

# 多智能体系统动态协调与分布式控制设计

洪奕光, 翟超

(中国科学院 数学与系统科学研究院 系统控制重点实验室, 北京100190)

**摘要:** 多智能体系统的主要研究目的在于探索由个体之间的相互作用所产生的群体协调现象的内在机制和原理, 而控制或反馈在多智能体协调运动中起着至关重要的作用. 本文集中讨论了多智能体协调研究中的几个新兴的基本问题, 包括输出调节、集合协调和覆盖. 文中着重介绍了分布式估计和内模原理两种多智能体系统分布式输出调节方法及相关的研究进展; 关于多智能体系统的目标集合协调, 本文从集合聚集和集合优化两方面做了详尽论述; 多智能体覆盖有多种分类方式, 从覆盖对象的特征出发可将其划分为区域覆盖、边界覆盖和动态目标覆盖3种类型, 并对它们的研究背景和最新成果予以介绍. 另外文章还对多智能体系统协调控制的理论和应用研究进行了展望.

**关键词:** 多智能体系统; 集合协调; 分布式输出调节; 覆盖

**中图分类号:** TP13, TP18, N941      **文献标识码:** A

## Dynamic coordination and distributed control design of multi-agent systems

HONG Yi-guang, ZHAI Chao

(Key Lab of Systems and Control, Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The main research objective of multi-agent systems is to investigate the inherent mechanism and principles of collective coordination phenomena based on the interaction between individuals, where control or feedback plays a key role in the coordination behavior of multi-agent systems. This paper discusses novel basic problems in multi-agent coordination, including output regulation, set coordination, and coverage. Two distributed output regulation methods and related results based on either distributed estimation or distributed internal model are emphasized for multi-agent systems; set aggregation and set optimization are then discussed intensively for the target set coordination of multi-agent systems; from the viewpoint of the covered objects, the research background and recent results about three kinds of coverages such as region coverage, boundary coverage, and target coverage are introduced, though there are various classifications for multi-agent coverages. Finally, the paper also shows prospects for theoretical or application research of coordination control of multi-agent systems.

**Key words:** multi-agent systems; set coordination; distributed output regulation; coverage.

### 1 引言(Introduction)

复杂系统作为新兴的交叉学科, 被许多科学家称为“21世纪的科学”<sup>[1]</sup>. 牛顿时代以来, 科学研究对象的中心一直是单一系统, 随着现代科学的发展, 在生物、物理、社会和工程等众多学科的研究中发现, 系统整体有时会展现出与个体部分截然不同的行为特性. 种种崭新的系统整体行为引起了许多学者的兴趣, 使得复杂系统科学成为许多学科领域研究的前沿<sup>[2,3]</sup>. 近年来, 伴随现代科学的深入探索 and 技术的飞速发展, 多智能体系统的理论研究不断深入, 应用范围不断扩大, 已逐渐渗透到科学研究和社会生活的各个方面. 所研究的系统通常由各个组成单元(紧密或松散的)构成而不再是只具有单一功能的对象. 各个单元相对独立且按某些规则相互作用

而使整个系统显示出一定的功能. 当前, 多智能体系统(multi-agent systems)已经成为研究此类复杂系统的重要模型之一<sup>[4~6]</sup>.

多智能体系统是由一群具备一定的感知、通信、计算和执行能力的智能体(agent)通过通讯等方式关联成的一个网络系统. 对此大规模网络系统, 分布式的控制方法比传统集中式的控制方法更为灵活、操作起来更为方便, 这也使得利用分布式控制策略来合作完成目标的研究得到了迅速发展. 来自社会经济、人工智能、生物生态、计算机通讯、系统控制等诸多领域的学者对此研究思路表现出浓厚的兴趣并取得了一系列重要成果<sup>[7~10]</sup>. 多智能体系统协调控制区别于传统控制, 其主要新特点可以概括如下: 多智能体系统在结构上具有“个体+通信规

则+连通拓扑”的特点; 个体的动力学是由简单的个体行为规则和局部信息产生的; 从控制目的来看, 多智能体系统协调控制的基本任务是实现所期望的整体行为模式.

近年来, 在多智能体系统协调控制研究领域已经取得了很多有意义的成果. 本文将集中讨论3个新兴重要问题: 1) 分布式输出调节; 2) 多智能体系统集成协调; 3) 多智能体系统覆盖.

## 2 分布式输出调节(Distributed output regulation)

多智能体系统的许多协调控制问题之间并没有一个清晰的界限, 不同的观察角度会有不同的研究框架. 在多智能体模型中通常可以分为无领导者模型和领导者-跟随者模型. 所谓无领导者模型, 指的是系统中的智能体具有完全相同的地位和能力. 所谓领导者-跟随者模型, 指多智能体系统中存在一类特殊的“领导者”(leader)个体, 其他个体称为“跟随者”(follower). “领导者”常常是系统的跟踪目标, 或者是系统的参考基准; 他们可以是真实存在的, 也可以是虚拟的<sup>[5,10,11]</sup>.

