

有人/无人机协同打击航路智能规划

罗维尔[†], 魏瑞轩

(空军工程大学 航空工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 随着航空技术的发展, 战机朝着高速化、隐身化、无人化、智能化发展, 有人/无人机协同是当前的发展方向. 如何在满足协同约束的条件下, 对有人机和无人机的航路进行规划与控制, 并体现二者鲜明的职能分工还没有有效的方法. 本文阐述了一种基于聚类再分配, 得到待优化航路点的航路点预处理方法. 首先简要的对 K -means++ 算法的基本流程, 然后针对战地环境中目标的不规则分布特点, 建立了战地各要素模型, 提出将自适应增类的聚类思想和二次聚类模型应用到航路规划的航路点预处理中, 并使用匈牙利算法和遗传算法对航路点进行规划. 通过仿真验证, 本文提出的方法能够很好的避免传统算法的局限, 能够在满足协同条件的同时, 减小航路代价, 简化规划复杂度.

关键词: 无人机; K -均值算法; 自适应增类; 二次聚类; 有人/无人机协同; 目标智能分配

引用格式: 罗维尔, 魏瑞轩. 有人/无人机协同打击航路智能规划. 控制理论与应用, 2019, 36(7): 1090 – 1095

DOI: 10.7641/CTA.2019.80615

Intelligent route planning for cooperative striking of manned/unmanned aerial vehicle

LUO Wei-er[†], WEI Rui-xuan

(Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi 710038, China)

Abstract: With the development of aeronautical technology, warplanes are developed towards high speed, stealthy, unmanned and intelligent. Cooperative attacking for manned vehicle and unmanned aerial vehicle (UAV) is the current development direction. However, there is no effective method to plan and control the routes of manned aerial vehicles and unmanned aerial vehicles under the condition of meeting the cooperative constraints, reflecting the distinct division of work between them. This paper describes a method of route point preprocessing based on clustering-redistribution to obtain route points to be optimized. Firstly, the basic flow of K -means++ algorithm is briefly introduced. Then, according to the irregular distribution characteristics of targets in the battlefield environment, the battlefield element models are established. And the adaptive adding category clustering idea and the dual clustering model is applied to the route planning. The simulation results show that the proposed method can avoid the limitations of the traditional algorithm and can meet the requirements of cooperative engagement, reducing the cost of the route and simplify the planning complexity.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV); K -means algorithm; adaptive adding category; dual clustering; cooperating for manned aerial vehicle and UAVs; intelligent allocation of target

Citation: LUO Weier, WEI Ruixuan. Intelligent route planning for cooperative striking of manned/unmanned aerial vehicle. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(7): 1090 – 1095

1 引言

随着无人机技术的发展, 无人机的效费比逐步提升^[1], 将无人机应用于作战是军用无人机的发展方向^[2]. 目前由人在地面站对无人机进行控制的方法由于传输距离远、地理环境复杂等原因往往存在着时效性差, 通信连续性差的特点^[3-8], 此外, 目前无人机自主智能程度不高, 作战过程需要战机之间进行协同.

当有人机与无人机协同执行打击任务时, 有人机在安全区域引导无人机前出执行任务, 利用数据链进行通信与控制, 消灭威胁和打击敌方, 有人机和无人机的优势和劣势可以互补, 能更好的完成任务^[9]. 而在有人机与无人机的协同过程中, 既要满足各战机自身的安全, 也要满足作战的一系列要求.

传统方法将此类问题视作多旅行商(multiple tra-

收稿日期: 2018-08-18; 录用日期: 2019-03-13.

[†]通信作者. E-mail: afeu_lwe@163.com; Tel.: +86 29-84787729.

本文责任编辑: 王卓.

