

多智能体协同覆盖控制及其在地灾监测中的应用

翟超 中国地质大学(武汉)

1、引言

多智能体协同覆盖控制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协同感应环境和执行特定的任务,如搜救、追捕、边境巡逻、环境监视、深海探测等。图 1^[1]展示了多智能体协同覆盖控制的四个应用实例,包括卫星定位、农作物收割、无线传感网络节点部署和无人机集群协同攻击。以全球卫星定位系统为例,24 颗卫星以 12 小时的周期环绕地球运行,要实现全球范围的精准定位,地面上的任意一点在任意时刻需要同时观测到 4 颗以上的卫星,即任意一点需要同时被 4 颗以上卫星覆盖。另外,现代农

业生产过程已经大量使用智能化、无人化农用机械,如何高效调度这些机械设备,完成特定种植区的农业生产任务(如耕种、作物采摘和浇灌等),也可以看作协同覆盖控制问题。虽然关于多智能体覆盖的概念目前还没有明确的定义,但普遍认为覆盖的基本问题是对智能体(如机器人或智能传感器)进行路径规划,使之遍访工作环境中的每一点或者部署传感器的位置以优化某项性能指标。在覆盖过程中,一般要求机器人或传感器完成覆盖所用时间尽可能短,重复路径尽量少以及覆盖面积尽可能大^[2]。因此,多智能体协同覆盖有着重要的理论和应用价值,也是传感器网络或多机器人网络的研究热点。



图1 多智能体协同覆盖的应用实例^[1]

2. 覆盖类型及主要进展

依照不同的角度，协同覆盖问题可以有多种分类，比如从数学工具的角度讲，有确定性覆盖和随机性覆盖；从多机器人合作完成任务的角度可以划分为地毯覆盖、栅栏覆盖、清扫覆盖^[3]（如图2所示，绿色圆环表示智能体的感知区域，圆环中心是智能体的位置，箭头指示智能体的运动方向）。地毯覆盖的目的是部署给定区域内的多个智能体使之能够最大化覆盖区域内目标的监测概率。栅栏覆盖的目的是部署一组智能体使之形成一条栅栏以保护区域内的目标，同时使入侵者穿过栅栏时被监测到的概率最大。简单来说，清扫覆盖可以被视为一条移动的栅栏，其目的是以某种方式组织多个智能体使之清扫或监测给定的区域，同时要在清扫或监测效率与区域覆盖的完整性之间做好平衡。依照覆盖过程中智能体运动状态的不同，可以分为静态覆盖和动态覆盖。静态覆盖的目标是将一组智能体放置在给定空间的固定位置上，使得环境中的每个点在每个时刻都能被覆盖。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

别是当环境信息未知时是不可能的。当智能体的数量不足以静态覆盖这个目标区域时，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，动态覆盖算法的研究要比静态覆盖复杂得多。

从覆盖对象的特点出发，可以将多智能体覆盖问题分为区域覆盖、边界覆盖和目标覆盖。区域覆盖的一个重要方法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，从而简化问题难度。这种“分而治之”的思想在很多研究中有所体现，其中较经典的区域划分方式为Voronoi分割。利用Lloyd算法，先根据智能体的位置完成对目标区域的Voronoi分割，然后计算出各个Voronoi子区域的质心，并让每个智能体运动到自己所在子Voronoi区域的质心，再根据下一步每个智能体新的位置，对要覆盖的目标区域作重新划分，如此反复直到算法收敛^[4]。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控制，但存在计算复杂度高的缺陷。传感器网络覆盖作为区域覆盖的重要形式，

