替代一些昂贵的传感器。

总之研究面向任务的合作控制系统仍充满挑战性,其中分布式估值器要么是必要的要么可以替代昂贵的测量器件,其所付出的代价是控制系统的设计变得困难且系统的稳定性分析变得复杂。不仅如此,诸如有限的控制输入、异步通信和信息量化等物理限制也可能降低联合估值和控制算法在不同分布式多智能体协同系统中的可应用性。

7 讨论

本文我们回顾了一些分布式多智能体协同系统中最近的研究和进展,除了上述的理论研究结果之外,人们也做了许多实验来验证理论设计和分析的有效性,这些可以在文献[125]和[126]中找到。虽然现存的理论研究和实验已经解决了许多分布式多智能体协同系统中的技术问题,但是仍有大量有趣的、重要的且富于挑战性的研究议题待我们去深入研究。它们中的部分内容我们简略地总结如下。

(1) 智能合作。智能合作指的是含有人工智能的一组智能体的分布式合作, 也即每个智能体都是智能的, 它们可以根据目标选择最佳的响应。智能合作潜在的应用不仅存在于工程和技术中有, 还存在于经济和社会研究中。虽然科研问题近期已得到研究, 例如捕食者—入侵者问题^[127-128], 分布式合作中的博弈论问题^[129-130], 但是仍有许多悬而未决的问题, 特别是含智能后对群体行为的理解。一个有趣的问题是如何能预测指定的复杂网络, 同时在智能存在时稳定并优化这个网络。

(2) 竞争与合作。如今大多数研究都是基于局部合作而非竞争来进行的。因为竞争不仅存在而且在群体合作的问题中起到正面作用, 所以这无形中给所讨论的问题加上了限制。例如, 由于缺失竞争, 传统一致性算法的终态总是限定在由初始智能体状态所决定的某一区域内。一个有趣的问题是怎样引入竞争到分布式合作中, 从而达到不同的预期区域, 并且不同的智能体有着不同的利益目标, 进而提升系统的性能。

(3) 集中化和分散化。虽然分散化较之集中化显示出明显的优势, 例如可扩展性和鲁棒性方面, 但是分散化也有其自身的缺陷。一个缺点是在分布式的协议中某些智能体不能依据现有的局部信息预测群体行为, 继而某类群体行为就不可控。一个直观的例子是当下的经济危机实际上说明了行为分散化后的某些不利之处。因而一个有趣的问题是怎样能平衡集中化和分散化, 从而能进一步提升整体系统的性能。

参 考 文 献

- [1] N. A. Lynch, Distributed Algorithms. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 1996.
- [2] M. H. DeGroot, "Reaching a consensus," J. Amer. Statist. Assoc., vol. 69, no. 345, pp. 118–121, 1974.
- [3] T. Vicsek, A. Czirók, E. B. Jacob, I. Cohen, and O. Schochet, "Novel type of phase transitions in a system of self-driven particles," Phys. Rev. Lett., vol. 75, no. 6, pp. 1226–1229, 1995.

- [4] J. N. Tsitsiklis, "Problems in decentralized decision making and computation," Ph.D. dissertation, Dept. Electr. Eng. Comput. Sci., Mass. Inst. Technol., Cambridge, 1984.
- [5] J. N. Tsitsiklis, D. P. Bertsekas, and M. Athans, "Distributed asynchronous deterministic and stochastic gradient optimization algorithms," IEEE Trans. Autom. Control, vol. AC-31, no. 9, pp. 803–812, Sep. 1986.
- [6] A. Jadbabaie, J. Lin, and A. S. Morse, "Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules," IEEE Trans. Autom. Control, vol. 48, no. 6, pp. 988–1001, Jun. 2003.
- [7] J. A. Fax and R. M. Murray, "Information flow and cooperative control of vehicle formations," IEEE Trans. Autom. Control, vol. 49, no. 9, pp. 1465–1476, Sep. 2004.
- [8] R. Olfati-Saber and R. M. Murray, "Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays," IEEE Trans. Autom. Control, vol. 49, no. 9, pp. 1520–1533, Sep. 2004.
- [9] W. Ren and R. W. Beard, "Consensus seeking in multiagent systems under dynamically changing interaction topologies," IEEE Trans. Autom. Control, vol. 50, no. 5, pp. 655–661, May 2005.
- [10] L. Moreau, "Stability of multi-agent systems with time-dependent communication links," IEEE Trans. Autom. Control, vol. 50, no. 2, pp. 169–182, Feb. 2005.
- [11] IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol. 15, no. 4, Apr. 2007.
- [12] Proc. IEEE, vol. 94, no. 4, Apr. 2007.
- [13] ASME J. Dynam. Syst., Meas., Control, vol. 129, no. 5, 2007.
- [14] SIAM J. Control Optimiz., vol. 48, no. 1, 2009.
- [15] Int. J. Robust Nonlinear Control, vol. 21, no. 12, 2011.
- [16] N. E. Leonard, D. A. Paley, F. Lekien, R. Sepulchre, D. M. Fratantoni, and R. E. Davis, "Collective motion, sensor networks, and ocean sampling," Proc. IEEE, vol. 95, no. 1, pp. 48–74, Jan. 2007.
- [17] W. Ren, R. W. Beard, and E. M. Atkins, "Information consensus in multivehicle cooperative control," IEEE Control Syst. Mag., vol. 27, no. 2, pp. 71–82, Feb. 2007.
- [18] R. M. Murray, "Recent research in cooperative control of multivehicle systems," J. Dynam. Syst., Meas., Control, vol. 129, no. 5, pp. 571–583, 2007.
- [19] R. Olfati-Saber, J. A. Fax, and R. M. Murray, "Consensus and cooperation in networked multi-agent systems," Proc. IEEE, vol. 95, no. 1, pp. 215–233, Jan. 2007.
- [20] P. Y. Chebotarev and R. P. Agaev, "Coordination in multiagent systems

- and Laplacian spectra of digraphs,” *Autom. Remote Control*, vol. 70, no. 3, pp. 128–142, 2009.
- [21] C. W. Wu, *Synchronization in Complex Networks of Nonlinear Dynamical Systems*. Singapore: World Scientific, 2007.
- [22] *Cooperative Control of Distributed Multi-Agent Systems*, J. Shamma, Ed. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2008.
- [23] W. Ren and R. W. Beard, *Distributed Consensus in Multi-vehicle Cooperative Control*. London, U.K.: Springer-Verlag, 2008.
- [24] F. Bullo, J. Cortés, and S. Martínez, *Distributed Control of Robotic Networks*. Princeton, NJ: Princeton Univ., 2009.
- [25] Z. Qu, *Cooperative Control of Dynamical Systems: Applications to Autonomous Vehicles*. London, U.K.: Springer-Verlag, 2009.
- [26] M. Mesbahi and M. Egerstedt, *Graph Theoretic Methods for Multiagent Networks*. Princeton, NJ: Princeton Univ., 2010.
- [27] W. Ren and Y. Cao, *Distributed Coordination of Multi-Agent Networks*. London, U.K.: Springer-Verlag, 2011.
- [28] H. Bai, M. Arcak, and J. Wen, *Cooperative Control Design: A Systematic, Passivity-Based Approach*. New York: Springer-Verlag, 2011.
- [29] Y. Cao, W. Yu, W. Ren, and G. Chen, “An overview of recent progress in the study of distributed multi-agent coordination,” [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1207.3231>
- [30] J. Wolfowitz, “Products of indecomposable, aperiodic, stochastic matrices,” *Proc. Amer. Math. Soc.*, vol. 15, pp. 733–736, 1963.
- [31] Z. Lin, B. Francis, and M. Maggiore, “Necessary and sufficient graphical conditions for formation control of unicycles,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 50, no. 1, pp. 121–127, Jan. 2005.
- [32] Y. Hatano and M. Mesbahi, “Agreement over random networks,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 50, no. 11, pp. 1867–1872, Nov. 2005.
- [33] C. W. Wu, “Synchronization and convergence of linear dynamics in random directed networks,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 51, no. 7, pp. 1207–1210, Jul. 2006.
- [34] A. Tahbaz-Salehi and A. Jadbabaie, “A necessary and sufficient condition for consensus over random networks,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 53, no. 3, pp. 791–795, Mar. 2008.
- [35] Y. Zhang and Y.-P. Tian, “Consentability and protocol design of multiagent systems with stochastic switching topology,” *Automatica*, vol. 45, no. 5, pp. 1195–1201, 2009.
- [36] S. Boyd, A. Ghosh, B. Prabhakar, and D. Shah, “Randomized gossip algorithms,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, no. 6, pp. 2508–2530, Jun. 2006.
- [37] A. G. Dimakis, S. Kar, J. M. F. Moura, M. G. Rabbat, and A. Scaglione, “Gossip algorithms for distributed signal processing,” *Proc. IEEE*, vol. 98, no. 11, pp. 1847–1864, Nov. 2010.
- [38] T. Li and J.-F. Zhang, “Mean square average-consensus under measurement noises and fixed topologies: Necessary and sufficient conditions,” *Automatica*, vol. 45, no. 8, pp. 1929–1936, 2009.
- [39] Z. Li, Z. Duan, and G. Chen, “On and performance regions of multi-agent systems,” *Automatica*, vol. 47, no. 4, pp. 797–803, 2011.
- [40] H. Kim, H. Shim, and J. H. Seo, “Output consensus of heterogeneous uncertain linear multi-agent systems,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 56, no. 1, pp. 200–206, Jan. 2011.
- [41] R. Olfati-Saber, “Distributed Kalman filter with embedded consensus filters,” in *Proc. IEEE Conf. Decision Control*, Seville, Spain, Dec. 2005, pp. 8179–8184.
- [42] R. Olfati-Saber and J. S. Shamma, “Consensus filters for sensor networks and distributed sensor fusion,” in *Proc. IEEE Conf. Decision Control*, Seville, Spain, Dec. 2005, pp. 6698–6703.
- [43] R. Olfati-Saber, “Distributed Kalman filtering for sensor networks,” in *Proc. IEEE Conf. Decision Control*, New Orleans, LA, Dec. 2007, pp. 5492–5498.
- [44] W. Yu, G. Chen, Z. Wang, and W. Yang, “Distributed consensus filtering in sensor networks,” *IEEE Trans. Sys., Man, Cybern.*, vol. 39, no. 6, pp. 1568–1577, Jun. 2009.
- [45] L. Shi, M. Epstein, and R. M. Murray, “Kalman filtering over a packet dropping network: A probabilistic perspective,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 55, no. 3, pp. 594–604, Mar. 2010.
- [46] Z. Qu, J. Wang, and R. A. Hull, “Cooperative control of dynamical systems with application to autonomous vehicles,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 53, no. 4, pp. 894–911, Apr. 2008.
- [47] S. E. Tuna, “Conditions for synchronizability in arrays of coupled linear systems,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 54, no. 10, pp. 2416–2420, Oct. 2009.
- [48] Z. Li, Z. Duan, G. Chen, and L. Huang, “Consensus of multiagent systems and synchronization of complex networks: A unified viewpoint,” *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. 57, no. 1, pp. 213–224, Jan. 2010.
- [49] G.-B. Stan and R. Sepulchre, “Analysis of interconnected oscillators by dissipativity theory,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 52, no. 2, pp. 256–270, Feb. 2007.
- [50] N. Chopra and M. W. Spong, “On exponential synchronization of

