

多智能体系统及其协同控制研究进展

刘佳, 陈增强, 刘忠信

(南开大学 信息技术科学学院, 天津 300071)

摘要:对多智能体系统及其协同控制理论研究和应用方面的发展现状进行了简要概述. 首先给出 Agent 及多 Agent 系统的概念和特性等, 介绍了研究多 Agent 系统协同控制时通常用到的代数图论; 然后综述了近年来多 Agent 系统群集运动和协同控制一致性方面的研究状况, 并讨论了其在军事、交通运输、智能机器人等方面的成功应用; 最后, 对多 Agent 系统未来的发展方向进行了探讨和分析, 提出几个具有理论和实践意义的研究方向, 以促使多 Agent 系统及其协同控制理论和应用的深入研究.

关键词:多 Agent 系统(MAS); 协同控制; 代数图论; 群集运动; 一致性协议

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2010)01-0001-09

Advances in multi-Agent systems and cooperative control

LIU Jia, CHEN Zeng-qiang, LIU Zhong-xin

(College of Information Technology Science, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: Progress in multi-Agent systems with cooperative control was reviewed in terms of theoretical research and its applications. First, concepts and features used to define Agents and multi-Agents were analyzed. Then graph theory was introduced, since it is often used in research on cooperative control of multi-Agent systems. Then advances in swarming/flocking as well as the means used to derive a consensus among multi-Agents under cooperative control were summarized. The application of these abilities was discussed for the military, transportation systems, and robotics. Finally, future developments for multi-Agent systems were considered and significant research problems proposed to help focus research on key questions for multi-Agent systems with cooperative control.

Keywords: multi-Agent system (MAS); cooperative control; graph theory; swarming/flocking; consensus protocol

分布式人工智能是人工智能领域中一个重要的研究方向, 而多 Agent 系统 (multi-Agent system, MAS) 则是其一个主要的分支. 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 的相关研究已经成为控制领域的一个新兴的研究方向. 由于 Agent 体现了人类的社会智能, 具有很强的自治性和适应性, 因此, 越来越多的研究人员开始关注对其理论及应用方面的研究. 目前, 人们已经将 MAS 的相关技术应用到交通控制、电子商务、多机器人系统、军事等诸多领域. 而在 MAS 中, Agent 之间如何在复杂环境中相互协调, 共同完成任务则成为这些应用的重要前提. 近年来, 从

控制的角度对 MAS 进行分析与研究已经成为国内外众多学术机构的关注热点, 人们在 MAS 协同控制问题上做了大量的研究工作, 特别是在 MAS 群集运动控制和协同控制一致性问题方面取得了很大的进展. 目前对 MAS 的研究总体上来说还处于发展的初步阶段, 离真正的实用化还有一定的距离; 但其广泛的应用性预示着巨大的发展潜力, 这必将吸引更多专家、学者投入到这一领域的研究工作中, 对 MAS 的理论及应用做进一步探索. 根据上述目的, 本文主要概述了多智能体系统 (MAS) 在协同控制方面的研究现状及其新进展.

1 Agent 与 MAS 的相关概念

1.1 Agent 的概念

Agent 一词最早可见于 Minsky 于 1986 年出版

收稿日期: 2009-11-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60774088, 60904022); 天津市自然科学基金资助项目 (09JCYBJC01700).

通信作者: 刘佳. E-mail: liujia_0704@163.com.

的《Social of Mind》一书中. 国内文献中经常将 Agent 翻译为:智能体、主体、代理等,但最常见的仍是采用英文“Agent”;因为 Agent 的概念尚无统一标准,人们对于汉语中哪个词能更好地表达其含义还没有达到共识.

对于 Agent 的概念,目前还不存在一个普遍接受的精确定义,这主要是由于 Agent 的各种属性在不同领域中的重要性不同. 这里介绍 2 种被引用较多的定义形式:

1) Maes 在文献[1]中将 Agent 定义为:试图在复杂的动态环境中实现一组目标的计算机系统.

2) Wooldrige 和 Jennings 在文献[2]中,从 Agent 的特性方面给出其弱定义和强定义. 弱定义是指 Agent 用来最一般地说明一个软硬件系统,它具有以下几个特性:a) 自治性(autonomy):Agent 可以在没有人或其他 Agent 的干扰下直接运作,而且对自己的行为和内部状态有某种控制能力;b) 社会性(social ability):Agent 可以与其他 Agent(也可以是人)进行通信交流;c) 反应性(reactivity):Agent 可以感知环境,并可以对环境发生的变化做出相应的反应;d) 预动性(pro-activeness):Agent 不仅仅是简单地对周围环境做出反应,也可以通过接受某些启动信息,主动发起可以表现目标引导的行为. 强定义是指 Agent 除了具备以上弱定义中的所有特性外,还具备一些人的特性. 比如信念(belief)、知识(knowledge)等描述信息状态的行为;意图(intention)、承诺(commitment)等描述协商状态的行为;期望(desire)、目标(goal)等描述动机状态的行为.

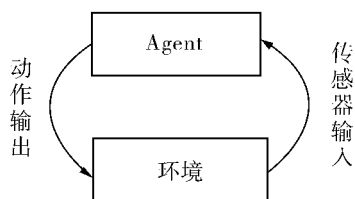


图1 环境中的 Agent

Fig.1 The Agent in environment

图1给出了一个环境中 Agent 的抽象示意图. 从图中可知,Agent 接受从环境中感知的输入,并产生输出动作作用于环境,这种交互通常是一个连续不断的过程. Agent 不能完全控制它周围的环境,只能通过动作输出影响环境.