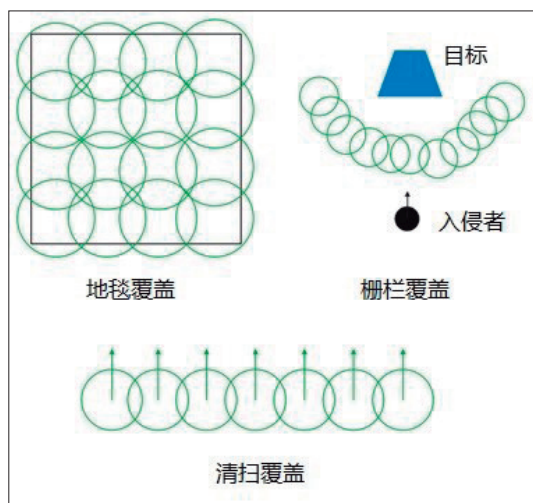


图2 多机器人系统的覆盖类型示意图

其主要研究两类问题：一类是最优部署问题，即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；另一类是重新部署问题，即传感器的移动策略使得传感器运动到最优位置上。研究传感器网络最优部署的一个著名例子是艺术馆问题^[5]：在一个由若干个顶点构成的非凸多边形（比如艺术馆）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，需要确定监控器的最少个数以及配置监控器的最优位置。

边界覆盖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，人们往往先要确定火灾的边界^[6]。在救火过程中，火势的不断变化导致火势边界也在变动。要很好地控制火势，用于灭火的机器人网络必须随火势边界调整覆盖位置，这显然是一个运动边界覆盖问题。栅栏覆盖就是在边界上布置一组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，栅栏覆盖要发现或监测这些穿越的目标。

有时候人们只对覆盖特定目标感兴趣。如果目标是静止的，这就与区域覆盖类似（给定区域就是要覆盖的目标）。实际上，目标覆盖的主要研究对象是带有不确定性的动态目标。因此，多智能体所覆盖的区域不再事先给定，而是随着目标的运动和不确定信息的出现而不断变化。为此，人们需要考虑对该目标可能出现的区域进行估计，随后对有问题区域进行包围或覆盖。目标覆盖问题需要保证某个特定目标所占据的区域或其边界能被充分覆盖并完全处于监视之下。要注意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，那

么该多智能体系统就完成抓捕或监控目标的任务。当目标运动时，智能体要协同获取或估计目标的速度等信息以实现对该目标运动行为的限制和追踪。通常，每个追踪者有一定的感知或执行半径，通常每个追踪者由一个圆盘所描述。圆盘的中心表示追踪者的位置，圆盘所占据的区域代表追踪者的感知范围或者其执行器的执行范围。这样追捕问题就可看成这些追踪者（圆盘）对目标的覆盖或围困。

3. 覆盖控制方法

多智能体协同覆盖控制的研究方法归纳起来有以下几种：胞腔分解法、编队控制法、误差函数法和群体智能法（见图3）。胞腔分解法是指根据问题的特点将整个区域分解成若干子区域，每个智能体既要与邻近的智能体通信协调又要负责覆盖自己的子区域。这种方法通过任务分配使得原来的协同覆盖问题得以简化，被广泛采用。编队控制法是指通过设计一定的控制法则，使得智能体能够排成预先给定的队形，然后由整个编队来