在现代控制理论中, 控制系统的输出调节问题是一个重要的问题, 有着深刻的理论研究背景和实际应用价值(包括渐近跟踪和扰动衰减)<sup>[12,13]</sup>. 类似传统的镇定性问题可以推广到多智能体系统的一致性问题, 传统的输出调节问题可以推广到多智能体系统的分布式输出调节问题. 镇定性问题可以看成是输出调节问题的一个特殊情形, 进而多智能体系统的一致性问题从某种意义上也可以看成是分布式输出调节问题的一个特殊情形.

分布式输出调节问题就是设计分布式的反馈控制器使之达到渐近跟踪和扰动衰减的目的, 其中参考输入和扰动都由外部系统给出. 在该问题中, 本文把外部系统看成是多智能体系统中的领导者. 之所以研究多智能体系统的分布式输出调节问题是鉴于如下的研究背景:

1) 传感器网络中动态目标的位置估计问题: 在这一问题里, 将该动态目标看成领导者. 只有目标落在传感器的有限的感应区域内, 传感器才能“看到”该目标, 因此传感器必须通过邻居之间的信息交流才能重构该目标的状态. 另外, 因为该动态目标在不同时刻位于不同的感应区域内, 所以传感器与目标之间的通信关系是随时间变化的.

2) 领导者-跟随者框架下的同步、编队控制、追捕问题: 在这一问题里, 跟随者不能完全量测到领导者的信息, 因此为了达到跟踪目的, 每个跟随者都要与其邻居个体之间交换量测输出信息. 实际上, 可以从分布式输出调节的角度去解决这类跟随者-领导

者框架下的协调问题.

3) 外部系统影响下的网络多智能体的一致性问题: 在这一问题里, 每个智能体都受外部信号的影响, 这里所说的外部信号可以是干扰(如环境的影响)或者是参考输入(如规划的轨迹). 在外部系统不完全可量测的前提下, 使网络中的个体达到同步.

下面是线性多智能体系统的一个基本模型<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{w} = \Gamma w, w \in \mathbb{R}^l, y_0 = Fw \in \mathbb{R}^q, \\ \dot{x}_i = Ax_i + Bu_i + D_i w, u_i \in \mathbb{R}^m, x_i \in \mathbb{R}^n, \\ e_i = Cx_i - y_0 \in \mathbb{R}^q, \\ i = 1, \dots, N, \end{cases}$$

其中:  $w$  是外部动力系统的状态,  $y_0$  是外部系统量测输出. 外部系统可以是要跟踪的动态目标, 或者是生成扰动的环境模型等.  $x_i, u_i$  分别是个体  $i$  的状态和控制输入.  $e_i$  是个体  $i$  的调节输出, 用来描述控制目标. 如果在给定的分布式反馈控制器的作用下, 当  $w \equiv 0$  时闭环系统是稳定的, 而且对于任意的初值

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} e_i(t) = 0, i = 1, \dots, N,$$

那么称分布式输出调节问题可解或分布式输出调节控制器存在.

由于在本文所考虑的问题里只有部分智能体能够得到外部系统的信息, 本文不得不采用分布式的反馈控制器. 实际上, 分布式输出调节提供了一个一般的理论框架, 它包括了多智能体系统协调控制研究中的一些基本问题, 即在一定条件下, 分布式输出调节问题可分别转变成分布式镇定问题、静态的领导者-跟随者一致性问题、无领导者的多智能体系统的一致性问题以及动态的领导者-跟随者问题. 为了实现分布式输出调节, 现有的方法主要有两种.

### 2.1 分布式估计(Distributed estimation)

这种方法将外部动力系统当作“动态领导者”, 然后根据系统结构构造分布式估计器或观测器来估计不可量测的领导者的状态信息以协助多智能体系统实现目标. 该方法与内模原理方法比起来有一个优点是分布式控制器相对简单. 由于不同的系统需要考虑不同的设计方案, 故在设计理念上没有统一的框架, 大多只适用于简单的系统.

文[15]研究了具有动态领导者和拓扑变化的一阶智能体系统, 首次给出了分布式控制器和“观测器”以实现领导者的一致性跟踪. 随后, 文[16]给出了针对二阶智能体系统的分布式控制器和“观测器”用于跟踪动态领导者. 另外, 文[17]给出了动态领导者随机一致性跟踪算法, 得出了在期望意义下分布式输出调节问题的收敛性. 而文[18]基于Riccati方程设计出了一个具有一般动态领导者的一阶多智能体系统的跟踪调节控制器.

