

# 地面无人系统的多智能体协同控制研究综述\*

王荣浩<sup>†</sup> 邢建春 王平 王春明

(解放军理工大学国防工程学院, 南京 210007)

**摘要** 本文结合多智能体系统控制理论与技术的研究现状,以地面无人系统为控制对象,对理论及其技术发展作了详细概述.从多智能体的行为协同控制和任务协同控制两个侧面讨论了相关的理论及应用问题,并指出当前协同控制研究中存在的一些问题以及今后的发展方向.地面无人系统的协同控制对于有效提升社会及军事效益,最大限度地发挥地面任务执行的效能具有重要意义.

**关键词** 多智能体, 行为协同控制, 任务协同控制, 地面无人系统, 控制理论

DOI: 10.6052/1672-6553-2015-009

## 引言

智能体-Agent的概念最早可以追溯到1977年Carl Hewitt“Viewing Control Structure as Patterns of Passing Messages”一文.在此文中,Carl Hewitt给出了一个称为“Actor”的对象,它具有自身的内在状态,又能与其他同类对象发送和反馈信息.而正式采用“Agent”一词可见于M. Minsky于1986年出版的《Society of Mind》一书,文中用“Agent”称呼一些具有特别技能的个体,它们存在于社会中,并通过竞争或协商求解矛盾<sup>[1]</sup>.

多智能体系统(Multi-Agent System, MAS)是由多个具备一定感知和通信能力的Agent组成的集合,该系统可以通过无线通信网络协调一组Agent的行为(知识、目标、方法和规划),以协同完成一个任务或是求解问题,各个单Agent可以有同一个目标,也可以有多个相互作用的不同目标,它们不仅要共享有关问题求解方法的指示,而且要就单Agent间的协调过程进行推理.多智能体理论的应用研究开始于20世纪80年代中期,近些年呈明显增长的趋势.尤其是近10年来,Agent和多智能体系统理论与技术频繁出现在大量应用系统设计中,对Agent的研究已成为人工智能学科的一个热点.

人们在研究人类智能行为中发现,大部分人类活动都涉及到多个人构成的社会群体,大型复杂问

题的求解需要多个专业人员或组织协作来完成.同样,工程上也需要多个单智能体间的相互协作和协调来共同完成一项任务.类似于生物界的大雁南飞、鱼群游动、蚂蚁觅食、蜜蜂筑巢(如图1)等生物行为所体现出的群体优势,多智能体间的协同将大大提高个体行为的智能化程度,更好地完成很多单个个体无法完成的工作.

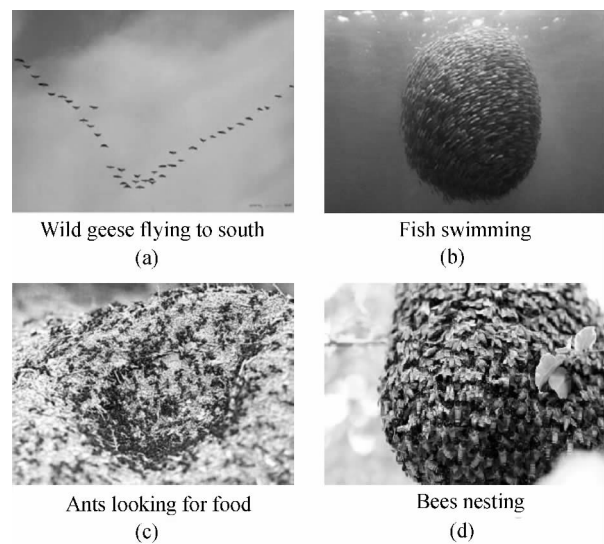


图1 多智能体系统生物学现象

Fig. 1 Biological phenomenon of multi-agents system

随着信息化、智能化技术的快速发展,地面无人系统将在未来的陆地任务执行中发挥更加显著的作用.任务的形式既可以由个体独立完成,也可

2014-12-24 收到第1稿 2015-02-11 收到修改稿.

\* 军队2110重点学科建设资助项目(20130013)和解放军理工大学预先研究基金资助项目(KYGYZLXY1121)

<sup>†</sup> 通讯作者 E-mail: wrh@893.com.cn

以是群体协作. 对于地面无人系统而言, 多个个体之间保持协同与合作具有以下优点:

(1) 能充分获取当前的环境信息, 有利于实现侦察、搜寻、排雷、安全巡逻等. 单个主体的传感器获取信息的能力总是有限的, 如果每个个体保持协调关系, 分工合作获取自己周围的环境信息, 再进行信息融合, 便可迅速地感知整个群体所在的区域环境信息;

(2) 在对抗性环境中能增强多个个体抵抗外界攻击的能力, 如多机器人士兵通过保持合适的战斗防御队形可以更有效地应用战术, 抵抗多方向的入侵, 增强自身安全性;

(3) 在一些具体任务(如物资运输)中, 保持协调关系能加快任务的完成, 提高工作效率;

(4) 具有较大的冗余, 能提高系统鲁棒性和容错性;

(5) 完成同样任务, 具有协同合作关系的多个个体一般成本低廉, 比单个性能优良但是成本昂贵的智能体更具有经济或军事效益.

相较于水下无人系统和空中无人系统, 地面无人系统在协同控制方面所面临的主要困难在于陆地环境的复杂多变, 如电磁干扰导致的通讯受阻或网络中断, 地形变化导致行驶障碍, 这些都可能造成系统无法正常运行. 因此针对地面无人系统的协同控制研究所面临的实际挑战更大.

近年来, 多智能体系统已发展成为控制领域和无人系统领域的重要研究方向. 多智能体系统协同控制的研究涵盖的基本问题主要包括: 一致性控制、群集控制、会合控制、编队控制, 其中又以一致性控制为其他几种控制的基础. 图2展示了地面无人系统协同控制的相关实例.



图2 地面无人系统协同控制实例

Fig. 2 Example of cooperative control for unmanned ground system

在地面无人系统的协同控制中, 协同完成任务的能力是基本要求, 但有时为了适应复杂的地面环境, 面对紧急状态的多任务处理能力也是很重要的

一个方面, 此类问题涉及多任务和非结构化问题处理, 且具有对环境响应的实时性要求. 在群体协作过程中, 如何充分利用系统资源将任务分配到分布式节点并行求解、进行任务的协调, 以及如何在任务求解过程中进一步对环境做出响应是协同控制研究的另一个方面. 随着多智能体技术的发展, 尤其是其强大的分布式并行计算处理能力, 使得这一问题得到了有效的解决.

