



基于虚拟排斥力的移动多智能体覆盖控制动态博弈算法

宿浩¹, 张宝琳^{2*}, 籍艳², 蔡智辉³, 薛健⁴, 马慧¹, 郑元世^{5*}

1. 中国海洋大学信息科学与工程学院, 青岛 266100

2. 青岛科技大学自动化与电子工程学院, 青岛 266061

3. 中国计量大学理学院, 杭州 310018

4. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049

5. 西安电子科技大学机电工程学院, 西安 710071

* 通信作者. E-mail: zhangbl2020@qust.edu.cn, zhengyuanshi2005@163.com

收稿日期: 2022-06-14; 修回日期: 2022-09-10; 接受日期: 2022-10-28; 网络出版日期: 2022-12-06

国家重点研发计划 (批准号: 2018AAA0100804)、国家自然科学基金 (批准号: 62273267) 和陕西省杰出青年基金项目 (批准号: 2022JC-46) 资助

摘要 为提高移动多智能体系统的覆盖控制效率, 通常要求移动智能体在覆盖控制过程中进行多信息甚至全信息交互. 在此情形下, 覆盖控制成本和能耗将大幅增加. 如何在提高移动智能体覆盖效率的同时, 尽可能降低控制成本一直是移动智能体覆盖控制领域的重要课题之一. 本文研究非完全信息条件下的移动多智能体覆盖控制方法, 提出了基于虚拟排斥力的移动多智能体覆盖控制合作博弈算法. 首先, 将移动多智能体集群分解为若干个子集群, 群中每个智能体只能观测到各自周围一定范围内其他智能体的信息, 将移动多智能体集群的覆盖控制问题转化为非完全信息条件下移动多智能体子群的合作博弈分布覆盖问题; 其次, 给出了各移动智能体子群的博弈规则, 并提出了一种基于虚拟排斥力的智能体分布覆盖博弈决策策略, 用以计算并确定集群中每个智能体在覆盖控制过程中的新候选位置; 第三, 将移动多智能体系统覆盖控制问题分解为以刚性虚拟结构为参照系的覆盖控制问题, 简化了多智能体系统覆盖控制中位移路径的规划设计. 仿真算例表明, 本文提出的基于虚拟排斥力的覆盖控制合作博弈算法, 可以实现不完全信息条件下移动多智能体系统的分布覆盖控制任务, 有效节约移动智能体的覆盖控制成本; 同时, 和已有的覆盖控制算法相比, 本文提出的动态合作博弈覆盖算法, 覆盖控制过程中智能体移动次数更少, 覆盖率更高.

关键词 动态博弈, 网络覆盖, 分布算法, 多智能体系统, 虚拟排斥力

引用格式: 宿浩, 张宝琳, 籍艳, 等. 基于虚拟排斥力的移动多智能体覆盖控制动态博弈算法. 中国科学: 信息科学, 2022, 52: 2195–2212, doi: 10.1360/SSI-2022-0219
Su H, Zhang B-L, Ji Y, et al. Dynamic game coverage control algorithms for multiple mobile agents through virtual repulsive force (in Chinese). Sci Sin Inform, 2022, 52: 2195–2212, doi: 10.1360/SSI-2022-0219

1 引言

移动智能体集群系统在灾难救援、环境监测、气象预报、智慧农业、空间探测和污染防治等领域的应用越来越多,近年来受到了人们的广泛关注^[1~3]。特别地,在很多场景下,需要移动智能体集群,如无人机群^[4~6]、多机器人集群^[7,8]以及移动传感器网络^[5,9]等协同作业完成相应任务。其中,在智慧农业^[8]、信息侦测^[10]以及灾难救援^[11]等作业过程中,通常要求无人机、传感器网络节点或机器人等移动智能体能够均匀分布于作业区域,或者要求覆盖面积或覆盖体积等作业覆盖率尽可能大;同时,在移动智能体满足分布覆盖指标的前提下,还通常要求移动智能体集群的覆盖能耗最小^[12],或者覆盖时间最小,或者移动路径最短。为此,基于给定的多智能体覆盖控制作业及其有关的覆盖控制指标,需要设计有效的移动智能体覆盖控制算法。事实上,作为多智能体集群系统领域一直以来的热点课题之一,移动智能体的覆盖控制算法研究具有重要的理论价值和应用前景^[13]。

为了提高多智能体集群的覆盖率,文献^[14]基于空气分子之间相互排斥和吸引的作用原理,提出了一种基于虚拟分子力的多智能体分布覆盖算法。该算法根据各智能体之间的距离计算相互作用力,进而完成智能体的位移移动,实现对指定区域的分布覆盖。基于该算法进行覆盖作业,能够取得较好的覆盖效果,但覆盖过程中需要获取所有智能体之间的距离来计算吸引力和排斥力的合力,且需要设定覆盖优化迭代的阈值。不难看出,一方面,该算法要求在整个分布覆盖过程中,各移动智能体之间的信息完全已知;另一方面,每次覆盖操作需要计算并保存各智能体之间的吸引力、排斥力及其合力,计算量较大,能耗较高。文献^[15]结合遗传算法和粒子群优化算法来改进分子虚拟力模型,进而提高了无线传感器网络移动节点的服务质量,但该算法也要求在节点移动过程中获得目标区域和传感器节点的相关完整信息。文献^[16]提出了利用移动节点来检测和修复无线传感器网络覆盖空洞的算法,提高了系统的信号覆盖率,减少了移动节点的移动距离,从而进一步节省了能耗。文献^[17]提出了移动无线传感器网络去中心化的最大化覆盖和最长寿命算法,通过引入较少的设计参数实现覆盖效率和覆盖能耗的平衡问题。文献^[18,19]基于Voronoi图来研究多智能体节点的移动趋势及其覆盖特性,但该方法的缺点是同样要求移动智能体集群中各智能体的信息完全已知。

注意到,在移动多智能体集群协同分布覆盖过程中,通常存在一些未知因素,例如,网络通信受限、单个智能体失效、联合作业环境未知、智能体之间信息不可完全观测以及智能体覆盖过程中多智能体的频繁多次移动导致大量能耗而引起的传感器失效等。覆盖控制过程中的诸多不确定因素,使得覆盖控制问题变得更为复杂。由于博弈方法在容错性和鲁棒性等方面的显著优势,近年来,博弈理论开始应用于解决多智能体的分布覆盖控制问题^[20~22]。特别地,文献^[22]通过引入博弈算法,研究了一类移动传感器网络在未知环境中的覆盖问题,同时考虑了覆盖率和覆盖能耗的平衡问题。事实上,不难发现,目前的覆盖控制算法主要基于固定的目标区域进行设计,亦即在整个覆盖控制过程中,多智能体集群整体始终位于某一个固定的目标区域内,在该区域内经过多轮覆盖操作完成覆盖任务。当目标覆盖区域实时变化时,要求移动智能体集群在整体移动的同时实现目标区域的渐近覆盖控制,而现有的覆盖控制方法难以处理此类问题;另一方面,目前的绝大多数覆盖算法都要求移动智能体集群中各智能体的位置信息完全已知,甚至要求覆盖目标的环境信息亦已知,从而导致信息获取、网络通信和在线决策成本大幅增加,进而引起覆盖控制成本或能耗以及覆盖决策的复杂性增大,不利于基于集中控制方式来进行多智能体的覆盖控制。为此,本文尝试研究非完全信息条件下的移动多智能体集群的分布覆盖控制问题,提出了一种基于虚拟排斥力的动态合作博弈覆盖控制算法,旨在解决移动多智能体集群在非完全信息条件下的分布覆盖控制问题。通过将移动多智能体集群分解为若干个可移动子集群,其中,群中每个智能体能观测且只能观测到各自一定范围内邻居智能体的信息,各子群中除了在子群

边界附近的智能体之外,不同子群中的智能体之间其信息互相完全未知.基于上述智能体集群的子群分解,将移动多智能体集群的覆盖控制问题转化为非完全信息条件下移动多智能体子群的合作博弈分布覆盖问题,其中,该移动多智能体集群可视为刚性虚拟结构,而对应的覆盖控制问题可将该刚性虚拟结构作为参照系进行设计,从而进一步简化了多智能体系统覆盖控制中位移路径的规划设计.进而,给出了各移动智能子群的博弈规则,智能体之间以及智能体和集群边界之间虚拟排斥力的定义,并提出了一种仅仅依赖虚拟排斥力的智能体分布覆盖博弈决策策略,以此来计算并确定各子集群中每个智能体在覆盖控制过程中的新候选位置,通过智能体子群的多轮合作博弈,实现多智能体集群的分布覆盖指标.本文的主要创新点如下:

- 提出了一种基于合作博弈思想的移动多智能体动态分布覆盖控制方法,用于解决不完全信息条件下移动多智能体集群的动态分布覆盖问题.移动多智能体集群被分解为若干个移动子集群,各子群之间根据预定的覆盖顺序进行动态博弈实现分布覆盖计算,并根据得到的覆盖路径导航策略实现位置移动,从而有效减少了覆盖控制的能耗问题,提高了覆盖控制效率.

- 提出了一种仅仅基于虚拟排斥力的移动多智能体动态博弈覆盖控制算法.与传统的基于虚拟力的多移动智能体覆盖算法相比,本算法不需要集群内所有智能体的信息,仅需要周围可观测范围内的其他邻居智能体或者障碍信息即可.该算法能有效节约移动智能体的覆盖控制成本,且具有更大的覆盖率.