## 2.2 分布式内模原理(Distributed internal model)

基于内模的输出调节设计<sup>[12]</sup>给出了一个更为系统化且更具有鲁棒性的方法. 至今, 有关多智能体系统的分布式内模输出调节问题的论文很少, 文[19]考虑了同步式的输出调节问题, 其中外部信号能够用于所有个体的控制器的设计, 即所有个体都能感知到外部动力系统(领导者). 这在多智能体系统的研究中有一定的局限性. 而在一般多智能体系统协调控制的研究中只有部分智能体能够得到领导者的信息. 因此需要考虑更一般的情形, 即只有部分个体能够得到外部系统的信息.

文[14]系统地给出分布式输出调节的问题描述, 并设计了基于内模的分布式反馈控制器解决了固定拓扑下的输出调节问题. 随后文[20]考虑了一类固定特殊拓扑下一般异类线性多智能体系统的分布式鲁棒输出调节问题. 在所讨论的关联图中没有环路的假设下, 得出以下结论, 即基于虚拟的调节输出和内模的分布式控制, 本文对任意给定的初始值和充分小的扰动实现了分布式的鲁棒输出调节. 之后, 文[21]对另一类多智能体系统根据不同的条件分析了包括基于内模在内的分布式输出调节控制器的简单设计问题. 此外, 同样基于内模的思路, 文[22]还对无领导者情形下一类非线性多智能体系统进行了分布式同步协同控制设计.

## 3 多智能体系统集合协调(Set coordination of multi-agent systems)

在多智能体协调控制中, 整体的目标很可能与一个或几个集合有关. 比如多智能体系统的目标集合聚集问题就有着深刻的研究背景. 一个多智能体系统, 例如一个生物群体, 或者是一个机器人团队, 常常存在一个期望聚集的目标集合, 这个集合可以是一个食物富集区域, 集体筑巢或栖息的地点, 也可以是一个任务覆盖地区. 如何控制一个多智能体系统达到一个目标区域成了一个有重要意义的问题. 而且, 在集合优化过程中, 每个个体只对自己的指标优化, 但目标是全系统的优化. 同样个体之间这种信息交换通道也常常是时变的. 对于这类情况, 要解决完全系统拓扑(集合与跟随者组成的拓扑)时变情况下个体的分布式集合优化问题仍面临很多重要的挑战. 另外, 集合聚集协调控制也能在理论上为多智能体系统其他方面的研究提供新的方法和思路. 因此, 研究多智能体系统中目标集合的作用, 具备广阔的现实背景与理论意义.

在集合聚集协调控制研究中有一个典型的情况, 即多领导者包含(containment)控制问题. 实际上, 许多具有领导者的同步, 聚集和编队问题均可由多智

能体系统的目标集合聚集问题来描述. 在大多数领导者-跟随者研究模型中, 往往只有一个领导者存在, 系统中其他跟随者的控制目标是实现与领导者个体的同步. 然而, 在更多的实际系统中, 领导者不再是一个简单的个体, 而可能是一个目标区域; 系统中也可能存在多个需要跟踪的动态目标, 或者“多领导者”问题. 这时跟随者个体往往无法得到每一个领导者的动态信息, 而只能对单个领导者进行跟随控制; 跟随者亦不能随时得到某个领导者的全部信息, 或者跟随者与领导者之间的通讯是时断时续的; 跟随者也只能与其邻域范围内的跟随者交换信息. 因此在多领导者协调中, 诸如可控性、可观性等结构分析和有效的分布式控制设计等问题还亟待解决.

这里讨论两个方面的问题:

### 3.1 集合聚集(Set aggregation)

当前, 多智能体系统目标集合聚集问题面临很多重要的挑战: 如何设计分布式控制律以使系统达到目标集合聚集? 如果个体之间的邻接关系是有向的, 并随时间切换, 要达到目标聚集对系统拓扑有什么样的要求? 当系统中包含动态集合或多个领导者, 多智能体系统会有什么样的整体行为? 这些问题都需要跨越单个领导者模型的局限, 探寻集合与多智能体系统的关系. 集合可以作为一个推广的广义领导者个体, 亦可具有自己独立的动力学, 从而覆盖许多领导者-跟随者模型中的领导者模型.

在一些凸性假设下, 文[23]研究了具有静态目标集合的非线性多智能体系统, 得到了在一些简单非线性分布式控制律下使系统达到目标集合聚集的(有向的并随时间切换的)连通拓扑的条件. 对一般动态集合进行聚集研究的结果还非常少, 但对多领导者构成的凸集所产生的聚集问题(即包容控制问题)已经有了不少好结果. 另一方面, 许多实际问题还可以用集合或多领导者协调来进行建模. 比如文[24]建立了一个间歇性的多领导者模型来研究群体行为.

文[2]设计了一个多智能体协调运动模型, 其中包括“领导者”和普通个体两类智能体. “领导者”掌握有目标信息, 而“跟随者”在运动过程中采取“从众”的策略. 模型中的“跟随者”没有辨别谁是“领导者”的能力, 且领导者在运动中也在一定程度上受到邻居的影响. 然而, 在一定的条件下整个群体仍然能够达到运动的同步. 此外, 群体的规模越大, 实现上述目标需要的领导者数目比例就越低.