综上所述, 基于多智能体的地面无人系统协同控制具有两层含义, 即行为协同和任务协同, 而对多智能体系统的研究为协同控制提供了理论与技术支撑. 本文主要讨论地面无人系统的协同控制这一侧面, 重点围绕多智能体行为协同控制的几个基本问题、相关的衍生问题以及任务协同控制的模型、体系结构等研究工作进行讨论.

## 1 行为协同控制中的基本问题

### 1.1 一致性控制

在多智能体协同控制问题中, 一致性作为智能体之间合作协调的基础, 具有重要的现实意义和理论价值. 所谓一致性, 就是寻找恰当的控制律使得所有智能体关于某个感兴趣的量达到相同的状态. 为了实现一致, 智能体之间需要进行局部的信息交换. 例如在地面无人火控系统中, 要求群体中的所有成员向着同一目标实施攻击, 如图3所示, 所有个体进行集中的攻击状态就是所需要达到的群体行为的一致性.



图3 地面无人火控系统实施集中火力打击

Fig. 3 Firepower focusing on targets through unmanned fire control system

要实现这种状态的趋同, 其控制目标可描述为:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_j(t) - x_i(t)\| = 0, \forall i, j \in N \quad (1)$$

其中  $N$  为系统中个体的集合,  $x_i(t)$  为系统中第  $i$  个个体在时刻  $t$  的状态.

1995年,Vicsek等<sup>[2]</sup>提出了一个简单的粒子模型并给出了一系列有趣的仿真结果.所有粒子以相同的速度但不同的运动方向在同一个平面上运动,每个粒子利用它的邻居运动方向之和的平均值来更新自己的运动方向动态.在没有集中的协调控制下,所采用的“邻居规则”却能够使所有粒子最终朝同一个方向运动,如图4所示.

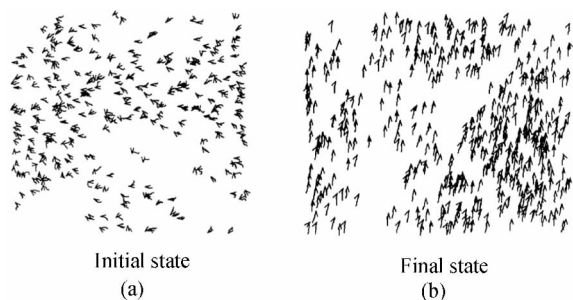


图4 粒子运动轨迹

Fig.4 Particle motion trajectory

“邻居规则”所体现的就是个体之间局部的信息交换.由此可以看出,“邻居规则”实质是群体在达到一致性状态过程中所采用的一种控制策略或协议,显然它的特点是无中心控制、局部信息交换和简单行为协调.随后,Jadbabaie等<sup>[3]</sup>利用代数图论和矩阵理论给出了简化的Vicsek模型理论解释.

对于一个简单的一阶积分器系统模型:

$$\dot{x}_i(t) = u_i(t), \forall i \in N \quad (2)$$

其中 $u_i(t)$ 为对第 $i$ 个个体施加的控制量,常用的一致性算法为<sup>[4]</sup>:

$$u_i(t) = - \sum_{j \in N_i(t)} a_{ij}(t) (x_i(t) - x_j(t)) \quad (3)$$

其中 $j \in N_i(t)$ 表示第 $i$ 个个体在时刻 $t$ 的相邻个体集合, $a_{ij}(t)$ 为时变的拓扑加权系数.可以看出,针对第 $i$ 个个体设计一致性控制策略时,仅仅利用了其相邻个体与其自身的状态差,无需非相邻个体的任何信息.从经典控制的角度来看,该控制器实质上是一个比例控制器,控制律中包含了位置误差信息,所不同的是对多智能体系统而言,其利用的是群体性误差信息.每一时刻相邻的个体状态是时变的,而针对个体系统的控制仅需要该个体与期望状态(初始给定)的误差信息.这个例子表明多智能体一致性控制的分析与综合更为复杂.关于一致性控制的详细介绍可参见文献[5-8].

## 1.2 群集控制

群集是由大量自主个体组成的集合.在无集中式控制和全局模型的情况下,大量随机分布的自主个体通过局部感知作用和相应的反应行为聚集在一起,使整体呈现出一致行为.群集控制的研究主要受到生物领域的启发,自然界中存在着大量群集,如蚁群、鱼群、蜂群、鸟群等.群集是一种普遍存在的群体行为和自组织现象.群集行为在实践中的应用包括在复杂环境中布署分布式传感器节点(如图5所示)、军事演习中的侦察、攻击与躲避,如陆地作战群在遇到敌方攻击时为了躲避暂时出现混乱现象,然后再形成一个合理的编队逃跑或反击等.

一般而言,群集行为应满足如下3条基本规则:

- (1) 避免发生碰撞: 避免相邻个体之间发生碰撞;
- (2) 速度、方向匹配: 与相邻个体的速度、方向达到渐近一致;
- (3) 中心聚集: 每个个体改变当前位置并向其邻居的平均位置靠拢.



图5 分布式无线传感器节点布置

Fig.5 Layout of the nodes for distributed wireless sensors

群集控制要求群集中的智能体之间进行局部协作,整体上在某些方面达成一致,以求最终完成任务.可以看出,群集控制与一致性问题的研究密切相关,它在群体保持状态一致性的基础上,要求所有个体相对集中.在多智能体群集控制策略应用中,一致性算法主要用于实现多智能体间的速度匹配,在以相同速度运动的前提下,多智能体间保持一定的距离以避免相互碰撞.文献[9]提出了群集设计和分析的理论框架,除了实现速度匹配一致外,多智能体还要形成指定编队构型并避免相互碰

撞. 文献[10-12]研究了多智能体群集现象, 在固定拓扑和动态拓扑条件下, 通过构造局部控制律可实现一组移动智能体以速度方式进行结盟. 文献[13]给出了进一步的扩展结果. 采用一致性策略设计和分析群集算法的相关报道可参见文献[14-16].

### 1.3 会合控制

所谓的会合问题指空间分布的多个个体或者智能体, 通过交换邻居局部信息, 最终会合于一个期望的区域内, 群体中所有个体速度逐渐趋于零, 最终静止于某一位置. 会合控制的发展源于机器人应用的发展, 如一群机器人要合作完成一个任务到达同一个地点, 在一片未知区域进行搜索工作, 或者一群陆地无人车要达到一个共同的地点等, 图6是一组无人车根据指挥命令会合在指定的位置.