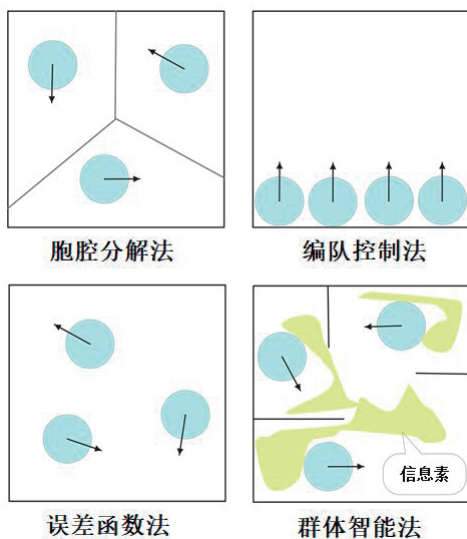


图3 覆盖控制方法示意图

实现对给定区域的覆盖。这样，覆盖问题就转化为多智能体编队的路径规划问题。误差函数法的基本思想是通过建立关于期望覆盖水平与实际覆盖水平之间误差的势能函数，来驱动各个智能体朝向覆盖水平低的方向移动，从而完成覆盖任务。受到生物群集运动现象（如蚁群、蜂群等的觅食行为）的启发，每个智能体在覆盖完某一区域后会留下痕迹（称为信息素），表明该区域已经被覆盖过以避免重复覆盖。如此，智能体之间以及智能体与环境之间就通过信息素来交互协调。这种方法可以用于覆盖比较复杂的环境，有很强的适应性，但难以进行严格的理论分析。

4. 覆盖应用案例

下面介绍三种多智能体协同覆盖控制算法，分别在区域清扫、导弹拦截和环境监测方面有潜在的应用价值。

4.1 区域清扫

扫地机器人已经进入千家万户，在大多数情况下，只有一个扫地机器人进行清扫工作。若有多个扫地机器人一起清扫房间，如何用最短时间完成清扫任务是一个值得研究的问题。假设每个扫地机器人只有有限的感知和通信能力，房间内灰尘（即负荷）的分布是不均匀的，而且分布信息事先未知。如何为多个扫地机器人设计一种分布式协同清扫覆盖算法，在尽可能短的时间完成房间的清扫任务？如果房间内的灰尘分布信息事先已知，同时每个扫地机器人都可以获取该信息，最佳清扫方案是将整个房间分为若干个子区域，

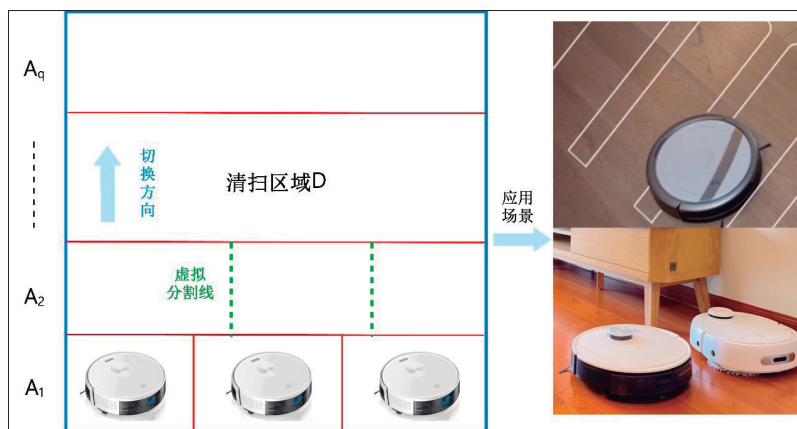


图4 多智能体协同清扫覆盖框架及应用场景

每个扫地机器人恰好占据一个子区域，而且每个子区域内的灰尘或负荷量都相等。若扫地机器人的清扫效率相同，就能以最短的时间完成清扫任务（即最优清扫时间 T^* ）。然而，由于负荷的全局分布信息未知，难以事先对覆盖区域进行负荷等分，实际覆盖算法的清扫时间 T 往往大于最优清扫时间 T^* 。实际清扫时间与最优时间之差 $T - T^*$ 可以被用来衡量覆盖算法的优劣。

为此，笔者提出如下分布式清扫覆盖方法，使得子区域清扫和任务分配同时执行以节省时间^[7]。具体过程包括：1) 首先将整个清扫区域 D 分成若干个带状区域 A_1, A_2, \dots, A_q ；2) 根据智能体数量将每个带状区域再分割成多个子区域，每个智能体负责清扫一个子区域；3) 智能体在清扫当前带状区域的子区域时，同时分割下一个带状区域的负荷，使得每个子区域上的负荷尽可能相等；4) 所有智能体清扫完当前带状区域后一起移动以切换到下一个带状区域，重复3)中的操作直到清扫完整个区域（见图4）。在进行分割时，子区域之间的边界执行分布式等分算法以实现子区域之间的负荷平衡。当时间足够长时，每个智能体只须跟最近的邻居通信就能实现子区域负荷等分。

