

文章编号: 1001-9081(2019)S1-0046-04

面向无人机集群自组织区域覆盖的分布式互惠规划方法

陈伟^{*}, 胡应龙

(中国人民解放军 75837 部队, 广州 510000)

(* 通信作者电子邮箱 173767890@qq.com)

摘要:针对传统的分布式区域覆盖规划算法存在收敛时间长、无人机运动震荡等问题,提出了一种基于互惠原理的无人机集群区域覆盖自组织规划方法。一方面,不同于传统的位型空间建模优化方法,该方法将集群区域覆盖问题直接在速度域下进行建模和优化求解,更加简洁和有效,能够缩短建模优化求解时间。另一方面,该方法考虑了邻间无人机的互惠行为,通过调整无人机相对邻间无人机的速度来确定最佳覆盖区域速度区间,能够减少无人机运动时产生的震荡。通过和两类代表性方法进行对比的仿真实验结果分析得出所提方法具有更高的覆盖率、更短收敛时间和运算时间。

关键词:无人机集群; 区域覆盖; 分布式规划; 互惠行为; 集群智能

中图分类号: TP399 **文献标志码:** A

Distributed planning method based on reciprocal principle for self-organized area coverage of UAV

CHEN Wei^{*}, HU Yinglong

(75837 Unit of PLA, Guangzhou Guangdong 510000, China)

Abstract: Since there exists some problems in the traditional distributed area coverage planning algorithms, such as long convergence time and motion oscillation of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) in the traditional distributed area coverage planning algorithms, a self-organized planning method based on reciprocal principle for area coverage of UAV swarm was proposed. On one hand, different from the traditional configuration space modeling and optimization method, the proposed method directly model and optimize the swarm coverage problem in the velocity space, which is more concise and effective, and shortens the operation time. On the other hand, with the reciprocal behaviors between the neighbor UAVs considered, the optimal coverage velocity region was determined by adjusting relative velocity of the UAV to its neighbors, reducing the motion oscillation of the UAV. Simulation results show that compared with two representative methods, the proposed method has higher coverage rate, shorter convergence and operation time.

Key words: Unmanned Aerial Vehicle (UAV) swarm; regional coverage; distributed planning; reciprocal behavior; swarm intelligence

0 引言

无人机集群区域覆盖是一个重要的研究问题,主要解决如何通过大规模无人机进行指定区域的覆盖,从而达到集群系统的最佳性能,如覆盖时间最短、覆盖率最高等。无人机集群覆盖具有十分广泛的应用,如地理测绘、搜索救援、灾情监视等。尽管指定覆盖区域可能在形状和大小上有所不同,也可能充满各种障碍,但利用无人机进行区域覆盖主要包括以下几个流程。首先,无人机感知环境信息后,利用一些区域分割方法对指定区域进行划分^[1];其次,无人机执行任务规划和航迹规划进程^[2-3];最后,无人机的控制器和执行器完成规划好的任务流程^[4]。在这些步骤中,区域分割和行为决策是最为基础和重要的,然而它们本质上是覆盖任务规划。

早期覆盖规划的研究主要针对单机覆盖指定区域的方法研究,如扫描方式^[5]、区域分割^[6]和进程规划^[7]。随后,研究者更加侧重多无人机协同区域覆盖,因为多无人机协同区域覆盖比单无人机区域覆盖具有更好的效果,如覆盖时间更短、覆盖率更高等。多机区域覆盖规划主要有两种方法,一是集

中式规划,二是分布式规划。前者基于全局信息能够获得更好的部署配置,但其扩展性因它的指数增长计算量而受到限制^[8];后者具有更好的灵活性和扩展性,因为它能够通过局部信息和邻间通信无需获取全局信息而适应更多的变化的内外部环境,但可能比较难得到最佳覆盖部署^[9]。分布式集群覆盖方法可分为分区决策型和直接决策型两类,前者通过分割算法对区域进行划分随后基于分区进行规划,后者无需分区直接进行规划。分区决策型的代表算法为维诺图法^[10],应用维诺图对区域进行划分,随后基于维诺图格进行覆盖规划。直接决策型的代表算法是虚拟力法^[11],直接通过虚拟力之间的吸引和排斥进行覆盖规划。这两类算法都具有较好的效果,但利用互惠思想和直接在速度空间内进行建模优化可提高运算速度、覆盖效果和无人机轨迹平滑度。