- kuramoto oscillators," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 54, no. 2, pp. 353–357, Feb. 2009.
- [51] A. Sarlette, R. Sepulchre, and N. E. Leonard, "Autonomous rigid body attitude synchronization," *Automatica*, vol. 45, no. 2, pp. 572–577, 2009.
- [52] S.-J. Chung and J.-J. Slotine, "Cooperative robot control and concurrent synchronization of lagrangian systems," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 25, no. 3, pp. 686–700, Aug. 2009.
- [53] J. Yao, Z.-H. Guan, and D. J. Hill, "Passivity-based control and synchronization of general complex dynamical networks," *Automatica*, vol. 45, no. 9, pp. 2107–2113, 2009.
- [54] Q. Hui, W. M. Haddad, and S. P. Bhat, "Finite-time semistability and consensus for nonlinear dynamical networks," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 53, no. 8, pp. 1887–1890, Aug. 2008.
- [55] J. Cortés, "Finite-time convergent gradient flows with applications to network consensus," *Automatica*, vol. 42, no. 11, pp. 1993–2000, 2006.
- [56] D. V. Dimarogonas and K. J. Kyriakopoulos, "On the rendezvous problem for multiple nonholonomic agents," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 52, no. 5, pp. 916–922, May 2007.
- [57] C.-Q. Ma and J.-F. Zhang, "Necessary and sufficient conditions for consensusability of linear multi-agent systems," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 55, no. 5, pp. 1263–1268, May 2010.
- [58] F. Xiao and L. Wang, "Asynchronous consensus in continuous-time multi-agent systems with switching topology and time-varying delays," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 53, no. 8, pp. 1804–1816, Aug. 2008.
- [59] Y.-P. Tian and C.-L. Liu, "Consensus of multi-agent systems with diverse input and communication delays," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 53, no. 9, pp. 2122–2128, Sep. 2008.
- [60] P. Lin and Y. Jia, "Consensus of second-order discrete-time multiagent systems with nonuniform time-delays and dynamically changing topologies," *Automatica*, vol. 45, no. 9, pp. 2154–2158, 2009.
- [61] Y. Zhang and Y.-P. Tian, "Consensus of data-sampled multi-agent systems with random communication delay and packet loss," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 55, no. 4, pp. 939–943, Apr. 2010.
- [62] J. Liang, Z. Wang, Y. Liu, and X. Liu, "Global synchronization control of general delayed discrete-time networks with stochastic coupling and disturbances," *IEEE Trans. Sys., Man, and Cybern.*, vol. 38, no. 4, pp. 1073–1083, Apr. 2008.
- [63] J. Yao, H. O. Wang, Z.-H. Guan, and W. Xu, "Passive stability and synchronization of complex spatio-temporal switching networks with time delays," *Automatica*, vol. 45, no. 7, pp. 1721–1728, 2009.
- [64] N. Chopra, M. W. Spong, and R. Lozano, "Synchronization of bilateral teleoperators with time delay," *Automatica*, vol. 44, no. 8, pp. 2142–2148, 2008.
- [65] E. Nuno, R. Ortega, L. Basanez, and D. Hill, "Synchronization of networks of nonidentical euler-lagrange systems with uncertain parameters and communication delays," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 56, no. 4, pp. 935–941, Apr. 2011.
- [66] V. S. Vokharaie, O. Mason, and M. Verwoerd, "D-stability and delay-independent stability of homogeneous cooperative systems," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 55, no. 12, pp. 2882–2885, Dec. 2010.
- [67] W. Wang and J.-J. Slotine, "Contraction analysis of time-delayed communications and group cooperation," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 51, no. 4, pp. 712–717, Apr. 2006.
- [68] A. Kashyap, T. Başar, and R. Srikant, "Quantized consensus," *Automatica*, vol. 43, no. 7, pp. 1192–1203, 2007.
- [69] R. Carli and F. Bullo, "Quantized coordination algorithms for rendezvous and deployment," *SIAM J. Control Optim.*, vol. 48, no. 3, pp. 1251–1274, 2009.
- [70] J. Lavaei and R. Murray, "Quantized consensus by means of gossip algorithm," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 57, no. 1, pp. 19–32, Jan. 2012.
- [71] A. Nedic, A. Olshevsky, A. Ozdaglar, and J. N. Tsitsiklis, "On distributed averaging algorithms and quantization effects," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 54, no. 11, pp. 2506–2517, Nov. 2009.
- [72] M. Zhu and S. Martínez, "On the convergence time of asynchronous distributed quantized averaging algorithms," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 56, no. 2, pp. 386–390, Feb. 2011.
- [73] R. Carli, F. Fagnani, P. Frasca, and S. Zampieri, "Gossip consensus algorithms via quantized communication," *Automatica*, vol. 46, no. 1, pp. 70–80, 2010.
- [74] C. W. Reynolds, "Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model," *Comput. Graph.*, vol. 21, no. 4, pp. 25–34, July 1987.
- [75] N. E. Leonard and E. Fiorelli, "Virtual leaders, artificial potentials and coordinated control of groups," in *Proc. IEEE Conf. Decision Control*, Orlando, FL, Dec. 2001, pp. 2968–2973.
- [76] P. Ogren, E. Fiorelli, and N. E. Leonard, "Cooperative control of mobile sensor networks: Adaptive gradient climbing in a distributed environment," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 49, no. 8, pp. 1292–1302, Aug. 2004.