文[25]中给出了固定无向图拓扑下多智能体系统的包含控制, 使跟随者位置最终到达由多个固定

或者运动领导者形成的多面体中. 文[26]在固定和时变有向拓扑条件下得到了具有多个静态或动态领导者的多智能体系统的控制律, 特别的, 其控制中考虑了保持连通和避免碰撞的因素. 文[27]中考虑了多智能体系统的分布式协调, 并讨论了有限时间收敛的包含控制问题. 实际上大部分的现有结果是对确定性系统得到的, 而文[28]系统地讨论了随机拓扑切换下包含控制在概率意义下的收敛性问题. 另外, 由于不能得到领导者全部动力学信息, 而跟随者控制中又不可避免的存在一些由通讯或者外界干扰造成的不确定性, 因此, 完全无误差的动态目标跟踪往往无法实现. 文[29]研究了由动态领导者组成的目标集合的非线性多智能体系统, 研究了在一些简单非线性分布式控制律作用下使系统达到目标集合聚集的(有向的并随时间切换的)连通拓扑的条件. 利用集合输入状态稳定性(set input-to-state stability)和集合积分输入状态稳定性还进一步定量描述了系统不确定性对多智能体系统动态集合聚集的影响以及无误差的动态集合聚集能够实现的一些充分条件.

### 3.2 分布式优化(Distributed optimization)

已有的优化算法大多是集中式的<sup>[30]</sup>, 现在随着多智能体系统协调技术的发展, 许多分布式多智能体优化算法被提出, 相关算法收敛性等的分析也在进行. 分布式优化往往可以与集合优化相关, 因为在一些情况下对凸函数优化指标可以在空间中转化为对凸集的收敛问题. 多智能体分布式优化因而也可以转化为智能体对其相应集合的收敛性. 故此本文将分布式优化放在集合协调问题中来介绍.

分布式优化算法可以大体分为梯度法、对偶分解法、和智能算法. 近年来, 基于梯度法的分布式优化研究越来越得到相关研究人员的重视并取得了不少进展<sup>[31~33]</sup>. 文[33]给出了一类特殊优化问题的分布式算法, 而文[34]利用了次梯度和一致性算法来解决固定无向拓扑下多智能体的解耦优化问题. 之后, 在时变拓扑的假定下, 文[35]给出了凸目标函数之和的优化收敛界的估计. 进而文[36]讨论了在切换拓扑下带约束的凸优化趋同问题. 随后, 文[37]研究了连续时间的非线性多智能体系统在一般的 $[t, \infty)$ 联合连通(有向)拓扑假设下的集合优化趋同. 其中每个个体有自己的目标函数(对应自己的集合), 在给定的分布式优化算法下可以得出保证其收敛的条件. 对偶分解法既考虑主(primal)变量也考虑其对偶(dual)变量. 在此算法中, 每个个体拥有对自己局部更新变量的信息, 通过将这些局部变量收敛到一个共同值来实现全局优化<sup>[38]</sup>. 而启发式的智能算法已经研究了多年, 包括分布式遗传算法<sup>[39]</sup>等, 但对他们往往不容易在数学上进行严格的收敛性分析.

## 4 多智能体系统覆盖(Coverage of multi-agent systems)

多智能体协调的目的往往还可能涉及区域环境的因素, 为此越来越多的研究人员投入到多智能体系统覆盖问题的研究中. 多智能体覆盖问题有着其重要的理论和应用价值, 也是传感器网络或多机器人网络等领域中的重要研究课题. 该问题要求一群具有感知、通信、计算、移动能力的个体在一定的区域内分布式地感应环境和执行特定的任务, 如搜救、追捕、环境监测、深海探测等等. 从不同的角度, 覆盖问题可以分为不同的类型, 比如从数学工具的角度说有确定性覆盖和随机性覆盖; 从机器人网络角度上可以划分为地毯(blanket)覆盖、栅栏(barrier)覆盖、清扫(sweep)覆盖<sup>[40]</sup>.

从覆盖过程中智能体运动状态的不同可以将它分为静态覆盖和动态覆盖. 静态覆盖的目标是将多智能体放置在一个给定空间或集合中固定的位置上, 使得环境中的每个点在每个时刻都能被覆盖. 文[9, 41]广泛地研究了静态覆盖问题. 为了静态覆盖一个环境, 需要有一定数目的智能体. 而确定这个数目是相当困难的, 特别是在环境未知的前提下则是不可能的<sup>[41]</sup>. 如果智能体的数量不足以静态覆盖这个目标区域, 可以采取不断运动的方式使得区域中每一点能够在一定的时间段或以一定频率被覆盖到, 即所谓的动态覆盖. 由于动力学的介入, 动态覆盖的研究要比静态覆盖的研究复杂得多.