1.2 MAS 的概念

MAS 是由多个 Agent 组成的集合,Agent 之间以及 Agent 与环境之间通过通讯、协商与协作来共同完成单个 Agent 所不能解决的问题. 多个 Agent 的使用比单个

Agent 有更多的优点. 多个 Agent 相互合作能够完成超出它们各自能力范围的任务,使得 MAS 的整体能力大于个体能力之和. 总体上说,MAS 具有更广泛的任务领域、更高的效率、改良的系统性能、错误容忍、鲁棒性、分布式的感知与作用、内在的并行性、对社会和生命科学的观察等显著特性^[3].

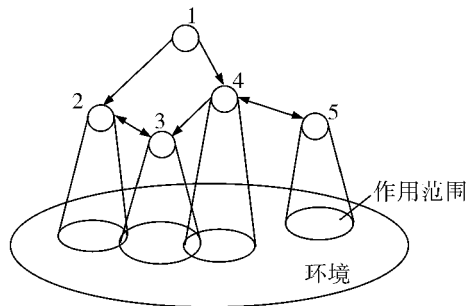


图2 环境中的 MAS

Fig.2 Multi-Agent system in environment

图2描述了 MAS 中 Agent 之间以及 Agent 与环境之间的关系. 从图中可以看出,MAS 中的交互关系是非常复杂的,各个 Agent 之间的交互可以是双向的,例如:Agent 2 和 Agent 3、Agent 4 和 Agent 5;这种关系也可以是单向的,例如 Agent 1 和 Agent 2、Agent 1 和 Agent 4、Agent 4 和 Agent 3. 系统中的 Agent 可以在环境中动作,不同的 Agent 有不同的“作用范围”,表示它们可以影响环境的不同部分,而 Agent 也同时受其作用范围内环境的影响. 在有些情况下,不同 Agent 的作用范围可能会重叠,例如图2中 Agent 2 和 Agent 3、Agent 3 和 Agent 4 的作用范围存在相互重叠的区域. 这种影响范围重叠的事实会产生 Agent 之间的依赖关系. 另外,Agent 也存在不与环境相互影响的情况,例如图2中的 Agent 1.

1.3 MAS 的组织结构

MAS 的组织结构是指系统中 Agent 之间的信息关系和控制关系,以及问题求解能力的分布模式. 组织结构是 MAS 中很多问题的研究基础,因此,如何将各个 Agent 有效地组织起来,以便使 Agent 之间及 Agent 与环境之间的各种协作顺利进行,对 MAS 的研究非常重要.

MAS 的组织结构可以是集中式的或分布式的,也可以是这 2 种形式都存在的混合式组织结构. 不同的组织结构行为方式不同,因此性能也会有所不同. 一般地,MAS 的组织结构主要分为以下 3 种类型^[4]:

1) 行政管理组织结构(集中式).

这是一种主从式层次结构,在这种结构中,所有

Agent 组成一个 Agent 团体. 根据 Agent 的工作范围和职能,可将其分为

a) 管理 Agent: 负责 MAS 的管理, 一般一个系统中只有一个管理 Agent;

b) 功能 Agent: 具有通用的任务执行能力, 能够协助管理 Agent 完成一些系统任务, 是一类不受应用领域影响的工具 Agent;

c) 应用 Agent: 具有特殊领域中的事务处理功能, 一般一个系统中有多个应用 Agent.

2) 完全自治式组织结构(分布式).

在这种结构中, Agent 之间没有管理与被管理的关系, 每个 Agent 都可以自主地实现自己的目标. 这种方式最能体现 MAS 的灵活性、社会性和每个 Agent 的自治性, 但这种方式运行的稳定性和可控性较差.

3) 问题求解组织结构(混合式).

这是 Agent 为了协同完成一项任务而形成的一种动态组织结构, 各 Agent 之间的关系是动态变化的. 从 Agent 之间的关系来看, 这种结构介于主从式与完全自治式结构之间.

2 MAS 协同控制研究进展

经过 20 多年的发展, MAS 的研究已经在理论和应用方面取得了很大的进展. MAS 一个显著特征是: 系统中每个 Agent 的能力有限, 而大量这样的个体聚集到一起, 通过相互作用会产生有意义的社会活动或完成单个 Agent 所不能完成的任务. 因此, MAS 研究领域一个重要的问题就是设计正确的控制策略, 使 MAS 完成给定任务, 即 MAS 的协同控制问题. 近年来, MAS 的协同控制已经成为国内外诸多研究人员关注的热点问题, 本节先简要介绍研究协同控制问题通常使用的代数图论, 然后从 MAS 群集运动和协同控制一致性问题 2 个方面, 论述近年来国内外在多 Agent 协同控制方面的研究发展状况.