- [77] M. Pavone and E. Frazzoli, "Decentralized policies for geometric pattern formation and path coverage," *J. Dyn. Syst., Meas., Control*, vol. 129, no. 5, pp. 633–643, 2007.
- [78] W. Ren, "Collective motion from consensus with Cartesian coordinate coupling," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 54, no. 6, pp. 1330–1336, Jun. 2009.
- [79] L. M. y Teran-Romero, E. Forgoston, and I. B. Schwartz, "Coherent pattern prediction in swarms of delay-coupled agents," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 28, no. 5, pp. 1034–1044, Oct. 2012.
- [80] R. Sepulchre, D. A. Paley, and N. E. Leonard, "Stabilization of planar collective motion: All-to-all communication," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 52, no. 5, pp. 811–824, May 2007.
- [81] R. Sepulchre, D. A. Paley, and N. E. Leonard, "Stabilization of planar collective motion with limited communication," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 53, no. 3, pp. 706–719, Mar. 2008.
- [82] D. V. Dimarogonas and K. J. Kyriakopoulos, "Inverse agreement protocols with application to distributed multi-agent dispersion," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 54, no. 3, pp. 657–663, Mar. 2009.
- [83] R. Olfati-Saber, "Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 51, no. 3, pp. 401–420, Mar. 2006.
- [84] F. Cucker and S. Smale, "Emergent behavior in flocks," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 52, no. 5, pp. 852–862, May 2007.
- [85] H. G. Tanner, A. Jadbabaie, and G. J. Pappas, "Flocking in fixed and switching networks," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 52, no. 5, pp. 863–868, May 2007.
- [86] F. Cucker and J.-G. Dong, "A general collision-avoiding flocking framework," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 56, no. 5, pp. 1124–1129, May 2011.
- [87] F. Zhang and N. E. Leonard, "Coordinated patterns of unit speed particles on a closed curve," *Syst. Control Lett.*, vol. 56, no. 6, pp. 397–407, 2007.
- [88] D. A. Paley, "Stabilization of collective motion on a sphere," *Automatica*, vol. 45, no. 1, pp. 212–216, 2009.
- [89] S. Hernandez and D. A. Paley, "Three-dimensional motion coordination in a spatiotemporal flowfield," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 55, no. 12, pp. 2805–2810, Dec. 2010.
- [90] D. A. Paley, N. E. Leonard, and R. Sepulchre, "Stabilization of symmetric formations to motion around convex loops," *Syst. Control Lett.*, vol. 57, no. 3, pp. 209–215, 2008.
- [91] W. Ren, "Multi-vehicle consensus with a time-varying reference state," *Syst. Control Lett.*, vol. 56, no. 7, pp. 474–483, 2007.
- [92] Y. Cao, W. Ren, and Y. Li, "Distributed discrete-time coordinated tracking with a time-varying reference state and limited communication," *Automatica*, vol. 45, no. 5, pp. 1299–1305, 2009.
- [93] J. Xiang, W. Wei, and Y. Li, "Synchronized output regulation of linear networked systems," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 54, no. 6, pp. 1336–1341, Jun. 2009.
- [94] X. Wang, Y. Hong, J. Huang, and Z.-P. Jiang, "A distributed control approach to a robust output regulation problem for multi-agent linear systems," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 55, no. 12, pp. 2891–2895, Dec. 2010.
- [95] H. Su, X. Wang, and Z. Lin, "Flocking of multi-agents with a virtual leader," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 54, no. 2, pp. 293–307, Feb. 2009.
- [96] W. Yu, G. Chen, and M. Cao, "Distributed leader-follower flocking control for multi-agent dynamical systems with time-varying velocities," *Syst. Control Lett.*, vol. 59, no. 9, pp. 543–552, 2010.
- [97] Y. Cao and W. Ren, "Distributed coordinated tracking with reduced interaction via a variable structure approach," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 57, no. 1, pp. 33–48, Jan. 2012.
- [98] W. Ni and D. Cheng, "Leader-following consensus of multi-agent systems under fixed and switching topologies," *Syst. Control Lett.*, vol. 59, no. 3–4, pp. 209–217, 2010.
- [99] J. Hu and G. Feng, "Distributed tracking control of leader-follower multi-agent systems under noisy measurement," *Automatica*, vol. 46, no. 8, pp. 1382–1387, 2010.
- [100] W. Wang and J.-J. Slotine, "A theoretical study of different leader roles in networks," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 51, no. 7, pp. 1156–1161, Jul. 2006.
- [101] K. D. Do, "Formation tracking control of unicycle-type mobile robots with limited sensing ranges," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 527–538, Mar. 2008.
- [102] W. Dong and J. A. Farrell, "Cooperative control of multiple nonholonomic mobile agents," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 53, no. 6, pp. 1434–1448, Jun. 2008.
- [103] W. Ren, "Distributed cooperative attitude synchronization and tracking for multiple rigid bodies," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 18, no. 2, pp. 383–392, Feb. 2010.
- [104] Y. Kim and M. Mesbahi, "On maximizing the second smallest

- eigenvalue of a state-dependent graph laplacian," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 51, no. 1, pp. 116–120, Jan. 2006.
- [105] Y. Kim, "Bisection algorithm of increasing algebraic connectivity by adding an edge," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 55, no. 1, pp. 170–174, Jan. 2010.
- [106] R. Carli, A. Chiuso, L. Schenato, and S. Zampieri, "Optimal synchronization for networks of noisy double integrators," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 56, no. 5, pp. 1146–1152, May 2011.
- [107] L. Xiao and S. Boyd, "Fast linear iterations for distributed averaging," *Syst. Control Lett.*, vol. 53, no. 1, pp. 65–78, 2004.
- [108] Y. Kim, D.-W. Gu, and I. Postlethwaite, "Spectral radius minimization for optimal average consensus and output feedback stabilization," *Automatica*, vol. 45, no. 6, pp. 1379–1386, 2009.
- [109] M. Rabbat and R. Nowak, "Distributed optimization in sensor networks," in *Proc. ACM Inf. Process. Sensor Networks*, Berkeley, CA, 2004, pp. 20–27.
- [110] A. Nedic and A. Ozdaglar, "Distributed subgradient methods for multiagent optimization," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 54, no. 1, pp. 48–61, Jan. 2009.
- [111] A. Nedic, A. Ozdaglar, and P. A. Parrilo, "Constrained consensus and optimization in multi-agent networks," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 55, no. 4, pp. 922–938, Apr. 2010.
- [112] I. Lobel and A. Ozdaglar, "Distributed subgradient methods for convex optimization over random networks," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 56, no. 6, pp. 1291–1306, Jun. 2011.
- [113] A. Nedic, "Asynchronous broadcast-based convex optimization over a network," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 56, no. 6, pp. 1337–1351, Jun. 2011.
- [114] Y. Cao and W. Ren, "Optimal linear consensus algorithms: An LQR perspective," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. 40, no. 3, pp. 819–830, Mar. 2010.
- [115] F. Borrelli and T. Keviczky, "Distributed LQR design for identical dynamically decoupled systems," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 53, no. 8, pp. 1901–1912, Aug. 2008.
- [116] J. Hu, M. Prandini, and C. Tomlin, "Conjugate points in formation constrained optimal multi-agent coordination: A case study," *SIAM J. Control Optim.*, vol. 45, no. 6, pp. 2119–2137, 2006.
- [117] G. Ferrari-Trecate, L. Galbusera, M. P. E. Marciandi, and R. Scattolini, "Model predictive control schemes for consensus in multi-agent systems with single- and double-integrator dynamics," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 54, no. 11, pp. 2560–2572, Nov. 2009.
- [118] F. Zhang and N. E. Leonard, "Cooperative filters and control for cooperative exploration," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 55, no. 3, pp. 650–663, Mar. 2010.
- [119] K. M. Lynch, I. B. Schwartz, P. Yang, and R. A. Freeman, "Decentralized environmental modeling by mobile sensor networks," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 24, no. 3, pp. 710–724, Jul. 2008.
- [120] P. Yang, R. A. Freeman, and K. M. Lynch, "Multi-agent coordination by decentralized estimation and control," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 53, no. 11, pp. 2480–2496, Nov. 2008.
- [121] R. S. Smith and F. Y. Hadaegh, "Closed-loop dynamics of cooperative vehicle formations with parallel estimators and communication," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 52, no. 8, pp. 1404–1414, Aug. 2007.
- [122] M. V. Subbotin and R. S. Smith, "Design of distributed decentralized estimators for formations with fixed and stochastic communication topologies," *Automatica*, vol. 45, no. 11, pp. 2491–2501, 2009.
- [123] N. Marechal, J.-M. Gorce, and J.-B. Pierrot, "Joint estimation and gossip averaging for sensor network applications," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 55, no. 5, pp. 1208–1213, May 2010.
- [124] S. S. Stanković, M. S. Stanković, and D. M. Stipanović, "Decentralized parameter estimation by consensus based stochastic approximation," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 56, no. 3, pp. 531–543, Mar. 2011.
- [125] W. Ren, H. Chao, W. Bourgeois, N. Sorensen, and Y. Chen, "Experimental validation of consensus algorithms for multivehicle cooperative control," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 16, no. 4, pp. 745–752, Apr. 2008.
- [126] R. O' Grady, A. L. Christensen, and M. Dorigo, "Swarmorph: Multirobot morphogenesis using directional self-assembly," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 25, no. 3, pp. 738–743, Jul. 2009.
- [127] S. Bopardikar, F. Bullo, and J. Hespanha, "A cooperative homicidal chauffeur game," *Automatica*, vol. 45, no. 7, pp. 1771–1777, 2009.
- [128] A. Kolling and S. Carpin, "Pursuit-evasion on trees by robot teams," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 26, no. 1, pp. 32–47, Feb. 2010.
- [129] M. Huang, P. E. Caines, and R. P. Malhame, "Large-population cost coupled LQG problems with nonuniform agents: Individual-mass behavior and decentralized -nash equilibria," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 52, no. 9, pp. 1560–1571, Sep. 2007.
- [130] D. Bauso, L. Giarre, and R. Pesenti, "Consensus for networks with unknown but bounded disturbances," *SIAM J. Control Optim.*, vol. 48, no. 3, pp. 1756–1770, 2009.