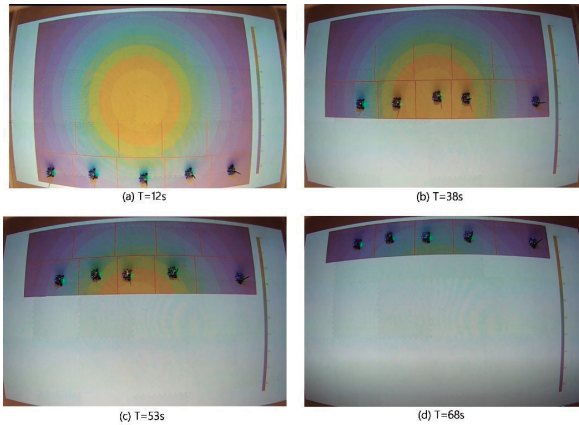


图5 多机器人系统清扫覆盖实验过程

图5显示了上述清扫算法在多机器人系统上的实验过程。5个机器人对矩形区域(房间)进行清扫,红色线段代表子区域边界。区域颜色表示负荷(灰尘)分布密度大小,黄色程度愈深表示负荷密度愈大,蓝色程度愈深表示负荷密度愈小。可见,大概68秒后基本完成了整个区域的清扫任务。

4.2 导弹拦截

多智能体协同覆盖控制的思想还可用于设计协同拦截算法,提升高速动态目标的拦截概率。其中,一个极具潜力的应用场景就是导弹拦截。如图6所示,动态目标移动过程中会释放诱饵以干扰拦截器,而拦截器能够实时量测目标的运动状态。一旦目标进入拦截器的杀伤范围(虚线圆圈),目标就被击毁,表示拦截成功。如何协调多个拦截器的运动以提升动态目标的拦截概率是一个重要的研究课题。为简单起见,我们考虑二维平面上的运动目标拦截,提出一种基于覆盖控制的协同拦截算法^[8]。执行步骤如下:在拦截过程中,每个拦截器利用卡尔曼滤波方法估计运动目标的位置,得到其概率分布函数,然后根据拦截器的杀伤范围构造一个联合拦截概率函数,通过布局多个拦截器的位置以最大化该函数值。利用梯度

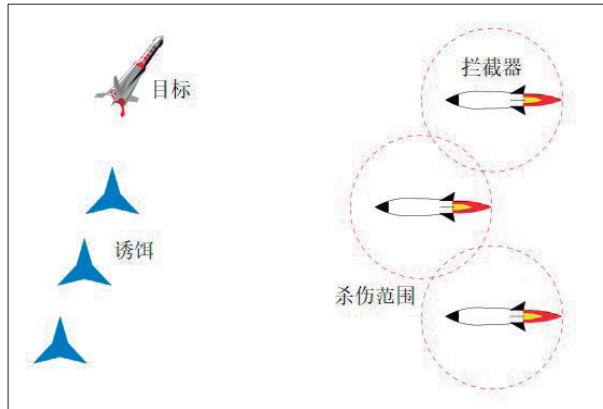


图6 多拦截器协同覆盖控制

法在线求得拦截器的最佳位置,设计最优控制器驱动每个拦截器到达各自的最佳位置,以上操作迭代执行,直到多拦截器集群与目标交汇。上述拦截算法可以被视为一种主动栅栏覆盖算法,即智能体生成栅栏后主动拦截目标,而非被动地等待目标来袭。仿真结果表明,增加拦截器数量可以显著提升目标拦截概率,同时能够弥补拦截器机动性上的不足。