由此可以看出, 会合控制的目标可描述为:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_j(t) - x_i(t)\| = 0, \forall i, j \in N \quad (4)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}_i(t) = 0, \forall i \in N \quad (5)$$



图6 会合控制的应用

Fig.6 Application of rendezvous control

分别反映群体会合于一个期望的区域内并最终静止. 显然会合问题本质上是一致性问题的一个特例, 可以简单理解为终态为静止的一致性. Lin等采用一致性策略解决了同步和异步通信条件下移动智能体的会合问题<sup>[17-19]</sup>. 文献[20]应用一致性策略研究了无人车群会合问题. 相似的想法扩展到了多无人机同时在敌方雷达探测边界会合的问题<sup>[21]</sup>. 此外, Cortes等还研究了移动智能体的鲁棒会合问题<sup>[22]</sup>. 文献[23]采用线性连续时间一致性策略求解了多协同机器人系统位置同步问题, 设计出了会合控制器. 此外, 在实际应用中, 有时往往需要群体中的所有个体同时达到相同位置(而非某一个区域) 这样的会合控制要求更高, 控制起来更为

复杂.

### 1.4 编队控制

所谓编队控制是指多智能体系统中的个体在运动中通过保持一定的队形来实现整体任务. 它要求多个智能体组成的群体在向特定目标或方向运动的过程中, 相互之间保持预定的几何形态(队形), 同时又要适应环境约束(如避开障碍物). 随着多机器人系统的发展, 编队控制也逐渐成为多智能体系统研究的热点问题. 在军事领域中, 多智能体采用合理编队可以代替士兵执行恶劣、危险环境下的军事任务. 在后勤军事物资运输中, 陆地无人车在搬运大型物体时, 对每辆车的位置存在一定要求, 以满足运输过程中的稳定性和负载平衡的要求. 在军事作战中, 为了行动的协调一致和战术的需要, 要求多机器人保持一定的队形, 并动态地切换队形和避障. 可以看出, 编队控制使得多智能体更加有效地完成指定任务. 图7展示了编队控制在无人车编队行驶中的实际应用.



图7 公路无人车编队行驶

Fig.7 Formation of unmanned car on the road

编队控制的目标可描述为:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_j(t) - x_i(t)\| = x_{dij}, \forall i, j \in N \quad (6)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}_i(t) - c(t) = 0, \forall i \in N \quad (7)$$

其中  $x_{dij}$  为第  $i$  个与第  $j$  个个体的期望相对位置矢量,  $c(t)$  为期望的整体位移速度. 可以看出编队控制本质是一种几何构型严格的群集控制, 智能体之间的队形是通过邻居智能体之间的相对距离来刻画的. 因此, 在一致性控制协议的基础上通过简单的线性变换就可以将一致性算法应用于编队控制算法. 目前编队控制的主要方法有两种: 基于常规控制算法的多智能体编队控制方法和基于行为的智能体编队控制方法<sup>[24]</sup>. 第一种方法适用于静态

或者平稳环境,第二种方法适用范围较广,能根据外界环境的变化进行调整,但这个过程需要较长的时间。在编队控制中一个基本问题是如何选取最有效的队形来执行协调任务,常见的队形有线型、柱形、菱形、V型四种<sup>[25]</sup>。此外,文献[26]采用一致性策略分析了轮式小车追捕问题中的编队稳定性,并且认为该问题可以看作是连续时间系统线性一致性问题的特例。在网络条件下,引入随机通信噪声和信息丢包问题,文献[27]采用一致性策略研究了基于信息交换的多边形编队控制方法。文献[28]给出了分析一致性和编队稳定性的基本框架,并基于此框架解决了单积分器和广义动力学模型的编队变换问题。文献[29]运用一致性策略分析了点、线和常见几何构型的编队稳定性。文献[30]针对复杂地形地面崎岖起伏的特点,通过建立三维地形环境下编队系统的误差模型,并根据环境中的特定地形设计相应的编队行驶策略,实现了多机器人系统在复杂地形环境下的编队控制。其它基于一致性策略的编队控制方法可参考文献[31-33]。

## 2 行为协同控制中的衍生问题

学术界在协同控制基本问题基础上,根据实际应用需求,衍生出了更多控制方式,其应用范围更加广泛,控制算法相对更加智能化,但所面临的实际情况也更为复杂。

### 2.1 包含控制

包含控制问题是指通过设计合适的算法,使得所有的跟随智能体最终进入到由多个领导智能体所生成的区域内。包含控制问题有许多潜在的应用,例如一队自控车辆要从一个地方安全移动到另外一个地方,但是只有部分车辆配备了传感器能够探测危险障碍物,这些车辆被指定为领导智能体而其它车辆为跟随智能体。如果跟随智能体一直在领导智能体所形成的安全区域内移动,那么该队车辆就能安全到达目的地。如图8所示,每个区域内的智能车都有一个领导者,所有的智能车最终进入到每个领导者所生成的区域内。

在一致性问题的研究当中,都是假设系统中没有领导智能体或者只有一个领导智能体,此时要求所有智能体的状态达到一个相同的值。然而,在一些实际应用当中,系统中可能存在多个领导智能

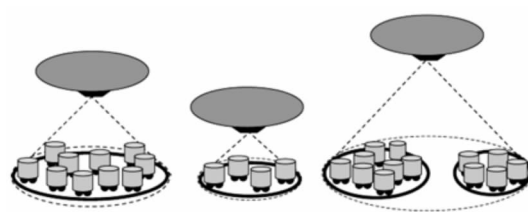


图8 包含控制的应用

Fig.8 Application of containment control

体,此时要求所有的跟随智能体最终到达一个区域而非某一个点,例如鸟群在觅食时要到达一个食物富足的区域,雄性蚕蛾被雌性蚕蛾释放的性外激素吸引到一个区域内等。另外,在许多问题中,常常需要跟踪多个动态目标,由于跟随智能体无法获得每个目标的动力学,只能对单个目标进行跟踪控制,而且系统的通信拓扑不断改变,这就导致完全无误差的动态目标跟踪无法实现。因此,对系统中含有多个领导智能体的包含控制问题的研究具有非常重要的理论和应用价值。Hu和Yuan<sup>[34]</sup>研究了固定无向拓扑下多智能体系统的包含控制问题,针对领导智能体提出了一个混合的控制协议,使所有跟随智能体的位置最终到达由多个领导智能体生成的多面体内。Cao和Ren<sup>[35]</sup>研究了有向切换拓扑下具有多个静止领导智能体的包含控制问题。此外,他们还研究了切换拓扑下具有多个动态领导智能体的包含控制问题,提出了一个非线性的分布式追踪协议。Zheng和Wang<sup>[36]</sup>针对领导者是二阶积分的智能体,提出了一种非线性控制协议并得到了异质多智能体有限时间包含控制问题的充要条件。