中国自动化学会第十届理事会理事长简介



郑南宁，1975年毕业于西安交通大学电机工程系，1981年在西安交通大学工学硕士学位，1985年在日本庆应大学获工学博士学位，现为西安交通大学教授。1999年当选为中国工程院院士，IEEE Fellow；现任国务院学位委员会委员、2000年起，担任国际模式识别协会理事会中国代表，2003年8月起任西安交通大学校长。

郑南宁教授长期从事模式识别与智能系统、计算机视觉与图像处理等领域的应用基础理论和工程技术的研究。



王飞跃，1990年获美国伦塞利尔理工学院计算机与系统工程博士学位。1990年起在美国亚利桑那大学先后任副教授、副教授和教授。1998年作为国家计划委员会“引入海外杰出人才计划”和中国科学院“百人计划”人才回国工作，2011年追溯为国防领域“千人计划”国家特聘专家。曾任中国科学院自动化研究所副所长，现为中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室主任。

主要研究领域为智能控制、社会计算、复杂系统等。自上世纪80年代起从事自动化和复杂系统的研究与应用，提出并建立了智能系统的协调结构和理论、语言动力学理论、代理控制方法、复杂系统的ACP方法等。自二十一世纪初，发起并开拓了社会计算、社会制造、平行控制、平行管

理等新的研究领域。

曾任IEEE Intelligent Systems主编及多份IEEE和其它国际期刊的主编、副主编或编委，现任IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems和《自动化学报》及《指挥与控制学报》的主编。曾任IEEE智能交通系统学会主席（2007–2008年）、旅美科协主席（2005年）、北美竺可桢教育基金会会长（2006–2008年）。现任中国自动化学会副理事长兼秘书长。2007年获国家自然科学基金二等奖，2003年起先后当选IEEE、INCOSE、IFAC、ASME和AAAS等国际学术组织的Fellow。



柴天佑，1947年11月20日生，甘肃兰州籍。中国工程院院士，IFAC Fellow，IEEE Fellow。东北大学学术委员会主任（2011~），国家自然科学基金委员会信息科学部主任（2010~）。曾任国际自动控制联合会（IFAC）技术局成员及IFAC制造与仪表技术协调委员会主席（1996-1999）。获2010年英国皇家工程院Distinguished Visiting Fellowship，2011年日本学术振兴协会（JSPS）Invitation Fellowship。

长期从事复杂工业过程控制、优化和综合自动化的基础研究与工程技术研究。发表论文被SCI收录150余篇，其中1篇论文获IFAC杂志Control Engineering Practice 2011-2013 最佳论文奖。应邀在美国、英国、加拿大、日本等国举行的IFAC、IEEE国际会议上作大会特邀报告30余次。获国家技术发明二等奖、国家科技进步二等奖共四项，省部级特等奖、一等奖十一项；已培养博士90余名。两次获得全国五一劳动奖章，2002年获何梁

何利基金科学与技术进步奖，2003年获辽宁省科技功勋奖，2005年获全国先进工作者荣誉称号，2010年获第一届杨嘉墀科技奖一等奖。2007年在IEEE系统与控制联合会议上被授予控制研究杰出工业成就奖。



张剑武，男，安徽宿州人，中共党员，1964年3月生人，教授级高级工程师，工学硕士。1985年毕业于南京航空学院计算机应用专业，1987年获东北大学研究生院计算机应用专业硕士学位。中国自动化学会副理事长；中国自动化学会应用专业委员会主任；中国金属学会常务理事；中国金属学会冶金自动化分会主任；丰台区政协委员。曾任冶金自动化研究设计院系统所副所长、北京金自天正智能控制股份有限公司常务副总经理。现任中国钢研科技集团有限公司党委常委，冶金自动化研究设计院院长，北京金自天正智能控制股份有限公司董事长。

作为我国工业自动化领域的专家，张剑武同志主持完成多项国家重大工程项目。1997年获得冶金部直属机关青年岗位能手称号，2000年获得政府特殊津贴，2013年被评为“2011年度丰台科技园优秀企业家”。主要学术著作及论文有：《宽带钢连轧机自动化关键技术》、《液压AGC自动化控制技术》、《21世纪初叶冶金自动化装备技术发展和对策》、《钢铁工业自动化》等。



张纪峰，1963年9月生，籍贯山东平邑。1985年本科毕业于山东大学数学系，1991年博士毕业于中国科学院系统所，现为中国科学院数学与系统科学研究院关肇

直首席研究员、系统科学研究所所长。

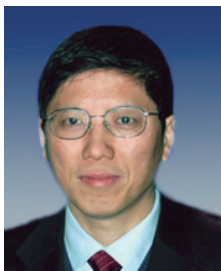
研究方向为随机系统、有限信息系统、多个体系统的分析与控制。合作出版专著1本，发表论文160余篇。曾获国家自然科学奖二等奖(排名第三)、国家杰出青年科学基金、全国优秀博士学位论文指导教师等奖励和荣誉。2014年当选IEEE Fellow。

现为国务院学位委员会系统科学学科组召集人，中国自动化学会副理事长、控制理论专业委员会主任，中国系统工程学会副理事长，中国数学会常务理事等；先后任IEEE控制系统协会Board of Governors成员，系统科学与数学、中国科学(F辑)、IEEE Trans. on Automatic Control、SIAM Journal on Control and Optimization等十多个学术期刊的主编、副主编、编委等。作为大会副主席、程序委员会主席等参与组织多个国内外重要会议。



陈杰，1965年7月生，福建省福清市人。北京理工大学教授、博导，“复杂系统智能控制与决策”国家重点实验室主任、国家杰出青年科学基金获得者、长江学者特聘教授、国家基金委创新研究群体学术带头人、教育部长江学者创新团队带头人，校长助理兼科学技术研究院常务副院长。

在动态环境下复杂系统的多指标优化与多目标决策及其控制等研究领域内进行了深入研究，并面向应用将在该领域的研究与装备系统建设密切结合。近年来，以第一完成人获国家科技进步二等奖2项、教育部自然科学一等奖1项、国防科技进步一等奖2项，已获授权发明专利48项和软件著作权25项，发表学术论文100多篇，其中SCI收录论文47篇。出版专著两本，主编出版国际学术会议论文集4本。



杨孟飞，男，1962年10月出生，湖南湘阴人。博士，研究员，博士生导师。主要从事飞行器总体、控制系统及控制计算机的研究和研制工作。



黄星，男，祖籍湖南省浏阳县。1952年9月出生，1968年3月入伍，1969年1月加入中国共产党。中国人民解放军军事科学院科研指导部原部长兼党委书记，军事科学院党委原常委，正军职，少将军衔。博士研究生导师，中国自动化学会副理事长，中国科学院人工智能与自动化研究所兼职博士研究生导师，国家高层次人才支持计划带课导师，中宣部青年拔尖人才支持计划专家委员会专家，军队战略规划委员会专家咨询委员会成员、国家哲学社会科学规划办公室专家委员会专家、国务院海峡两岸关系协会高级顾问、军队外事工作专家咨询组成员、中国国际战略研究基金会理事、中国文化发展促进会理事，第二炮兵战略研究中心特邀研究员、北京军区信息化专家委员会成员、国际关系学院等大专院校兼职教授等。



于海斌，中国科学院沈阳自动化研究所所长、研究员、博导。1964年10月生，籍贯黑龙江省密山市。东北大学毕业，工学博士。现任

中国科学院网络化控制系统重点实验室主任，中国自动化学会副理事长，全国工业过程测量控制和自动化标准化技术委员会主任委员，国际自动化协会ISA Fellow。

主要研究方向为工业自动化，先后主持20余项国家重大和重点项目。自主开发了我国唯一、

国际第三个通过基金会测试的现场总线主协议栈，支持多家国内仪表企业通过产品国际认证；研制成功国内首款工业现场总线芯片，已经为国内主流仪表企业采用，相关技术和产品出口美国、韩国和巴西等国家；构建了工业现场无线网络技术体系，并作为IEC和IEEE国际标准颁布。

国家杰出青年基金、国家首批“万人计划”科技创新领军人才、第六届中国青年科技创新（十佳）杰出奖、第九届中国青年科技奖获得者。获国家科技进步或技术发明二等奖3项，省部级技术发明或科技进步一等奖4项，获2013年中国标准创新贡献一等奖。授权中国发明专利36项，国际专利1项；软件著作权16项、集成电路布图设计权2项；主持国际标准制定2项。发表论文100余篇，主编专著2部。



李少远，男，1965年4月生，河北省枣强县，1987年本科毕业于河北工业大学自动控制专业，1989年在该校获得硕士学位，1997年在南开大学计算机与系统科学系获得自动控制理论及应用学科博士学位，1998年3月至2000年2月在上海交通大学控制科学与工程博士后流动站做博士后，出站后至今在上海交通大学自动化系工作。现为上海交通大学教授，博士生导师，电子信息与电气工程学院副院长。

主要研究领域为：自适应预测控制、满意优化控制和智能控制的理论、方法和应用。在国内外学术杂志上发表学术论文200余篇，SCI和EI收录论文150余篇，承担了包括国家自然科学基金、国家863计划在内的国家级科研项目10余项，出版学术专著3部，教材2部，主要成果获得2006年上海市自然科学一等奖（第一完成人），2008年获得国家杰出青年基金资助。

李少远，教授担任中国自动化学会副理事

长，教育部高等学校自动化类专业教学指导委员会副主任，亚洲控制协会副主席，上海市自动化学会理事长等职。担任《International Journal of System Control and Information Processing》执行主编，《International Journal of Modelling, Identification and Control》亚太地区编辑以及国内杂志《自动化学报》、《控制理论与应用》、《控制与决策》、《信息与控制》、《控制工程》和《自动化博览》等杂志编委。



周东华，男，1963年9月出生。上海交通大学工学博士。1996年12月加入清华大学，1997年7月晋升教授，1999年起任博士生导师。2008年7月起任清华大学自动

化系主任。研究方向是：动态系统的故障诊断与容错控制，故障预测与智能维护技术等。

已在国际学术刊物发表论文120余篇。目前的主要学术兼职有：IFAC 技术过程的故障诊断与安全性技术委员会委员，教育部高等学校自动化类教学指导委员会主任，第六届“控制科学与工程”国务院学科评议组成员，中国自动化学会副理事长，中国自动化学会技术过程故障诊断与安全性专业委员会主任。