本文提出可用于集群覆盖规划问题的一种自组织互惠规划方法,该方法直接在速度域内进行建模优化求解,且无需通过大量的重复实验确定最佳参数,使得该方法具有更好的扩展性和灵活性。此外,该方法利用互惠思想,减轻无人机间运动的震荡情况,使得无人机轨迹更为平滑。最后通过与维诺

收稿日期:2018-08-06;修回日期:2018-10-09。

作者简介:陈伟(1982—),男,湖南衡阳人,工程师,硕士,主要研究方向:任务规划、机器学习;胡应龙(1984—),男,湖南岳阳人,助理工程师,硕士,主要研究方向:计算机仿真、机器学习。

图法和虚拟力法这两类代表算法进行实验仿真比较, 分析对比得出本文方法具有更高的覆盖率、更低的无谓损失、更短的运算时间和收敛时间。

1 互惠规划

不失一般性, 将指定需要覆盖的二维凸区域设为 Ω , 无人机数量为 n 架, 其覆盖区域、机体大小和通信范围设为圆盘状, 半径分别为 r 、 R 和 CR 。此外, 每架无人机 A 具有它的最大速度 v_A^{\max} , 最大计算圆形区域半径 R_A^{\max} , 最大邻间计算数量 n_A^{\max} 以及其预测时间间隔 t 。无人机的位置用符号 m 表示, 速度用 v 表示。无人机任意分布在矩形区域 Ω_c 内, 矩形边长均为 l_c , 无人机一开始均为静止状态。

对于两个具有有限覆盖能力的无人机 A 和 B , 它们一开始十分接近彼此但无碰撞, 且它们的起始速度均为 0; 因此, 如果它们需要通过减小两个无人机间的覆盖重叠率来增加总的覆盖区域面积, 那么它们需要选择它们对彼此有利的新速度。假设无人机 A 在时间间隔 t 内采用了相对 B 的速度 v , 而在此速度下均不利于增加总区域覆盖面积, 我们称其为“弱覆盖速度”。集合 $WCV_{A|B}^t$ 是一个包含了所有无人机 A 相对于无人机 B 弱覆盖速度的空间, 其定义接下来会进行阐述。首先定义 $C(m, R)$ 为一个圆心在 m 、半径为 R 的一个开环, 其定义如下:

$$C(m, R) = \{w \mid \|w - m\| < R\} \quad (1)$$

因此, 弱覆盖速度空间 $WCV_{A|B}^t$ 定义如下:

$$WCV_{A|B}^t = \{v \mid \exists t \in [0, t]: tv \in C(m_B - m_A, \|m_B - m_A\|)\} \quad (2)$$

相对应的强覆盖速度空间为 $OCV_{A|B}^t$, 其为无人机 A 在时间间隔 t 内选择相对于无人机 B 的利于总覆盖区域增加的速度空间:

$$OCV_{A|B}^t = \{v \mid v \notin WCV_{A|B}^t\} \quad (3)$$

无人机 A 的弱覆盖速度集合 $WCV_{A|B}^t$ 的图形化表示如图 1, 可以清晰地发现集合 $WCV_{A|B}^t$ 和 $WCV_{B|A}^t$ 是关于原点对称的。图 1(a) 为无人机 A 和 B 在位型空间上的图形化表示, 无人机 A 和 B 中心为 m_A 和 m_B , 且它们具有不同的形状半径 (r_A 和 r_B) 和通信半径 (R_A 和 R_B)。图 1(b) 为无人机 A 的弱覆盖速度集合 $WCV_{A|B}^t$, 其在速度空间内表示为中心在 $(m_B - m_A)/t$ 半径 $R_t = \|m_B - m_A\|/t$ 的圆, 其中 t 是预测时间间隔, 在此图中 $t=1$ 和 $t=2$ 。 $WCV_{A|B}^t$ 是一条将弱覆盖速度集合 $WCV_{A|B}^t$ 和强覆盖速度集合 $OCV_{A|B}^t$ 完全分开的分割线。此外, 易知无人机 B 很难在时间间隔 t 内保持固定速度 v_B , 因此如果无人机 B 速度 $v_B \in V_B$, 那么无人机 A 应该选择一个速度集合 $OCV_{A|B}^t(V_B)$, 使其不在其闵可夫斯基^[12] 集合 $WCV_{A|B}^t \oplus V_B$ 中, 如图 1(c) 所示。