- 提出了一种基于移动智能体集群的刚性虚拟结构的分布覆盖策略,将移动智能体分布覆盖控制的移动路径分解为集群刚性虚拟结构的位移路径和以集群刚性虚拟结构为参照系的移动智能体的位移路径.分布覆盖控制只需规划以集群刚性虚拟结构为参照系的移动智能体的位移路径,从而简化了多移动智能体覆盖控制位移路径的规划设计.

本文各部分的具体内容安排如下:第2节主要给出了基于合作博弈的移动多智能体动态分布覆盖控制的问题描述,第3节主要研究基于虚拟排斥力的移动多智能体集群合作博弈规则、决策策略及其覆盖控制算法,第4节主要基于若干仿真算例说明本文提出的覆盖控制算法的有效性,本文的主要结论由第5节给出.

2 问题描述

考虑由 n ($n > 1$) 个移动智能体组成的智能体集群覆盖控制问题,基于合作博弈的思想实现动态覆盖作业,我们首先将该多移动智能体集群划分为 m 个子集群 $C_i, i = 1, 2, \dots, m, 1 \leq m \leq n$, 每个子集群 C_i 仅能观测到其他相邻子集群部分移动智能体的位置信息.每个子集群 C_i 按既定的顺序进行分布覆盖控制,每次分布覆盖控制只允许一个子集群规划自身管辖的移动智能体的移动路径.在每次动态合作博弈回合中,子集群 C_i 根据群内各移动智能体自身的信息及其已知的其他子集群中部分智能体的信息,按照既定的动态博弈算法,规划子集群 C_i 内各移动智能体的移动路径并按规划的路径实施分布覆盖控制.直至达到移动智能体集群整体分布覆盖指标,覆盖控制的动态博弈操作结束.

本文研究的多移动智能体集群采用虚拟结构的分布覆盖策略.假设移动智能体集群虚拟结构是一个刚体结构,其分布覆盖控制作业在 h 维实向量空间中进行,智能体集群虚拟结构本身及其各智能体的位移量和速度量等均可用 h 维列向量来表示.在作业过程中,移动智能体集群虚拟结构的行进速度记为 $v(k) = [v^1(k), v^2(k), \dots, v^h(k)]^T$, 子集群 C_i 中第 j 个移动智能体 A_{ij} 的行进速度记为 $\bar{v}_{ij}(k) = [\bar{v}_{ij}^1(k), \bar{v}_{ij}^2(k), \dots, \bar{v}_{ij}^h(k)]^T$, 则 $\bar{v}_{ij}(k)$ 可表示为

$$\bar{v}_{ij}(k) = v(k) + v_{ij}(k), \quad (1)$$

其中, $v_{ij}(k) = [v_{ij}^1(k), v_{ij}^2(k), \dots, v_{ij}^h(k)]^T$ 为子集群 C_i 中的第 j 个移动智能体 A_{ij} 以移动智能体集群虚拟结构作为参照系的行进速度.

令 $s(k)$ 和 $\bar{s}_{ij}(k)$ 分别表示移动智能体集群虚拟结构的位移和子集群 C_i 中移动智能体 A_{ij} 以移动智能体集群虚拟结构作为参照系的规划位移, 其中, $s(k) = [s^1(k), s^2(k), \dots, s^h(k)]^T$, $\bar{s}_{ij}(k) = [\bar{s}_{ij}^1(k), \bar{s}_{ij}^2(k), \dots, \bar{s}_{ij}^h(k)]^T$, 则

$$\bar{s}_{ij}(k) = s(k) + s_{ij}(k), \quad (2)$$

其中, $s_{ij}(k) = [s_{ij}^1(k), s_{ij}^2(k), \dots, s_{ij}^h(k)]^T$ 为移动智能体 A_{ij} 本次覆盖控制后行进的路径.

注释1 若 $\bar{s}_{ij}(k)$ 和 $s_{ij}(k)$ 是二维实向量, 表明移动智能体群是在平面上进行覆盖作业的, 例如, 多机器人集群、多移动传感器集群、通信基站的分布覆盖问题等; 如果 $\bar{s}_{ij}(k)$ 和 $s_{ij}(k)$ 是三维向量, 说明移动智能体在三维空间上进行覆盖作业, 例如, 多无人机集群和多通信卫星集群的分布覆盖问题等.

注释2 式 (1) 和 (2) 中, 若 $v(k) \equiv 0$, $s(k) \equiv 0$, 则多智能体集群虚拟结构本身在整个博弈覆盖控制过程中保持不动. 在该情形下, 本文研究的动态博弈覆盖控制问题可以刻画包括智能传感器网络以及通信卫星基站网络在内的一类非移动智能体集群的网络覆盖分布问题.

考虑到本文主要研究非完全信息条件下的移动智能体覆盖控制问题, 我们假定每个智能体只能探测或感知到自身周围环境的有限信息, 而不能探测到整个覆盖作业区域; 同时, 每个智能体的覆盖作业能力也是有限的. 为此, 下面先给出移动智能体探测范围和作业覆盖范围的定义.

定义1 (移动智能体探测范围) 移动智能体 A_{ij} 的探测范围是以自身当前质心位置为圆心, 以 R_{ij} 为半径的圆域 (或圆球域), $0 < R_{ij} < \infty$.

定义2 (移动智能体作业覆盖范围) 移动智能体 A_{ij} 的作业覆盖范围是指以智能体自身当前质心位置为圆心, 以 r_{ij} 为半径的圆域 (或圆球域), $0 < r_{ij} < \infty$.

注释3 定义 1 和 2 分别给出了移动智能体探测范围和作业范围的定义. 该定义指出, 智能体探测能力和覆盖能力是有限的. 事实上, 多智能体的物理属性决定了其有限的探测和覆盖能力; 另一方面, 在实际覆盖过程中, 基于有限的探测和覆盖能力进行覆盖作业, 有利于节约覆盖控制成本. 通常, 智能体的探测半径不小于覆盖半径的 2 倍, 亦即 $2r_{ij} \leq R_{ij}$.

定义3 (移动智能体集群覆盖控制性能指标) 移动智能体集群覆盖控制的性能指标是指移动智能体群 C_1, C_2, \dots, C_m 按一定规则控制集群中的 n 个移动智能体移动实现覆盖控制任务最终需要达到的总覆盖控制指标, 如, 最大总覆盖率、最小总覆盖能耗、最小总覆盖时间或最小移动路径等.

本文假设所有移动智能体都是相同的, 即它们有相同的探测范围 $R = R_{ij}$ 和相同的作业覆盖范围 $r = r_{ij}$. 令 $p_{ij}(k) = [p_{ij}^1(k), p_{ij}^2(k), \dots, p_{ij}^h(k)]^T$ 为移动智能体子集群 C_i 中第 j 个移动智能体 A_{ij} 的当前质心位置向量, $p_{ij}(k+1) = [p_{ij}^1(k+1), p_{ij}^2(k+1), \dots, p_{ij}^h(k+1)]^T$ 为本次规划位移后移动智能体 j 的质心位置向量, 则

$$p_{ij}(k+1) = p_{ij}(k) + s_{ij}(k+1), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

移动智能体集群虚拟结构的位移路径 $s_0(k)$ 是由下达移动智能体集群任务的上层决策者确定的, 移动智能体集群无条件执行上层决策者的决定, 对移动智能体集群虚拟结构本身的位移路径 $s_0(k)$ 没有控制权. 在多移动智能体覆盖控制的动态博弈过程中, 各移动智能体子集群只能对子集群 C_i 内的移动智能体相对于移动智能体集群虚拟刚体结构的相对位移路径 $s_{ij}(k)$ 进行控制. 为了简化问题描述, 在不引起混淆的情况下, 在下文叙述中, 我们将移动智能体相对于移动智能体集群虚拟刚体结构的相对位移路径 $s_{ij}(k)$ 简称为移动智能体位移路径. 本文研究的非完全信息条件下的基于虚拟排斥力的



图 1 子集群合作博弈覆盖控制顺序

Figure 1 Cooperative game coverage operation sequence of agent groups

移动多智能体动态合作博弈覆盖控制问题,主要是指对于上述给定的移动智能体集群,为实现动态覆盖控制任务,如何基于虚拟排斥力的思想,设计有效的智能体合作博弈规则、博弈决策策略和博弈算法,在非完全信息条件下,亦即在子群中每个智能体只能观测到各自周围一定范围内其他智能体位置信息的条件下,使得最终的博弈覆盖率最大,智能体移动次数最少。

3 移动多智能体动态合作博弈分布覆盖算法

本节给出基于虚拟排斥力的移动多智能体集群合作博弈覆盖控制算法。首先,给出移动智能体集群的子集群划分及其动态合作博弈规则;其次,给出移动智能体之间虚拟排斥力的定义,进而给出移动智能体集群中各子集群基于该虚拟力进行合作博弈的决策策略;最后,给出移动多智能体集群合作博弈动态覆盖控制算法。

3.1 分布覆盖动态合作博弈规则

为解决非完全信息条件下移动多智能体集群的分布覆盖问题,将移动智能体集群视为一刚体结构,并将该移动智能体集群划分为 m 个子集群 $C_i, i = 1, 2, \dots, m, m \geq 2$, 其中,每个子集群赋予唯一的编号 i 。假设每个子集群 C_i 中包含 n_i 个移动智能体,移动智能体集群共包含 n 个移动智能体,亦即 $\sum_{i=1}^m n_i = n$ 。因为各移动智能体在实施动态覆盖控制过程中需要移动各自的位置,可能出现部分智能体在合作博弈的过程中进入到其他的子集群。因此,每个子集群 C_i 中的移动智能体个数 n_i 是动态变化的。