4.3 环境监测

多传感器网络用于环境监测的一个重要任务是及时识别特定灾害事件(如森林火灾、滑坡和雪崩等)的发生。研究中通常假设这些灾害事件

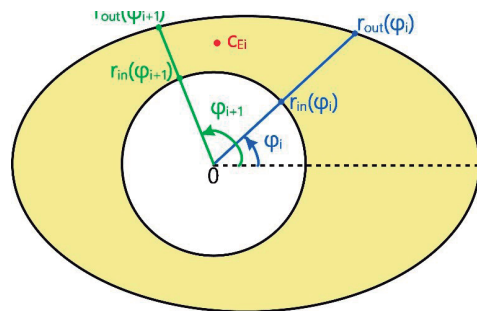


图7 多传感器网络环境监测

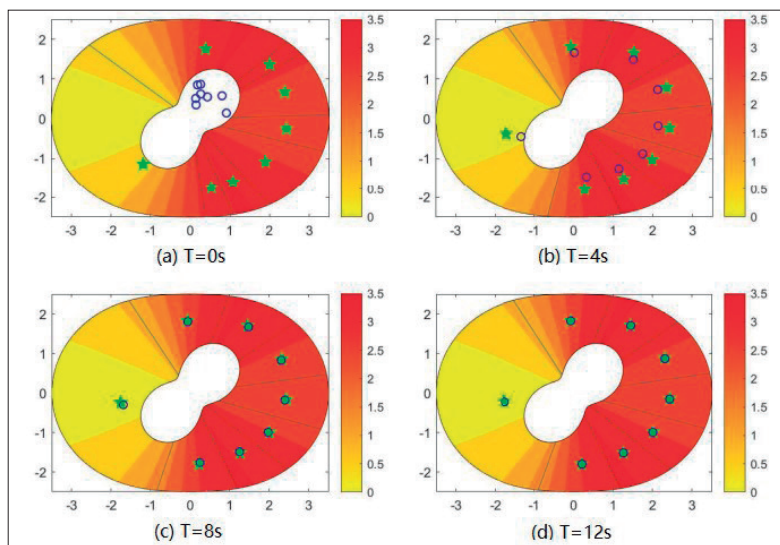


图8 多智能体覆盖仿真过程

是随机的，而且它们的概率密度函数已知。通过设计一个基于联合监测概率的目标函数，环境监测任务就转化为在给定区域部署传感器以优化随机事件的联合监测概率问题。尽管 Voronoi 分割可以有效处理上述环境监测问题，但当监测环境比较复杂（如非凸区域）且要求子区域负荷等分时，Voronoi 分割方法可能导致子区域不连通等问题，影响系统监测性能。

为解决上述问题，可以设计一种旋转指针分割算法，可用于处理非凸环境的监测问题，同时确保子区域之间负荷（灾害事件发生概率）相等^[9]。每个智能体配备一枚虚拟旋转指针，从原点 O 指向区域边界。如图 7 所示，非凸环境的内外边界可以由极坐标函数表示，即 $r_{in}(\varphi_i)$ 和 $r_{out}(\varphi_i)$ ，每个智能体的子区域由相邻两个指针和覆盖区域的内外边界围成。通过自动调节指针相角，实现子区域之间负荷平衡，即每个智能体被分配相同的任务量。与此同时，每个智能体计算各自子区域的质心坐标 c_{Ei} ，通过比例控制驱动自己移动到质心。指针分割算法和智能体的运动同时进行，指针分割算法可以迅速收敛。此外，所提出的优化

策略可以使监测概率以任意精度逼近最优值。图 8 显示了基于旋转指针分割方法的多智能体覆盖仿真过程。蓝色圆圈表示智能体位置，绿色五角星代表子区域质心，监测环境是一个中空的环状区域。灰色线条指示旋转指针（即子区域边界），区域颜色衡量灾害事件发生概率的大小，颜色愈深意味着概率密度愈大。初始时刻，智能体都位于环状区域的中空部分，随后在控制器驱动下朝各自子区域的质心移动，8 秒时区域分割基本完成，12 秒后智能体也抵达各自子区域的质心，监测网络部署完毕。