国家自然科学基金项目(61573373)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61573373).

veling salesman problems, mTSP)问题或以图论方法等. mTSP问题是从旅行商(traveling salesman problems, TSP)问题中引申出的一个典型的非确定性多项式(non-deterministic polynomial, NP)问题, 其中夏令儒等^[10]提出按mTSP算法进行多无人机的协同航路规划; Yu Q等^[11]提出了聚类后按mTSP问题求解的方法. 通过对任务点进行聚类预处理, 改善了航路的质量及运算的效率; 朱黔等^[12]考虑了在有持续时间约束下的规划问题, 采用了带有精英机制的混合粒子群算法. 二者都由于各飞机之间的航迹呈放射状分散, 无法保证协同的有效性. 柳长安等^[13]采用Voronoi图的方法, 描述任务区域, 再使用遗传算法对无人机的航路独立进行规划.

尽管在有人无人协同航路规划方面得到了一定的研究, 但主要解决的是战场较小, 对战机分开进行规划的情况, 缺乏在协同约束条件下, 各机种之间航路规划的统筹机制. 例如, mTSP问题以总体航迹代价最小作为指标函数, 考虑的是在无其他约束的情况下, 使总路程或费用最小^[14]. 理论上虽然可以得到较优的总路程代价, 但任务点的分布不均也容易导致各航路里程相差较大, 造成资源闲置.

而基于图论的方法考虑的多是对单一目标的多机切入方向及时机方面的问题. 例如, Voronoi图将威胁视为大小可忽略的点, 在固定的生成航线中进行规划可以保证对目标点切入方向和时机的战术要求. 但无法体现出有人机作为任务指挥机, 无人机作为任务执行机的协同分工特点.

为了确保有人无人协同的有效性, 实现二者协同分工对效能的提高, 需要研究对于有人无人协同航路规划的新方法. 本文通过分析传统方法的缺陷与短板, 提出了基于二次聚类的航路规划方法, 能够有效解决传统方法资源闲置、协同分工特点不明显的问题.

2 问题描述

如图1描述了一个超视距下的有人机和无人机协同集群, 从远离目标的位置依次对所有目标点进行协同打击的过程.

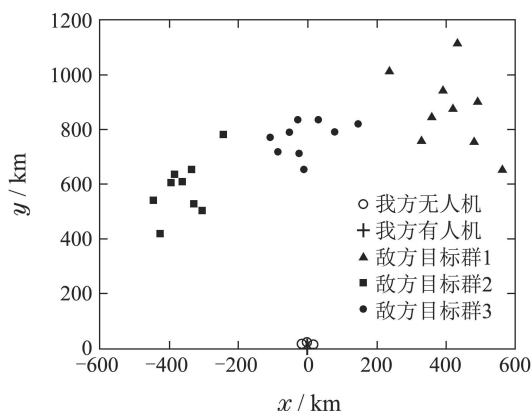


图1 战场目标分布

Fig. 1 Battlefield target distribution

由于武器投送、通信时延等原因要求有人机和无人机的距离阈值不能超过 R_d , 要求设计一套从起点(StartPos)开始, 经过各目标点, 并最终返回起点(StartPos)的航路集, 每个目标点确保有一条航线经过, 并保证路径代价最小.

3 不规则分布目标的有人/无人协同航路规划问题建模

3.1 战场各要素模型

为描述协同规划过程中各要素特点, 主要为有人机、无人机和目标3个主体进行建模.

目标模型: 在特定大小的战场区域 Ω 中, 目标 x_j 因地形等原因在一些区域不适合或无法部署, 因而大部分只会存在于战场中特定的一定区域, 由隶属关系或呈现出在一定区域内围绕某个中心聚集分布的目标群 S_i , 而随着中心目标属性的不同呈现出目标群内目标数量和疏密程度的不同.

对于任意目标 x_j 的坐标 (x_j^x, x_j^y, x_j^z) , 由于目标高度依地形分布的原因略有不同, 但绝大多数情况下 $\max(x_j^z) - \min(x_j^z) < 5 \text{ km}$, 对于几十至几百公里战场纵深和战机的飞行高度而言, 虽会在任务执行阶段产生一定差异, 但在聚类的效果上并不会产生太大影响. 因此在获得目标点 (x_j^x, x_j^y, x_j^z) 后, 可先进行数据预处理, 对样本进行降维, 得到 (x_j^x, x_j^y) . 这样既可以对聚类效果不产生太大变动, 又能有效提高数据的聚类速度, 提高算法的效率.