2.1 代数图论

有向图 $G=(V, E, A)$ 由一个有限顶点(或结点)集合 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 、一个有向边的集合 $E \subseteq V \times V$ 和权重矩阵 A 所构成. $e_{ij}=(v_i, v_j) \in E$ 叫做边, 第 1 个元素 v_i 称为边的起点, 第 2 个元素 v_j 称为边的终点, 边的方向从 v_i 指向 v_j . 连接权重矩阵为 $A=[a_{ij}]$, 且对于 $\forall i \in I(I=1, 2, \dots, n)$ 有: $i \neq j, a_{ij} > 0$, 对于 $\forall i \in I: a_{ii}=0$. 类似地可以定义无向图, 无向图是由一个有限顶点(或结点)集合、一个无向边集合和权重矩

阵构成的. 无向边集合中, 结点没有起点和终点之分, 也就是说, (v_i, v_j) 就意味着 (v_j, v_i) , 因此, 无向图是有向图的一种特殊情况. 一个结点 v_i 的入度和出度分别用 $\deg_{in}(v_i)$ 和 $\deg_{out}(v_i)$ 来表示, 且

$$\deg_{in}(v_i) = \sum_{j=1}^n a_{ji}, \deg_{out}(v_i) = \sum_{j=1}^n a_{ij}.$$

图 G 中的结点 v_i 是平衡的(balanced)当且仅当该结点的入度和出度相等, 即 $\deg_{in}(v_i) = \deg_{out}(v_i)$. 图 G 是平衡图的充分必要条件是图中所有结点都是平衡的, 即有

$$\deg_{in}(v_i) = \deg_{out}(v_i), \forall i \in I.$$

一个有向图 G 是强连通的(strongly connected)当且仅当图 G 的任意的 2 个不同结点之间有一条有向路径. 一个有向图包含生成树, 当且仅当它有一个根结点, 从任意的其余结点出发, 都存在路径可以到达这个根结点.

权重图的 Laplacian 矩阵定义为 $L=[l_{ij}]$, 其中, $l_{ii} = \sum_j a_{ij}$, 对于 $\forall i \neq j, l_{ij} = -a_{ij}$.

2.2 MAS 群集运动及控制研究

MAS 群集(Swarming/Flocking)行为是复杂性科学的一个焦点问题. Swarming 是指一个由大量自治个体组成的集合, 在无集中式控制和全局模型的情况下, 一般通过个体的局部感知作用和相应的反应行为, 使整体呈现出涌现行为. 在一个 MAS 中, 所有的 Agent 最终能够达到速度矢量相等, 相互间的距离稳定, 则被称为 Flocking 问题. 自然界中存在很多群集行为, 例如: 鸟群迁徙时会整齐编队, 在遇到障碍时, 这种队形还可以自动调整; 野生动物群和鱼群在遇到攻击时会形成一个合理的编队逃跑, 而不是一哄而散; 蚁群在觅食时能够在食物与居住地之间选取一条最优路径, 并且, 当环境变化时, 它们会对路径进行重新选择. 这些是群集行为极具代表性的例子.

1987 年, Reynolds 提出一个模仿动物聚集的计算机模型^[5], 这个基本的群集模型包括 3 条规则: 1) 聚集(cohesion): 所有 Agent 改变当前位置并向其邻近成员的平均位置运动; 2) 分离(separation): 运动过程中, 相邻的 Agent 避免发生碰撞; 3) 调整(alignment): 所有 Agent 速度大小和方向改变基于其邻近成员的平均值.

1995 年, Vicsek 等人提出了多自主移动 Agent 模型^[6]:

$$\mathbf{x}_i(t+1) = \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{v}_i(t)\Delta t, i = 1, 2, \dots, n,$$

式中: $\mathbf{x}_i(t)$ 为第 i 个 Agent 在 t 时刻的位置向量, 在

每个时间段根据上式更新, $v_i(t)$ 为速度向量, 由一个定常的绝对速度 v 和一个方向角 $\theta_i(t)$ 决定, $\theta_i(t)$ 按下式更新:

$$\theta_i(t+1) = \langle \theta_i(t) \rangle_r + \Delta\theta, i = 1, 2, \dots, n.$$

式中 $\langle \theta_i(t) \rangle_r$ 是以 Agent i 为中心, 以 r 为半径的圆盘内所有 Agent (包 Agent i) 的平均方向, $\Delta\theta$ 是服从均匀分布的随机数, 表示干扰. 实质上, Vicsek 模型是 Reynolds 模型的一种特殊情况, 他只考虑了 Reynolds 提出的 3 条规则中的调整. Vicsek 等还通过一系列有趣的仿真结果说明, 尽管没有集中的协调, 并且每个 Agent 的最邻近的集合在系统演变的过程中随时间而改变, 模型所采取的“最邻近规则”却能够使所有 Agent 的运动方向最终趋于一致.