### 2.2 网络控制

就系统属性而言,多个体系统区别于单体系统最本质的要素在于其通过网络进行信息传递与共享。因此,网络传输中普遍存在的丢包、时延、中断以及故障等因素对于系统性能的影响不容忽视。图9展示了分布在不同区域的智能体通过无线网络连成一体,共同实施设定任务。

多智能体系统通信拓扑的连通性在一致性的实现中起着关键作用。但是,在实际的应用中,单个智能体可能因遭受外部攻击而从网络中删除,这将导致网络连通性的破坏。更严重的是,当一个智能体被攻击掉以后,它的邻居节点由于失去被攻击节点的保护从而抗攻击性变差,这可能导致邻居节点进一步被攻击掉,从而引发相继故障的发生。针对



图9 地面无人系统所构成的通信网络

Fig. 9 Communication network of unmanned ground system

这一问题,文献[37]研究了一般网络拓扑下大规模多智能体系统对外部攻击抗毁性的鲁棒优化问题和多智能体系统的通信拓扑在外部攻击发生后网络连通性的恢复问题,给出了相应的网络优化设计方案.从复杂网络的角度研究了大规模多智能体网络在外部攻击下的相继故障问题,使用平均二步度来度量网络的异质性,将无标度网络对随机故障的最优鲁棒性的设计问题转化为非线性混合整数规划问题;针对网络连通性的恢复问题,提出了连接邻居集策略来恢复通信拓扑的连通性,并且恢复后的网络具有更强的鲁棒性.图10展示了网络节点被攻击前(图a),受攻击后(图b)以及恢复后(图c)的拓扑结构,其中虚线表示新建立的通信连接.

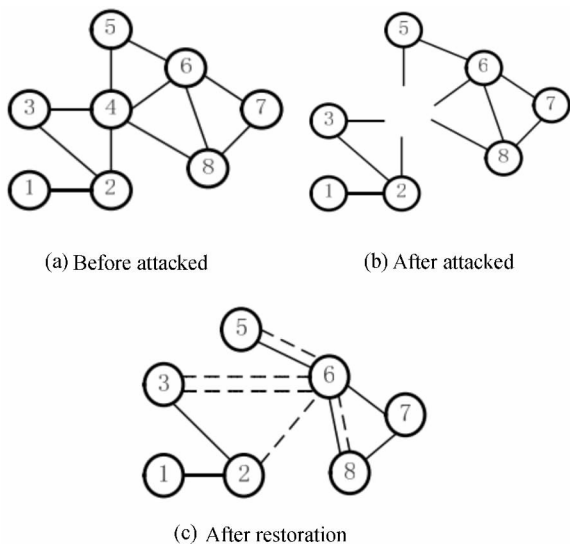


图10 网络拓扑图

Fig. 10 Topology graph of network

由于通信网络时延的存在,多智能体中个体之间进行交互时,发送方的信息经一定时间滞后才能

到达接受方.针对这种情况,文献[38]针对最简单的一阶线性系统给出了分布式时滞控制策略,保证了系统渐近一致性:

$$u_i(t) = - \sum_{j \in N_i(t)} a_{ij}(t) (x_i(t) - x_j(t - T_{ij})) \quad (8)$$

其中,  $T_{ij}$  表示第  $i$  个智能体和第  $j$  个智能体的通信传输延时.实际应用中当受到干扰或通信距离发生变化时,通信网络中的某些链路可能断开或连通,通信拓扑从一种模式转换为其他模式,导致网络拓扑结构发生变化,针对存在这种具有时变拓扑结构的切换通信网络的多智能体控制问题, Jadbabaie 等<sup>[3]</sup>进行了开创性研究工作,给出了一阶线性多智能体系统达到一致性的条件.此后的研究工作主要以此为基础展开.此外,智能体之间的信息在传感、传播和接收过程中通常存在着各种噪声,尤其是在复杂的陆地战场环境中,强电磁干扰具有很大的破坏作用,所以各智能体很难获得其邻居智能体的精确状态信息.近年来,针对具有通信噪声的网络环境下多智能体控制的一致性问题也引起了不少学者的关注.文献[39]针对智能体网络中普遍存在的干扰现象,利用脉冲牵引控制方法研究了具有引导者的多智能体网络系统的脉冲一致性问题,其一致性控制协议具有如下形式:

$$u_i(t) = \begin{cases} - \sum_{j \in N_i(t)} a_{ij}(t) (x_i(t) - x_j(t)) - b(x_i(t_k) - x_0) \delta(t - t_k), & i = 1 \\ - \sum_{j \in N_i(t)} a_{ij}(t) (x_i(t) - x_j(t)), & i = 2, \dots, n \end{cases} \quad (9)$$

其中  $b > 0$  表示脉冲强度,  $\delta(t)$  为脉冲函数,表示节点状态的一种脉冲效应,  $\{t_k\}_{k=1}^{+\infty}$  表示脉冲控制时刻.可以看出,该类控制协议也是基于 Olfati - Saber 的分布式一致性协议扩展而来.

值得指出的是,由于实际的网络环境中,通信拓扑往往同时存在时延、切换以及受到不确定噪声干扰,因此综合考虑这些因素更具有实际意义,但对其控制策略的研究也具有更大的挑战性.

### 2.3 跟踪控制

多智能体跟踪控制是基于一致性理论基础之上的控制方式.这里的跟踪具有两种含义,其一是在多智能体组成的群体中,某个智能体被指定为领导者,其余作为它的跟随者,这些跟随者以一定距离间隔跟踪领导智能体.根据领导者与跟随者之间的相对位置关系,就可形成不同的队形,该队形可

看作宏观上不同的网络拓扑结构,如图11所示,该种控制方式侧重于智能体同盟内部之间的同一协调;

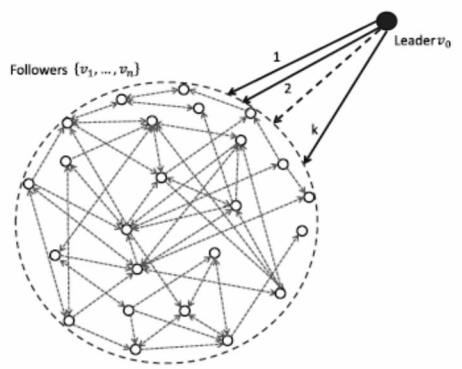


图11 跟随领导者的跟踪控制

Fig. 11 Leader-following control

其二是在群体网络中,要跟踪的目标出现后,多智能体之间形成一个动态联盟,将目标信息(方位、速度等状态)传送给中心节点,从而实施统一的控制策略,如图12所示,该控制方式一般用于监测对方行为意图,从而为实施精确跟踪打击提供依据。