规避区模型: 在特定大小的战场区域 Ω 中, 部分区域可能属于障碍、危险、禁飞区等无法航行的区域, 记这些区域为 Ω_i^- , 当最终航线生成后, 若存在航线 l_k 与 Ω_i^- 产生交集, 可采用航路优化方法或航路点插值, 绕行规避区. 虽然牺牲了一定的航路代价, 但规避区域较小的规避区所带来的航路代价增量较小, 不会对整体产生太大影响; 而较大的规避区会因为战机协同过程中彼此距离较近, 使所有战机的航路代价增量近乎等量增加, 因此对协同过程的影响不大.

3.1.1 战机特点

战斗机的高速特性及有力的续航能力使得其能在短时间内到达多个战场, 在不同的目标上空执行任务, 战场纵深跨度大、打击面广.

有人机模型: 有人机作为协同和指挥的关键主体, 不作为作战的实施主体, 而是确保作战时能时刻与无人机进行协同, 保持良好的通信和安全的方位. 以目标群中心作为任务点进行规划, 由于对于战场大小来说有人机的大小可忽略不计, 可以近似为质点的运动.

无人机模型: 在协同中担负作战的实施主体, 直接参与作战, 对目标点进行打击. 以目标点作为任务点

进行规划. 相比于战场大小来无人机的大小可忽略不计, 可以近似为质点的运动.

3.1.2 协同特点

有人机与无人机协同的过程中, 无人机可在有人机的指挥和帮助下对目标进行侦查、攻击. 同时要求有人机和无人机的距离阈值不能超过 R_d 以保证协同的有效性.

由协同的特点及战场目标分布, 决定了所有战机的理想航迹应包含在一个宽度为 $2R_d$ 的带状区域内, 所有的目标点及航线应包含在这一带状区域中, 而带状区域的中轴线长度则可作为一项能反映出整体航线航路代价优劣的指标.

3.2 K-means++自适应增类算法的原理

K-means++ 算法由 David Arthur^[15]提出, 保证了各目标点到其他目标点的距离之和最大, 改进了 K-means 算法对初始聚类中心的比较敏感的缺点, 可以产生更有效的初始聚类中心^[16].

为了使得到的聚类都在指定范围内, 本文提出了使用 K-means++ 自适应增类算法. 算法流程如图2所示.

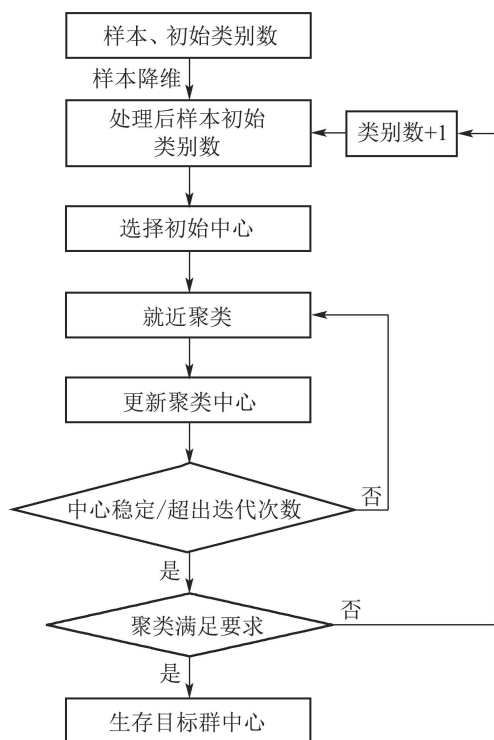


图2 自适应增类K-means++

Fig. 2 Adaptive adding category K-means++ algorithm

在获得 N 个样本的位置信息 x_j 之后, 先随机初始化一个初始聚类中心 $C = \{c_1\}$, 然后通过式(1)迭代

计算最大概率值:

$$\begin{cases} x^* = \arg \max_x \frac{d(x, C)}{\sum_{j=1}^n d(x_j, C)}, \\ d(x_j, C) = \sum_{i=1}^k \|x - c_i\|^2, \\ i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, N. \end{cases} \quad (1)$$