Tanner 等在文献 [7-8] 中从理论方面解释了 Reynolds 提出的计算机模型, 他们分别针对固定拓扑和切换拓扑 2 种情形, 对多 Agent 群集行为建立了数学模型, 并运用代数图论、非平滑分析及非平滑系统理论等数学工具、经典控制理论及人工势场法, 设计了局部分散控制策略, 使得 Agent 群体达到运动方向全局收敛到同一方向、速度大小收敛到同一值、相邻的 Agent 之间没有碰撞发生及人工势场函数被最小化的理想状态. 在文献 [9] 中, 他们又提出一种非平滑控制策略, 使得一组 Agent 做群集运动时避免相互碰撞, 且避开环境中的静态障碍. 在文献 [10] 中, Olfati-Saber 则设计了一个局部控制策略, 使得 Agent 群体取得群集运动的同时避免与环境中的多个凸型障碍发生碰撞, 并说明控制规则中隐含了 Reynolds 模型中的 3 条规则. Liu 等人 [11] 给出了在固定通信拓扑下 m 维多移动 Agent 的群集行为稳定性分析. Gazi 等 [12] 还在 Agent 群体模型中加入了环境模型, 指出决定每个个体运动的 3 个因素: 1) 与距离较远的个体相互吸引; 2) 与距离较近的个体相互排斥; 3) 被感兴趣的区域吸引或排斥不感兴趣的区域, 说明 Agent 群体聚集行为是 Agent 之间相互作用, Agent 与环境相互作用平衡的结果. 他们还针对不同环境, 对系统的稳定性进行了分析, 给出系统收敛到更有利区域的条件. Wang 等在文献 [13] 中讨论了 n 维空间内 MAS 群集行为, 根据动态 Agent 之间的局部作用和信息交换, 设计了一组控制策略使得 MAS 按所期望的形式做群集运动.

上述文献在无向网络中考虑了同类 MAS 的群体聚集运动. 针对一类由领航者 (leader) 和跟随者 (follower) 2 种个体组成的 MAS 聚集模型, 文献 [14] 在环境

的势能场函数梯度有界时, 给出群体聚集的收敛条件和一个表示群体大小的上界. Yu 和 Wang 等在文献 [15] 中基于动态时变有领航者的网络拓扑, 用图论模型表示 Agent 之间的相互作用及通信关系, 运用推广的 Lyapunov 理论及非平滑分析进行了稳定性分析, 并得到所有 Agent 速度方向收敛到同一方向并与 leader 保持一致; 所有 Agent 速度大小收敛并与 leader 相同; 相邻 Agent 之间没有碰撞发生; 所有 Agent 的人工势场函数被最小化等重要结论. 他们还在文献 [16] 中对具有二次积分动态的 Agent 群体, 在有向网络取得群集运动进行了研究, 提出了一个分散控制方法对 Agent 群体进行分散控制. 另外, X. F. Wang 和 L. Wang 等还利用一种虚拟 leader 对多 Agent 群集运动进行稳定性分析 [17-19].

2.3 MAS 一致性问题研究

目前, 对于多 Agent 群集行为的研究, 通常将位置聚合和速度匹配问题单独拿出来研究, 即不考虑多 Agent 之间是否发生碰撞, 这就是所说的一致性. 一致性 (consensus) 是指在一个 MAS 中, 所有的 Agent 最终状态能够趋于一致. 一致性协议 (算法) 则是 MAS 中, 使个体状态最终趋于一致的 Agent 之间的信息传递规则. 近年来, 国内外专家、学者们在 MAS 一致性问题的研究中取得很多成果, 提出多种不同情况下 MAS 协同控制一致性协议, 下面将对已有的一致性控制算法进行简单的总结.

设系统中有 n 个多 Agent, 用 x_i 表示第 i 个 Agent 的状态, 这个状态可以是位置、速度、振幅等等.

连续时间线性一致性协议通常可以写成如下形式 [20-25]:

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

式中: $J_i(t)$ 表示在 t 时刻传送信息给第 i 个 Agent 的邻居集, α_{ij} 是一个非负权值因子. 也就是说, 每一时刻每个 Agent 的状态都取决于在那一时刻它所有邻近 Agent 的状态. 特别地, 如果每个 Agent 的邻居集和权值因子从初始时刻开始一直保持不变, 那么这个 MAS 就具有固定拓扑结构. 此时, 连续时间线性一致性协议为

$$\dot{x} = -Lx. \quad (2)$$

式中: L 为权重图的 Laplacian 矩阵, $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$.

离散时间线性一致性协议为 [26-27]

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

式中: $\sum_{j \in J_i[k] \cup i} \beta_{ij}[k] = 1, \beta_{ij}[k] > 0$. 也就是说, 每个 Agent 的下一步状态是根据它及与其相邻的所有 Agent 的当前状态更新的. 可以将离散时间线性一致性协议式(3)写成矩阵形式:

$$\mathbf{x}[k+1] = \mathbf{D}[k]\mathbf{x}[k]. \quad (4)$$

式中: $\mathbf{D}[k]$ 为所有行和为 1 的随机矩阵.

在一个 MAS 中, 如果对于任意的 $i \neq j$, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 有 $\|\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t)\| \rightarrow 0$, 则系统的最终状态可以趋于一致. Olfati-Saber 等在文献[21, 23]中指出, 如果 MAS 的拓扑结构是强连通的有向图, 那么对于任意初始状态, 系统的状态渐近收敛, 并且在强连通的有向拓扑结构下, 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. Ren 等人在文献[25-26]中给出时不变信息交换拓扑结构下, 连续或离散时间协议达到渐近一致的充分必要条件, 即信息交换图中包含生成树. 这个条件比文献[21, 23]中提出的强连通条件弱, 适用范围更广.