曾获2012年度国家自然科学二等奖1项（第1完成人），2010年度国家科技进步二等奖1项（第6完成人），省部级科技进步/自然科学一、二等奖6项，省部级优秀教学成果一等奖1项（第1完成人）。

中国自动化学会第十届理事会 常务理事简介



查亚兵，1968年6月出生，江西九江人。分别于1989年和1995年获国防科技大学自动控制系学士和博士学位，一直从事系统建模和仿真的理论方法研究，主持国家863高技术、国家自然科学基金、武器装备预研基金、武器装备预研等十余个科研项目，在概念建模、智能虚拟实体行为建模、仿真系统集成、仿真VV&A等领域取得一系列成果，主要服务于武器装备研制、军事训练和作战研究等领域。近年来，在信息地球物理、能源互联网等领域开展了一些有益探索。现任国防科技大学信息系统与管理学院院长，教授、博士生导师。
联系方式：ybzha@nudt.edu.cn



常天庆，男，1963年1月出生，河南郑州人。1985年获装甲兵工程学院电气自动化学士学位，1988年获装甲兵工程学院导航制导与控制硕士学位，1999年获清华大学控制理论与控制工程博士学位。

历任装甲兵工程学院科研部组织计划处处长、控制工程系系主任等职，现为装甲兵工程学院控制工程系教授。

中国自动化学会常务理事、中国兵工学会理事、教育部高等学校自动化类专业教学指导委员会委员、总装备部惯性技术专业组委员。第十二

届全国人大代表。

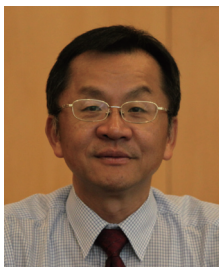
在坦克火力控制、嵌入式模拟训练、装甲装备检测及其综合集成、基于状态的装备运用、作战需求论证等方面取得了多项创新性成果，产生了重大的军事和经济效益。获国家科技进步二等奖1项，获军队科技进步一等奖5项；获国防发明专利8项；发表论文200余篇，出版专著2部。



陈国龙，男，1965年8月出生，福建莆田人，中共党员。分别获福州大学学士学位、硕士学位和西安交通大学博士学位，教授，博士生导师。

1987年8月参加工作，先后任福州大学计算机科学与技术系主任助理、副主任，校外联部部长、科技开发部副主任、科技处处长、校长助理，福州大学委员会常委、副校长。

长期致力于智能信息处理、网络与信息安全方面的研究工作。主持和完成了包括国家自然科学基金项目、科技部产学研科技项目、“863”计划课题、教育部科技重点项目等30余项国家、省部级科研项目，申请发明专利12项，获软件著作权15项，出版学术专著1部，在国内外学术刊物和国际会议上发表论文150多篇，其中SCI收录16篇，EI收录83篇，获福建省科技进步二、三等奖各1项。2010年所领导的科研团队获批中央财政支持地方高校创新团队建设。



陈俊龙 (C. L. Philip Chen) 博士, 1959年7月生, 籍贯台湾省南投县, 澳门大学讲座教授及科技学院院长。1988年获得美国普度大学博士学位 (Purdue University), 1985年获得美国密西根大学硕士学位 (University of Michigan)。曾任美国德州大学工学院终身教授, 工学院副院长及电机电脑系主任。曾任电机电子工程学会 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) 系统人机及智慧学会 (IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society, SMCS) 主席, 2012-2013, 现任前主席 (Jr. Past President), 2014-2015, 以及IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems期刊总主编 (Editor-in-Chief)。陈教授是大中华地区少数曾经担任过主席职位的现职学者之一, 多年的事业贡献备受国际肯定。陈教授同时是IEEE SMCS的常务理事及杰出演讲师, IEEE Cybernetics, 和 Access 期刊副编辑, 曾任财务总监, 主持IEEE SMCS 2009及2014学会国际年会, 是IEEE 会士 (Fellow), 美国科学促进会, AAAS 会士 (Fellow), 也是HKIE Fellow。

陈教授曾任美国空军莱特实验室及美国航天总署访问研究员, 研究方向包括智慧系统理论, 物理建模, 诊断及预测, 网路与通信, 获两项美国专利, 在《IEEE Transactions on Robotics & Automation》、《IEEE Transactions on Fuzzy Systems》、《IEEE Transactions on Neural Networks》、《IEEE Transactions on Wireless Communications》、《IEEE Sensor Journal》、《IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A, Part B, and Part C》等国外重要学术刊物上发表论文, 出版学术专著1部。陈教授在学会担任许多要职, 担任多个国际会议主席及技术委员 (IEEE International Conference on

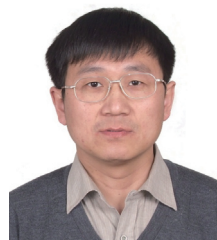
Robotics and Automation, IEEE WCCI, IEEE Int'l Conf. on Intelligent Robotics and Systems (IROS), IEEE Int'l Conf. on SMC)。陈教授在IEEE SMCS学会里创了三个技术委员会 (大系统工程, Enterprise Information Systems, and Information Assurance), 开创了两个技术分会并担任会长 (中德州以及澳门分会), 获学会颁发了两次杰出贡献奖。陈教授也是美国工学技术教育认证会 (ABET) 的评审委员。



段广仁, 1962年4月生, 籍贯山东省东明县, 哈尔滨工业大学控制理论与制导技术研究中心主任。

1991年破格晋升哈工大教授、1997年入选教育部跨世纪人才、1999年获得国家杰出青年科学基金资助、2000年受聘为哈工大长江学者; 2005年获得教育部长江学者创新团队项目资助; 2009年获得国家自然科学基金委创新群体项目资助。任教育部科技委信息学部委员、中国自动化学会常务理事等职。

作为第一完成人获得国家自然科学二等奖等多项奖励, 另获第四届中国青年科技奖、第八届全国优秀科技图书二等奖和第十一届中国图书奖; 发表SCI论文240余篇, 出版学术著作4部; 培养全国百名优秀博士论文获得者2人、新世纪人才2人, 长江学者和国家杰出青年基金获得者1人。



段志生, 1972年3月出生, 于内蒙古呼和浩特郊区。2000年7月于北京大学获一般力学专业博士学位, 2002年7月于北京大学博士后出站并留校任教, 2003起任副教授, 2008年起任教授。多次访问澳大利亚Monash大学、香港城市大学、美国纽约理工大学进行合作研究。长期从事控制理论及其应用方面的研究工作, 在控

制器与对象同时摄动的鲁棒控制问题,关联系统协调控制,多冗余输入协调控制以及复杂网络方面做出了有特色的研究工作。发表SCI检索论文90多篇。研究成果被国内外同行广泛引用评价,他引1000多次。主持和参加多项国家自然科学基金项目。先后兼任多个国内外期刊编委,任控制理论专业委员会委员、复杂网络专业委员会委员、一般力学专业委员会委员、自动化学会常务理事等职务。2001年获第七届关肇直优秀论文奖,2011年获教育部自然科学一等奖(第一完成人),2012年获得国家杰出青年基金资助,与黄琳院士联合培养的李忠奎博士获得全国百篇优秀博士学位论文奖。现任教育部长江奖励计划特聘教授。个人主页: <http://www.mech.pku.edu.cn/~aerocontrol/duanzs/index.htm>



高彦臣,男,1964年12月出生,吉林松原人,工学博士,博士生导师,研究员,国家轮胎工艺与控制工程技术研究中心副主任、软控股份有限公司高级顾问。长期致力于化工、橡胶、轮胎等行业的自控系统及网络信息系统的研究开发、应用推广工作,取得了多项突破性的科研成果,为行业科技创新及产业链模式探索等做出了突出贡献,荣获多项国家及省部级科技奖励,并先后获得国务院政府特殊津贴、全国化工优秀科技工作者、山东省有突出贡献的中青年专家、山东省软件企业领军人物、青岛专业技术拔尖人才等荣誉称号。



桂卫华,1950年8月出生,中南大学教授,中国工程院院士。主要研究方向:复杂工业过程建模、控制与优化;大系统控制理论与应用;分散鲁棒控制;最优控制与应用;

流程工业现代集成技术等。

主持国家973、国家863、国家自然科学基金、国家支撑计划和国家高技术产业化等国家和企业重大项目多项,获国家科技进步二等奖三项,省部级科技进步一等奖四项,省部级自然科学一等奖一项,出版著作四部(排名第1),发表论文多篇,2009年获何梁何利基金科学与技术进步奖,2013年获国家自然科学基金委创新研究群体。



贺剑锋,男,1962年10月出生,湖南湘潭人,汉族,自动控制及理论博士,高级工程师。1997年加入和利时,现任和利时集团董事长。

其长期从事自动化控制领域的科研教学、应用实践、设计开发和技术管理等工作。在近20年,主持完成包括863科技课题在内的国家重大科技课题10余项,科技成果转化业绩突出,自动化产业总值超过30亿元,业务延伸至海外,并在行业中处于领先地位。

主持管理的科技开发项目获得过国家及省部级20余项奖励和表彰,并促成多部技术专著的出版,拥有具有自主知识产权的发明专利和软件著作权近百余项,参与多项国家标准的制定并形成执行标准3项。



胡昌华,1966年6月3日出生于湖北省罗田县,分别于1987、1990年于二炮工程大学获学士、硕士学位,1996年于西北工业大学获博士学位,1990年开始在二炮工程大学任教,1999年晋升教授,现为二炮工程大学导航制导与控制国家重点学科带头人,导弹测试与控制技术军队重点实验室主任,教育部自动化类教学指导委员会委员,自动化学会常务理事、技术过程故障诊断与安全性委员会副主任,出版专著