再以此作为下一个聚类中心, 以此类推, 直到生成 k 个中心为止. 以此产生的聚类中心可以保证目标点到其他目标点的距离足够大, 以确保之后的聚类更加有效. 按式(2)分配各样本到相近的聚类集合, 并按式(3)更新聚类中心:

$$S_i^{(t)} = \{x_j | \|x_j - c_i^{(t)}\|^2 \leq \|x_j - c_p^{(t)}\|^2\}, \quad (2)$$

$$c_i^{(t+1)} = \frac{1}{|S_i^{(t)}|} \sum_{x_j \in S_i^{(t)}} x_j. \quad (3)$$

重复上一步骤, 当聚类结束时, 需满足

$$\|c_i^{(t+1)} - c_i^{(t)}\| < \varepsilon, \text{ 或 } t = \tau,$$

其中 ε, τ 分别为距离阈值和时间阈值. 遍历样本判断

$$\|x_j - c_i^{(t)}\|^2 \leq R_d^2, x_j \in S_i^{(t)}.$$

若存在样本不满足上述条件, 增加 k 的值并重新完成上述聚类步骤, 最后得到的结果为带有聚类标签的样本及每类的聚类中心. 即通过自适应增类的方法, 能产生符合需求的聚类.

4 二次聚类K-means++模型

首先, 获取战场中已确认的目标坐标, 根据 K-means++ 自适应增类算法将目标进行有距离限制的聚类, 得到的聚类中心为目标的目标群中心, 将目标群中心坐标作为有人机的任务点参与无人机的航路规划. 并将各聚类中包括的目标点打上一次聚类类别属性标签.

获得有人机任务点后, 根据无人机的数目、协同所需战机数确认二次聚类类别数, 并根据 K-means++ 算法对同一类别标签的目标点进行二次聚类, 由此产生子聚类中心 C_i^u , $u = 1, 2, \dots, k'$, 以无人机到达子聚类中心作为阶段任务, 分别视作 $k-1$ 次指派问题 (assignment problem, AP), 并用匈牙利算法分别求解^[17].

解得的每一无人机所过阶段的 C_i^u 聚类中的所有目标点按次序打上同一二次类别属性标签, 将同一二次聚类类别属性标签的目标点作为无人机的任务点参与无人机航路规划.

最后, 利用遗传算法对有人机的任务点和各无人机的任务点进行航路规划. 目标分配过程见图3所示.

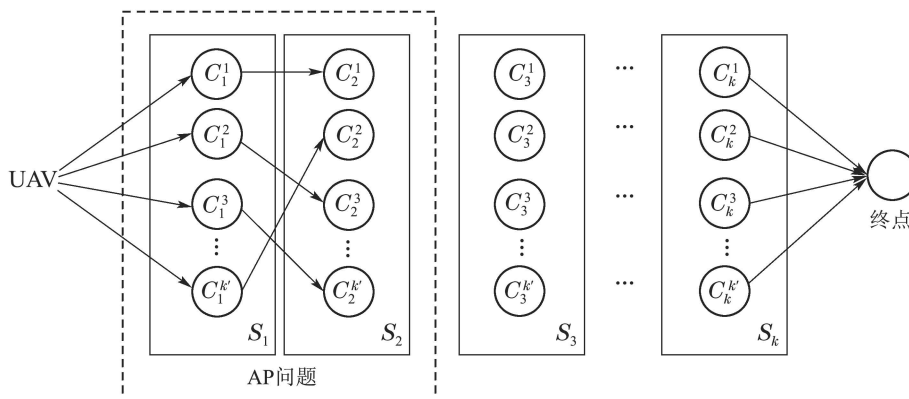


图 3 目标分配过程

Fig. 3 Target distribution

通过两次使用 K -means++算法, 将协同航路规划的分为有人机的航路规划和无人机的航路规划. 利用

自适应增类的思想确定有人机的航路规划的任务点. 算法流程如图4所示.