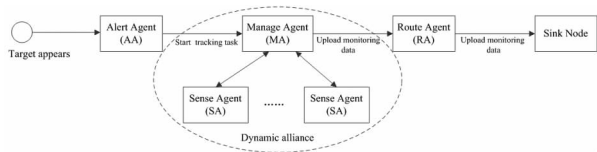


图12 基于多智能体系统的无线传感器网络目标跟踪控制框架

Fig. 12 Target tracking control frame of wireless sensor network based on multi-agent system

地面无人系统在民用和军事上均有着巨大的应用潜力。由于陆地环境复杂,对无人系统的通信会产生很大影响,因此各子系统一般只能在离散时刻获得邻居节点的状态信息,针对这个问题,文献[40-41]考虑了复杂外部环境下一个领导者和多个智能体组成的系统,利用网络一致性理论,研究了复杂条件下的多智能体跟随领导者问题。但文献[42]指出这些研究中的跟踪控制算法多数基于一致性理论使得系统中跟随者最终渐近地跟踪领导者,实际上系统并不能在有限的时间内实现跟踪。但是很多实际的控制系统要求动态响应快,且在可调的有限时间内达到零跟踪误差,因此有限时间跟踪控制问题具有更强的工程应用背景。在此基础上文献[42]针对固定和切换网络拓扑结构下的多智能体系统,通过应用 Lyapunov 函数方法分析系统

的有限时间跟踪控制问题,提出了相应的控制算法。文献[43]针对非线性网络,也提出了一种有限时间分布式跟踪控制算法。在多智能体跟踪控制中,文献[44]利用图论方法研究了信息节点的选择优化问题,进一步确定了领导者和跟随者之间的通信距离对一致性收敛率的影响,并给出了收敛率的上界和下界值。

针对第二种含义的跟踪控制,目前国际上对基于无线传感器网络的目标跟踪算法进行了广泛的研究,这些跟踪算法大致可以分为两大类:非预测跟踪和预测跟踪<sup>[45]</sup>。基于节能考虑,这些算法实现了部分协同工作,主要体现在节点唤醒与休眠、参与跟踪的节点群变化,以及监测数据的交换等。但尚没有运用一种理论体系来描述和运用这种协同。文献[46]基于多智能体方法研究处理了目标跟踪过程中节点间的这些协同问题,分析了其协同策略,形成了一般性的协同机制。无线传感器节点选择算法的目的是选择出提供最优信息的传感器节点序列,作为动态联盟的 MA (Manage Agent, 管理智能体),通过这些 MA 互相协作交换信息,对目标的位置、方位进行估测、判断及分析,并“引导”信息的传输路径,从而完成移动目标追踪任务。关于 MA 的选举算法,文献[47]提出了一种综合考虑信息效用和代价的目标函数,采用该目标函数,制定了 MA 的选择标准。

### 3 任务协同控制的相关问题

地面无人系统多任务协同控制既要求任务协同求解,又注重实时任务处理,且涉及非结构化问题求解,是一个极为复杂的过程,传统的经典控制理论无法解决这类问题。智能体技术的自治性、自主性、智能性特点以及多智能体系统的协作性特点,为解决复杂的任务协同控制问题提供了有效的途径和方法。

#### 3.1 基本模型

由于单个智能体的能力、资源受限而不能单独完成一项复杂的作战任务,所以必须将复杂任务进行分解,将复杂任务逐层逐级转化为单个智能体能直接执行的具体任务。在此基础上,对于多智能体任务协同过程控制,面向的是多任务处理。在战场攻击环境中地面无人系统根据外部信息支援系统和编队传感器获得的信息进行态势评估,结合作战



意图形成作战任务,如目标跟踪、目标识别、路径规划、隐蔽接敌、电子干扰、导弹发射和导弹制导等任务,并对任务进行分配、管理和监控,无人系统主体根据自身能力和工作状态响应执行任务。

与其它多任务系统不同的是,面向战场环境的无人系统地面任务强调对环境响应的实时性,滞后于截止期的系统响应将造成灾难性后果。为此,要尽可能地提高问题求解能力。根据系统工程学理论,任意复杂的任务都可以从逻辑上和物理上进行分解。通常可划分为层次结构、平行结构以及混合结构3种类型。层次结构的任务是逻辑上和物理上的层次分布,每个任务由若干设计子任务组成,每个子任务又由若干个下层子任务组成;平行结构任务在时间上和空间上是分布的,整个任务的求解依赖于与之有关的各个子任务;混合结构的求解任务既有一定的层次,且在每个层次上又是平行分布的。针对地面无人系统任务处理的分布式网络环境,对系统的输入(决策任务)应当在考虑系统资源分布情况的基础上,将任务分解并分配到分布式节点智能体系统中并行求解,属于混合结构任务求解模型,其中任务分配目标是使地面无人系统发挥最大效能,相关任务分配算法可参看文献[48]。

图13所示为面向多任务求解的地面无人系统任务处理模型。在满足系统实时性要求的前提下,强调多智能体总体协作效果,即寻求系统全局最优解而不是某个任务的局部最优解。为此,在过程控制中,各节点智能体系统间的通信和协同是关键。总体任务经过分解成多个子任务后分配到各节点地面无人系统并行求解,求解结果经汇集后形成一个任务执行方案(解)。

为寻求最优解,在满足截止期的前提下进行多次求解以形成方案集,方案集经评估后生成最优方案。但如果在接近系统响应截止期的时刻仍没有解产生时,对于某些特定任务首要的问题是考虑无人系统的生存,此时需要提供一种机制使智能体进入独立任务处理状态,即变自主权任务处理<sup>[49]</sup>。

### 3.2 体系结构

地面无人系统多智能体形成一个智能体联盟,组成多智能体联盟结构。多智能体联盟是物理上的分布,每个智能体联盟映射一个分布式节点。联盟内的智能体需要相互通信完成不同子任务的求解。同时,针对对群体多任务处理,智能体联盟间通过