3部, 发表论文300余篇, 获国家科技进步二等奖1项、部级科技进步一、二等奖9项, 先后获国家杰出青年科学基金, 当选国家教学名师、教育部长江学者特聘教授、全国优秀科技工作者、国家百千万人才工程国家级人选、国家有突出贡献的中青年专家、享受政府特殊津贴专家。



贾英民, 男, 1958年10月生, 山东省金乡县人。1981年毕业于山东大学数学系自动控制专业获学士学位, 1990年和1993年分获北京航空航天大学自动控制理论及应用专业硕士和博士学位。

1994年从北航航空与宇航技术博士后流动站出站留校任教, 同年被评为教授, 1996年被评为控制理论与控制工程学科博士生导师。

曾先后获德国宇航院, 德国“洪堡”基金会, 日本学术振兴会以及国家留学基金委的资助多次访问德国、日本和美国。1996年获国家杰出青年科学基金, 1999年入选国家“百千万人才工程”第一、二层次人选, 2004年被评为教育部“长江学者”特聘教授, 2011年任国家“973计划”项目首席科学家, 2013年任国家重大科研仪器设备研制专项主持人。

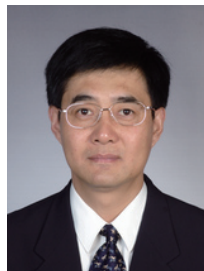
研究方向为: 鲁棒与自适应控制、智能控制及其在车辆系统与工业过程中的应用等。



刘德荣, 1963年1月生于吉林省白城市, 1982年从华东工学院毕业并获机械工程专业学士学位, 1987年从中国科学院自动化研究所毕业并获自动控制理论及应用硕士学位, 1994

年从美国圣母大学毕业并获电机工程博士学位。曾先后在美国通用汽车公司研究开发中心工作和斯蒂文斯理工学院电机与计算机工程系任副教授。从1999年开始, 在芝加哥伊利诺依大学电机

与计算机工程系工作, 先后任该校助教授(1999-2002)、终身职副教授(2002-2006)和终身职正教授(2006年起)。2008年, 入选中国科学院“百人计划”在自动化研究所任研究员。2009年, 入选中组部“千人计划”在自动化研究所任复杂系统管理与控制国家重点实验室副主任。自1992年以来, 共发表了100多篇国际杂志论文、170多篇国际会议论文。同他人合作共出版过14本书。1999年, 获得了美国国家科学基金会教授早期事业发展奖。2006年, 获伊利诺依大学的大学学者奖。2008年, 获得了中国国家自然科学基金委“海外杰出青年合作研究基金”。现任IEEE计算智能学会的杰出讲师、IEEE神经网络与学习系统汇刊总主编。2005年当选IEEE Fellow、2013年当选INNS Fellow。



刘丁, 男, 1957年3月生, 山东沂水人, 西安理工大学控制科学与工程学科教授, 博士生导师、校长。

主要从事复杂工业过程的信息测量、模型建立和智能优化控制; 智能机器人视觉伺服控制; 晶体生长核心工艺与控制系统研究。在国内外著名学术刊物及重要国际学术会议上发表学术论文160余篇, 其中SCI、EI检索收录近百篇; 获国家发明专利授权20余项, 美国发明专利2项。先后获国家技术发明二等奖(2012年)、国家科技进步三等奖(1997年)、国家级教学成果二等奖(2009年)各1项, 省部级科学技术奖7项。

主持国家科技重大专项(02专项)、国家“863”计划项目科技攻关重大项目、国家自然科学基金及省、部各类科技攻关和基金项目十余项。现为IEEE高级会员、中国自动化学会常务理事、陕西省自动化学会副理事长、控制理论与应用、智能系统学报等期刊编委。



刘吉臻，男，汉族，1951年8月生，山西岚县人，中共党员。华北电力大学校长，博士，教授，博士生导师，新能源电力系统国家重点实验室主任，国家“973项目”首席科学家。兼任教育部科学技术委员会委员、机电运载学部常务副主任、中国电力企业联合会副理事长、中国电机工程学会副理事长、中国动力工程学会副理事长、中国自动化学会常务理事、热工自动化标准化委员会主任委员、国际电气工程师协会资深会员（FIET）。入选国家人事部首批百千万跨世纪优秀人才，享受国务院政府特殊津贴。第十二届全国政协委员。

多年来，刘吉臻教授带领其学术团队完成了20多项国家和省部级重点科研课题。发表学术论文180余篇，其中有90余篇被SCI、EI收录，出版学术著作5部。获国家科技进步二等奖一项、国家教学成果二等奖一项、省部级科研成果一等奖二项。其中，“智能电网中大规模新能源电力安全高效利用基础研究”，“火电厂厂级运行性能在线诊断及优化控制系统”、“大型超超临界机组自动化成套控制系统关键技术及应用”等课题的研究取得了重要的科技创新成果和显著的社会经济效益。



乔非，女，1967年6月生，陕西省西安市人，同济大学电子与信息工程学院教授、博导，学院副院长兼党委副书记。1993至今就职于同济大学，2001年德国洪堡学者，2007年入选教育部新世纪优秀人才计划。兼任中国自动化学会副秘书长，上海市自动化学会理事，中国自动化学会专家咨询工作委员会、集成自动化专业委员会和过程自动化专业委员会委员，上海市系统工程学会理事，IEEE高级会员。

长期从事系统工程领域生产计划与调度、能耗模型与能源管理、智能优化理论与方法、制造业信息化等的科研工作，先后主持、参与并完成国家自然科学基金重点项目和面上项目、国家重大专项子课题等科研项目20多项，已出版专著3部，发表学术论文100余篇，曾获上海市技术发明一等奖等科研奖项10多项。



沈林成，男，1965年出生，教授、博导，国家重点学科“控制科学与工程”学科学术带头人。国防科技大学机电工程与自动化学院院长，中国自动化学会常务理事、机器人专业委员会副主任委员，湖南省自动化学会副理事长，湖南省学科评议组第二、三届成员，总装无人机系统专业组副组长，Journal of Bionic Engineering期刊编委，国家985工程科技创新平台负责人。长期从事无人系统自主控制、飞行器任务规划及仿生机器人等方面研究工作，承担了国家重大专项、国家自然科学基金、演示验证、重大背景等多项科研项目，获军队科技进步一等奖1项（排名第一）、军队科技进步二等奖3项、湖南省技术发明二等奖1项（排名第一），获国防/发明专利11项，在IEEE汇刊、中国科学、自动化学报等领域期刊和会议发表SCI论文27篇、EI论文82篇，出版学术专著3部（《移动机器人自主控制理论与技术》，2011，科学出版社；《多无人机自主协同控制理论与方法》，2013，国防工业出版社；《分布式系统实时发布订阅数据分发技术》，2013，国防工业出版社）。潜心教书育人二十余载，多次被评为国防科学技术大学优秀教师和优秀导师，已培养博士生23人、硕士生37人、本科优异生26人，指导的学生数次获得国际数模、全国挑战杯、机器人大赛等竞赛奖项，多次获得全军/省优秀博士学位论文、优秀硕士学位论文。2012年荣立二等功1次。



田彦涛，男，1958年1月吉林省四平市出生。1982年6月至2001年5月年在原吉林工业大学工作，先后任自动化教研室主任、自动化研究所所长、电子工程系主任、信息科学与工程学院院长，1999年至2000年丹麦奥尔堡大学访问学者，2001年至2008年任吉林大学通信工程学院院长。长期从事复杂系统建模与优化控制、机器视觉与模式识别、仿生与智能机器人系统控制等学科方向的基础研究与工程应用研究工作。近五年，承担完成国家863计划课题1项、国家自然科学基金等国家项目2项、国家重大产业化项目1项、吉林省科技发展计划项目和教育部重要科技项目6项，发表论文78篇，其中，收入SCI检索6篇、EI检索58篇，出版专著1部，申请国家发明专利10项，其中授权7项，科研成果获省部级科技进步三等奖1项。



王伟，男，1955年1月生，辽宁省盖县人。1988年在东北大学获得博士学位。目前任大连理工大学电子信息与电气工程学部控制科学与工程学院教授、博士生导师，电子信息与电气工程学部部长。主要研究领域涉及复杂工业过程的建模、控制与优化，流程工业生产计划与优化调度等方面。在国内外

主要学术期刊和会议上发表论文300余篇，SCI他引1000余次。指导博士生已有41人获得博士学位。1997获得国家杰出青年基金。获教育部自然科学二等奖1次、教育部科技进步二等奖2次。现任亚洲控制协会执委会委员，中国自动化学会常务理事，过程控制专业委员会常务委员、中国自动化学会控制理论专业委员会委员，国际核心期刊《Information Science》编委，国内《自动化学报》、《控制理论与应用》等多家期刊编委。



张光新，1969年9月生，浙江兰溪市人。1994年4月至今在浙江大学从事教学科研工作，现为浙江大学教授、博士生导师，任浙江大学控制科学与工程学系系主任。

近年来主要从事先进传感技术、综合自动化系统、环境信息监测和预警、网络化监控等领域的研究和教学工作。承担国家重大科技专项课题、国家自然科学基金、国家质检总局公益项目、博士点基金、国家科技支撑项目子课题等研究项目十余项，食品、制药、轻工、化工等领域的自动化工程项目三十余项；获授权发明专利近二十项，发表SCI、EI收录论文六十余篇；先后合作出版国家重点教材等著作五本。近年来获得浙江省教学成果一等奖、二等奖各一项，获得浙江省科技进步二等奖、三等奖各一项。