考虑无人机间的互惠行为, 如果一对速度集合为无人机 A 的速度 V_A 和无人机 B 的速度 V_B , 其满足约束 $V_A \subseteq OCV_{A|B}^t(V_B)$ 和 $V_B \subseteq OCV_{B|A}^t(V_A)$, 那么称它们是覆盖互惠的速度。 $ORCV_{A|B}^t$ 和 $ORCV_{B|A}^t$ 是互惠覆盖速度空间内在时间间隔 t 内最大化的互惠速度空间, 其包含了最多的从当前速度到最佳速度的调整, 此集合 $ORCV_{A|B}^t$ 和 $ORCV_{B|A}^t$ 定义如下所示。

定义 1 最佳互惠覆盖速度。符号 \bar{A} 表示集合 A 的势^[13]。 $ORCV_{A|B}^t$ 和 $ORCV_{B|A}^t$ 由 $OCV_{A|B}^t(ORCV_{B|A}^t) = ORCV_{A|B}^t$ 和 $OCV_{B|A}^t(ORCV_{A|B}^t) = ORCV_{B|A}^t$ 决定。对于所有互惠覆盖速度 V_A 和 V_B 来说, (比如 $V_A \subseteq OCV_{A|B}^t(V_B)$ 和 $V_B \subseteq OCV_{B|A}^t(V_A)$), 并且对于所有的半径 r , 都满足以下约束:

$$\begin{cases} S_A = ORCV_{A|B}^t \cap C(v_A^{\text{opt}}, r) \\ S_B = ORCV_{B|A}^t \cap C(v_B^{\text{opt}}, r) \\ S_A' = V_A \cap C(v_A^{\text{opt}}, r) \\ S_B' = V_B \cap C(v_B^{\text{opt}}, r) \\ S_{\min} = \min(\bar{S}_A', \bar{S}_B') \\ \bar{S}_A = \bar{S}_B \\ \bar{S}_A \bar{S}_B \geq S_{\min} \end{cases} \quad (4)$$

换句话说, $ORCV_{A|B}^t$ 和 $ORCV_{B|A}^t$ 包含了最多接近无人机 A 和 B 当前速度 v_A^{cur} 和 v_B^{cur} 的速度范围。无人机 A 和 B 分别选择的新速度与它们当前速度 v_A^{cur} 和 v_B^{cur} 是相等的, $ORCV_{A|B}^t$ 和 $ORCV_{B|A}^t$ 的构建如图 2 所示。

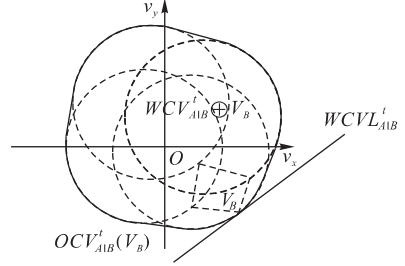
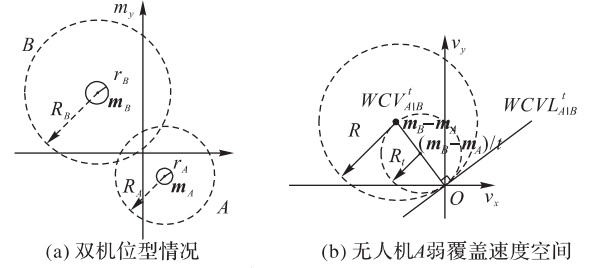