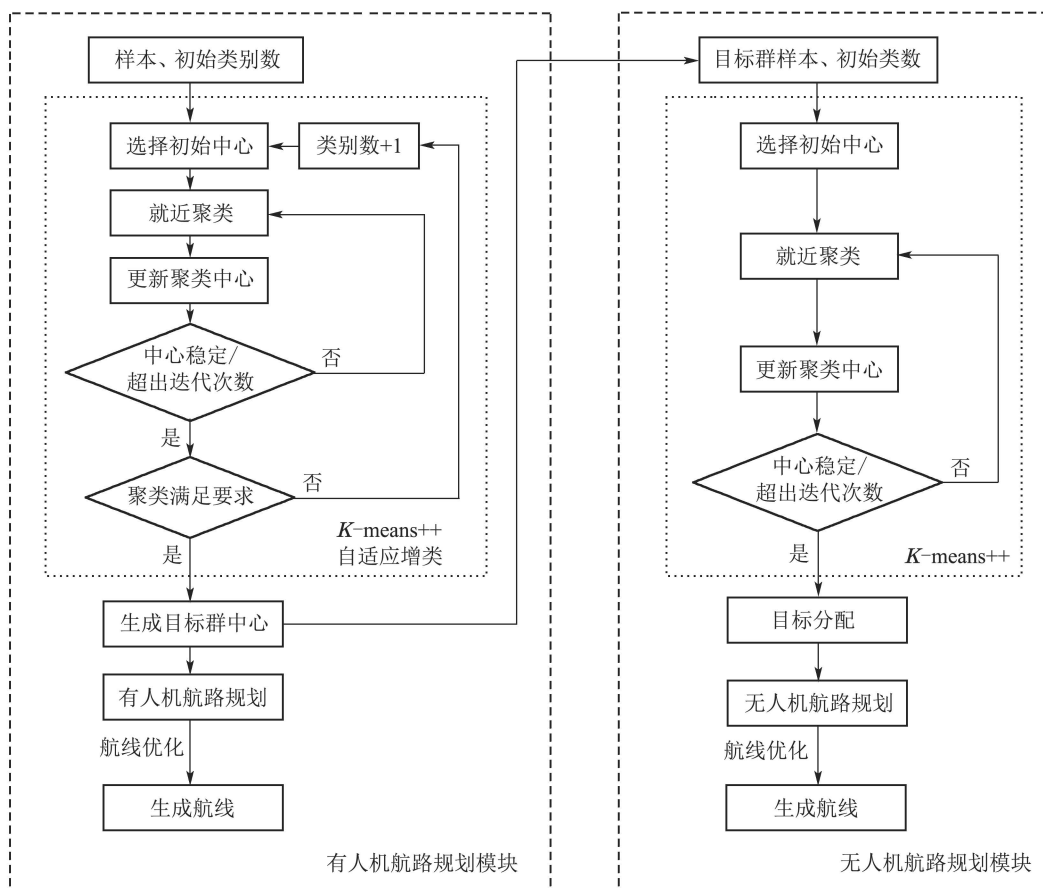


图 4 二次聚类算法流程

Fig. 4 Dual clustering algorithm flow

5 仿真与分析

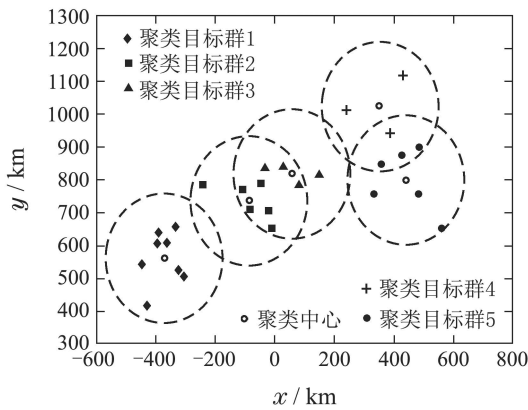
为了验证本文所提出的二次聚类 K -means++自适应增类算法, 本文设计了如下仿真对比试验.