下面给出移动智能体集群合作博弈动态分布覆盖控制方法的博弈顺序规则、智能体位置更新规则和博弈控制终止规则。

(1) 各智能体子群动态博弈控制顺序规则。如图 1 所示,子集群 C_1, C_2, \dots, C_m 依序分别实施覆盖控制操作, m 个子集群整体完成一次覆盖控制后,再从子群 C_1 开始,依序进行下一次的覆盖控制操作,依此类推,直到达到覆盖指标。

(2) 各智能体动态博弈控制位置计算规则。各智能体子群 $C_i, i = 1, 2, \dots, m$ 在进行一次覆盖控制规划前,首先要清点并确定子集群内移动智能体的数量 n_i , 并确定每个移动智能体 A_{ij} 的质心位置 $p_{ij}, j = 1, 2, \dots, n_i$ 。然后,根据其他 $m - 1$ 个智能体子群博弈作业后的状态,利用本文提出的虚拟排斥力算法确定子群 C_i 内每个移动智能体 A_{ij} 的移动位移 s_{ij} 。

(3) 移动智能体集群动态博弈控制终止规则。各移动智能体每完成一个回合的动态博弈覆盖控制作业后,进行一次移动智能体集群的总覆盖率检测工作。如果总覆盖率达到既定的移动智能体集群覆盖控制性能指标,则动态合作博弈覆盖控制结束,否则进行下一回合的动态博弈覆盖控制。

注释4 在移动多智能体集群的覆盖控制过程中,集中覆盖控制方式往往需要耗费大量的通信资源和控制成本,且覆盖控制操作的复杂性会显著增加。本文通过将移动多智能体集群分解为若干个移动智能体子集群,并基于各子集群通过合作博弈的动态分布覆盖控制方式,可以有效地解决上述问题。

另外, 在博弈覆盖操作过程中, 各移动智能体子群之间按照预先规划的博弈序列进行博弈覆盖操作, 每次博弈并不要求智能体立即更新其物理位置信息, 可根据博弈覆盖率和能耗的大小 (整体博弈代价), 经过连续多次的博弈覆盖作业之后, 再进行智能体的物理位置更新, 从而能够大幅减少智能体的物理移动次数和控制能耗, 从而有效提高覆盖效率. 因此, 从本质上来讲, 本文提出的移动智能体集群动态覆盖博弈算法, 是基于移动路径规划的有限次甚至一次移动博弈覆盖算法.

注释5 在移动智能体集群的动态博弈覆盖操作过程中, 每个智能体只能观测到周围一定范围内若干个 (由智能体的观测范围决定) 邻居智能体的相关位置信息; 而处在不同子群之中的各智能体之间位置信息是未知的、不可测量的, 除非理论位置位于智能体子群边界附近且处在邻居子群某智能体观测范围内的智能体, 其位置信息对邻居子群中的部分智能体而言是已知的. 因此, 多智能体集群在整个博弈覆盖的过程中, 集群中各智能体的位置信息为非完全已知的. 特别地, 如果该集群为只包含 n 个智能体的唯一子集群, 即 $m = 1$ 的情形, 此时, 该集群的博弈覆盖作业就退化为多智能体集群的一般覆盖控制问题.

3.2 虚拟排斥力分布覆盖算法

假设当前子集群 C_i 内包含 n_i 个移动智能体 A_{ij} , $j = 1, 2, \dots, n_i$, 每个移动智能体可以观测到半径为 R 的圆域内的其他移动智能体的相对位置. 为给出虚拟排斥力分布覆盖算法, 我们先给出几个定义.

设移动智能体 A_e 的质心位置向量为 p_e , A_e 或者在子集群 C_i 中, 或者不在子集群 C_i 中但在 A_{ij} 的可观测范围中, 设 A_b 为移动智能体 A_{ij} 到移动智能体集群虚拟结构对应区域边界的最短距离点 (可视为集群边界上的伪智能体), 其质心位置坐标为 p_b , 则移动智能体 A_{ij} 和 A_e 的距离 d_{ij}^e 以及 A_{ij} 和虚拟结构边界点 A_b 的距离 d_{ij}^b 分别定义为

$$d_{ij}^e = \|p_{ij} - p_e\|, \quad (4)$$

和

$$d_{ij}^b = \|p_{ij} - p_b\|, \quad (5)$$

其中, $\|\cdot\|$ 为向量欧氏范数.

进一步, 可定义两个移动智能体之间的虚拟排斥力, 移动智能体受到边界的虚拟排斥力以及智能体受到周围可观测到的其他智能体的虚拟总排斥力.

定义4 (智能体间虚拟排斥力) 移动智能体 A_e 作用于移动智能体 A_{ij} 的虚拟排斥力定义为

$$F_{ij}^e = \begin{cases} k_e(2r - d_{ij}^e)\mu_{ij}^e, & d_{ij}^e \leq 2r, \\ 0, & d_{ij}^e > 2r, \end{cases} \quad (6)$$

其中, $0 < k_e < 1$ 为调节参数, $\mu_{ij}^e = (p_{ij} - p_e)/d_{ij}^e$.

定义5 (虚拟结构边界点对智能体的虚拟排斥力) A_b 为 A_{ij} 移动智能体集群虚拟结构对应区域边界的最短距离点 (伪智能体), 则 A_b 作用于移动智能体 A_{ij} 的虚拟排斥力定义为

$$F_{ij}^b = \begin{cases} k_b(d_{ij}^b - r)\mu_{ij}^b, & d_{ij}^b \leq r, \\ 0, & d_{ij}^b > r, \end{cases} \quad (7)$$

其中, $0 < k_b < 1$ 为调节参数, r 为移动智能体 A_{ij} 的作业半径, $\mu_{ij}^b = (p_{ij} - p_b)/d_{ij}^b$.

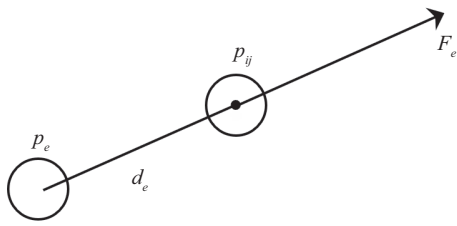


图 2 智能体间的虚拟排斥力示意图

Figure 2 Virtual repulsive force between agents

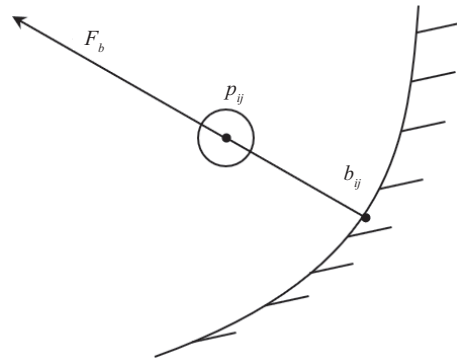


图 3 集群边界对智能体的虚拟排斥力示意图

Figure 3 Virtual repulsive force of a boundary point on the agent

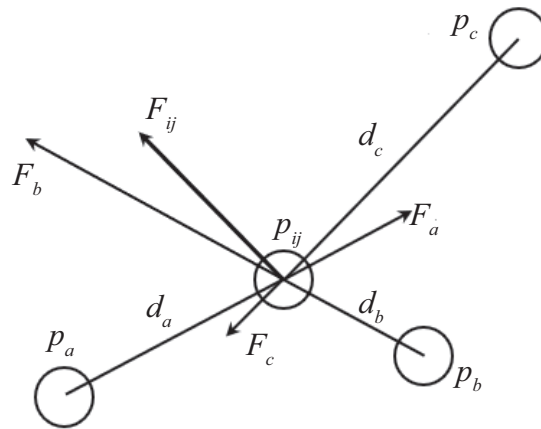


图 4 智能体受到的总虚拟排斥力示意图

Figure 4 Total virtual repulsive force on the agent

图 2 和 3 分别给出了移动智能体 A_e 作用于移动智能体 A_{ij} 的虚拟排斥力示意图和移动智能体集群虚拟结构边界点 A_b 作用于移动智能体 A_{ij} 的虚拟排斥力示意图. 事实上, 式 (6) 表明移动智能体 A_e 离移动智能体 A_{ij} 的距离越小, 移动智能体 A_e 对移动智能体 A_{ij} 的虚拟排斥力越大, 反之亦然; 由式 (7) 容易看到, 移动智能体 A_{ij} 离集群虚拟结构边界的距离越小, 集群虚拟结构边界点对移动智能体 A_{ij} 的虚拟排斥力越大, 反之亦然.

假设移动智能体 A_{ij} 可以观测到移动智能体 A_a , A_b 和 A_c 的相对位置, 包括分别能观测到移动智能体 A_a 相对于移动智能体 A_{ij} 的方向及距离 d_a , d_b 和 d_c , 如图 4 所示. 记移动智能体 A_a , A_b 和 A_c 对移动智能体 A_{ij} 的虚拟排斥力分别为 F_a , F_b 和 F_c , 则移动智能体 A_a , A_b 和 A_c 对移动智能体 A_{ij} 的总虚拟排斥力为 $F_{ij} = F_a + F_b + F_c$. 一般地, 所有能观测到的移动智能体作用于移动智能体 A_{ij} 的总虚拟排斥力可以表示为

$$F_{ij} = \sum_{p \in \Omega} F_p, \tag{8}$$

其中, Ω 为移动智能体 A_{ij} 可以观测到的移动智能体和集群虚拟结构边界的集合.

在移动智能集群的一次覆盖控制作业中, 移动智能体 A_{ij} 的位移量可以表示为

$$s_{ij} = k_s F_{ij}, \quad (9)$$

其中, $0 < k_s < 1$ 是由移动智能体 A_{ij} 的总排斥力 F_{ij} 转化成位移量 s_{ij} 的比例系数.