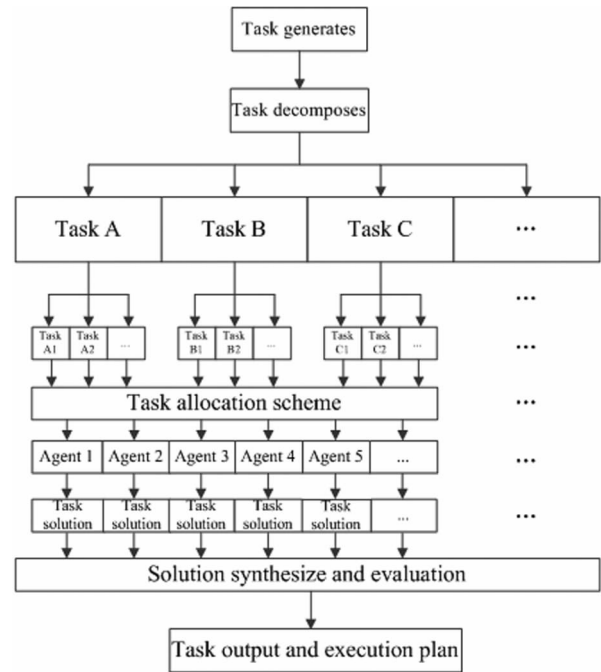


图13 面向地面无人系统的任务协同模型

Fig. 13 Task cooperative model of unmanned ground system

分布式节点内的协助智能体通信实现系统总体任务的分解、分配和求解。多智能体联盟结构能充分映射多主体任务处理的分布式任务求解过程。地面无人系统包括多个智能体,每个智能体面向不同的子任务,如目标识别智能体、态势评估智能体、路径规划智能体等。

建立多智能体分布式协同任务分配体系结构如图14所示,各智能体在自治计算和规划的基础上,通过相互协商实现任务的动态分配。图14所示的体系结构中,在地面指挥控制系统中设计了全局智能体对所有个体进行统一管理和控制。任务开始前,全局智能体中的集中式算法可以完成预先任务分配。任务执行过程中,全局智能体在各个体协商的结果之上进行协调,但在战场态势发生重大变化时,全局智能体可以在较粗的时间粒度上对任务进行全局的调整和重新分配<sup>[50]</sup>。

## 4 结束语

随着控制、通信、计算机技术的交叉融合,多智能体协同控制得到各国学者的广泛关注,本文从协同控制的两个方面,即行为协同和任务协同,重点阐述了近年来国内外的相关研究工作。值得指出的是,以地面无人系统为对象的多智能体协同控制目前还只处在理论完善和逐渐成熟的发展阶段,就实



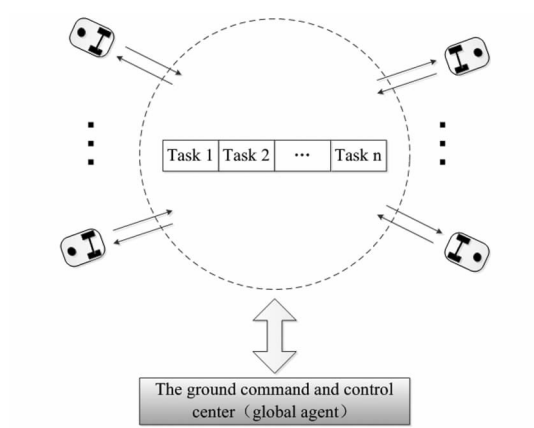


图 14 分布式协同任务分配体系结构

Fig. 14 Schematics of distributed task allocation system

际应用而言,如何在已有简化模型的基础上,利用现代分析方法对控制对象建立更具一般性的模型,并发展更具普适性的控制算法是今后研究的一个重点和方向。同时,基于多智能体的地面无人系统协同控制的研究基础在于无线传感器网络,广义上说,这也是一种基于物联网的控制系统,如何将现有的协同控制相关问题的研究结合并扩展至新兴物联网领域也是一个值得关注的研究方向。目前笔者所在的研究团队针对地面无人系统的多智能体平台结合物联网技术开展了相关研究工作。基于 ZigBee 通讯技术,在每个智能小车上装载通讯模块,如图 15 所示,通过智能小车之间的实时通信,以及领导者的指挥调度,搭建了智能体群控制策略研究的实验平台,如图 16 所示,在此平台上研发了相关的协同控制算法。每台小车通过与邻居小车的局部通讯,在中心领导者的指挥调度下,实现群体行为的一致性以及形成固定的队列阵型。

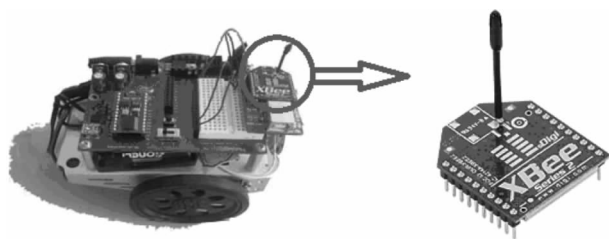


图 15 智能体小车

Fig. 15 An agent car

近年来在自动控制顶级刊物《IEEE Transactions on Automatic Control》上也出现了利用切换系统处理方法研究具有切换通信拓扑的多智能体系统的论文<sup>[51]</sup>,表明切换系统理论在多智能体系统

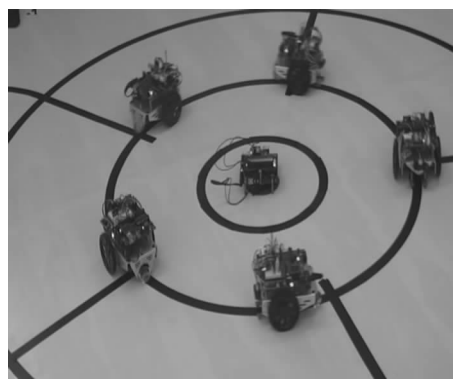


图 16 群智能控制平台

Fig. 16 Cluster control platform

中具有相应的建模与应用场景。笔者所在团队前期在随机及采样数据切换系统理论方面进行了深入研究<sup>[52-53]</sup>。结合网络环境中的随机干扰和数据采集,有望进一步将该方法应用到多智能体系统网络控制平台当中。此过程实现的难点在于如何克服 ZigBee 通讯协议的有限带宽及通信距离的约束。因此,通信受限条件下的多智能体协同控制问题也将是今后理论与实际应用所面临的困难。

## 参 考 文 献

- 1 胡鹏,石纯一,王克宏. 开放的分布式人工智能. 软件学报, 1995, 6(10): 607 ~ 613 (Hu P, Shi C Y, Wang K H. Open distributed artificial intelligence. *Journal of Software*, 1995, 6(10): 607 ~ 613 (in Chinese))
- 2 Vicsek T, Czirók T, Ben-Jacob E, Cohen I, Shochet O. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles. *Physical Review Letters*, 1995, 75(6): 1226 ~ 1229
- 3 Jadbabaie A, Lin J, Morse A S. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rule. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(6): 988 ~ 1001
- 4 Olfati-Saber R, Fax J A, Murray R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems. *Proceedings of IEEE*, 2007, 95(1): 215 ~ 233
- 5 Ren W, Beard R W. Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control. London, UK: Springer-Verlag, 2008
- 6 孙一杰,张国良,张胜修. 一类异构多智能体系统有向图下的广义平均一致性分析. 动力学与控制学报, 2015, 13(2): 154 ~ 160 (Sun Y J, Zhang G L, Zhang S)