5. 地灾监测中的覆盖控制问题

多传感器网络具有维护简便、可扩展性强、易于远程监控等一系列优点，已被广泛用于地灾监测预警。2007 年 5 月 10 日，湖北巴东县清太坪镇发生滑坡地质灾害，由于监测网络及时发布预警信息，各部门迅速启动应急预案，救援人员和装备及时到位，避免了人员伤亡事故的发生。显然，在上述地灾预警成功案例中传感器监测网络功不可没。当前研究侧重于利用最新技术（如物

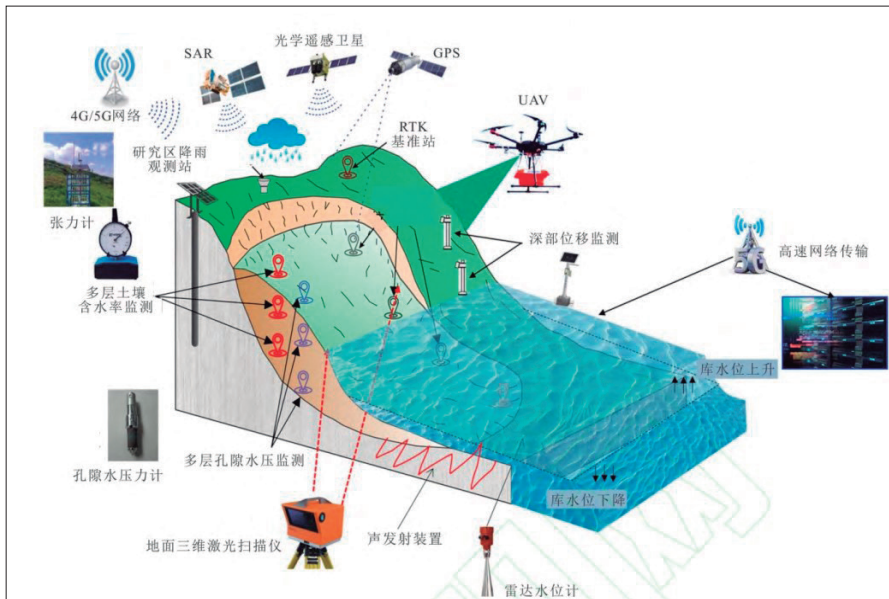


图9 地灾监测中的覆盖控制

联网、新一代移动通信、大数据和云计算)解决监测数据的精准采集、远程无线传输、监测系统的优化与集成以及关键信息快速挖掘与评价等问题,如图9所示。通常在现场调查和综合分析基础上,部署大量智能传感器节点,实时监测地表形变状况和各种诱发因素(如降雨、地下水位和土体含水率等),再将监测数据传递到数据中心进行预存储和预处理,最后融合多源数据对地质环境状况进行综合分析评价,构建多场一体化地灾监测网络,为应急决策提供辅助支持。

多智能体协同覆盖控制为地灾监测预警提供了一种有效的研究框架。考虑智能体的感知模式以及地质灾害的时空分布和演化特性,通过设计多智能体覆盖控制算法,在监测区域内协调部署一定数量的智能传感器,有助于克服传统监测方法响应速度慢、易受干扰和环境适应能力差等缺陷,提升多传感器网络的预警水平。然而,典型地质灾害(如滑坡、崩塌和泥石流)的演化过程及其诱发的扰动给覆盖控制设计带来了诸多的困难。例如,滑坡灾害演化过程中,多传感器网络