注释6 在每次覆盖控制后, 为了确保每个移动智能体都坐落于集群的虚拟结构区域内, 以下修正算法是必要的:

$$p_{ij} = p_b - \tilde{b} \mu_{ij}^b, \quad (10)$$

其中, \tilde{b} 为移动智能体 A_{ij} 到达集群虚拟结构边界的最小允许距离. 事实上, 式 (9) 表明, 移动智能体 A_{ij} 到边界最小点的距离 d_{ij}^b 不超过 \tilde{b} , 亦即 $d_{ij}^b \leq \tilde{b}$.

注释7 在一些情况下, 允许若干个移动智能体处于同一位置, 尤其是在多移动智能体覆盖控制的初始状态, 可能会出现若干个移动智能体处于同一位置或相对距离非常小的情况. 在该情况下, 利用本文提出的虚拟排斥力算法会出现奇异问题. 例如, 式 (6) 中的等号右边会出现分母为零的情况. 为此, 对覆盖算法做进一步改进. 若移动智能体 A_{ij} 相对于移动智能体 A_e 的距离足够小, 亦即 $\|p_{ij} - p_e\| < \delta$, $\delta > 0$ 为预先给定的充分小的数, 则如下修改虚拟排斥力:

$$F_{ij}^e = k_\delta \hat{\mu}, \quad (11)$$

其中, $0 < k_\delta < 1$, $\hat{\mu}$ 为适当维数的随机单位向量.

注释8 上述式 (6), (7), (9) 和 (11) 给出了智能体之间以及智能体和虚拟结构边界点之间虚拟排斥力的计算方法以及在每次覆盖作业过程中智能体需要移动的位移量. 基于上述方法, 可以保证移动智能体覆盖控制算法的收敛性. 事实上, 一方面, 在动态覆盖过程中, 智能体的移动操作将引起智能体总体覆盖率的逐渐增大; 另一方面, 随着覆盖过程的持续进行, 智能体之间及其智能体和覆盖区域边界点之间的虚拟排斥力将逐渐减小, 智能体移动的位移量亦逐渐变小, 从而使得总体覆盖率增大的速度逐渐变小. 经过多轮的合作博弈覆盖作业, 当覆盖率达到了给定的总体覆盖指标时, 智能体集群的合作博弈覆盖作业即可结束. 关于基于虚拟力覆盖控制算法的收敛性, 类似的分析可参阅文献 [14, 18].

为了进一步给出虚拟排斥力的算法描述, 令 $\theta_0 > 0$ 表示预先给定的覆盖率指标, $\theta \geq 0$ 表示当前的覆盖率, $\kappa \geq 0$ 记录覆盖操作次数, 基于虚拟排斥力的移动多智能体动态合作博弈覆盖算法由算法 1 给出. 注意到, 该动态博弈覆盖控制算法的主要运算包括智能体之间虚拟排斥力的计算和智能体的位移计算及其位置更新, 算法时间复杂度为 $O(n^2)$, 其中, n 为智能体的总个数.

4 仿真算例

为验证本文提出的基于虚拟排斥力的移动多智能体动态合作博弈覆盖控制算法的有效性, 本节分别分析了由 30 个智能体构成的移动智能体集群只含有自身一个子集群 (亦即 $m = 1$) 的合作博弈覆盖问题, 由 100 个移动智能体构成的集群分解为 4 个子集群在方形域上的合作博弈覆盖问题和由 120 个移动智能体构成的集群分解为 4 个子集群在圆形域上的合作博弈覆盖问题.

4.1 $m = 1$ 情形下的覆盖控制效果

本小节讨论移动智能体集群不进行子集群分解的情形. 此时, 智能体集群本身只有 C_1 , 下面我们验证本文提出的基于虚拟排斥力的覆盖控制算法. 为此, 我们采用文献 [14] 中的仿真算例, 考虑具有

算法 1 分布覆盖动态合作博弈算法

Require: $r > 0 \vee R > 0 \vee \kappa > 0 \vee \delta > 0 \vee d \geq 0 \vee n > 0 \vee s \geq 0 \vee i \geq 0 \vee j \geq 0 \vee k \geq 0; \forall F_i \geq 0 \vee k_s \geq 0, x_i, i = 1, 2, \dots, n$
已知, 集群初始分布已知.

- 1: 给出移动智能体集群的初始覆盖位置信息 $x_i, i = 1, 2, \dots, n$;
- 2: 计算初始覆盖率 θ ;
- 3: **while** $\theta \leq \theta_0$ **do**
- 4: **for** $s = 1 : m$ **do**
- 5: **for** $i = 1 : n$ **do**
- 6: **if** $x_i \in C_s$ **then**
- 7: **if** $d_i^b \leq r$ **then**
- 8: 根据式 (7) 计算虚拟排斥力 F_i ;
- 9: **else**
- 10: **for** $k = 1 : n$ **do**
- 11: 计算两智能体 A_i 和 A_k 间的距离 d ;
- 12: **if** $d < 2r$ **and** $d < \delta$ **then**
- 13: 根据式 (11) 计算虚拟排斥力 F_i ;
- 14: **else**
- 15: 根据式 (6) 计算虚拟排斥力 F_i ;
- 16: **end if**
- 17: **end for**
- 18: $x_i \leftarrow x_i + k_s F_i$;
- 19: **end if**
- 20: **end if**
- 21: **end for**
- 22: $\kappa \leftarrow \kappa + 1$;
- 23: 计算当前覆盖率 θ ;
- 24: **end while**
- 25: **end while**

30 个移动智能体在二维平面的 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 方域中的分布覆盖问题, 每个移动智能体的工作覆盖范围是半径为 6 m 的圆域, 其探测范围是半径为 12 m 的圆域. 令智能体间虚拟排斥力系数 $k_e = 0.58$, 边界对智能体虚拟排斥力系数 $k_b = 0.495$; 式 (11) 中, $k_\delta = 0.2$, 给定覆盖率目标指标 $\theta_0 = 99.0\%$.

智能体集群质心移动轨迹由下面函数描述:

$$s(t) = 0.2te^{-0.3t} + 90 \sin(0.004\pi t). \quad (12)$$

图 5 给出了智能体集群沿着上述轨迹移动过程中, 集群中各智能体合作博弈过程中的不同覆盖状态, 其中, 蓝色圆圈表示 30 个移动智能体的初始位置, 该初始位置是随机设置的, 青绿色圆圈表示移动智能体在移动过程中的某个覆盖状态, 洋红色圆圈表示移动智能体的最终覆盖状态. 利用文献 [14] 的分布覆盖算法可以计算得到, 智能体集群在初始阶段的覆盖率为 78.42% , 随着合作博弈覆盖作业的进行, 覆盖率逐渐增加到 95.98% , 最后增大到 99.01% , 达到了目标覆盖率, 说明了本文提出的基于虚拟排斥力合作博弈覆盖算法实现覆盖作业是有效的. 同时, 可以看到, 和文献 [14] 提出的基于虚拟分子力算法 (virtual molecular force algorithm, VMFA) 得到的覆盖率 97.3% 相比, 基于本文的覆盖算法可以取得更好的覆盖效果. 图 6 给出了智能体集群实施覆盖作业时, 覆盖率随着覆盖作业次数 (迭代次数) 增大时的变化曲线. 从该图可以看出, 在覆盖的初始阶段, 覆盖率整体上呈快速增大趋势, 在第 10 次覆盖作业之后, 覆盖率增幅显著减少, 覆盖作业及其覆盖率进入了小幅微调阶段, 经过 24 次覆盖作业后, 覆盖率达到 99.01% . 事实上, 智能体集群在第 7 次覆盖后, 覆盖率达到 97.3% , 该值为 VMFA [14]

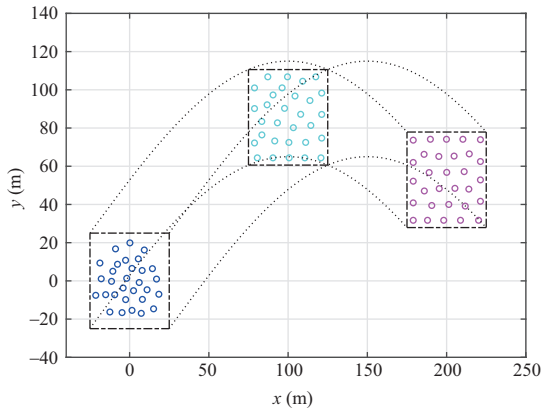


图 5 (网络版彩图) 30 个移动智能体集群动态覆盖作业过程

Figure 5 (Color online) Dynamic coverage process of 30 mobile agents

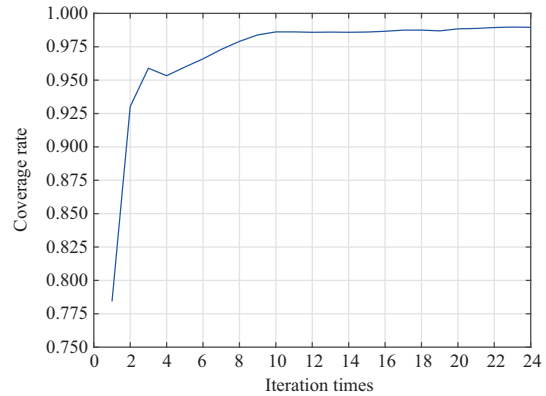


图 6 (网络版彩图) 覆盖率和迭代次数关系曲线

Figure 6 (Color online) Relation curve of coverage rate versus iteration times

经过 15 次覆盖后的覆盖率, 这也说明了本文的覆盖算法覆盖速度更快. 另外, 覆盖率值可以进一步提高, 但需要实施更多次的覆盖作业. 图 7(a)~(c) 分别给出了对应图 5 中三个不同阶段的整体覆盖情况, 图 7(d) 给出了 30 个移动智能体从初始位置到最终覆盖位置的一次移动位移路径.