- X. Generalized average consensus analysis for a class of heterogeneous multi-agent system on digraphs. *Journal of dynamics and control* , 2015 ,13( 2) : 154 ~ 160 ( in Chinese ) )
- 7 Zuo Z Y , Tie L. A new class of finite-time nonlinear consensus protocols for multi-agent systems. *International Journal of Control* , 2014 , 87( 6) : 1243 ~ 1251
- 8 Shang Y L. Finite-time consensus for multi-agent systems with fixed topologies. *International Journal of Systems Science* , 2012 , 43( 3) : 499 ~ 506
- 9 Saber R O. Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory. *IEEE Transactions on Automatic Control* , 2006 , 51( 3) : 401 ~ 420
- 10 Tanner H , Jadbabaie A , Pappas G. Stable flocking of mobile agents , part I: Fixed topology. In: The 42<sup>nd</sup> IEEE Conference on Decision and Control , New York , USA: IEEE Press , 2003. 2010 ~ 2015
- 11 Tanner H , Jadbabaie A , Pappas G. Stable flocking of mobile agents , part II: Dynamic topology. In: The 42<sup>nd</sup> IEEE Conference on Decision and Control , New York , USA: IEEE Press , 2003. 2016 ~ 2021
- 12 Tanner H G , Jadbabaie A , Pappas G J. Flocking in fixed and switching networks. *IEEE Transactions on Automatic Control* , 2007 , 52( 5) : 863 ~ 868
- 13 Cucker F , Smale S. Emergent behavior in flocks. *IEEE Transactions on Automatic Control* , 2007 , 52( 5) : 852 ~ 862
- 14 Su H , Wang X , Yang W. Flocking in multi-agent systems with multiple virtual leaders. *Asian Journal of Control* , 2008 , 10( 2) : 238 ~ 245
- 15 Su H , Wang X , Lin Z. Flocking of multi-agents with a virtual leader. *IEEE Transactions on Automatic Control* , 2009 , 54( 2) : 293 ~ 307
- 16 Lee D , Spong W. Stable flocking of multiple inertial agents on balanced graphs. *IEEE Transactions on Automatic Control* , 2007 , 52( 8) : 1469 ~ 1475
- 17 Lin J , Morse A , Anderson B D O. The multi-agent rendezvous problem. In: The 42<sup>nd</sup> IEEE Conference on Decision and Control , New York , USA: IEEE Press , 2003. 1508 ~ 1513
- 18 Lin J , Morse A S , Anderson B D O. The multi-agent rendezvous problem , part 1: the synchronous case. *SIAM Journal on Control and Optimization* , 2007 , 46( 6) : 2096 ~ 2119
- 19 Lin J , Morse A S , Anderson B D O. The multi-agent rendezvous problem , part 2: the asynchronous case. *SIAM Journal on Control and Optimization* , 2007 , 46( 6) : 2120 ~ 2147
- 20 Ren W , Beard R W , McLain T W. Coordination variables and consensus building in multiple vehicle systems in cooperative control. Berlin: Springer-Verlag , 2005
- 21 Kingston D , Ren W , Beard R. Consensus algorithms are input-to-state stable. In: 2005 American Control Conference , New York , USA: IEEE Press , 2005: 1686 ~ 1690
- 22 Cortes J , Martinez S , Bullo F. Robust rendezvous for mobile autonomous agents via proximity graphs in arbitrary dimensions. *IEEE Transactions on Automatic Control* , 2006 , 51( 8) : 1289 ~ 1298
- 23 Angeles A R , Nijmeijer H. Cooperative synchronization of robots via estimated state feedback. In: The 42<sup>nd</sup> IEEE Conference on Decision and Control , New York , USA: IEEE Press , 2003. 1514 ~ 1519
- 24 俞辉. 多智能体机器人协调控制研究及稳定性分析 [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学 , 2007 ( Yu H. Research on cooperative control and analysis of stability for multi-agent robots [PhD Thesis]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology , 2007 ( in Chinese ) )
- 25 曹志强 张斌 谭民. 基于行为的多移动机器人实时队形保持. 高技术通信 , 2001 , 11( 10) : 74 ~ 77 ( Cao Z Q , Zhang B , Tan M. Behavior-based real-time formation keeping for multiple mobile robots. *High Technology Letters* , 2001 , 11( 10) : 74 ~ 77 ( in Chinese ) )
- 26 Marshall J , Broucke M , Francis B. A pursuit strategy for wheeled-vehicle formations. In: The 42<sup>nd</sup> IEEE Conference on Decision and Control , New York , USA: IEEE Press , 2003: 2555 ~ 2560
- 27 Glavaski S , Chaves M , Day R , Nag P , Williams A , Zhang W. Vehicle networks: achieving regular formation. In: 2003 American Control Conference , New York , USA: IEEE Press , 2003: 4095 ~ 4100
- 28 Gupta V , Hassibi B , Murray R. Stability analysis of stochastically varying formations of dynamic agents. In: The 42<sup>nd</sup> IEEE Conference on Decision and Control , New York , USA: IEEE Press , 2003: 504 ~ 509
- 29 Lin Z , Francis B , Maggiore M. Necessary and sufficient graphical conditions for formation control of unicycles. *IEEE Transactions on Automatic Control* , 2005 , 50( 1) : 121 ~ 127
- 30 张瑞雷 李胜 陈庆伟 杨春. 复杂地形环境下多机器人