需要调节感知模式以获取关键状态信息(如孔隙压力、地下水位、土体含水率)。同时,传感器节点受到不确定扰动影响,易导致功能受损而无法正常工作。另外,复杂地表系统的各个部分之间相互关联,滑坡演化过程由多种因素相互作用“涌现”产生,导致滑坡事件具有突发性和不确定性,发生时间和范围难以准确预测。现有的传感器网络监测与控制方法侧重于量测特定的状态信息,忽视了地表系统各部分之间的关联性及其可能的突变行为,难以得到及时且可靠的监测结果。以上技术挑战也为多智能体协同覆盖控制提供了难得的发展机遇。具体可以概括为以下问题:如何考虑地表系统各部分的动态关联,设计协同覆盖控制算法使得多传感器网络能够适应环境变化,快速调整感知模式,及时获取地灾演化过程的典型特征性信号,从而提升地灾监测的时效性和可靠性。

经历了人工经验判断、确定性预报模型、统计预报模型和非线性预报模型等多个发展阶段后,未来地灾监测预警的研究借助协同覆盖控制方法,

和人工智能和大数据技术,必将在灾害识别的准确性、时效性以及监测网络的环境适应性方面取得新的长足进展。

6. 结束语

以上对多智能体协同覆盖控制的研究进展和主要方法进行了概述,介绍了笔者研究的三个覆盖应用案例,初步探讨了覆盖控制应用于地灾监测面临的技术挑战。由于篇幅所限,部分内容不能进一步具体展开,难免存在一些疏漏。从本质上讲,协同覆盖控制可以被视为一种处理复杂系统不确定性的优化方法,系统的特点和覆盖目标决定了控制策略的设计思路。由于覆盖控制问题往往跟外部环境相关联,在某种程度上增加了控制器设计的难度,也体现了多智能体协同行为的多样性。

参考文献

- [1] Zhai, C., Zhang, H. and Xiao, G. Cooperative Coverage Control of Multi-Agent Systems and its Applications[M]. Vol. 408. Springer, 2021.
- [2] 蔡自兴,崔益安,多机器人覆盖技术研究进展,控制与决策,2008,23(5):481-486.
- [3] Gage, D. Command control for many-robot systems, Proc. Annual AUVS Technical Symposium, 1992, 22-24, Huntsville, Alabama, USA.
- [4] Cortes, J., Martinez, S., Karatas, T., Bullo, F. Coverage control for mobile sensing networks. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20(2): 243-255.
- [5] O'rourke, J. Art Gallery Theorems and Algorithms (Vol. 57). Oxford: Oxford University Press, 1987.
- [6] Casbeer, D. W., Kingston, D. B., Beard, R. W., McLain, T. W. Cooperative forest fire surveillance using a team of small unmanned air vehicles. International Journal of Systems Science, 2006, 37(6): 351-360.
- [7] Zhai, C., Hong, Y. Decentralized sweep coverage algorithm for multi-agent systems with workload uncertainties. Automatica, 2013, 49(7): 2154-2159.
- [8] Zhai, C., He, F., Hong, Y., Wang, L., Yao, Y. Coverage-based interception algorithm of multiple interceptors against the target involving decoys. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2016, 39(7): 1647-1653.
- [9] Zhai, C., Fan, P. Distributed coverage control of multi-agent systems with load balancing in non-convex environments. arXiv preprint arXiv: 2209.01532, 2022
- [10] Dou, J., Xiang, Z., Xu, Q., Zheng, P., Wang, X., Application and development trend of machine learning in landslide intelligent disaster prevention and mitigation. Earth Science, DOI:10.3799/dqkx.2022.419, 2022



【作者简介】翟超,理学博士,中国地质大学(武汉)自动化学院教授,博士生导师,IEEE高级会员,湖北省人工智能学会理事,2013年获中国科学院数学与系统科学研究院复杂系统与控制专业博士学位,先后在英国布里斯托大学、香港大学和新加坡南洋理工大学从事科研工作,入选湖北省高层次人才计划。研究兴趣包括多智能体覆盖控制、韧性系统和交互运动协同,发表学术论文70余篇,出版英文专著1部。