针对涉及战机转进作战的作战区域, 假定区域面积为 $1000\text{ km} \times 1200\text{ km}$ 的矩形区域, 无人机和有人机

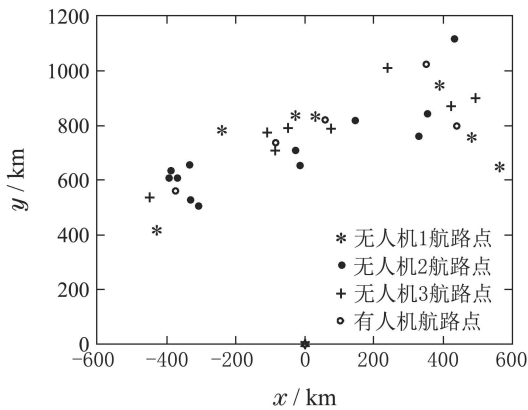
的编队从起点出发, 依次共同完成对所有目标点的打击任务, 最终回到起点. 假定所有目标至少要有由一架无人机和一架有人机协同进行打击, 当无人机与有人机之间的距离小于阈值时, 视为协同有效.

如图1所示的若干目标点, 经过 K -means++的自

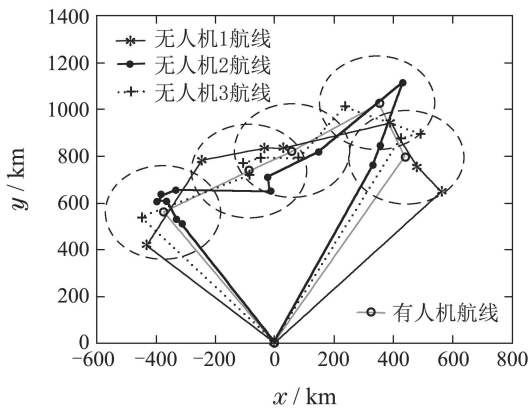
适应类增算法聚类后即将目标点划分为5个目标群及其目标群中心,且每一个目标群中的个体距离目标群中心的距离不超过200 km(图5(a)),然后对每一个目标群中的子目标的再聚类,并使用匈牙利算法进行分配,分别产生了3类不同的任务点(图5(b)),最后对3类不同的任务点和所有目标群中心用遗传算法进行任务规划,生成4条不同的航线,并计算各航线的里程,分别对应3架无人机和有人机的航线(图5(c));最后计算所有战机的总里程(表1).



(a) 一次聚类结果



(b) 二次聚类及目标点分配结果



(c) 航路规划结果

图 5 聚类规划仿真图

Table 5 Simulation of clustering planning

表 1 按二次聚类求解的各战机航程

Table 1 Range of warplanes (solved by dual clustering)

战机航线	长度/km	均值/km	方差/km ²
有人机(航迹带中轴线)	2692.25	2878.30	14117.05
无人机1	2867.16		
无人机2	3010.73		
无人机3	2943.04		

从表1可以看出,有人机的航路里程最小,无人机的航路里程比有人机略大且彼此间相差不大,可见无人机能够始终与有人机保证一定的距离,既能够以最小的路径代价完成对目标的打击,同时也能保证协同过程的有效性.

图6所示的是将原问题看成mTSP问题求解的示意图,航路规划算法同样为遗传算法.可以看出当战场区域较大时,便无法确保有人机与无人机之间的距离阈值不超过 R_d ,且从表2也可看出,虽然均值较小,但各战机的航程相差较大,容易造成资源闲置,且无法解决协同约束下的规划问题.