(待续)

中国自动化学会十届二次秘书长 工作会议在京召开

2014年2月22日,中国自动化学会第十届二次正副秘书长工作会议在北京中科院自动化所召开。秘书长王飞跃主持会议,副秘书长张楠,戴琼海,孙彦广,乔非,董海荣,黄华,陈积明,石红芳,赵延龙,孙长银(派代表)出席会议,学会办公室全体工作人员列席会议。

会议主要围绕学会现有工作基础和2014年重点工作进行了认真了解和讨论,

大家集思广益,各抒己见,为学会下一步工作提出了很多宝贵的意见和建议,并形成会议决议。

中国自动化学会十届二次理事长 工作会议在京召开

2014年3月24日下午,中国自动化学会理事长郑南宁院士在京主持召开十届二次理事长工作会议,副理事长于海斌、王飞跃、张纪峰、张剑武、李少远、杨孟飞、陈杰、周东华、黄星、柴天佑(派代表)出席会议,秘书处办公室全体工作人员列席会议。

首先,全体与会代表审议通过了十届一次理事长工作会议的会议纪要,再次明确了各位副理事长的分工;接下来,各位副理事长分别从学会管理、学术、财务、会员发展和奖励、学术会议和会展、出版宣传、国防、工业、社会服务工作等方面汇报了2014年度工作重点以及相关工作的进展情况,其中,副理事长王飞跃研究员重点传达了中国科协八届五次全委会的会议精神以及民政部关于取消全国性社会团体分支机构登记等审批事项的文件精神,详细汇报了常务理事分组情

况、网站改版、2013年度年检审计、会员相关工作等;随后,各位正副理事长就如何更好地承接政府职能转移、开展科普与社会服务工作、大力发展会员特别是学生会员以及完善各项会员服务、积极筹备2015年中国自动化大会、CAA优博论文启动工作、国内青年队伍与发展点以及推动国际合作与国际化等方面展开了热烈的讨论,大家集思广益,各抒己见,为学会下一步工作提出了很多宝贵的意见和建议,并形成会议决议。

最后,学会理事长郑南宁院士做总结发言。他在充分肯定学会秘书处近阶段工作的同时,提出了"抓大放小、突出主业"的八字方针,希望大家围绕各自分管的工作,充分发挥自身优势,加强沟通合作,稳步扎实地推进学会各项工作,齐心协力共同开创学会美好的明天!

ABB入选《财富》2014“全球最受赞赏公司”

在本次全球范围的年度调查中，ABB位居行业内榜首

瑞士苏黎世，2014年3月20日——作为全球领先的电力和自动化技术集团，ABB曾多次入选美国《财富》杂志“全球最受赞赏公司”排行榜。2014年，ABB从去年工业机械行业的第6位跃居榜首。

每年，《财富》向1,500名高级管理人员和行业分析师发出问卷调查，请他们从创新能力、吸引并留住人才等9个关键指标对各公司进行评分。2014年，ABB在整体评分以及全球竞争力、产品/服务质量、质量管理、人事管理和创新5个分项指标中都位居同行业之首。

ABB集团首席执行官史毕福表示：“ABB

一直是行业的领军者，为人才提供业内最佳工作平台；很高兴这一点得到行业和《财富》的认可。我们将继续通过盈利性增长、不遗余力的全面执行和以业务为主导的跨部门合作等重点关注领域，为我们的顾客、员工以及股东创造更多价值。”

《财富》杂志此次调查共涵盖25个不同行业。

ABB位居全球500强，是电力和自动化技术领域的领导企业。ABB致力于帮助电力、公共事业和工业客户提高业绩，同时降低对环境的影响。ABB集团业务遍布全球100多个国家，拥有15万名员工。ABB在中国拥有研发、制造、销售和工程服务等全方位的业务活动，员工1.9万名，拥有37家本地企业和遍布全国109个城市的销售与服务网络。

第一届台达杯两岸高校自动化设计大赛启动

“发现能效高手”——第一届台达杯两岸高校自动化设计大赛近日启动，本届大赛由中国自动化学会、教育部电气类专业指导委员会主办（主办单位排名不分先后），台达集团承办，是面向海峡两岸大学生的创新性科技竞赛活动，以“发现能效高手”为主题，征集结合了台达自动化技术与产品的自动化系统创新设计方案。

秉持“环保 节能 爱地球”的经营使命，台达一直致力于环保节能事业发展，期望以竞赛为载体，贯彻落实教育改革精神，培养理论联系实际的学风，促进大学生自动化实践水平的提高，

激发大学生学习自动化技术的兴趣；强化学生节能、环保意识与合作创新精神，提升大学生编程和调试的应用技能，加强两岸校企交流，深化校企合作。

3月28日，“发现能效高手——第一届台达杯两岸高校自动化设计大赛”报名截止，两个月来大赛组委会共收到海峡两岸50多所高等院校的120多队报名参赛，其中还有4支台湾高校代表队首次出现在大陆自动化大赛上，创新了两岸自动化交流形式，也彰显了台达自动化品牌在两岸自动化高等教育领域的强大品牌号召力。

中国自动化学会党支部召开民主生活会

1月8日,中国自动化学会党支部召开了民主生活会,挂靠单位自动化研究所党委副书记房自正同志出席了会议,党支部全体党员参加了会议,会议由党支部书记吕爱英同志主持。

学会党支部按照所党委的要求在会议前专门组织全体党员学习了“党的十八届中央委员会第三次全体会议公报”、“习主席在河北省委专题民主生活会上的讲话”等重要文件,每位党员都认真准备了发言提纲或总结材料。

党支部副书记张楠同志首先发言,她结合学会秘书处的的工作,尤其是这次换届大会,从筹备到实施都发挥党员的先锋模范作用和党支部的战斗堡垒作用,使学会工作创新、平稳、和谐、有序地发展。在总结了大会经验的同时,她也指出了不足,并结合秘书处的工作进行了批评和自我批评。随后,党员们畅所欲言,坚持对事业、对同志高度负责的态度,就各自一年来的工作进行了认真总结,开展了认真的批评与自我批评。大家一致认为:中国自动化学会作为最早的全国性社会团体之一,肩负着团结全国范围内的自动化领域科技工作者的责任,而学会秘书处办公室作为学会办事机构,一定要发挥好中枢作用,上对学会常务理事会负责,下要深入到各二级学会和会

员单位中去,及时将方针政策、活动通知等各项服务落实到各级学会和每个会员,让他们感受到学会的温暖;同时也要及时将各级学会和会员的需求和心声反映给常务理事会,特别是能够通过学会这个平台反映到国家及会员,让会员感受到学会的凝聚力、吸引力、自我发展能力和社会影响力。党支部正是在这种背景下,积极配合秘书处,明确各项工作的方向和目标,从凝聚团结会员入手,加强岗位职责的履行,发挥好党员的带头作用。党员们表示:在今后工作中要认真整改与完善措施,使学会工作迈上新的台阶。

房自正副书记在会上对党中央的这次群众路线教育活动的重大意义进行了讲解,明确了对党支部及党员的要求。他对本次民主生活会给予了充分肯定,认为学会党支部会前都进行了认真准备,会上态度诚恳、畅所欲言,开展批评与自我批评充分,达到了关于党内民主生活会的要求。希望今后根据大家的意见和建议,进行整改,不断总结经验,在低头拉车的同时要抬头看路,明确发展方向;同时在积累过程中,能够为学会秘书处沉淀一些经验,例如办会、文件处理、档案管理工作中总结出规律,让党建工作在学会中发挥更大的作用,使学会工作迈上新的台阶。

习近平在省部级主要领导干部学习 贯彻十八届三中全会精神全面深化改革 专题研讨班开班式上发表重要讲话

省部级主要领导干部学习贯彻十八届三中全会精神全面深化改革专题研讨班17日在中央党校开班。中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平在开班式上发表重要讲话。他强调，必须适应国家现代化总进程，提高党科学执政、民主执政、依法执政水平，提高国家机构履职能力，提高人民群众依法管理国家事务、经济社会文化事务、自身事务的能力，实现党、国家、社会各项事务治理制度化、规范化、程序化，不断提高运用中国特色社会主义制度有效治理国家的能力。

中共中央政治局常委李克强、张德江、俞正声、王岐山、张高丽出席开班式。中共中央政治局常委刘云山主持开班式。

习近平指出，党的十八届三中全会提出的全面深化改革的总目标，就是完善和发展中国特色社会主义制度、推进国家治理体系和治理能力现代化。这是坚持和发展中国特色社会主义的必然要求，也是实现社会主义现代化的应有之义。

习近平强调，改革开放以来，我们党开始以全新的角度思考国家治理体系问题，强调领导制度、组织制度问题更带有根本性、全局性、稳定性和长期性。今天，摆在我们面前的一项重大历史任务，就是推动中国特色社会主义制度更加成熟更加定型，为党和国家事业发展、为人民幸福安康、社会和谐稳定、为国家长治久安提供一整套更完备、更稳定、更管用的制度体系。这项工程极为宏大，必须是全面的系统的改革和改