在实际应用中, 由于网络节点或边的故障、重连、丢包等; 又或者在某些特定场合, 如蜂拥问题、编队控制问题、次同步问题等, 网络拓扑结构经常是变化的, 通常把这种动态拓扑结构称为网络切换拓扑结构. 文献[23]给出 MAS 在切换拓扑结构下的一致性协议:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = -\mathbf{L}_k \mathbf{x}(t), k = s(t). \quad (5)$$

式中: $\mathbf{L}_k = \mathbf{L}(G_k)$ 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. 文献[21, 23]给出切换拓扑结构中系统在任意切换信号下平均一致收敛的充分条件. 在文献[22]中, Olfati-Saber 等基于 Lyapunov 泛函方法, 分析了动态系统在无向拓扑网络机构下连续时间非线性一致性协议:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \sum_{j \in J_i(t)} \phi_{ij}(\mathbf{x}_j(t) - \mathbf{x}_i(t)). \quad (6)$$

式中: $\phi_{ij}(z) = \phi_{ji}(z)$, 且满足: 1) $\phi_{ij}(z)$ 是局部 Lipschitz 连续的; 2) $\phi_{ij}(z) = 0 \Leftrightarrow z = 0$; 3) $z\phi_{ij}(z) > 0, \forall z \neq 0$.

在 MAS 中, 当 Agent 之间的信息交换存在时间延迟时, 连续时间线性一致性协议式(1)将写成如下形式^[23, 28]:

$$\dot{\mathbf{x}}_i(t) = - \sum_{j \in J_i(t)} \alpha_{ij}(\mathbf{x}_i(t - \sigma_{ij}) - \mathbf{x}_j(t - \sigma_{ij})). \quad (7)$$

式中, $\sigma_{ij} > 0$ 表示系统中 Agent 之间信息交换时的时间延迟. 对于一种最简单的情形, 即 $\sigma_{ij} = \sigma$ 且信息交换拓扑结构是固定无向的连接图, 系统平均一致收敛

的充要条件是 $0 \leq \sigma \leq \pi/2\lambda_{\max}(L)$ ^[23]. 在文献[28]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. 需要指出的是, 目前对于有向网络拓扑结构下时变时滞一致性协议的研究还比较少; 另外, 在某些 Agent 之间传输信息出现错误的情况下, 怎样确保整个 MAS 也能达到协同控制的要求是一个对实际应用非常有意义的课题.

一阶积分一致性协议式(1)也可以推广到二阶积分动态系统, 此时, 一致性协议为^[29-30]

$$\ddot{\mathbf{x}}_i = - \sum_{j=1}^n a_{ij}(t) [(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) + \gamma(\dot{\mathbf{x}}_i - \dot{\mathbf{x}}_j)]. \quad (8)$$

式中, γ 为一个正的增益. 文献[31]还在已有的二次积分系统的一致性协议中引入旋转矩阵, 讨论了三维空间中一组多 Agent 的一致性运动结果. 说明了网络拓扑、阻尼增益、欧拉角的值均能影响到多智能体一致性运动结果. 针对动态有向作用下二次积分动力学系统, 文献[32]研究了 2 种采样离散时间编队控制的一致性协议. 在文献[33]中, Wang 等还进一步考虑了具有二次积分动态系统的有限时间一致性问题.

在许多实际应用场合, 对 MAS 的协同控制是在某些约束条件下进行的. 例如, 控制输入是有界的, 期望所有的 Agent 最终都收敛到一个特定值或是特定区域. Ren 等在文献[30]中分析了有界控制输入约束条件下二阶积分系统的渐近收敛问题. 文献[34]则是在切换拓扑结构下, 研究了具有有界时变通信时间延迟的离散 MAS 系统一致性问题. Bauso 还在固定拓扑结构下讨论了非线性一致性协议的收敛问题, 使得所有 Agent 最终收敛到一个特定值^[35].

另外, 许多文献还在 MAS 中包含 leader 和 follower 2 种类型 Agent 的情况下, 讨论了系统的一致性问题. 文献[36]分别在固定拓扑和切换拓扑 2 种结构下, 研究了带有多个 leader 的 MAS 的一致性问题, 指出其他 Agent 最终能收敛到以多个 leader 为顶点的多面体中. 文献[37]则研究了具有时变时滞及动态 leader 的 MAS 在固定拓扑和切换拓扑结构下的一致性问题. Ren 还在文献[38]中分析了具有有界控制输入的一致性跟踪协议, 并在 leader 动态变化和切换信息交换网络拓扑结构下, 给出一致性跟踪协议的收敛条件; 他们还利用多机器人实验平台, 将一致性跟踪协议结果应用于编队控制.

以上这些研究工作都是假设 Agent 信息交换渠道是非常理想化的, 即每个 Agent 能从与它邻近的 Agent 那里得到准确的信息. 而在实际应用中, Agent

发送、接收信息及信息传输过程中经常会受到干扰,例如:热干扰、信道衰减等.因此,在存在随机干扰的情形下讨论 MAS 的一致性就显得更有实际意义了. Li 和 Zhang 在文献[39]中讨论了具有可测噪声的固定有向拓扑结构下 MAS 的均方平均一致性问题. 为了降低可测噪声的影响,他们将时变一致性增益引入到一致性协议中,利用图论和随机理论,分析了这种协议的收敛性. Wang 和 Zhang^[40]则在一般有向通信拓扑和高斯通信噪声的影响下,给出 MAS 的一致性条件,利用马氏链的结果得到一个网络节点的互通类,通过对噪声影响的细化,给出了不同噪声情形下系统的一致性条件. 这里研究的有向图不仅包含平衡图,也包含非平衡图,推广了文献[39]中的结果. 在文献[41]中,作者则讨论了在具有可测通信噪声影响下有 leader 的 MAS 的一致性问题,给出了一个使得系统在固定拓扑结构下强均方一致的充分条件,并指出在无噪声情况下,此条件是充分必要的.