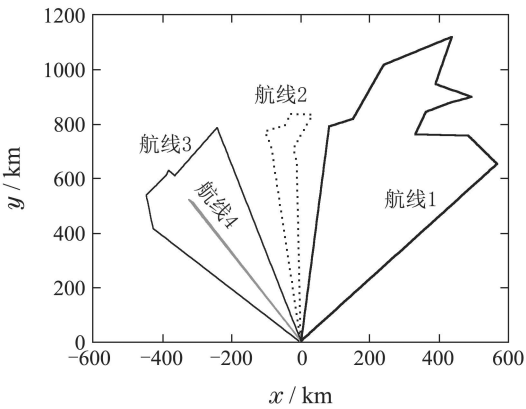


图 6 mTSP问题求解

Fig. 6 mTSP problem solving

表 2 视作mTSP问题求解的各战机航程

Table 2 Range of warplanes (as a solution to the mTSP problem)

战机航线	长度/km	均值/km	方差/km ²
有人机(航迹带中轴线)	1899.70	1975.37	399146.19
无人机1	1794.90		
无人机2	1230.10		
无人机3	2976.80		

两种方法比较而言,虽然使用二次聚类方法求解的平均航程比视作mTSP问题求解增加了45%,但方差却大幅下降至原来的3%,且能够克服传统方法中航线发散导致的协同性下降问题.

而若如图7所示,所有战机编队遍历所有任务点,则可视作mTSP问题中的特例,也就是TSP问题,此时

的平均航程即可达到4092 km(见表3), 虽然保证了协同的有效性, 但无法优化协同的航路代价。

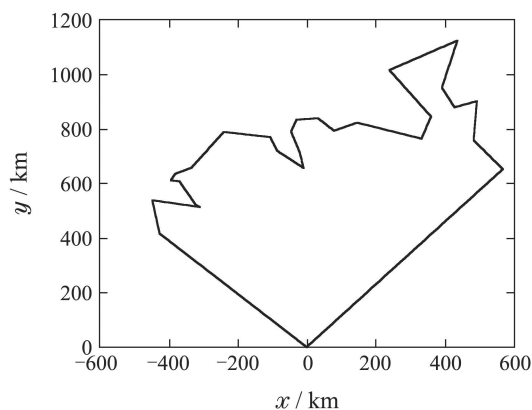


图7 mTSP问题求解

Fig. 7 mTSP problem solving

表3 视作TSP问题求解的各战机航程

Table 3 Range of warplanes(as a solution to the TSP problem)

战机航线	长度/km	均值/km	方差/km ²
有人机(航迹带中轴线)	4092.80		
无人机1	4092.80	4092.80	0
无人机2	4092.80		
无人机3	4092.80		