为了进一步说明本文提出的合作博弈覆盖算法的优越性, 我们将智能体的总数由原来的 30 个减少到 26 个, 并将目标覆盖率值由 99.0% 减小到 97.5%, 再次基于合作博弈覆盖算法实施覆盖作业, 经过多轮的覆盖控制操作后, 其总体覆盖率可以达到 97.6%, 该值仍大于文献 [14] 中 30 个移动智能体对应的分布覆盖率 97.3%. 这说明, 基于本文提出的合作博弈覆盖控制算法, 利用较少的智能体亦可达到较为理想的覆盖控制效果, 从而有效减少了覆盖控制成本. 图 8 给出了利用 26 个智能体实施覆盖操作在不同覆盖阶段的覆盖情况, 其中, 图 8(a)~(c) 分别给出了 26 个多智能体组成的移动智能体集群的初始覆盖, 某中间覆盖及其最终覆盖状态, 图 8(d) 给出了覆盖的最终规划路径, 其中蓝色圆圈和洋红色圆圈分别表示集群的覆盖初始位置和结束位置, 黑色箭头表示 26 个移动智能体的位移移动路径.

注意到, 包括文献 [14] 提出的 VMFA, 现有文献提出的动态覆盖控制算法中, 在实施覆盖控制作业的过程中, 多智能体需要按照覆盖控制算法中得到的位置更新信息实时地进行物理位置的及时移动和更新, 从而使得覆盖控制的通信成本和控制成本大幅提高; 同时也增大了智能体之间相互碰撞的概率. 事实上, 在很多场景下, 多智能体不需要根据每一轮算法得到的位置信息进行实际物理位置的移动, 只需要根据最终的覆盖状态位置信息, 实施从初态到终态的一次或有限次物理移动即可, 如图 7(d) 和 8(d) 所示. 因此, 本文提出的覆盖控制算法提供了一种智能体集群为完成覆盖任务从覆盖初态到终态的路径规划方法. 显然, 该覆盖方法使得智能体移动的次数大大减少, 可最大程度地节约覆盖控制成本. 对应于最后一轮的物理覆盖, 在整个覆盖过程中, 各智能体的每次覆盖可视为虚拟覆盖, 只需要根据当前覆盖态势进行对应位置的理论更新即可.

4.2 非完全信息下不同覆盖域上的动态合作博弈分布覆盖

本小节分别考虑覆盖域为方形域和圆形域上基于子集群分解的合作博弈覆盖控制问题. 首先考虑由 100 个移动智能体组成的集群在 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 方域中的动态博弈分布覆盖问题, 每个移动智能体的工作覆盖范围为半径为 6 m 的圆域, 探测范围为半径为 12 m 的圆域. 智能体间虚拟排斥力系数

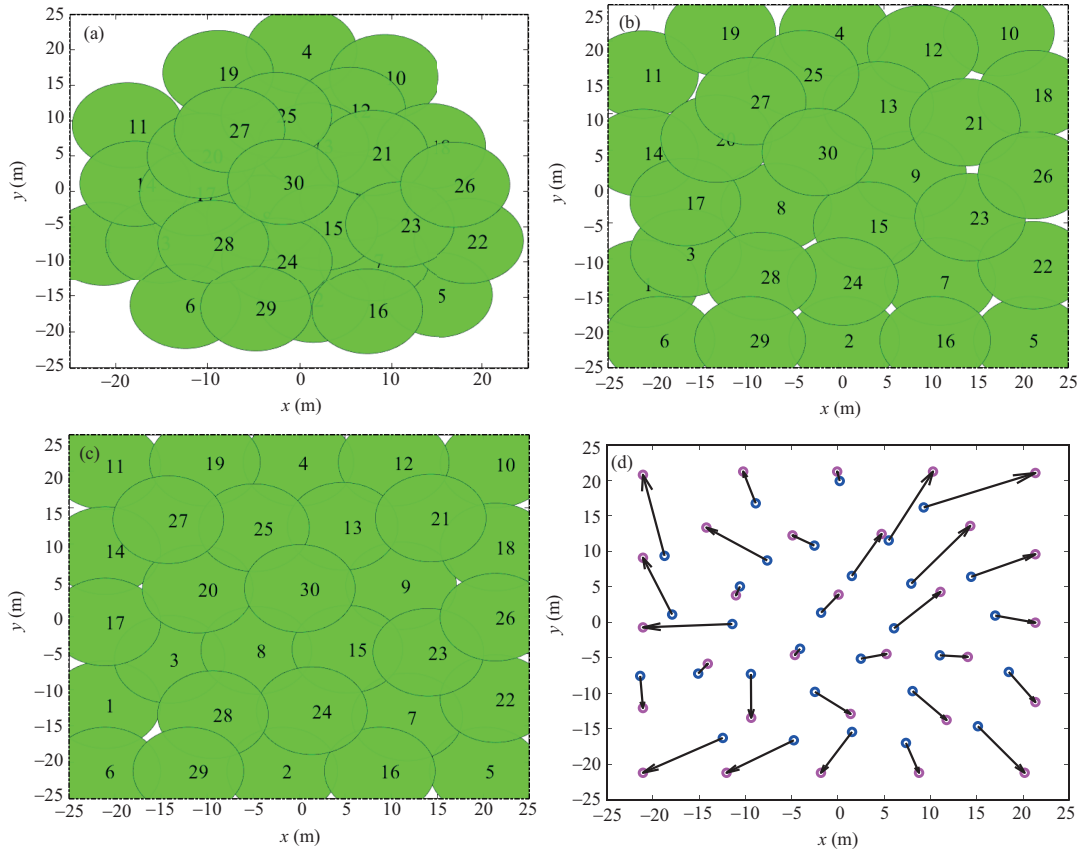


图 7 (网络版彩图) 30 个移动智能体不同阶段的覆盖状态和起止移动路径

Figure 7 (Color online) Coverage states of different times and moving paths of 30 mobile agents. (a) Initial coverage state; (b) one of coverage states; (c) final coverage state; (d) moving paths of mobile agents

$k_e = 0.6$, 边界对智能体虚拟排斥力系数 $k_b = 0.6$; 式 (11) 中, $k_\delta = 0.2$. 设定覆盖率指标为 $\theta_0 = 97.0\%$, 移动智能体集群的质心移动轨迹为

$$s(t) = 0.1te^{-0.5t} + 75 \sin(0.0015\pi t). \tag{13}$$

为实现动态博弈覆盖任务, 我们将移动智能体集群划分为 4 个子集群, 假定子集群虚拟结构的中心位置为平面坐标的原点, 坐标平面的第一, 三, 二和四象限分别为 C_1, C_2, C_3 和 C_4 等 4 个移动智能体子群所在的区域, 坐标轴所在的红色虚线为 4 个子集群的虚拟分界线. 100 个移动智能体的初始位置是随机设置的, 图 9 给出了 4 个移动子群从初始位置经过一轮博弈覆盖后分别对应的覆盖状态, 图 9 中蓝色圆圈和洋红色圆圈分别表示移动智能体的初始位置和一轮博弈覆盖后的位置, 黑色箭头线表示移动智能体的位移路径; 图 10 给出了移动智能体集群沿着给定的轨线运动过程中, 各智能体从初始位置分布 (蓝色区域) 开始, 经过一系列的动态博弈操作后达到给定覆盖指标后对应的最终位置分布情况 (洋红色区域), 其中的青色区域为博弈过程的某一个覆盖状态对应的各智能体的位置分布情况. 图 11(a)~(c) 分别给出了图 10 中 3 个不同时刻的动态博弈覆盖映像图, 图 11(d) 给出了从初始覆盖状态 (蓝色圆圈) 到最终覆盖状态 (洋红色圆圈) 的位移移动路径图, 黑色箭头线代表了智能体的移动方向和长度. 可以计算得到, 上述 3 个状态对应的覆盖率分别为 61.4%, 80.2% 和 97.04%. 图 12 给出了智能体集群在实施合作博弈覆盖过程中, 合作博弈覆盖次数持续增大时覆盖率的变化趋势图. 从