图 1 无人机 A 和 B 覆盖问题求解在速度域内的描述

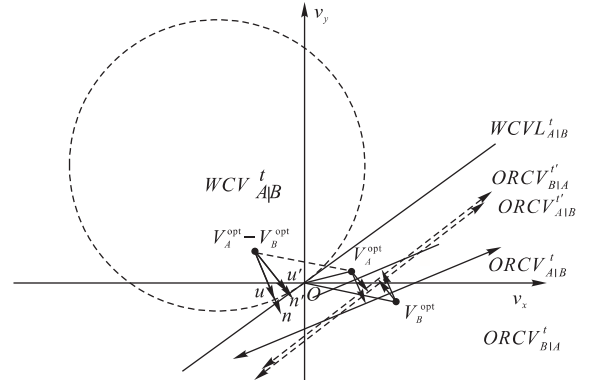


图 2 构建 A 相对于 B 的最佳互惠覆盖空间 $ORCV_{A|B}^t$ 的两种方式

如果 $v_A^{\text{cur}} - v_B^{\text{cur}} \in WCV_{A|B}^t$, 则意味着以当前速度运动将会导致无人机 A 和 B 之间的弱覆盖。在这种情况下, 如果无人机 A 和 B 能够采取它们的新速度 v_A^{new} 和 v_B^{new} , 而它们的新速度满足 $v_A^{\text{new}} - v_B^{\text{new}} \notin WCV_{A|B}^t$ 空间的约束, 那么总覆盖面积将会增加。符号 u 表示从当前速度差向量 $v_A^{\text{cur}} - v_B^{\text{cur}}$ 到 $WCV_{A|B}^t$ 最近边界的点:

$$u = \left(\operatorname{argmin}_{v \in WCV_{A|B}^t} \|v - (v_A^{\text{cur}} - v_B^{\text{cur}})\| \right) - (v_A^{\text{cur}} - v_B^{\text{cur}}) \quad (5)$$

另外也可以选择让 u' 选择为 $v_A^{\text{cur}} - v_B^{\text{cur}}$ 到 $WCV_{A|B}^t$ 边界的最近的点:

$$u' = \left(\operatorname{argmin}_{v \in WCV_{A|B}^t} \|v - (v_A^{\text{cur}} - v_B^{\text{cur}})\| \right) - (v_A^{\text{cur}} - v_B^{\text{cur}}) \quad (6)$$

n 为点 $(v_A^{\text{cur}} - v_B^{\text{cur}}) + u$ 到 $WCV_{A|B}^t$ 边界的向外单位向量,

因为 u 是无人机 A 和无人机 B 在 t 时间内需要改变的最小速度变化, 并且双方都平分避免弱覆盖的责任, 故无人机采用的改变至少 $0.5u$ 的速度变化, 而无人机 B 肩负另一半:

$$ORCV_{A|B}^t = \{v | (v - (v_A^{\text{cur}} + u/2)) \cdot n \geq 0\} \quad (7)$$

显然, 集合 $ORCV_{B|A}^t$ 对于无人机 B 也是如此定义的, 且和集合 $ORCV_{A|B}^t$ 是关于原点对称的。此外, 以上方法也可以应用到 $v_A^{\text{cur}} - v_B^{\text{cur}} \notin WCV_{A|B}^t$ 的情形, 这意味着当无人机 A 和 B 不会产生弱覆盖时它们仍能够采用它们当前的速度 v_A^{cur} 和 v_B^{cur} 。然而, 在这种情况下, 这两个无人机仍能够利用上述方法来维持强覆盖行为。

2 集群覆盖

每架无人机 A 在每个时间间隔 Δt 内执行一个感知和行动的周期, 在每个周期中无人机 A 利用 KD 树搜索距离它 D_A^{max} 内的最近的 n_A^{max} 架无人机, 并获取位置和速度信息。随后, 无人机 A 推断所有其邻间无人机 B 的强覆盖区域 $ORCV_{A|B}^t$, 所有的 $ORCV_{A|B}^t$ 的交集构成 $ORCV_A^t$ 。此外, 无人机 A 还受到其自身最大速度约束。