3 多 Agent 协同控制的应用

MAS 的理论研究在近些年受到很大关注的一个重要原因是, MAS 及其协同控制问题在许多领域具有十分广泛的应用. 例如,利用无人驾驶飞行器或自治水下机器人应用于复杂作业、未来的自治性战争体系、智能交通控制系统等等. 本节将从军事、交通运输、智能机器人 3 个方面介绍 MAS 协同控制的典型应用.

3.1 军事方面

现代军事系统正日趋先进,而 MAS 的理论也应用到了军事仿真系统的研究中. Li 等^[42]对一种对话模式的坦克智能体之间的通讯机制进行了构建,为在坦克分队仿真开发中通讯机制有效性、可靠性、透明性的提高提供了有力的参考. Parker^[43]已经在早期的工作中对飞机编队飞行问题进行了研究,他利用局部信息和全局信息相结合的方式设计控制率以保持编队. 多 Agent 协同控制在军事中的应用还包括允许战斗机按照自己的路线飞行,以避免雷达,达到局部优化^[44]. 文献[45]还利用 MAS 技术构建火力分配模型,实现火力模型通用化、智能化,使火力分配更精确、高效.

3.2 交通运输控制方面

城市交通系统是由人和交通工具等组成的动态复杂系统,具有影响因素多、开放性强、随机及不确

定因素多等特点. MAS 理论的出现和发展为交通系统的研究提供了一种新的思路和方法,引起了诸多研究学者的关注. 目前, MAS 在交通控制领域的应用已经成为一个日趋成熟的研究方向. 文献[46]采用多 Agent 协调控制方法来协调相邻交叉口处的控制信号,以消除网络中的交通拥塞. Cheng 等则在文献[47]中提出了一种基于多智能体的分布式交通信号协调控制方法.

另外,空中交通管理系统也是 MAS 协同控制方法在交通运输控制方面应用的另一重要领域. 随着世界经济的快速发展,空中交通拥挤将成为一个世界范围内的难题. 澳大利亚人工智能研究所基于多 Agent 的思路设计实现了一个空中交通管理系统,系统中每个 Agent 负责一个空中交通系统中的子问题,并与其他 Agent 进行协调与协作,以便实现整个系统的目标任务.

3.3 智能机器人方面

近年来,多移动机器人系统的协同控制问题已经成为一个新兴的研究热点,而此问题的理论研究已经在很多领域中得到应用. 日本的机器人足球世界杯锦标赛 RoboCup 就是一个非常典型的例子. 在机器人足球赛中,多个机器人之间的关系相当复杂,它们必须通过互助合作才能共同完成任务,这是 MAS 协同控制应用的一个典型实例. 在工业方面, MAS 协同控制的应用表现在,人们控制多个智能机器人以特定队形搬运单个物体,利用多个智能机器人替代人类进行危险作业. 在军事方面还可以利用多机器人群体进行侦查、巡逻等.

4 MAS 协同控制的研究展望

随着计算机科学以及网络技术的发展,多 Agent 的应用领域将会更加广阔. 目前, MAS 协同控制方面的研究已经取得很大进展,但仍存在许多问题,有待进一步研究.

1) 在 MAS 协同控制的研究中, Agent 之间在进行信息交换时一般会存在时间延迟现象. 已有的很多文献讨论了 MAS 协同控制的时滞一致性算法,但大多是在无向网络(有向网络的特殊情况)拓扑结构下考虑的. 因此,讨论信息交换时存在时滞(尤其是时变时滞)的有向拓扑结构下多 Agent 协同控制一致性问题将是非常有意义的. 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发送和接收信息,及信息传输过程中往往会存在着许多干扰,而目前关于在有随机噪声的通信环境下研究多Agent协同控制一致性问题的文章还比较少,因此,研究MAS在通信环境存在随机干扰情况下的协同控制一致性算法及其稳定性是待研究的方向.另外还可在此基础上进一步考虑Agent之间避免发生碰撞的条件,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)预测控制作为近年来新型计算机控制算法,汲取了优化控制的思想,但利用滚动的有限时段优化取代一成不变的全局优化,这种建立在实际反馈信息基础上的反复优化,具有更强的鲁棒性.Zhang等已经在文献[48]中研究了预测机制下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.

4)为了能将MAS的相关理论更好地应用于实践,MAS或者多机器人系统的仿真平台研究也是相当重要的.目前,国内外已经建立了一些这样的仿真平台,但很多工作还有待进一步完善.

5 结束语

MAS及其协同控制已经成为当前学术界一个新的研究热点,吸引了许多不同领域研究人员的极大关注.本文讨论了与MAS有关的一系列问题,简要介绍了MAS协同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及其协同控制相关问题的研究会存在很多问题和困难,但其应用前景是十分广阔的,相信在各领域专家、学者的共同努力下,多智能体系统控制方面的研究定能取得新的进展与突破.