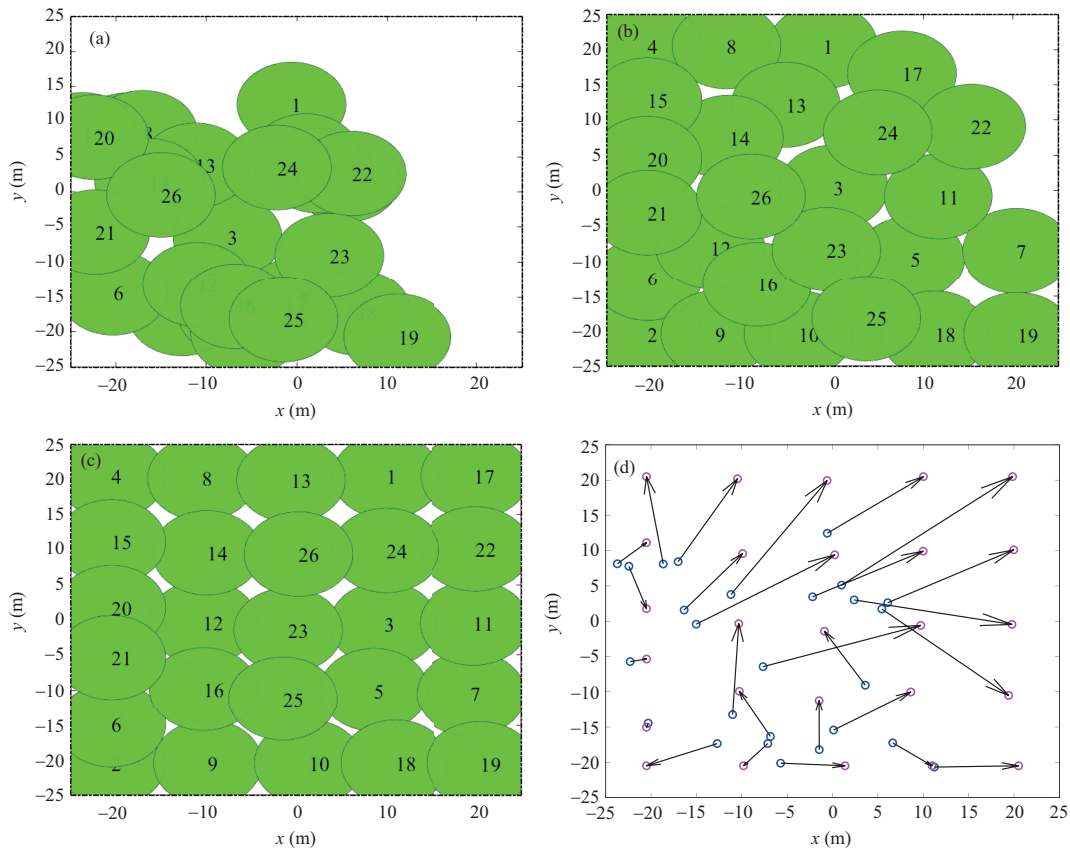


图 8 (网络版彩图) 26 个移动智能体不同阶段的覆盖状态和起止移动路径

Figure 8 (Color online) Coverage states of different times and moving paths of 26 mobile agents. (a) Initial coverage state; (b) one of coverage states; (c) final coverage state; (d) moving paths of mobile agents

该图可以看出, 随着合作博弈覆盖操作次数的增加, 覆盖率从初始覆盖率 61.4% 逐渐快速增大, 经过 30 轮的合作博弈, 整体覆盖率达 90.0%; 再经过 40 轮的博弈覆盖, 覆盖率缓慢增大到 95.0%; 然后, 覆盖率的增大幅度显著减少, 再经过 67 轮的合作博弈, 亦即第 137 轮合作博弈后, 整体覆盖率超过了目标指标 97.0%. 特别地, 从第 100 轮合作博弈开始, 覆盖率从 96.53% 稳步缓慢调整至目标覆盖率.

类似地, 利用本文的合作博弈覆盖算法也可以解决圆形域上的动态博弈覆盖控制问题. 下面, 我们考虑由 120 个移动智能体构成的多智能体集群覆盖一个半径为 60 m 的圆形区域. 设每个移动智能体的工作覆盖面积为半径为 6 m 的圆域, 其探测范围为半径为 12 m 的圆域. 给定智能体间虚拟排斥力系数 $k_e = 0.7$, 边界对智能体虚拟排斥力系数 $k_b = 0.5$, 虚拟排斥力和智能体位移量的关联系数 $k_s = 0.5$, 覆盖率指标 θ_0 为 98.0%. 将移动智能体集群虚拟结构划分为 4 个子集群, 其所在的区域划分同上面方形域的情形, 红色虚线为子集群虚拟结构的分界线, 第一, 三, 二和四象限区域分别为子集群 C_1, C_2, C_3 和 C_4 . 对于该圆形域上的覆盖问题, 我们仅给出智能体集群在初始时刻、某中间时刻以及结束时刻的覆盖映像图及其智能体由初始覆盖状态移动到最终覆盖状态的位移路径, 见图 13. 图 13(a)~(c) 分别表示智能体集群的初始覆盖状态 (覆盖率为 34.78%), 中间覆盖状态 (覆盖率为 88.72%) 和结束覆盖状态 (覆盖率为 98.0%), 图 13 给出了从初始覆盖状态 (蓝色圆圈) 到最终覆盖状态 (洋红色圆圈) 的位移移动路径图, 黑色箭头线代表了智能体的移动方向和长度. 图 14 给出了 4

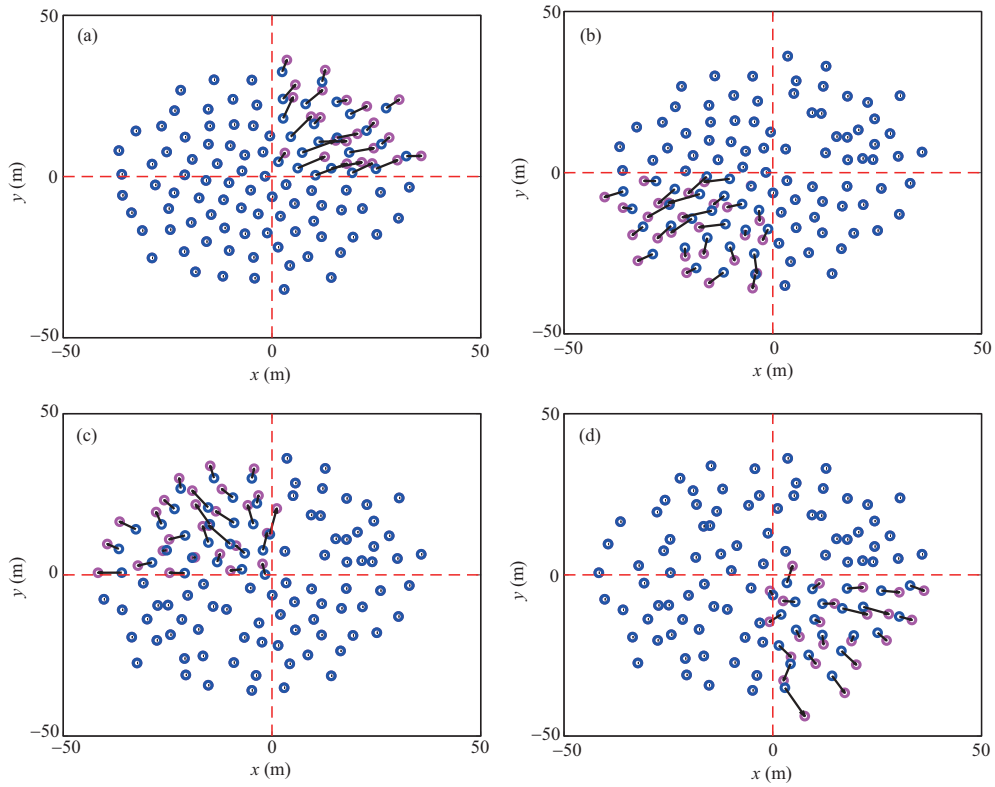


图 9 (网络版彩图) 一轮博弈覆盖后智能体子群 C_1 (a), C_2 (b), C_3 (c) 和 C_4 (d) 的覆盖分布

Figure 9 (Color online) Coverage distribution of mobile agent groups C_1 (a), C_2 (b), C_3 (c), and C_4 (d) after the first round game