进，是各领域改革和改进的联动和集成，在国家治理体系和治理能力现代化上形成总体效应、取得总体效果。

习近平指出，国家治理体系和治理能力是一个国家的制度和制度执行能力的集中体现，两者相辅相成。我们的国家治理体系和治理能力总体上是好的，是有独特优势的，是适应我国国情和发展要求的。同时，我们在国家治理体系和治理能力方面还有许多亟待改进的地方，在提高国家治理能力上需要下更大气力。只有以提高党的执政能力为重点，尽快把我们各级干部、各方面管理者的思想政治素质、科学文化素质、工作本领都提高起来，尽快把党和国家机关、企事业单位、人民团体、社会组织等的工作能力都提高起来，国家治理体系才能更加有效运转。

习近平指出，推进国家治理体系和治理能力现代化，必须完整理解和把握全面深化改革的总目标，这是两句话组成的一个整体，即完善和发展中国特色社会主义制度、推进国家治理体系和治理能力现代化。我们的方向就是中国特色社会主义道路。

习近平强调，一个国家选择什么样的治理体系，是由这个国家的历史传承、文化传统、经济社会发展水平决定的，是由这个国家的人民决定的。我国今天的国家治理体系，是在我国历史传承、文化传统、经济社会发展的基础上长期发展、渐进改进、内生性演化的结果。我国国家治理体系需要改进和完善，但怎么改、怎么完善，

我们要有主张、有定力。中华民族是一个兼容并蓄、海纳百川的民族，在漫长历史进程中，不断学习他人的好东西，把他人的好东西化成我们自己的东西，这才形成我们的民族特色。没有坚定的制度自信就不可能有全面深化改革的勇气，同样，离开不断改革，制度自信也不可能彻底、不可能久远。我们全面深化改革，是要使中国特色社会主义制度更好；我们说坚定制度自信，不是要固步自封，而是要不断革除体制机制弊端，让我们的制度成熟而持久。

习近平指出，推进国家治理体系和治理能力现代化，要大力培育和弘扬社会主义核心价值体系和核心价值观，加快构建充分反映中国特色、民族特性、时代特征的价值体系。坚守我们的价值体系，坚守我们的核心价值观，必须发挥文化的作用。民族文化是一个民族区别于其他民族的独特标识。要加强对中华优秀传统文化的挖掘和阐发，努力实现中华传统美德的创造性转化、创新性发展，把跨越时空、超越国度、富有永恒魅力、具有当代价值的文化精神弘扬起来，把继承优秀传统文化又弘扬时代精神、立足本国又面向世界的当代中国文化创新成果传播出去。只要中华民族一代接着一代追求美好崇高的道德境界，我们的民族就永远充满希望。

习近平强调，制定出一个好文件，只是万里长征走完了第一步，关键还在于落实文件。我们在学习宣传全会精神上还要下细功夫、苦功夫、深功夫，夯实全面深化改革的思想认识基础。在学习理解上，要防止一知半解、断章取义、生搬硬套，要弄清楚整体政策安排与某一具体政策的关系、系统政策链条与某一政策环节的关系、政策顶层设计与政策分层对接的关系、政策统一性与政策差异性的关系、长期性政策与阶段性政策的关系，既不能以局部代替整体、又不能以整体

代替局部，既不能以灵活性损害原则性、又不能以原则性束缚灵活性。在贯彻落实上，要防止徒陈空文、等待观望、急功近利，必须有时不我待的紧迫意识和夙夜在公的责任意识抓实、再抓实。改革是循序渐进的工作，既要敢于突破，又要一步一个脚印、稳扎稳打向前走，确保实现改革的目标任务。全面深化改革是立足国家整体利益、根本利益、长远利益进行部署的，要注意避免合意则取、不合意则舍的倾向，破除妨碍改革发展的那些思维定势。对党和人民事业有利的，对最广大人民有利的，对实现党和国家兴旺发达、长治久安有利的，该改的就要坚定不移改，这才是对历史负责、对人民负责、对国家和民族负责。

刘云山在主持开班式时指出，习近平总书记重要讲话从历史与现实、理论与实践结合上，深入阐释了全面深化改革总目标的历史背景、现实根据、科学内涵，深刻回答了坚持改革总目标必须解决好制度模式选择、价值体系建设等重大问题，并对进一步学习贯彻十八届三中全会精神提出明确要求。讲话视野广阔、思想深刻，政治性、理论性、指导性很强，是对全面深化改革的再一次有力动员。要认真学习、深刻领会，把讲话精神体现到中国特色社会主义伟大实践之中，贯彻到全面深化改革各项工作之中。

中共中央政治局委员、中央书记处书记，全国人大常委会有关领导同志，国务委员，全国政协有关领导同志出席开班式。

各省、自治区、直辖市，中央和国家机关有关部门的主要负责同志，解放军及武警部队有关负责同志参加开班式。有关方面负责同志列席开班式。

(新华网)



温度保护开关专家

东莞市凯恩电子科技有限公司系国内以温敏控制器产品研发、生产、销售于一体的专业生产厂商，产品广泛应用于豆浆机、热水器等家电领域；汽车、仪器仪表、工业加热等工业领域；红外理疗等医疗领域和轮船、航空器械等军工领域；我公司已有八年的温敏控制器研发和生产经验，行业排名第三。

凯恩成立于 2006 年 11 月 6 日，注册资本 1000 万元，年销售额 3 亿元，厂房总面积 4.7 万平方米，拥有东莞和湖南江华两个生产基地。2011 年 3 月，公司从原来只有 KI31、BW 两个系列产品增加到拥有 KI66、KI67、KI68、KI69、KI6AP、KI3MP、KI71、KI81 等 16 大系列产品，产能再次从 2010 年初日产 30 万单位跃升到日产 75-80 万单位。2012 年 5 月，公司全面启动自主研发、全自动化的 8 套温度控制器大型生产线，从而奠定国内研发技术、生产产能领先的地位。

2012 年，招银国际投资股份有限公司加盟凯恩，成为凯恩的股东，这为企业未来发展提供了强有力的金融资本保障。

目前为止已申请 70 项专利，其中发明专利 12 项，PCT 5 项。38 个产品获得了 UL、TUV、CE、CB、VDE 认证。

近两年陆续通过了国家级高新技术企业认定、TS-16949 汽车行业质量体系认证、东莞市民营科技企业、广东省高新技术产品认定等资质。自主研发的“基于物联网云技术的智能火灾控制系统”斩获“邮储银行杯”2013 广东省大赛金奖。

2012 年下半年公司进入快速发展期，为此专门聘请了中国工程院李院士为凯恩顾问，指导凯恩的产品研发方向。2013 年凯恩与中国科学院云计算中心自动化所东莞研究院成功组建“**智能温控产品与平行管控系统联合实验室**”，使得我公司在元器件技术和自动化技术步入了一个崭新的发展期。

今天的凯恩，以独有的姿态站在全球同行业的鼎巅，专注于做好国际各大品牌企业的战略合作伙伴！





青岛海信网络科技股份有限公司成立于1998年10月，是海信集团发展战略中信息板块的核心力量。公司秉承海信集团“高科技、高质量、高水平服务、创国际名牌”的发展战略，围绕城市交通管理、交通运输管理、轨道交通管理等产业方向，立足自主研发，专业从事智能交通领域核心技术研究，研发具有自主知识产权的智能交通系统系列产品。立足自主研发，专业从事智能交通领域核心技术研究，研发具有自主知识产权的智能交通系统系列产品。

公司是“国家规划布局内重点软件企业”，主持参与15项交通领域国家、行业标准的制定（13项国家标准，2项行业标准）。承担了973、863、科技支撑等共26项国家级科研项目，申请了447项专利和软件著作权，其中发明专利133项，是国内智能交通领域申报专利和软件著作权数量最多的企业。

海信网络科技以优化产业结构为基础、技术创新为动力、资本运营为杠杆，始终把技术作为发展的第一推动力，不断追求研发深度，持续提升自主创新能力，公司领先的技术和一流的品质，在智能交通核心产品市场占有率已位居全国前列，其中快速公交智能调度系统（BRT）名列全国第一，海信网络科技公司已凭借优异的市场业绩成为国内智能交通行业的领军品牌。



欢迎加入

中国自动化学会

Chinese Association of Automation

这里可以 **获取技术信息** **结识业内专家**
获得同行认可 **施展个人才华**

作为个人会员，你可以

- 优惠或免费获得学会提供的技术咨询和资料（以电子邮件方式为主）
- 优惠或免费参加学会或其所属专业委员会举办的学术活动
- 优惠或免费订阅学会通讯及与学会签约的学术期刊
- 优惠参加学会提供的继续工程教育培训
- 通过学会申请各类奖项和荣誉资格
- 其它可能由学会提供的服务

作为团体会员，你可以

- 派出代表参加全国会员代表大会
- 优惠参加学会组织的有关学术论坛、科技展览等活动
- 优惠或免费获得学会提供的有关资料、学术期刊和服务
- 优惠取得学会的技术咨询、新产品鉴定、工程项目验收等服务
- 优惠获得学会为单位员工进修而举办的新产品、新技术培训活动
- 其它可能由学会提供的服务

中国自动化学会办公室

地址：北京市海淀区中关村东路 95 号自动化大厦 509 室

邮编：100190

传真：010-62522248

电话：010-82544542

<http://www.caa.org.cn> E-mail: caa@ia.ac.cn