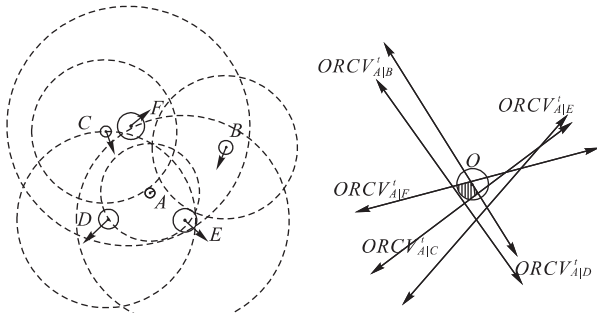


图 3 无人机 A 和其周围无人机位型情况及 $ORCV_A^t$ 的构建

$$ORCV_A^t = C(0, p_A^{\text{max}}) \cap_{B \neq A} ORCV_{A|B}^t \quad (8)$$

接下来, 无人机 A 将选择一个新的速度 v_A^{new} 作为其最佳速度, 这里为强覆盖区域的中心:

$$v_A^{\text{new}} = \operatorname{argmin}_{v \in ORCV_A^t} \|v - v_A^{\text{opt}}\| \quad (9)$$

最后, 无人机 A 到达它的新位置:

$$m_A^{\text{new}} = m_A + v_A^{\text{new}} \Delta t \quad (10)$$

3 仿真实验

为了验证本文提出算法的有效性, 本文与两种代表性方法进行对比, 在覆盖率、无谓损失、轨迹平滑度和收敛速度等性能指标进行分析比较。本文仿真实验通过 OpenMP 来进行核心部分的并行计算, 平台架构为 x64 且环境为八核 Intel 2.60 GHz, 仿真参数如表 1 所示。

表 1 实验仿真参数

参数	值	描述
T	0.25 s	仿真步长
ζ	10^{-5}	算法终止阈值
l_e, l_a	250 m, 50 m	方形区域 Ω_e, Ω_a 的长
n, n'	25, 1000	无人机数量
v_i^{max}	2 m/s	无人机的最大速度
r, R, CR	0.5 m, 25 m, 70 m	无人机形状、感知和通信半径
$n_i^{\text{max}}, R_i^{\text{max}}$	4, 51 m	最大考虑邻间无人机数量和距离

当 $\sup \|a_{i+1}^* - a_i^*\|_2 \leq \zeta$, 算法终止; 无人机一开始为随机分布在 Ω_a 方形区域。根据无人机局部信息, 它们开始扩散提高覆盖率, 最终达到一个收敛的稳态。

如图 4 所示为本文方法和维诺图法^[10]、虚拟力方法^[11]的对比, 其中图 (a) ~ (c) 为本文方法, 图 (d) ~ (f) 为维诺图法, 图 (g) ~ (i) 为虚拟力法, 各种方法中以此为起始位置、记录轨迹和最终收敛稳态。