参考文献:

- [1] MAES P. Modeling adaptive autonomous Agent[J]. Artificial Life, 1994, 1(1/2): 135-162.
- [2] WOOLDRIDGE M, JENNINGS N R. Intelligent Agents: theory and practice [J]. Knowledge Engineering Review, 1995, 10(2): 112-152.
- [3] 俞辉. 多智能体机器人协调控制研究及稳定性分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
YU Hui. Research on cooperative control and analysis of stability for multi-Agent robots[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [4] 李英. 多Agent系统及其在预测控制与智能交通系统中的应用[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2004: 15-25.
- [5] REYNOLDS G. Flocks, birds and schools: a distributed behavioral model[J]. Computer Graphics, 1987, 21(1): 25-34.
- [6] VICSEK T, CZIROK A, BENJACOB E, et al. Novel type of phase-transition in a system of self-driven particles[J]. Physical Review Letters, 1995, 75(6): 1226-1229.
- [7] TANNER H G, JADBABAIE A, PAPPAS G J. Stable flocking of mobile Agents, Part I: fixed topology[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. Maui, HI, USA, 2003: 2010-2015.
- [8] TANNER H G, JADBABAIE A, PAPPAS G J. Stable flocking of mobile Agents, Part II: dynamic topology[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. Maui, HI, USA, 2003: 2016-2021.
- [9] TANNER H G. Flocking with obstacle avoidance in switching networks of interconnected vehicles[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. New Orleans, USA, 2004: 3006-3011.
- [10] OLFATI-SABER R. Flocking for multi-Agent dynamic systems: algorithms and theory[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(3): 76-95.
- [11] LIU Yang, PASSINO K N, POLYCARPOU M. Stability analysis of M-dimensional asynchronous swarm with a fixed communication topology[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(4): 76-95.
- [12] GAZI V, PASSINO K M. Stability analysis of social foraging swarms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, 2004, 34(1): 539-557.
- [13] WANG L, SHI H, CHU T G, et al. Flocking control of groups of mobile autonomous Agents via local feedback[C]// Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control. Limassol, Cyprus, 2005: 441-446.
- [14] 李宗刚, 贾英民. 一类具有群体 LEADER 的多智能体系统的聚集行为[J]. 智能系统学报, 2006, 1(2): 26-30.
LI Zonggang, JIA Yingmin. Aggregation of multi-Agent systems with group leaders[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2006, 1(2): 26-30.
- [15] 俞辉, 王永骥, 程磊. 基于动态拓扑有领航者的智能群体群集运动控制[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(11): 1721-1724.
YU Hui, WANG Yongji, CHENG Lei. Control of flocking motion of the flock with a leader based on dynamic topology[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28

- (11): 1721-1724.
- [16] 俞 辉, 王永骥, 程 磊. 基于有向网络的智能群体群集运动控制[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(1): 79-83.
- YU Hui, WANG Yongji, CHENG Lei. Flocking motion control of flock in directed networks[J]. Control Theory & Applications, 2007, 24(1): 79-83.
- [17] SU Housheng, WANG Xiaofan, LIN Zongli. Flocking of multi-Agent with a virtual leader, Part I: with a minority of informed Agents[C]//Proceedings of the 46th IEEE Conference Decision and Control. New Orleans, USA, 2007: 2937-2942.
- [18] SU Housheng, WANG Xiaofan, LIN Zongli. Flocking of multi-Agent with a virtual leader, Part II: with a virtual leader of varying velocity[C]//Proceedings of the 46th IEEE Conference Decision and Control. New Orleans, USA, 2007: 1429-1434.
- [19] SHI H, WANG L, CHU T G. Virtual leader approach to coordinated control of multiple mobile Agents with asymmetric interactions[J]. Physica D, 2006, 213: 51-65.
- [20] JAGBABAIE A, LIN J, MORRSE A S. Coordination of groups of mobile autonomous Agents using nearest neighbor rules[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48: 988-1001.
- [21] OLFATI-SABER, MURRAY R M. Agreement problems in networks with directed graphs and switching topology[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. Maui, HI, USA, 2003: 4126-4132.
- [22] OLFATI-SABER R, MURRAY R M. Consensus protocols for networks of dynamic Agents[C]//Proceedings of the American Control Conference. Denver, USA, 2003: 951-956.
- [23] OLFATI-SABERR, MURRAY R M. Consensus problems in networks of Agents with switching topology and time-delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49: 1520-1533.
- [24] MOREAU L. Stability of continuous-time distributed consensus algorithms[C]//Proceedings of the 43rd IEEE Conference Decision and Control. Atlantis, Paradise Island, Bahamas, 2004: 3998-4003.
- [25] REN W, BEARD R W, MCLAIN T W. Coordination variables and consensus building in multiple vehicle systems[J]. Lecture Notes in Control and Information Sciences, 2004, 309: 171-188.
- [26] REN W, BEARD R W. Consensus seeking in multi-Agent systems under dynamically changing interaction topologies[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(5): 655-661.
- [27] MOREAU L. Stability of multi-Agent systems with time-dependent communication links[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50: 169-182.
- [28] BLIMAN P A, FERRARI-TRECATE G. Average consensus problems in networks of Agents with delayed communications[J]. Automatica, 2008, 44(8): 1985-1995.
- [29] REN W, ATKINS E. Second-order consensus protocols in multiple vehicle systems with local interactions[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. San Francisco, USA, 2005: 3689-3701.
- [30] REN W. On consensus algorithms for double-integrator dynamics[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(6): 2295-2300.
- [31] REN W. Collective motion from consensus with Cartesian coordinate coupling[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(6): 1330-1335.
- [32] CAO Y C, REN W. Sampled-data formation control under dynamic directed interaction[C]//2009 American Control Conference. St Louis, USA, 2009: 5186-5191.
- [33] WANG Xiaoli, HONG Yiguang. Finite-time consensus for multi-Agent networks with second-order Agent dynamics[C]//Proceedings of the 17th International Federation of Automatic Control World Congress. Seoul, Korea, 2008: 15185-15190.
- [34] XIAO F, WANG L. State consensus for multi-Agent systems with switching topologies and time-varying delays[J]. International Journal of Control, 2006, 79(10): 1277-1284.
- [35] BAUSO D, GIARRE L, PESENTI R. Non-linear protocols for optimal distributed consensus in networks of dynamic Agents[J]. Systems and Control Letters, 2006, 55(11): 918-928.
- [36] HU Jiangping, HONG Yiguang. Coordination for a group of autonomous mobile Agents with multiple leaders[C]//Proceedings of the 25th Chinese Control Conference. Harbin, China, 2006: 318-322.
- [37] HU Jianping, HONG Yiguang. Leader-following coordination of multi-Agent systems with coupling time delays[J]. Physica A, 2007, 374: 853-863.
- [38] REN W. Consensus tracking under directed interaction topologies: algorithms and experiments[C]//2008 American Control Conference. Seattle, USA: 742-747.
- [39] LI Tao, ZHANG Jifeng. Mean square average-consensus under measurement noises and fixed topologies: necessary and sufficient conditions[J]. Automatica, 2009, 45: 1929-1936.
- [40] 王炳昌, 张纪峰. 非平衡拓扑和随机干扰情形下多自主体系统的趋同条件[J]. 系统科学与数学, 2009, 10:

1353-1365.

WANG Bingchang,ZHANG Jifeng. Consensus conditions of multi-Agent systems with unbalanced topology and stochastic disturbances [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences,2009,10(1): 1353-1365.

- [41] MA Cuiqin,LI Tao,ZHANG Jifeng. Leader-following consensus control for multi-Agent systems under measurement noises [C]//Proceedings of the 17th International Federation of Automatic Control World Congress. Seoul, Korea,2008: 1528-1533.

- [42] 李永强,徐克虎,孙成松.基于Agent的坦克分队CGF中的通讯机制研究[J].计算机仿真,2005,22(5): 31-34.

LI Yongqiang,XU Kehu,SUN Chengsong. Communication mechanism of tank unit CGF based on Agent [J]. Computer Simulation,2005,22(5): 31-34.

- [43] PARKER L E. Designing control laws for cooperative Agent teams [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Atlanta,USA,1993: 582-587.

- [44] CHANDLER P R,PACHTER M,RESMUSSEN S. Uav cooperative control [C]//Proceedings of the American Control Conference. Arlington,USA,2001: 50-55.

- [45] 罗 旭.基于Agent的防空兵群火力分配模型[J].舰船电子工程,2009,29(4): 47-48,68.

LUO Xu. A model of firepower distribution for airdefense group based on Agent[J]. Ship Electronic Engineering, 2009,29(4): 47-48,68.

- [46] 欧海涛,张卫东,张文渊,等.基于多智能体技术的城市智能交通控制系统[J].电子学报,2000,28(12): 52-55.

OU Haitao,ZHANG Weidong,ZHANG Wenyan,et al. Urban intelligent traffic control system based on multi-Agent technology[J]. Acta Electronica Sinica,2000,28(12): 52-55.

- [47] 承向军,杜 鹏,杨肇夏.基于多智能体的分布式交通信号协调控制方法[J].系统工程理论与实践,2005,8: 130-135.

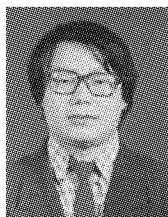
CHENG Xiangjun,DU Peng,YANG Zhaoxia. A distributed and coordinated traffic signal control approach based on multi-Agent system [J]. Systems Engineering Theory & Practice,2005,8: 130-135.

- [48] ZHANG H T, CHEN M Z, STAN G B,et al. Collective behavior coordination with predictive mechanisms [J]. IEEE Circuits and Systems Magazine,2008,8(3): 67-85.

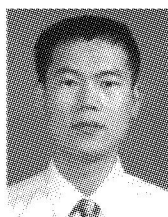
作者简介:



刘 佳,女,1982年生,博士研究生,主要研究方向为多智能体系统控制、复杂系统建模与控制.发表学术论文6篇,被SCI、EI收录4篇.



陈增强,男,1964年生,教授、博士生导师,中国系统仿真学会理事,中国自动化学会控制理论专业委员会委员,中国自动化学会过程控制专业委员会,中国优选法统筹法与经济数学研究会复杂系统专业委员会理事.主要研究方向为智能预测控制、混沌系统与复杂网络、多智能体系统控制等.获省部级科技进步奖4次.发表学术论文100余篇,被SCI检索70余篇.



刘忠信,男,1975年生,副教授,中国系统仿真协会会员.主要研究方向为复杂网络、计算机控制、控制理论与控制工程.获省部级科技进步奖1次.发表学术论文50余篇,被SCI、EI检索20余篇.