下面主要从覆盖对象的特点出发, 将多智能体系统研究领域覆盖问题分为区域(region)覆盖、边界覆盖(boundary)和目标(target)覆盖并作介绍和说明.

### 4.1 区域覆盖(Region coverage)

区域覆盖是将覆盖区域划分成子区域, 每个智能体只负责实现对自己所在子区域的覆盖, 这种“分而治之”的研究思想在很多文献中都有所体现<sup>[42~44]</sup>. 较为常用的区域划分方式有Voronoi分割<sup>[45]</sup>和等任务分割<sup>[44]</sup>两种. 文[42]研究了分布密度函数已知条件下实现对目标区域的最优覆盖问题, 利用Voronoi分割和平行轴定理设计出一种迭代优化算法. 作者借鉴Lloyd算法的思想, 先根据智能体的位置完成对目标区域的Voronoi分割<sup>[46]</sup>, 然后计算出各个Voronoi子区域的质心, 每个智能体朝自己所在子区域的质心移动, 再根据智能体新的位置, 对目标区域作重新划分, 如此反复. 该算法能很好地完成最优覆盖任务并可实现对智能体的分布式队形控制, 但也存在计算复杂度高的缺陷. 文[47]将自适应控制方法应用到分布式区域覆盖问题, 得到了分布密度函数未知但可参数化条件下多智能体的近似最优配置, 证明了非完整约束下的多移动机器人也能

解决位置优化问题并针对环境参数不确定性格提出了自适应控制覆盖算法。

传感器网络覆盖存在两类主要问题:第1类是最优部署问题,即关于空间位置固定的传感器配置问题,其目标是优化传感器的位置及其相应的感应区域;第2类是重新部署问题,即关于传感器的移动策略使得传感器运动到最优位置上。一个有名的最优部署例子是艺术馆问题:在一个有若干个顶点的非凸形状的多边形(艺术馆)里放置监控器。为了使得多边形中的每个点都能保证至少被其中一个监控器所监视,为此要确定监控器的最少个数和最优位置问题<sup>[48]</sup>。

文[49]运用Voronoi分割研究了这一位置最优问题,其中最优的位置是对应的Voronoi块的质心;而文[50]从代数拓扑的角度出发分析研究了这一静态区域覆盖问题。另外,实际应用还要考虑重新部署问题:在固定传感器个数的前提下,随着环境中一些因素的变化,如何确定控制策略使得多智能体能运动到最优位置以便能提供最好的监测效果。文[43]讨论了一些关于分布式算法的复杂性等问题并设计了覆盖算法使得机器人运动到Voronoi分割的质心使得整个系统重新部署后在某指标意义下达到最优覆盖。

清扫覆盖是讨论多智能体之间如何相互协作完成对一个给定区域的清扫。文[42]考虑了清扫覆盖问题,利用若干个具有有限视角传感器的移动机器人来巡视环境中的所有点。而文[51]利用编队控制等方法解决了一类清扫覆盖的问题。文[52]还提出了有效覆盖问题并给出了带积分的控制算法达到的对目标区域的有效动态覆盖。而文[53]则采用了间歇式的控制方法来实现这一目标。

此外, $k$ 度覆盖要求对目标区域的每个点至少被 $k$ 个智能体的势力范围所覆盖。文[54]从节约能量的角度出发研究了一个传感器“可能睡眠”的 $k$ 度覆盖模型,当每个智能体具有圆形覆盖邻域时对一个区域进行概率1实现该覆盖的智能体密度临界值问题。文[55]则研究了具有扇形感知邻域的智能体对一个给定的方形区域进行 $k$ 度覆盖问题,并得出了基于随机过程的3种策略下以概率1实现 $k$ 度覆盖的充分条件。

## 4.2 边界覆盖(Boundary coverage)

边界覆盖不同于区域覆盖,它只要求覆盖住所感兴趣区域的全部或部分边界。根据覆盖过程中边界的状态,边界覆盖可分为静止边界覆盖和运动边界覆盖。在监测和控制火势的多智能体分布式算法设计中,我们往往先要确定火灾的边界<sup>[56]</sup>。在救火过程中,由于火势在不断变化,火势边界也在变动,这

显然是一个运动边界覆盖问题。

栅栏覆盖目的是在边界上布置多智能体而形成多智能体栅栏,当一些可疑目标以某种路径穿越边界时,栅栏覆盖就是要考虑发现或监测这些穿越的目标。不难看出,栅栏覆盖有很多实际用途,比如在战场环境中,它可用来监测敌军的车辆、坦克或步兵是否正在穿越传感器部署的区域。文[57]考虑了一个相关的有趣问题:若某条路径上的每个传感器与最近传感器的距离最大,则当目标沿这样的路径穿越区域时,不被监测到的概率最大。相对于监测方而言,这样的路径是“最坏情形路径”。相反,如果路径上的每个传感器与最近传感器的距离最小,则称为“最好情形路径”。利用计算几何理论使得“最坏情形路径”是由Voronoi图中的线段组成,而“最好情形路径”由Delaunay三角形的线段构成。其中每一条边一个权重用以代表到最近传感器的距离,再利用查找算法找到最好和最坏情形的路径来研究覆盖效果。另外,文[58]利用编队控制方法对直线栅栏进行了有效的覆盖,利用基于邻域信息的控制方法设计出分散智能体控制算法实现了等距栅栏覆盖。