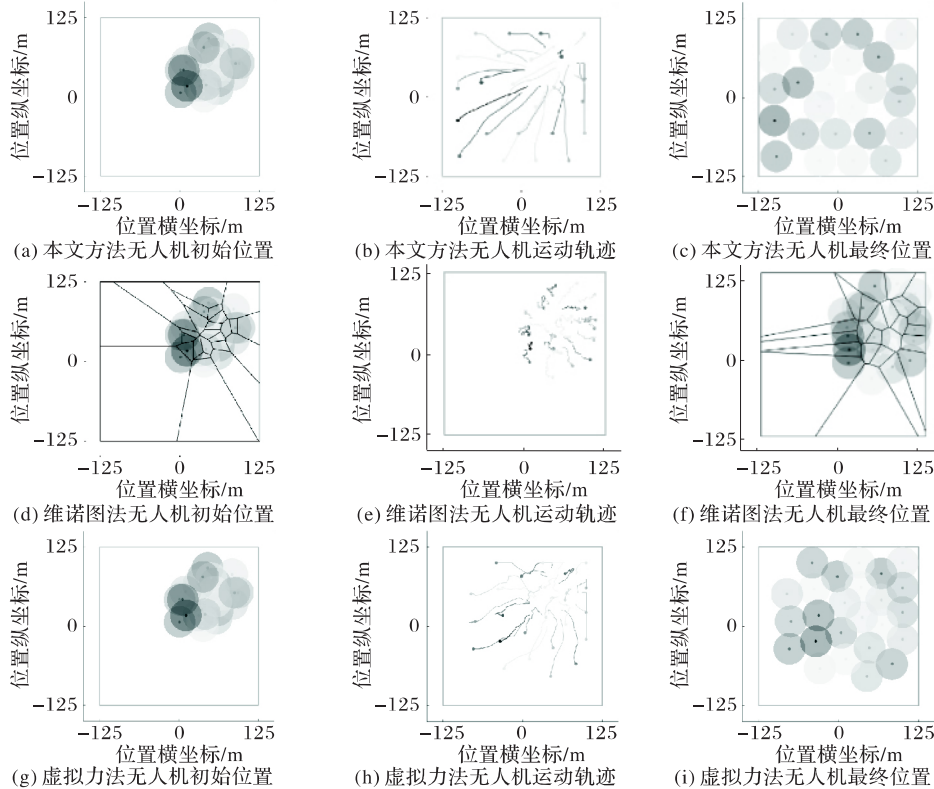


图 4 三种方法驱动下的无人机覆盖全流程情况对比

如图 5 所示为随意选择一架无人机的轨迹平滑情况对比, 可以发现本文所提方法因考虑了无人机间的互惠行为, 故

较另外两种方法减少了更多的震荡情况,从而降低因过度震荡引起的失控概率,在路径最优、能耗最低、覆盖时间最短的同时提升无人机飞行安全可靠。

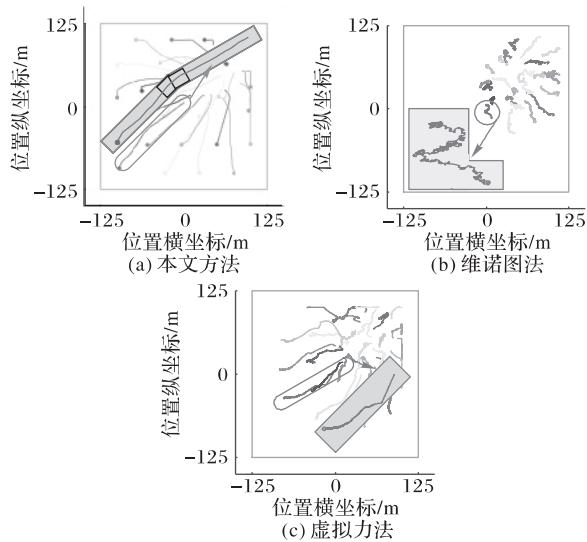


图5 三种方法驱动下的无人机轨迹平滑情况对比

接下来,本文对三种方法的覆盖率和无谓损失进行比较,如图6所示。可以发现本文提出的方法比维诺图法和虚拟力法这两类代表性算法都具有更高的覆盖率和更低的无谓损失。这也归功于本文提出方法运用了互惠行为思想,使得无人机集群自组织覆盖时间最短,成本最低。