最后可以得出, K -means++自适应增量算法结合二次聚类可以确保有人机和无人机在不规则目标分布的情况下, 有效进行协同。

6 结束语

有人机无人协同作战的是将来很长一段时间的作战样式, 具有很重要的现实意义. 本文通过给出了二次聚类 K -means++自适应增量算法并对问题进行了仿真, 结果说明本文所提方法能够有效解决此问题. 但由于算法加入了附加的启发式重初始化, 相应的降低了效率. 如何进一步提高效率是将来需要进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] PENG Hui. *Rresearch on key issues in distributed multi-uav cooperative area search*. Changsha: National University of Defense Science and Technology, 2009.
(彭辉. 分布式多无人机协同区域搜索中的关键问题研究. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.)
- [2] BAO Zhan, WANG Shuwen. Research on generating capability of manned/UAV cooperative combat capability. *National Defense Science and Technology*, 2017, 38(3): 76 – 79.
(包战, 王树文. 有人/无人机协同作战能力生成问题研究. 国防科技, 2017, 38(3): 76 – 79.)
- [3] GENG L, ZHANG Y F, WANG P F, et al. UAV surveillance mission planning with gimbaled sensors. *Proceedings of IEEE International Conference on Control & Automation*. Taichung: IEEE, 2014: 320 – 325.
- [4] ZHANG Qirui, WEI Ruixuan, HE Renke, et al. Path planning for unmanned aerial vehicle in urban space crowded with irregular obstacles. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(10): 1407 – 1413.
(张启瑞, 魏瑞轩, 何仁珂, 等. 城市密集不规则障碍空间无人机航路规划. 控制理论与应用, 2015, 32(10): 1407 – 1413.)
- [5] MA Xiangling, LEI Yuyao. Research on the key technology of cooperative attack for manned vehicle/unmanned aerial vehicle. *Fire Control & Command Control*, 2012, 37(1): 78 – 81.
(马向玲, 雷宇曜. 有人/无人机协同作战关键技术. 火力与指挥控制, 2012, 37(1): 78 – 81.)
- [6] MA Xiangling, LEI Yuyao, SUN Yongqin, et al. Key technologies for cooperation of manned/unmanned aerial vehicles in air to ground attacking. *Electronics Optics & Control*, 2011, 18(3): 56 – 60.
(马向玲, 雷宇曜, 孙永芹, 等. 有人/无人机协同空地作战关键技术综述. 电光与控制, 2011, 18(3): 56 – 60.)
- [7] YANG K, KANG Y, SUKKARIEH S. Adaptive nonlinear model predictive path-following control for a fixed-wing unmanned aerial vehicle. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2013, 11(1): 65 – 74.
- [8] CHANDLER P, PACTHER M, RASMUSSEN S, et al. Distributed control for multiple UAVs with strongly coupled tasks. *Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. Austin, TX, USA: AIAA, 2003: 1 – 6.
- [9] WANG Yan. Cooperative attack for manned/unmanned aerial vehicles. *Telecommunication Engineering*, 2013, 53(9): 1253 – 1258.
(王焱. 有人/无人机协同作战. 电讯技术, 2013, 53(9): 1253 – 1258.)
- [10] XIA Lingru, SUN Shouqun. Planning route for UAV. *Electronic Science and Technology*, 2018, 31(1): 4 – 8.
(夏令儒, 孙首群. 多无人机协同任务规划. 电子科技, 2018, 31(1): 4 – 8.)
- [11] YU Q S, WANG D, LIN D M, et al. A novel two-level hybrid algorithm for multiple traveling salesman problems. *Proceedings of 3rd International Conference on Swarm Intelligence*. Heidelberg: Springer Verlag, 2012: 497 – 503.
- [12] ZHU Qian, ZHOU Rui. Cooperative path planning with reconnaissance duration time constraints. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(10): 2130 – 2138.
(朱黔, 周锐. 具有持续侦察时间约束的协同航路规划. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(10): 2130 – 2138.)
- [13] LIU Changan, WANG Heping, LI Weiji. Coordinated path planning of attacking unmanned aerial vehicles (UAVs). *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2003, 21(6): 707 – 710.
(柳长安, 王和平, 李为吉. 攻击无人机的协同航路规划. 西北工业大学学报, 2003, 21(6): 707 – 710.)
- [14] BAKTAS T. The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures. *Omega*, 2006, 34(3): 209 – 219.
- [15] LI Hang. *Statistical Learning Method*. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
(李航. 统计学习方法. 北京: 清华大学出版社, 2012.)
- [16] XIE Jianbin. *Visual Machine Learning 20 Lecture*. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.
(谢剑斌. 视觉机器学习20讲. 北京: 清华大学出版社, 2015.)
- [17] MAO Hongbao, TIAN song, CHAO Ainong. *Unmanned Aerial Vehicle Mission Planning*. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
(毛红保, 田松, 晁爱农. 无人机任务规划. 北京: 国防工业出版社, 2015.)

作者简介:

罗维尔 硕士研究生, 主要研究方向为无人机自主防撞控制,

E-mail: afeu_lwe@163.com;

魏瑞轩 教授, 主要研究方向是无人机自主控制与应用, E-mail:

rxwei369@sohu.com.