## 4.3 目标覆盖(Target coverage)

在一些特定的应用需求中,人们只感兴趣去覆盖或包围所关注目标所在之处。其核心思想都是覆盖带有不确定性的动态目标所可能存在的空间。这时所覆盖的区域不是事先给定的,而是随着目标的运动和不确定信息而变化,为此可能先需要考虑对该目标区域进行估计。目标覆盖问题需要保证某个特定目标的问题区域能被充分覆盖和完全处于监视之下。注意到每个智能体都备有一个感应器和一个执行器,如果目标能落在某个智能体的感知或执行区域内,该多智能体系统就完成目标覆盖的任务。

对于静态的目标,控制方面的要求相对比较简单参见文[59]。当目标运动时,智能体要(合作地)获取或估计目标的速度等信息以期实现对目标的限制和追踪。通常,每个追踪者有一定的感知或执行半径,为此每个追踪者将由一个圆盘所描述。而追捕问题可看成这些追踪者(圆盘)对那些逃逸的目标的覆盖或围困。文[60]给出了一种多智能体协调方法实现目标包围用于围捕该目标和封锁其逃逸路径。文[61]建立了仿真软件讨论多智能体系统追踪/逃逸问题,利用任务分配等对作为移动目标的逃逸者进行围捕优化。文[62]研究了多智能体系统覆盖跟踪一个移动的目标,由于每个智能体只能拿到该目标位置或速度的部分信息,这里考虑如何利用协同观测器和覆盖跟踪控制器跟踪一个带有不确定性的动态目标。其中利用给出的协同估计算法得到了对该目标估计误差的界使得覆盖跟踪目标转化为覆盖一个移动区

域, 随后采用编队控制的思路解决了此问题。

## 5 结论(Conclusions)

自然界和人类社会中丰富的群体协调运动现象是构建新的多智能体系统模型的重要源泉。多智能体系统通过其内部智能体之间的协调作用能够高效地完成分配的任务, 解决许多单一智能体难以胜任的大规模复杂问题, 具有较强的抗干扰性和环境适应能力。因此, 多智能体系统协调控制领域的深入发展有助于找出生物、社会等自然界中协调运动现象的内在原因, 也为解决高新工程技术问题提供新的思路和方法。本文对多智能体的运动协调和控制领域的3个重要问题, 即集合协调、输出调节和覆盖做了详尽地探讨, 介绍了研究背景和主要内容, 揭示了“系统决策, 分布执行”的研究思想。

总之, 多智能体运动协调和控制方面的研究刚刚起步, 远不只是已被大量研究的一致性和编队问题, 也不仅限于本文所讨论的几个方面。许多重要的理论与实际问题亟待解决, 新的研究领域还有待开拓。随着通信和微电子技术的迅猛发展, 高效、廉价且性能稳定的传感器、处理器以及各种执行器件相继面世。这必然会极大地拓展多智能体系统的应用范围, 促进其协调控制理论研究不断取得新的成果。