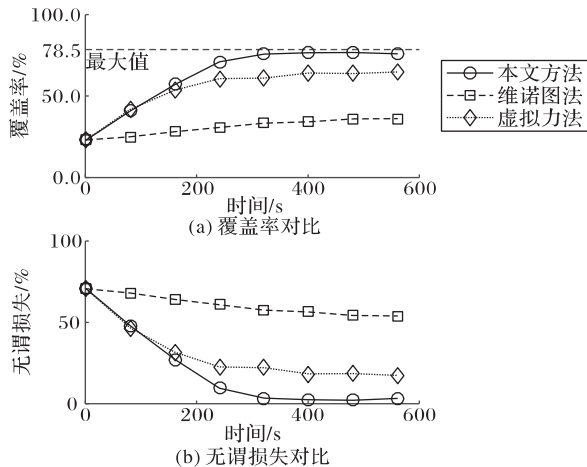


图6 三种方法覆盖率和无谓损失对比情况

随着无人机数量的增长,收敛速度差异也展现了较大的差异,如图7所示为三种方法的情况,可以发现本文方法较其他两种方法收敛次数更少,具有更好的扩展性。

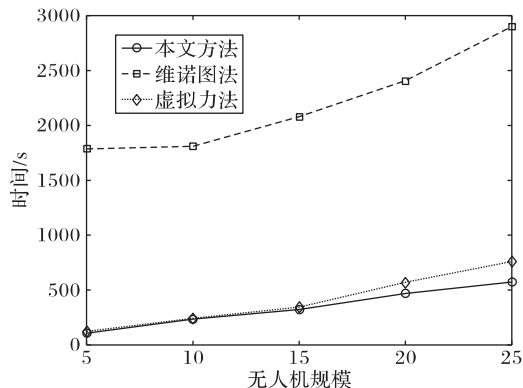


图7 无人机不同规模下三种方法收敛速度情况对比

当无人机数量 $n = 25$ 时,本文对三种方法在不同环境情

况下进行分析统计,结果如表2所示。对于每架无人机,采用本文方法每次规划仅需 14.807 ms,采用虚拟力法需 42.798 ms,而采用维诺图法需多于 500 ms。本文方法直接在速度空间进行优化求解,较位型空间求解方法具有更好的效能。

表2 无人机规模 $n = 25$ 时的三类方法计算速度对比

方法	情况 1	情况 2	情况 3	平均时间 /ms
本文方法	10.857	20.280	13.266	14.807
维诺图法	591.148	605.856	632.880	609.961
虚拟力法	36.749	48.072	43.573	42.798

4 结语

本文针对无人机集群自组织覆盖问题,设计了一种分布式互惠规划方法,利用邻间无人机的互惠行为产生集群协同覆盖。此方法直接在速度空间内进行建模优化求解,极大减少运算量缩短计算时间,更加简洁有效,同时利用了无人机间的互惠思想,使得协同覆盖中无人机覆盖速度更快,有效减少无人机运动过程中产生的震荡,轨迹更为平滑。通过与两类代表算法进行仿真比较,对比分析得出本方法具有更高的覆盖率、更快的收敛速度和更短的运算时间。同时,本方法也适合感知能力随飞行高度变化等异构感知系统,无需通过大量重复实验确定最佳参数,更加具有扩展性和有效性。下一步,通过简单的维度扩展和约束添加,本方法可运用于三维空间动力约束模型环境中,扩大了该方法的适用范围。

参考文献:

- [1] 黄成. 多机器人区域分割优化覆盖算法研究[J]. 电脑与信息技术, 2018, 26(3): 5-7.
- [2] 陈海, 何开锋, 钱炜祺. 多无人机协同覆盖路径规划[J]. 航空学报, 2016, 37(3): 928-935.
- [3] 朱创创, 梁晓龙, 何吕龙, 等. 群目标侦察航迹规划方法[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(1): 47-51.
- [4] 刘海龙. 多无人机协同覆盖路径规划的算法设计[D]. 南京: 东南大学, 2017: 1-4.
- [5] 神显豪, 李军, 奈何. 感知受限的移动传感器节点扫描覆盖优化算法[J]. 计算机应用, 2017, 37(1): 60-64.
- [6] 魏潇龙, 姚登凯, 谷志鸣, 等. 基于分割法的无人机路径规划研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(1): 90-94.
- [7] BALAMPANIS F, MAZA I, OLLERO A. Coastal areas division and coverage with multiple UAVs for remote sensing[J]. Sensors, 2017, 17(4): 808.
- [8] AVELLAR G, PEREIRA G, PIMENTA L, et al. Multi-UAV routing for area coverage and remote sensing with minimum time[J]. Sensors, 2015, 15(11): 27783.
- [9] SHARMA S, SHUKLA A, TIWARI R. Multi robot area exploration using nature inspired algorithm[J]. Biologically Inspired Cognitive Architectures, 2016, 18: 80-94.
- [10] STERGIOPOULOS Y J, TZES A. Decentralized swarm coordination: a combined coverage/connectivity approach[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2011, 64(3/4): 603-623.
- [11] YU X, LIU N, QIAN X, et al. A deployment method based on spring force in wireless robot sensor networks[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2014, 11(5): 79.
- [12] CANNARSA P, CZAMECKI M-O. Minkowski content for reachable sets[J]. Manuscripta Mathematica, 2010, 131(3/4): 507-530.
- [13] DEISER O. On the development of the notion of a cardinal number[J]. History & Philosophy of Logic, 2010, 31(2): 123-143.