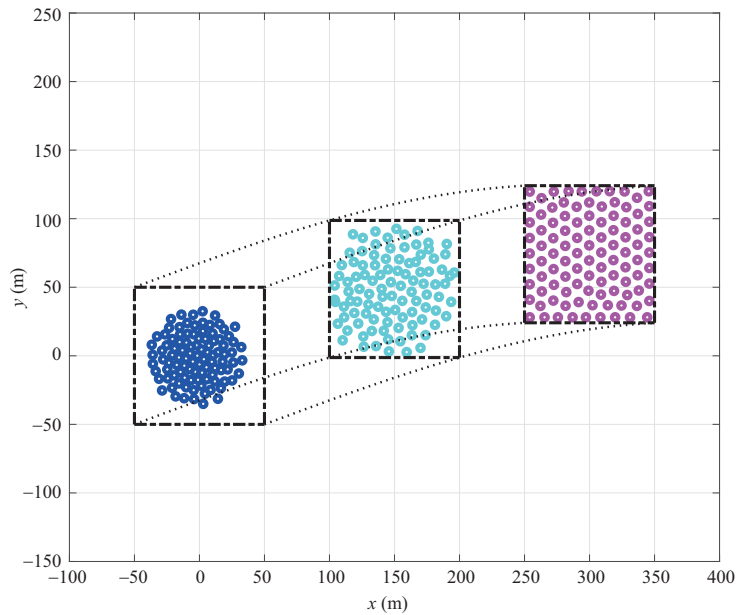


图 10 (网络版彩图) 100 个移动智能体集群动态覆盖作业过程

Figure 10 (Color online) Dynamic coverage process of 100 mobile agents

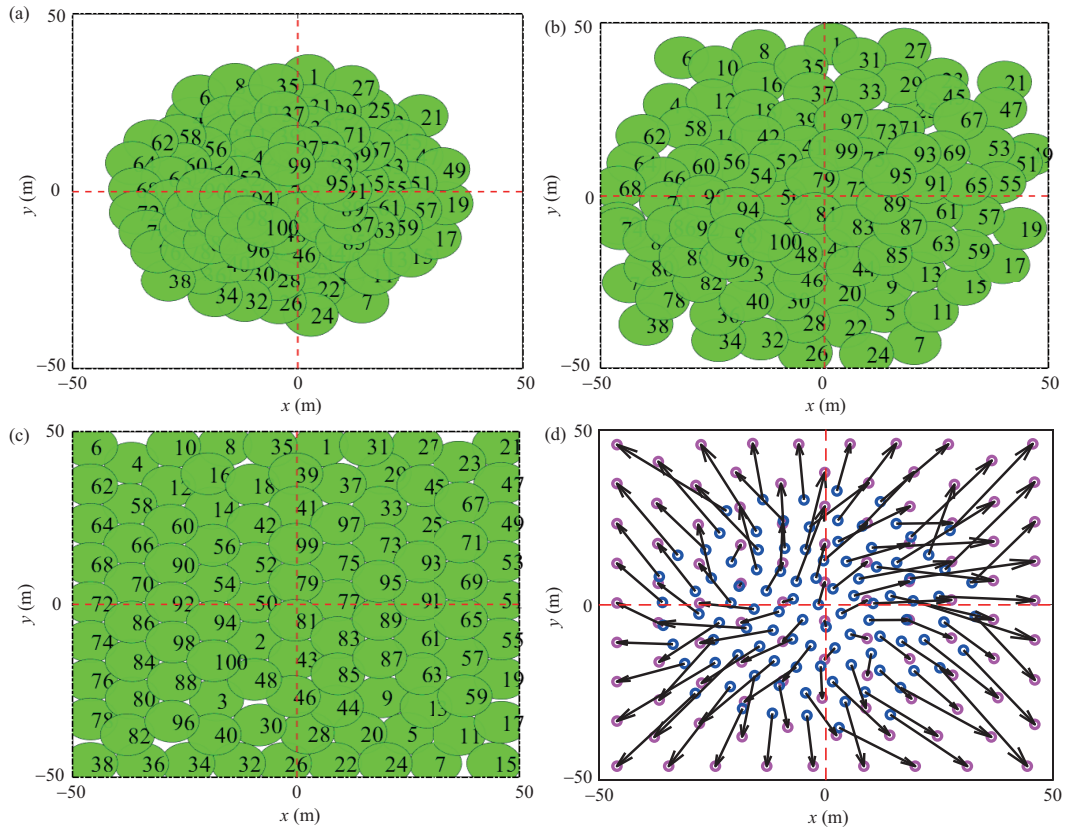


图 11 (网络版彩图) 100 个移动智能体不同阶段的覆盖状态和移动路径

Figure 11 (Color online) Coverage states of different times and moving paths of 100 mobile agents. (a) Initial coverage state; (b) one of coverage states; (c) final coverage state; (d) moving paths of mobile agents

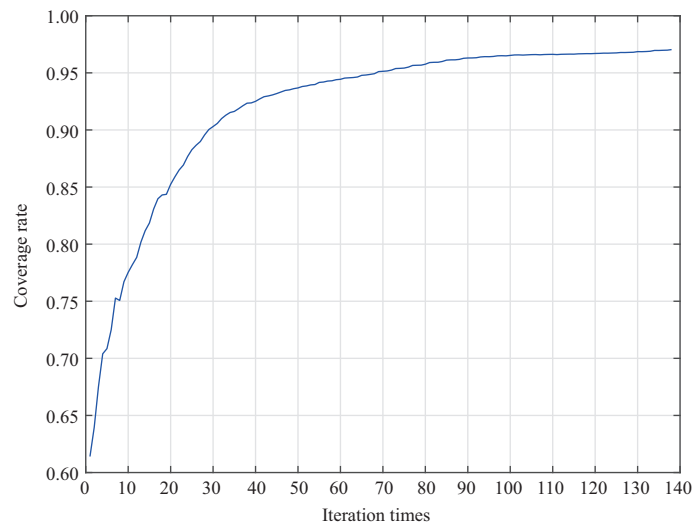


图 12 (网络版彩图) 100 个智能体在方域上的覆盖率和迭代次数关系曲线

Figure 12 (Color online) Relation curve of coverage rate versus iteration times of 100 mobile agents on a square area

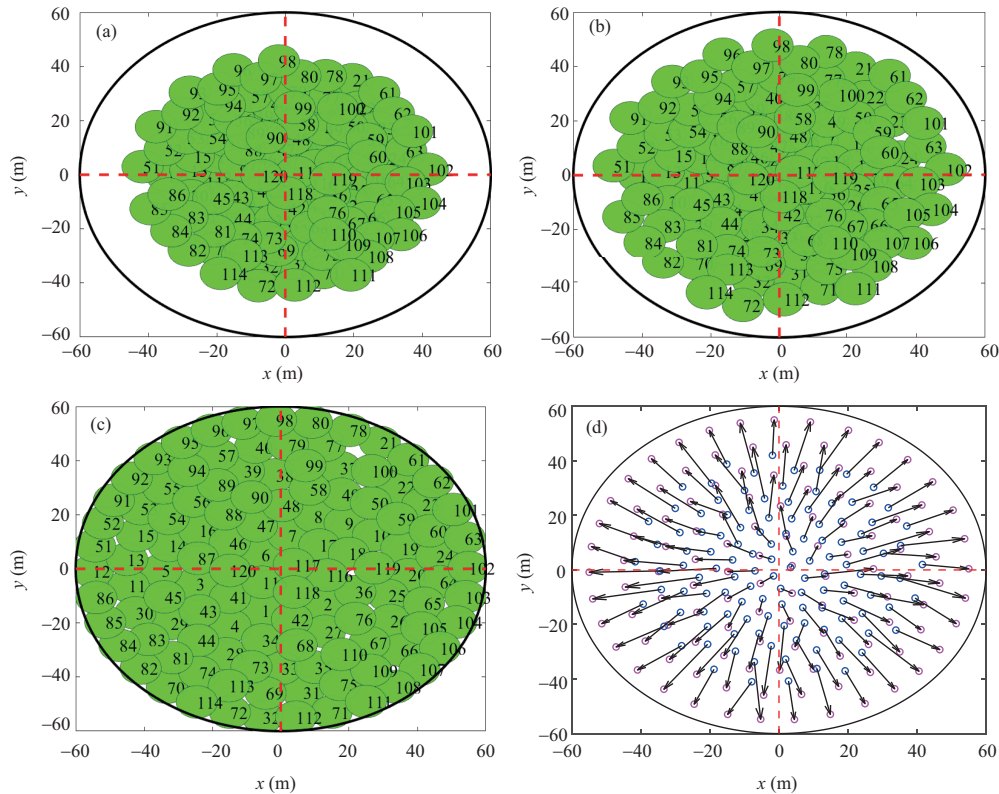


图 13 (网络版彩图) 120 个移动智能体不同阶段的覆盖状态和移动路径

Figure 13 (Color online) Coverage states of different times and moving paths of 120 mobile agents. (a) Initial coverage state; (b) one of coverage states; (c) final coverage state; (d) moving paths of mobile agents

个移动智能体子群合作博弈覆盖作业的覆盖率和博弈次数之间的关系曲线, 该图说明博弈 80 轮次后总体覆盖率达到了 95.0%, 随后, 随着博弈轮次的增加, 总覆盖率小幅度逐渐增大, 经过 240 轮的合作博弈, 最后达到了目标覆盖率 98.0%.

从上面的例子可以看到, 无论待覆盖的区域是方形域还是圆形域, 通过将移动智能体集群进行子集分解, 并基于虚拟排斥力的合作博弈覆盖控制方法可以实现非完全信息条件下的覆盖控制问题. 事实上, 4 个移动智能体子群 C_1, C_2, C_3 和 C_4 在每一轮的合作博弈过程中, 除了相邻边界附近位于其他子群内若干智能体观测范围之内的智能体外, 每一个子集群中各智能体位置信息对其他子集群中的智能体而言均是未知的. 通过合作博弈的方式实现了非完全信息条件下的动态覆盖控制问题, 同时有效减小了各智能体之间的通信成本及其覆盖能耗. 特别需要指出的是, 当移动智能体子群的个数为 1, 亦即对智能体集群不进行子集群分解时, 该覆盖控制问题退化为完全信息条件下的动态覆盖控制问题, 即第 4.1 小节的情形.

另外, 在覆盖控制过程的每一轮合作博弈中, 移动智能体只进行当前位置移动大小和方向的计算及其更新, 不进行实际物理位置的移动, 直到达到目标覆盖率后, 移动智能体进行一次位置移动; 或者可设置智能体物理移动的阈值, 每连续多轮合作博弈且博弈次数达到该阈值时, 再进行智能体的实际物理移动, 该策略亦可大大减少智能体因频繁物理移动造成的覆盖成本. 图 12 和 14 说明了基于本文的合作博弈覆盖控制算法, 在覆盖控制初期, 覆盖率快速增大; 随着博弈轮次的增加, 覆盖率继续增大, 当覆盖率增大到一定值时, 其增幅显著减小; 再经过多轮次的合作博弈覆盖作业, 最终达到目标覆盖

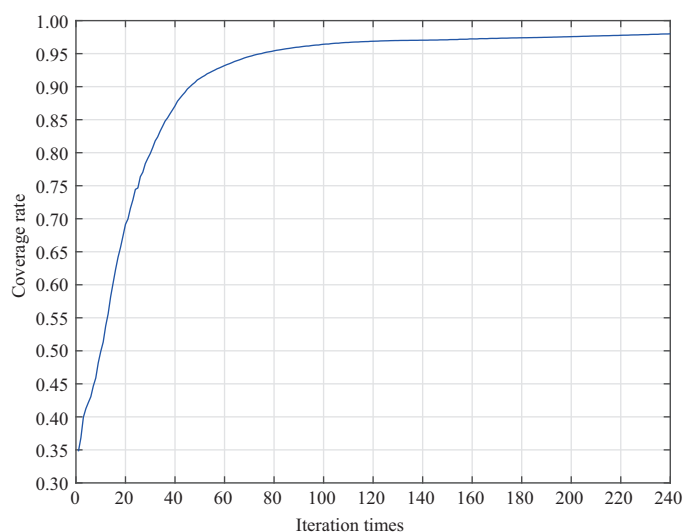


图 14 (网络版彩图) 120 个智能体圆域上的覆盖率和迭代次数关系曲线

Figure 14 (Color online) Relation curve of coverage rate versus iteration times of 120 mobile agents on a circle area

率, 完成整个覆盖控制任务. 对于目标覆盖率较大的情形, 上述特点尤为突出, 而当目标覆盖率较小时, 基于本文的合作博弈覆盖算法, 可以快速实现覆盖控制作业.