## 参考文献(References):

- [1] WALDROP M. *Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*[M]. New York: Simon and Schuster, 1992.
- [2] COUZIN I D, KRAUSE J, FRANKS N, et al. Effective leadership and decision-making in animal groups on the move[J]. *Nature*, 2005, 433(3): 513 – 516.
- [3] ANDERSON P. More is different[J]. *Science*, 1972, 177(4): 393 – 396.
- [4] MARTÍNEZ S, CORTÉS J, BULLO F. Motion coordination with distributed information[J]. *IEEE Control Magazine*, 2007, 27(4): 75 – 88.
- [5] REN W, BEARD R W. *Distributed Consensus in Multi-vehicle Cooperative Control*[M]. London: Springer-Verlag, 2008.
- [6] LYNCH N A. *Distributed Algorithms*[M]. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 1997.
- [7] REYNOLDS C W. Flocks, herds, and schools: a distributed behavioral model[J]. *Computer Graphics*, 1987, 21(1): 25 – 34.
- [8] VICSEK T, CZIROÓK A, BEN-JACOB E, et al. Novel type of phase transition in a system of self-derived particles[J]. *Physical Review Letters*, 1995, 75(6): 1226 – 1229.
- [9] HOWARD A, PARKER L E, SUKHATME G S. Experiments with a large heterogeneous mobile robot team: Exploration, mapping, deployment and detection[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2006, 25(3): 431 – 447.
- [10] OLFATI-SABER R, FAX J A, MURRAY R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems[J]. *Proceedings of IEEE*, 2007, 95(1): 215 – 233.
- [11] HONG Y, GAO L, CHENG D, et al. Lyapunov-based approach to multi-agent systems with switching jointly connected interconnection[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(5): 943 – 948.
- [12] FRANCIS B A, WONHAM W M. The internal model principle of control theory[J]. *Automatica*, 1976, 12(4): 457 – 465.
- [13] HUANG J. *Nonlinear Output Regulation: Theory & Applications*[M]. Philadelphia: SIAM, 2004.
- [14] HONG Y, WANG X, JIANG Z. Multi-agent coordination with general linear models: a distributed output regulation approach[C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Control & Automation*. Xiamen: [s.n.], 2010: 137 – 142.
- [15] 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.
- [16] HONG Y, CHEN G, BUSHNELL L. Distributed observers design for leader-following control of multi-agent networks[J]. *Automatica*, 2008, 44(5): 846 – 850.
- [17] HU J, GARY F. Distributed tracking control of leader-follower multi-agent systems under noisy measurement[J]. *Automatica*, 2010, 46(8): 1382 – 1387.
- [18] HONG Y, WANG X. Multi-agent tracking of a high dimensional active leader with switching topology[J]. *Journal of Systems Science and Complexity*, 2009, 22(4): 722 – 731.
- [19] GAZI V. Formation control of a multi-agent system using nonlinear servomechanism[J]. *International Journal of Control*, 2005, 78(8): 554 – 565.
- [20] WANG X, HONG Y, HUANG J, et al. A distributed control approach to a robust output regulation problem for linear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2010, 55(12): 2891 – 2896.
- [21] HUANG J. Remarks on “synchronized output regulation of linear networked systems” [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, 56(3): 630 – 631.
- [22] WIELAND P, ALLGOWER F. An internal model principle for synchronization[C] // *Proceedings of IEEE International Conference Control and Automation*. Christchurch, New Zealand: [s.n.], 2009: 285 – 290.
- [23] SHI G, HONG Y. Global target aggregation and state agreement of nonlinear multi-agent systems with switching topologies[J]. *Automatica*, 2009, 45(5): 1165 – 1175.
- [24] NOTARSTEFANO G, EGERSTEDT M, HAQUE M. Rendezvous with multiple, intermittent leaders[C] // *Proceedings of IEEE Conference on Decision & Control/Chinese Control Conference*. Piscataway, NJ: IEEE, 2009: 3733 – 3738.
- [25] JIN M, FERRARI-TRECCATE G, EGERSTEDT M, et al. Containment control in mobile networks[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(8): 1972 – 1975.
- [26] CAO Y C, REN W. Containment control with multiple stationary or dynamic leaders under a directed interaction graph[C] // *Proceedings of the 28th IEEE Conference on Decision & Control/Chinese Control Conference*. Piscataway, NJ: IEEE, 2009: 3014 – 3019.
- [27] MENG Z, REN W, YOU Z. Distributed finite-time attitude containment control for multiple rigid bodies[J]. *Automatica*, 2010, 46(12): 2092 – 2099.
- [28] LOU Y C, HONG Y G. Multi-leader set coordination of multi-agent systems with random switching topologies[C] // *Proceedings of the 49th IEEE Conference on Decision and Control*. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 3820 – 3825.
- [29] SHI G D, HONG Y G. Set tracking of multi-agent systems with variable topologies guided by moving multiple leaders[C] // *Proceedings of the 49th IEEE Conference on Decision and Control*. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 2245 – 2250.
- [30] BOYD S, VANDERBERGHE L. *Convex Optimization*[M]. New York: Cambridge University Press, 2004.