- 编队控制方法. 控制理论与应用, 2014, 31(4): 531 ~ 537 (Zhang R L, Li S, Chen Q W, Yang C. Formation control for multi-robot system in complex terrain. *Control Theory and Applications*, 2014, 31(4): 531 ~ 537 (in Chinese))
- 31 Porfiri M, Roberson D G, Stilwell D J. Tracking and formation control of multiple autonomous agents: a two-level consensus approach. *Automatica*, 2007, 43(8): 1318 ~ 1328
- 32 Lafferriere G, Williams A, Caughman J, Veerman J. Decentralized control of vehicle formations. *Systems and Control Letters*, 2005, 54(9): 899 ~ 910
- 33 王保防, 张瑞雷, 李胜, 陈庆伟. 基于轨迹跟踪车式移动机器人编队控制. 控制与决策, 2015, 30(1): 176 ~ 180 (Wang B F, Zhang R L, Li S, Chen Q W. Formation control for car-like mobile robots based on trajectory tracking. *Control and Decision*, 2015, 30(1): 176 ~ 180 (in Chinese))
- 34 Hu J, Yuan H. Collective coordination of multi-agent systems guided by multiple leaders. *Chinese Physics B*, 2009, 18(9): 3771 ~ 3776
- 35 Cao Y, Ren W. Containment control with multiple stationary or dynamic leaders under a directed interaction graph. In: Proceedings of the 48<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control and the 28<sup>th</sup> Chinese Control Conference, New York, USA: IEEE Press, 2009: 3014 ~ 3019
- 36 Zheng Y S, Wang L. Containment control of heterogeneous multi-agent systems. *International Journal of Control*, 2014, 87(1): 1 ~ 8
- 37 吴治海. 网络环境下的多智能体系统一致性问题研究 [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2011 (Wu Z H. Research on consensus problems of multi-agent systems under network environments [PhD Thesis]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011 (in Chinese))
- 38 Moreau L. Stability of multiagent systems with time-dependent communication links. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(2): 169 ~ 182
- 39 颜青, 马米花, 吴海亮. 具有引导者的多智能体网络系统的脉冲一致性. 动力学与控制学报, 2012, 10(2): 152 ~ 156 (Yan Q, Ma M H, Wu H L. Impulsive consensus of networked multi-agent system with a leader. *Journal of dynamics and control*, 2012, 10(2): 152 ~ 156 (in Chinese))
- 40 Ören P, Fiorelli E, Leonard N E. Cooperative control of mobile sensor networks: adaptive gradient climbing in a distribute environment. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(8): 1292 ~ 1302
- 41 徐德刚, 桂卫华. 基于网络一致性的多智能体跟踪控制. 控制工程, 2010, 17(3): 304 ~ 308 (Xu D G, Gui W H. Tracking control of multiagents based on consensus of networks. *Control Engineering of China*, 2010, 17(3): 304 ~ 308 (in Chinese))
- 42 余莹莹, 方华京. 多智能体系统的有限时间跟踪控制. 系统工程与电子技术, 2011, 33(8): 1871 ~ 1874 (Yu Y Y, Fang H J. Finite-time tracking control for multi-agent systems. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(8): 1871 ~ 1874 (in Chinese))
- 43 于镝, 伍清河, 王垚. 非线性网络有限时间分布式跟踪控制. 控制与决策, 2013, 28(10): 1491 ~ 1496 (Yu D, Wu Q H, Wang Y. Finite time distributed tracking control of nonlinear networks. *Control and Decision*, 2013, 28(10): 1491 ~ 1496 (in Chinese))
- 44 Shi G D, Sou K C, Sandberg H, Johansson K H. A graph-theoretic approach on optimizing informed-node selection in multi-agent tracking control. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2014, 267(1): 104 ~ 111
- 45 Richard R, Brook S. Distributed target classification and tracking in sensor networks. *Proceedings of the IEEE*, 2003, 91(8): 1163 ~ 1171
- 46 杨津晓, 丁慧勇, 程远国. 基于多智能体的传感器网络协同目标跟踪技术研究. 军事运筹与系统工程, 2007, 21(3): 43 ~ 47 (Yang J X, Ding H Y, Cheng Y G. Research on cooperative target tracking technology based on multi-agent sensor network. *Military Operations Research and Systems Engineering*, 2007, 21(3): 43 ~ 47 (in Chinese))
- 47 Chu M, Haussecker H, Zhao F. Scalable information-driven sensor querying and routing for ad hoc heterogeneous sensor networks. *The International Journal of High Performance Computing Applications*, 2002, 16(3): 90 ~ 110
- 48 刘宏强, 魏贤智, 付昭旺, 周中良. 有人机/无人机编队协同攻击任务分配方法研究. 电光与控制, 2013, 20(6): 16 ~ 19 (Liu H Q, Wei X Z, Fu Z W, Zhou Z L. Cooperative task assignment of manned/unmanned aerial vehicle formation in air combat. *Electronics Optics and Control*, 2013, 20(6): 16 ~ 19 (in Chinese))
- 49 于鑫. 基于多 Agent 联盟的无人机群任务协同控制. 软件导刊, 2009, 8(11): 157 ~ 159 (Yu X. Mission coop-

- eration control of unmanned aerial vehicles based on multi-agents. *Software Guide*, 2009, 8(11): 157 ~ 159 (in Chinese))
- 50 龙涛 朱华勇 沈林成. 多 UCAV 协同中基于协商的分布式任务分配研究. *宇航学报*, 2006, 27(3): 457 ~ 462 (Long T, Zhu H Y, Shen L C. Negotiation-based distributed task allocation for cooperative multiple unmanned combat aerial vehicles. *Journal of Astronautics*, 2006, 27(3): 457 ~ 462 (in Chinese))
- 51 Yang H, Jiang B. Stabilization of switched nonlinear systems with all unstable modes: application to multi-agent systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, 56(9): 2230 ~ 2235
- 52 Wang R H, Xing J C, Wang P, Yang Q L, Xiang Z R. Finite-time stabilization for discrete-time switched stochastic linear systems under asynchronous switching. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2014, 36(5): 588 ~ 599
- 53 Wang R H, Xing J C, Zhou C, Wang P, Yang Q L. Finite-time asynchronously switched control of switched systems with sampled-data feedback. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2014, 33(12): 3713 ~ 3738

## AN OVERVIEW ON MULTI-AGENTS COOPERATIVE CONTROL OF UNMANNED GROUND SYSTEM\*

Wang Ronghao<sup>†</sup> Xing Jianchun Wang Ping Wang Chunming

(College of Defense Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

**Abstract** Based on the current research status of multi-agents system control theory and technology, the paper makes a detailed overview for unmanned ground systems. From two aspects of behaviour and task cooperative control for multi-agents, the relevant theory and application problem is discussed. Moreover, some existed open problems are presented and a possible future development is proposed. For unmanned ground systems, cooperative control will be of great importance in promoting social and military benefits and maximizing the executive function of ground mission.

**Key words** multi-agents, behaviour cooperation control, task cooperation control, unmanned ground systems, control theory

Received 24 December 2014 revised 11 February 2015.

\* The paper supported by Military 2110 Leading Academic Discipline Project (20130013) and the Pre-Research Foundation of PLA University of Science and Technology of China (KYGZLXY1121)

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: wrh@893.com.cn