5 结论

本文研究了非完全信息条件下的移动智能体集群合作博弈动态覆盖控制问题, 提出了基于虚拟控制力的合作博弈动态覆盖控制算法. 为了降低智能体集群覆盖控制的规模和减小覆盖控制的成本, 基于化整为零和合作博弈的思想, 通过将移动多智能体集群分解为若干个智能体子群, 进而将集群的覆盖控制问题转化为非完全信息条件下各子群之间的合作博弈分布覆盖问题; 给出了智能体之间以及智能体和覆盖域边界之间虚拟排斥力的计算方法, 跟已有的智能体间虚拟力计算方法相比, 该算法更加简单直观. 提出了移动智能体集群基于虚拟排斥力的合作博弈覆盖规则及其博弈算法, 该博弈覆盖控制算法可以应用于包括方形域、圆形域以及可以利用二者界定的更一般覆盖域的覆盖控制问题, 收敛速度快, 覆盖效率高. 同时, 在覆盖控制过程中, 视多智能体集群及其覆盖控制问题分别为刚性虚拟结构以及以刚性虚拟结构为参照系的覆盖控制问题, 简化了多智能体系统覆盖位移路径设计, 进一步降低了智能体覆盖控制的通信成本和覆盖能耗. 仿真结果表明, 本文提出的基于虚拟排斥力的合作博弈覆盖控制算法能够有效实现覆盖控制任务; 跟已有的同类型基于虚拟力的覆盖控制方法相比, 本文提出的算法覆盖效率更高, 且能有效降低覆盖控制成本.

本文提出的基于虚拟排斥力的合作博弈覆盖控制算法给出了非完全信息条件下实现移动智能体集群分布覆盖的一种方法, 该方法具有覆盖效率高, 覆盖成本低等优点. 然而, 关于该覆盖控制算法, 下面几个问题亟待进一步研究:

- 智能体集群的初始覆盖状态对合作博弈覆盖控制算法收敛速度的影响. 研究发现, 智能体初始覆盖状态及覆盖率对覆盖效率有一定影响, 如何从理论上定量刻画出二者的关系, 值得进一步讨论.
- 虚拟控制力和智能体位移修正量计算时调节参数 k_e, k_s, k_b 和 k_δ 的最优选择问题. 上述四个调节参数对覆盖效率亦有一定影响, 如何设定或者给出它们的最优值, 有待进一步分析.

• 结合智能体的动力学或运动学特性的合作博弈覆盖控制问题研究. 本文将多智能体集群视为刚性虚拟结构进行覆盖控制算法设计, 忽略了智能体的动力学或运动学特性. 如何结合智能体的动力学特性和具体的覆盖应用场景, 研究智能体集群的合作博弈覆盖控制问题, 亟待深入研究.

参考文献

- 1 Derakhshan F, Yousefi S. A review on the applications of multiagent systems in wireless sensor networks. *Int J Distrib Sens Networks*, 2019, 15: 1–19
- 2 Wang J, Hong Y, Wang J, et al. Cooperative and competitive multi-agent systems: from optimization to games. *IEEE/CAA J Autom Sin*, 2022, 9: 763–783
- 3 Laport-López F, Serrano E, Bajo J, et al. A review of mobile sensing systems, applications, and opportunities. *Knowl Inf Syst*, 2020, 62: 145–174
- 4 Bentz W, Hoang T, Bayasgalan E, et al. Complete 3-D dynamic coverage in energy-constrained multi-UAV sensor networks. *Auton Robot*, 2018, 42: 825–851
- 5 Ma L, He F, Wang L, et al. Multi-agent coverage control design with dynamic sensing regions. *Control Theor Technol*, 2018, 16: 161–172
- 6 Huang S, Teo R S H, Leong W W L, et al. Coverage control of multiple unmanned aerial vehicles: a short review. *Unmanned Syst*, 2018, 06: 131–144
- 7 Ji K, Zhang Q, Yuan Z, et al. A virtual force interaction scheme for multi-robot environment monitoring. *Robot Auton Syst*, 2022, 149: 103967
- 8 Din A, Ismail M Y, Shah B, et al. A deep reinforcement learning-based multi-agent area coverage control for smart agriculture. *Comput Electrical Eng*, 2022, 101: 108089
- 9 Liu Y C, Lin T C, Lin M T. Indirect/direct learning coverage control for wireless sensor and mobile robot networks. *IEEE Trans Contr Syst Technol*, 2022, 30: 202–217
- 10 Luo K, Hu B, Guan Z H, et al. Distributed coordination of multi-agent systems for neutralizing unknown threats based on a mixed coverage-tracking metric. *J Franklin Inst*, 2020, 357: 12700–12723
- 11 Xu X L, Yang L X, Meng W, et al. Multi-agent coverage search in unknown environments with obstacles: a survey. In: *Proceedings of the 38th Chinese Control Conference*, Guangzhou, 2019. 2317–2322
- 12 Wen Q, Zhao X Q, Cui Y P, et al. Coverage enhancement algorithm for WSNs based on vampire bat and improved virtual force. *IEEE Sens J*, 2022, 22: 8245–8256
- 13 Zhai C, Wang Z, Dou J. Multi-agent coverage control for enhanced geohazard monitoring: a brief review. *Control Theor Technol*, 2021, 19: 418–420
- 14 Liu S, Zhang R, Shi Y. Design of coverage algorithm for mobile sensor networks based on virtual molecular force. *Comput Commun*, 2020, 150: 269–277
- 15 Song P, Li J Z, Li K J, et al. Researching on optimal distribution of mobile nodes in wireless sensor networks being deployed randomly. In: *Proceedings of International Conference on Computer Science and Information Technology*, Singapore, 2008. 322–326
- 16 So-In C, Nguyen T G, Nguyen N G. An efficient coverage hole-healing algorithm for area-coverage improvements in mobile sensor networks. *Peer-to-Peer Netw Appl*, 2019, 12: 541–552
- 17 Etancelin J M, Fabbri A, Guinand F, et al. DACYCLEM: a decentralized algorithm for maximizing coverage and lifetime in a mobile wireless sensor network. *Ad Hoc Networks*, 2019, 87: 174–187
- 18 Mahboubi H, Aghdam A G. Distributed deployment algorithms for coverage improvement in a network of wireless mobile sensors: relocation by virtual force. *IEEE Trans Control Netw Syst*, 2017, 4: 736–748
- 19 Habibi J, Mahboubi H, Aghdam A G. A gradient-based coverage optimization strategy for mobile sensor networks. *IEEE Trans Control Netw Syst*, 2017, 4: 477–488
- 20 Marden J R, Wierman A. Distributed welfare games. *Oper Res*, 2013, 61: 155–168
- 21 Zhu M, Martínez S. Distributed coverage games for energy-aware mobile sensor networks. *SIAM J Control Optim*, 2013, 51: 1–27
- 22 Rahili S, Lu J, Ren W, et al. Distributed coverage control of mobile sensor networks in unknown environment using game theory: algorithms and experiments. *IEEE Trans Mobile Comput*, 2018, 17: 1303–1313

Dynamic game coverage control algorithms for multiple mobile agents through virtual repulsive force

Hao SU¹, Bao-Lin ZHANG^{2*}, Yan JI², Zhihui CAI³, Jian XUE⁴, Hui MA¹ & Yuanshi ZHENG^{5*}

1. *College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;*
2. *College of Automation and Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China;*
3. *College of Science, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;*
4. *School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*
5. *School of Mechano-electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China*

* Corresponding author. E-mail: zhangbl2020@qust.edu.cn, zhengyuanshi2005@163.com

Abstract To improve the coverage efficiency of mobile agents, the related information of the agents is generally required partially or completely during the coverage control process, which may lead to a dramatic control cost and energy consumption increase. How to balance the improvement in coverage rate and the reduction of control cost is an important issue in the coverage control area of mobile agents. This paper addresses the dynamic cooperative game coverage control algorithm design problem of a multi-agent system under an incomplete information condition. First, by separating the moving multi-agent system into several subgroups, where each agent can only obtain the position information of the neighbor agents, the coverage control problem of the moving multi-agent system is transformed into a dynamic cooperative game coverage problem of moving multi-groups under incomplete information conditions. Then, the cooperative game rules of the subgroups are presented, and a virtual repulsive force-based dynamic coverage game decision strategy of the agent system is developed to compute the new candidate positions of the agents. Third, the moving multi-agent system is considered a rigid virtual structure, and the coverage control problem of the system is turned into a new one with the virtual structure as a reference frame. Thus, the displacement path planning design of the coverage control for a multi-agent system is simplified. Simulation results reveal that the dynamic cooperative game coverage algorithm based on the virtual repulsive force can effectively realize the coverage control requirement of the moving agent system under the incomplete information condition and can remarkably reduce the cost of coverage control. In addition, compared with several existing coverage algorithms, using the dynamic cooperative game coverage algorithm proposed in this paper requires fewer moving times of agents while obtaining a higher coverage rate.

Keywords dynamic game, network coverage, distributed algorithms, multi-agent systems, virtual repulsive force