- [31] TSITSIKLIS J, BERTSEKAS D, ATHANS M. Distributed asynchronous deterministic and stochastic gradient optimization algorithms[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1986, 31(6): 803 – 812.
- [32] RAM S S, NEDICA A, VEERAVALLI V V. Incremental stochastic subgradient algorithms for convex optimization[J]. *SIAM Journal on Optimization*, 2009, 20(2): 691 – 717.
- [33] JOHANSSON B, RABI M, JOHANSSON M. A randomized incremental subgradient method for distributed optimization in networked systems[J]. *SIAM Journal on Optimization*, 2009, 20(3): 1157 – 1170.
- [34] JOHANSSON B, KEVICZKY T, JOHANSSON M, et al. Subgradient methods and consensus algorithms for solving convex optimization problems[C] // *Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control*. Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 4185 – 4190.
- [35] NEDIĆ A, OZDAGLAR A. Distributed subgradient methods for multi-agent optimization[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(1): 48 – 51.
- [36] NEDIĆ A, OZDAGLAR A, PARRILO P A. Constrained consensus and optimization in multi-agent networks[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2010, 55(4): 922 – 938.
- [37] SHI G D, JOHANSSON K H, HONG Y G. Multi-agent systems reaching optimal consensus with directed communication graphs[C] // *Proceedings of the 2011 American Control Conference*. New York: IEEE, 2011.
- [38] XIAO L, JOHANSSON M, BYOD S. Simultaneous routing and resource allocation via dual decomposition[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2004, 52(7): 1136 – 1144.
- [39] ALBA E, TROYA J. A survey of parallel distributed genetic algorithms[J]. *Complexity*, 1999, 4(4): 31 – 52.
- [40] GAGE D W. Command control for many-robot systems[C] // *Proceedings of Annual AUVS Technical Symposium*. Huntsville, Alabama: [s.n.], 1992: 5456 – 5461.
- [41] O'ROURKE J. *Art Gallery Theorems and Algorithms*[M]. New York: Oxford University Press, 1987.
- [42] CHOSET H. Coverage for robotics—a survey of recent results[J]. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 2001, 31(1): 113 – 126.
- [43] CORTÉS J, MARTÍNEZ S, KARATAS T, et al. Coverage control for mobile sensing network[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2004, 20(2): 243 – 255.
- [44] PAVONE M, FRAZZOLI E, BULLO F. Distributed policies for equitable partitioning: theory and applications[C] // *Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control*. Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 4191 – 4197.
- [45] AURENHAMMER F. Voronoi diagrams—a survey of a fundamental geometric data structure[J]. *ACM Computing Surveys*, 1991, 23(3): 345 – 405.
- [46] DU Q, FABER V, GUNZBURGER M. Centroidal voronoi tessellations: applications and algorithms[J]. *SIAM Review*, 1999, 41(4): 637 – 676.
- [47] LUNA J M, FIERRO R, ABDALLAH C, et al. An adaptive coverage control algorithm for deployment of nonholonomic mobile sensors[C] // *Proceedings of the 49th IEEE Conference on Decision and Control*. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 1250 – 1256.
- [48] CHVATÁL V. A combinatorial theorem in plane geometry[J]. *Journal of Combinatorial Theory, Series B*, 1975, 18(1): 39 – 41.
- [49] DREZNER Z. *Facility Location: A Survey of Applications and Methods*[M]. New York: Springer Verlag, 1995.
- [50] de SILVA V, GHRIST R. Coverage in sensor networks via persistent homology[J]. *Algebraic & Geometric Topology*, 2007, 7(2): 339 – 358.
- [51] CHENG T M, SAVKIN A V. Decentralized control of mobile sensor networks for triangular blanket coverage[J]. *Proceedings of the 2005 American Control Conference*. New York: IEEE, 2010: 2903 – 2908.
- [52] HUSSEIN I I, STIPANOVIĆ D M. Effective coverage control for mobile sensor networks with guaranteed collision avoidance[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, 15(4): 642 – 657.
- [53] WANG Y, HUSSEIN I I. Awareness coverage control over large scale domains with intermittent communications[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2010, 55(8): 1850 – 1859.
- [54] KUMAR S, LAI T H, BALOGH J. On  $k$ -coverage in a mostly sleeping sensor networks[C] // *Proceedings of International Conference on Mobile Computing and Networking*. Philadelphia, PA: [s.n.], 2004: 144 – 158.
- [55] SHI G, HONG Y. Region coverage for planar sensor network via sensing sectors[C] // *Proceedings of IFAC World Congress*. Seoul, Korea: [s.n.], 2008: 4156 – 4161.
- [56] CASBEER D W, KINGSTON D B, BEARD R W, et al. Cooperative forest fire surveillance using a team of small unmanned air vehicles[J]. *International Journal of Systems Sciences*, 2006, 37(2): 351 – 360.
- [57] MEGUERDICHIAN S, KOUSHANFAR F, POTKONJAK M, et al. Worst and best-case coverage in sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2005, 4(1): 84 – 92.
- [58] CHENG T M, SAVKIN A V. A distributed self-deployment algorithm for the coverage of mobile wireless sensor networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2009, 13(11): 877 – 879.
- [59] YAMAUCHI H. A cooperative hunting behavior by mobile robot troops[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2005, 18(9): 931 – 940.
- [60] SCHUMACHER C. Ground moving target engagement by cooperative UAVs[C] // *Proceedings of the 2005 American Control Conference*. New York: IEEE, 2005: 4502 – 4505.
- [61] OH S, SCHENATO L, CHEN P, et al. Tracking and coordination of multiple agents using sensor networks: system design, algorithms and experiments[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 234 – 254.
- [62] WANG X, HONG Y, JIANG Z. Coverage tracking of a moving target by a group of mobile agents[C] // *Proceedings of Asian Control Conference*. Hong Kong: [s.n.], 2009: 332 – 337.

### 作者简介:

洪奕光 (1966—), 男, 博士, 研究员, 中科院系统控制重点实验室主任, 研究方向为非线性控制、网络控制、机器人控制等, E-mail: yghong@iss.ac.cn;

翟超 (1984—), 男, 博士研究生, 研究方向为多智能体系统的覆盖控制、网络博弈等.